

NORBERTO AUGUSTO JÚNIOR

MOTORES DE ALTO RENDIMENTO

DIMENSIONAMENTO E VIABILIDADE ECONÔMICA

*Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Engenharia.*

SÃO PAULO

2001

NORBERTO AUGUSTO JÚNIOR

Engenheiro Eletricista - EPUSP - 1972

MOTORES DE ALTO RENDIMENTO

DIMENSIONAMENTO E VIABILIDADE ECONÔMICA

*Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Engenharia.*

*Departamento de Engenharia de Energia
e Automação Elétricas*

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador:

Ivan Eduardo Chabu

SÃO PAULO

2001

À minha esposa Gláucia
e aos nossos filhos,
Maurício
Cristiane
André

AGRADECIMENTOS

Ao estimado amigo, Prof. Dr. José Roberto Cardoso, pela indicação deste relevante tema e pelas pertinentes observações na estrutura geral do trabalho;

Ao Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu, pelo constante estímulo e criteriosas contribuições no desenvolvimento de toda dissertação;

Ao aluno Claudy Marcondes dos Santos Júnior, estagiário PEA / EPUSP, pela dedicação e realização do programa aplicativo;

Aos diversos colaboradores, incluindo os prezados alunos e colegas professores, pelas inúmeras e importantes sugestões apresentadas e assim tornaram possível a elaboração deste trabalho

SUMÁRIO

I APRESENTAÇÃO.....	1
I.1 ASPECTOS GERAIS DA ENERGIA ELÉTRICA E IMPACTO AMBIENTAL.....	1
I.2 A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	5
II DESENVOLVIMENTO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.....	8
II.1 ELASTICIDADE ENTRE A TAXA DE CRESCIMENTO DO PIB E TAXA DO CRESCIMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	8
II.2 ALTERNATIVAS PARA GARANTIR O DESENVOLVIMENTO SUSTENTADO.....	10
II.3 PROCEL – PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA.....	12
III POTENCIAL DO USO EFICIENTE DA ENERGIA E OS MOTORES ELÉTRICOS.....	16
III.1 PRODUÇÃO NACIONAL DE MOTORES ELÉTRICOS.....	16
III.2 ALTERNATIVAS NA APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS...	19
III.3 PROPOSTA DO TRABALHO.....	20

IV MOTORES ELÉTRICOS, CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E CUSTOS OPERACIONAIS.....	25
IV.I MOTORES ELÉTRICOS E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA.....	25
IV.2 CUSTO OPERACIONAL E “PAY BACK”.....	26
IV.3 DESPERDÍCIO PELO SOBREDIMENSIONAMENTO.....	29
V MOTORES ELÉTRICOS DE ALTO RENDIMENTO.....	31
V.1 HISTÓRICO.....	31
V.2 ORIGENS DAS PERDAS.....	34
V.2.1 PERDAS JOULE NOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR E ROTOR.....	36
V.2.2 PERDAS NO FERRO DO NÚCLEO MAGNÉTICO.....	38
V.2.3 PERDAS ADICIONAIS OU SUPLEMENTARES.....	41
V.2.3.1 PERDAS SUPLEMENTARES NOS ENROLAMENTOS.....	41
V.2.3.2 PERDAS SUPLEMENTARES NO FERRO.....	42
V.2.4 PERDAS MECÂNICAS.....	43
V.3 NORMA ABNT–NBR 7094-RENDIMENTO E PERDAS-ENSAIOS... 45	
V.3.1 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO.....	47

V.3.1.1 ENSAIO EM VAZIO, COM TENSÃO VARIÁVEL E FREQUÊNCIA NOMINAL.....	48
V.3.1.2 ENSAIO EM CARGA, COM TENSÃO CONSTANTE E FREQUÊNCIA NOMINAL.....	52
V.3.1.3 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO.....	53
V.3.1.3 .1 MÉTODO DE SEPARAÇÃO DAS PERDAS.....	53
V.3.1.3 .2 MÉTODO DIRETO.....	54
V.4 REDUÇÃO DE PERDAS.....	54
V.5 VANTAGENS ADICIONAIS E CUIDADOS PELA UTILIZAÇÃO DE MOTORES DA LINHA DE ALTO RENDIMENTO.....	58
V.6 JUSTIFICATIVA PARA UTILIZAÇÃO DE MOTORES DE ALTO RENDIMENTO.....	59
VI DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO DE INDUÇÃO – TIPO ROTOR DE BARRAS.....	61
VI.1 A IMPORTÂNCIA DO DIMENSIONAMENTO.....	61
VI.2 REQUISITOS PRELIMINARES PARA O DIMENSIONAMENTO	61
VI.3 POTÊNCIA DO MOTOR E REGIME DE OPERAÇÃO.....	62
VI.3.1 ASPECTOS PRINCIPAIS.....	62

VI.3.2 POTÊNCIA NOMINAL.....	64
VI.4 DIMENSIONAMENTO PARA CARGAS EM REGIME VARIÁVEL.....	65
VI.5 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO.....	65
VI.5.1 DIMENSIONAMENTO PELO CRITÉRIO DE POTÊNCIA EFICAZ.....	66
VI.5.1.1 CORREÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL DEVIDO A ALTITUDE E TEMPERATURA DO LOCAL DA INSTALAÇÃO.....	69
VI.5.2 DIMENSIONAMENTO PELO CRITÉRIO DE POTÊNCIA DISPONÍVEL.....	71
VI.5.3 DIMENSIONAMENTO PELO CRITÉRIO DO CONJUGADO MÁXIMO MOTOR E MAIOR CONJUGADO RESISTENTE EM REGIME.....	73
VI.5.4 DIMENSIONAMENTO PELO CRITÉRIO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO.....	73
VI.5.4.1 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO (t_{AC})....	78
VI.5.4.1.1 EQUAÇÕES GERAIS.....	78
VI.5.4.1.2 CONJUGADO MOTOR MÉDIO (C_{MM}).....	82
VI.5.4.1.3 CONJUGADO RESISTENTE MÉDIO (C_{RM}).....	83

VI.5.4.1.4 CONJUGADO DE ACELERAÇÃO MÉDIO (C_{ACM}).....	86
VI.5.4.1.5 TEMPO MÁXIMO DE ROTOR BLOQUEADO (t_{MRB}).....	87
VII DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DOS MOTORES NO “CHÃO DE FÁBRICA”	90
VII.1 PROCEDIMENTOS.....	90
VII.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	91
VIII CUSTOS DO PROJETO.....	96
VIII.1 CUSTOS INICIAIS E OPERACIONAIS.....	96
VIII.1.1 CUSTOS INICIAIS.....	96
VIII.1.2 CUSTOS OPERACIONAIS.....	97
VIII.1.2.1 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA ABSORVIDA EM UM CICLO, NA CONDIÇÃO DE REGIME.....	99
VIII.1.2.2 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA ABSORVIDA NA PARTIDA.....	99
VIII.1.2.3 CUSTO ANUAL DA ENERGIA CONSUMIDA.....	101
VIII.1.3 CUSTO MÉDIO ANUAL DA ENERGIA – CE.....	102
VIII.1.3.1 GRUPO B.....	103

VIII.1.3.2 GRUPO A.....	103
VIII.1.3.2.1 CONVENCIONAL.....	104
VIII.1.3.2.2 HORO-SAZONAL.....	105
VIII.1.3.2.2.1 TARIFA AZUL.....	106
VIII.1.3.2.2.2 TARIFA VERDE.....	107
VIII.2 INVESTIMENTO INICIAL.....	108
VIII.3 RECEITAS DO INVESTIMENTO.....	110
IX LINHAS DE FINANCIAMENTOS - TAXA DE JUROS E TAXA DE AUMENTO DO CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA.....	111
IX1 LINHAS DE FINANCIAMENTOS.....	111
IX1.1 FINANCIAMENTOS ATRAVÉS DA ELETROBRAS / RGR.....	111
IX1.2 FINANCIAMENTOS ATRAVÉS DO BNDES.....	113
IX1.2.1 BNDES AUTOMÁTICO.....	115
IX1.2.2 FINEM – FINANCIAMENTO À EMPRESAS.....	116
IX1.2.3 FINAME.....	117
IX1.2.4 FINAME AUTOMÁTICO.....	117
IX1.2.5 FINAME LEASING.....	118

IX.2	TAXA DE JUROS E TAXA DE AUMENTO DO CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA.....	119
IX.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE O INVESTIMENTO E A DECISÃO DA ESCOLHA.....	120
X	AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROJETO.....	123
X.1	VANTAGEM FINANCEIRA.....	123
X.2	MÉTODO DO TEMPO DE RETORNO DO CAPITAL OU “PAY BACK”.....	125
X.3	MÉTODO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO - VPL.....	126
X.4	MÉTODO DO ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE I_L	129
X.5	MÉTODO DA TAXA INTERNA DE RETORNO.....	130
XI	“SOFTWARE” “SMART MOTOR”	132
XI.1	ESTRUTURA DO “SOFTWARE “ “SMART MOTOR”	133
	CONCLUSÃO.....	139
	ANEXOS: TELAS DO PROGRAMA APLICATIVO “SMART MOTOR”	141
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152

ÍNDICE DE FIGURAS

I APRESENTAÇÃO.....	1
Figura I.1 - Histórico do consumo mundial de energia e projeções para os próximos 20 anos.....	1
Figura I.2 - Indicadores de emissão de CO2.....	2
Figura I.3 - Fontes de energia mundial.....	3
Figura I.4 - Consumo final de energia por fonte - %.....	5
Figura I.5 - Fontes de energia no Brasil –Ano de 1999.....	6
Figura I.6 - Tipos de fontes de energia no Brasil.....	7
II DESENVOLVIMENTO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.....	8
Figura II.1- Comparação do Crescimento (%) do PIB e do Consumo de Energia Elétrica.....	9
Figura II.2 - Evolução do Mercado de Consumo de Energia Elétrica – TWh.....	9
Figura II.3 - Capacidade nominal instalada (Total 63.171 MW) - 1.999.....	11
Figura II.4 - Resultados do Procel.....	15
III POTENCIAL DO USO EFICIENTE DA ENERGIA E OS MOTORES ELÉTRICOS.....	16
Figura III.1 - Participação dos motores elétricos no consumo de energia no Brasil.....	17

Figura III.2 - Quantidades de motores elétricos fabricados no Brasil.....	18
Figura III.3 - Critérios para o Cálculo do Investimento do fabricante Weg.....	21
Figura III.4 - Curva e tabela de rendimento - motor industrial - Standard - 25 cv – 4 pólos –220 V.....	24
IV MOTORES ELÉTRICOS, CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E CUSTOS	
OPERACIONAIS.....	25
Figura IV.1 - Preços de aquisição e o custo mensal da energia consumida.....	26
Figura IV.2 - Exemplos de resultado do “pay back” - motores Kohlbach.....	27
Figura IV.3 - Retorno de investimento - motores trifásicos industriais - Weg 1800 rpm - IP-54.....	28
V MOTORES ELÉTRICOS DE ALTO RENDIMENTO.....	
Figura V.1 - Redução da relação massa (kg) / potência (kW) – motores 4 pólos.	31
Figura V.2 - Motor elétrico Asea 0.75kW - 1 hp - 1800rpm.....	32
Figura V.3 - Evolução dos rendimentos médios de motores no mercado americano.....	33
Figura V.4 - Elevação da temperatura à potência nominal.....	36
Figura V.5 - Valores de rendimentos mínimos à plena carga - motores de Alto Rendimento.....	45
Figura V.6 - Tolerância de rendimentos.....	46
Figura V.7 - Gráfico $(P_{FE} + P_{A,V}) \times V_L$	50

Figura V.8 - Gráfico ($P_{FE} + P_{A,V}$) x V_L^2	51
Figura V.9 - Acréscimo de temperatura nos rotores.....	55
FiguraV.10 - Acréscimo de temperatura nos enrolamentos do estator.....	56
FiguraV.11 - Motor industrial de Alto Rendimento. Cortesia Weg.....	56
FiguraV12 - Custos relativos em função do acréscimo de rendimento.....	57
VI DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO DE INDUÇÃO – TIPO ROTOR DE BARRAS.....	67
Figura VI.1 - Dimensionamento para cargas variáveis.....	67
Figura VI.2 - Tabela de coeficientes de correção da potência nominal, K_{TH}	71
Figura VI.3 - Curva típica de conjugado motor.....	75
Figura VI.4 - Tipos de carga aplicadas ao motor.....	77
Figura VI.5 - Curvas dos conjugados motor, carga e de aceleração.....	78
Figura VI.6 - Curvas para determinação dos conjugados médios, motor e resistente.....	80
Figura VI.7 - Limites de pico de temperatura na partida e classe de isolamento do motor.....	88
Figura VI.8 - Relação: classe térmica e o acréscimo do tempo máximo de rotor bloqueado.....	89

VII DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DOS MOTORES NO “CHÃO DE FÁBRICA”.....	90
Figura VII.1 - Fator de redução da potência nominal em função do desbalancamento da rede.....	92
Figura VII.2 - Curvas de Corrente, Conjugado e Desempenho do motor de 15 hp Industrial.....	95
VIII CUSTOS DO PROJETO.....	97
Figura VIII.1 - Energia consumida no ciclo de operação do motor em regime.....	98
Figura VIII.2 - Fluxo de caixa ou fluxo de investimento e receita.....	110
IX LINHAS DE FINANCIAMENTO - TAXA DE JUROS E TAXA DE AUMENTO DO CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA.....	111
Não há Figuras	
X AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROJETO.....	123
Figura X.1 - Método do tempo de retorno do capital - “pay back”.....	125
XI “SOFTWARE” “SMART MOTOR”.....	132
Figura XI.1 - Diagrama do “Software “ “Smart Motor”.....	138

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ALFABETO ROMANO

A	Número de anos de análise do projeto / Constante da equação geral da quantidade de calor
A_1, A_2, A_3	Área de integração entre as curvas de conjugado motor e conjugado médio motor.
B	Constante na equação geral da quantidade de calor
B_M	Campo de induções máximo (Wb/m^2)
B_1, B_2	Área de integração entre as curvas de conjugado resistente e conjugado médio resistente
C_0	Constante da equação geral da carga
C_{ACM}	Conjugado médio de aceleração (N.m)
C_{Carga}	Conjugado da carga (N.m)
CE_{TP}	Somatória durante A anos do custo anual da energia elétrica, referida ao presente pela taxa de juros (R\$)
CE_{TPir}	Somatória durante A anos do custo anual da energia elétrica, referida ao presente pela taxa interna de retorno (R\$)
CI_{AR}	Custo inicial do motor Alto Rendimento (R\$)
CI_{St}	Custo inicial do motor Standard (R\$)
$CkWh$	Custo atual da energia elétrica (R\$ / kWh)
CE	Custo médio anual da energia da concessionária (R\$ / kWh)
CE_P	Somatória durante A anos do custo anual da energia elétrica referida ao presente pela taxa de juros (R\$ / kWh)

CE_{Ptir}	Somatória durante A anos do custo anual da energia elétrica, referida ao presente pela taxa interna de retorno (R\$ / kWh).
C_M	Conjugado motor (N.m).
C_{Mn}	Conjugado nominal do motor (N.m).
C_{MM}	Conjugado médio motor (N.m).
C_{Mmax}	Conjugado máximo motor (N.m).
C_{MP}	Conjugado motor de partida (N.m).
CO_{anual}	Custo operacional anual do motor (R\$).
CO_{AR}	Custo operacional do motor Alto Rendimento durante A anos (R\$).
CO_{St}	Custo operacional do motor Standard durante A anos (R\$).
C_R	Conjugado resistente na velocidade do motor (N.m).
C_{RC}	Conjugado resistente na velocidade da carga (N.m).
C_{RM}	Conjugado médio resistente (N.m).
C_{Rmax}	Conjugado máximo resistente (N.m).
C_{Rn}	Conjugado resistente à rotação nominal do motor.
CV	Potência do motor em cv.
e	Espessura da chapa do núcleo magnético (mm) / Expoente na equação geral da carga / Taxa anual de aumento do custo da energia elétrica (%).
E_{ABSP}	Energia absorvida durante as N_p partidas de um ciclo (kWh).
E_{anual}	Energia anual absorvida pelo motor (kWh).
E_{ciclo}	Energia dissipada pelo motor durante um ciclo (kWh).
E_{cicloR}	Energia dissipada durante um ciclo com o motor na condição de regime (kWh).
$Energia_{AR}$	Energia anual absorvida pelo motor, linha Alto Rendimento (kWh).

E_{St}	Energia anual absorvida pelo motor, linha Standard (kWh).
E_{partida}	Energia dissipada pelo motor, estator e rotor, durante uma partida (kWh).
$E_{\text{partidaciclo}}$	Energia dissipada devido a todas as partida de um ciclo (kWh).
$E_{\text{partida estator}}$	Energia absorvida no estator durante uma partida (kWh).
$E_{\text{partida rotor}}$	Energia absorvida no rotor durante uma partida (kWh).
f	Frequência da rede de alimentação (Hz).
F	Força normal exercida sobre o rolamento (N).
H_m	Número de horas de operação do motor por mês.
II	Investimento inicial (R\$).
I_L	Índice de lucratividade (p. u.).
I_{LA}	Corrente na linha A (A).
I_{LB}	Corrente na linha B (A).
I_{LC}	Corrente na linha C (A).
I_p / I_n	Relação entre as correntes de partida e nominal (p.u.).
i_R	Taxa interna de retorno (%).
j	Taxa anual de juros (%).
J_{CC}	Momento de inércia da carga na velocidade da carga (kg.m ²).
J_{CR}	Momento de inércia da carga referido à velocidade de regime (kg.m ²).
J_R	Momento de inércia do rotor (kg.m ²).
J_t	Momento de inércia total do rotor (kg.m ²).
K	Constante na equação geral da carga.
K_A	Coefficiente de atrito.
K_c	Constante na equação geral da carga.

K_{pfr}	Coeficiente que depende do número de partidas, frenagens ou reversões por hora.
K_V	Coeficiente de ventilação.
K_H	Constante na expressão de cálculo das perdas de histerese.
K_{FC}	Constante na expressão de cálculo das perdas de Foucault.
n	Expoente para determinação das perdas de histerese / Rotação na equação geral da carga.
n_1	Rotação da carga no ponto 1 [referência para carga hiperbólica] (rpm).
n_C	Rotação da carga (rpm).
N_h	Número de horas de operação em um ano.
N_P	Numero de partidas no ciclo de operação.
N_1	Número de espiras efetivas do enrolamento do estator/fase.
n_R	Rotação do rotor (rpm).
n_{Rn}	Rotação nominal do rotor (rpm).
n_s	Rotação síncrona do motor (rpm).
p	Número de pares de pólos
P_A	Perdas de Atrito (kW).
P_{ABS}	Potência elétrica absorvida pelo motor em carga (kW).
P_{ABS0}	Potência elétrica absorvida pelo motor em vazio (kW).
P_{ABSi}	Potência elétrica absorvida pelo motor no estágio de carga i (kW).
P_{ABSP}	Potência elétrica absorvida pelo motor na partida (kW).
$P_{A,V}$	Perdas de Atrito e Ventilação (kW).
P_{SC}	Perdas Suplementares (kW).
P_{Disp}	Potência disponível, para o motor acionar a carga (kW).

P_{ef}	Potência eficaz (kW).
P_i	Potência mecânica desenvolvida pelo motor, no estágio i de carga (kW).
P_{mec}	Potência mecânica desenvolvida pelo motor (kW).
P_n	Potência nominal do motor (kW).
P_R	Potência resistente desenvolvida pela carga (kW).
P_V	Perdas de ventilação (kW).
P_1	Potência elétrica do estator por fase (kW).
P_2	Potência eletromagnética do rotor por fase (kW).
P_{CU1}	Perdas no cobre do enrolamento do estator por fase (kW).
P_{CU10}	Perdas no cobre do enrolamento do estator em vazio por fase (kW).
P_{fe}	Perdas no ferro do núcleo magnético por fase (kW).
P_{sc}	Perdas suplementares ou adicionais (kW).
Q_c	Calor gerado pelas perdas do motor em regime constante (kcal).
Q_i	Calor gerado pelas perdas do motor em regime intermitente (kcal).
R'_2	Resistência ôhmica do rotor por fase, referida ao estator (ohms).
R_1	Resistência ôhmica do estator por fase (ohms).
RI_{Tir}	Receita total do investimento referido ao presente pela taxa interna de retorno (R\$).
RI_{TP}	Receita total do investimento referido ao presente pela taxa de juros (R\$).
R_{MED}	Resistência ôhmica medida entre dois terminais do estator.
s	Escorregamento do motor (p.u.).
$S - 1$	Regime contínuo para carga constante (ABNT).
$S - 10$	Regime variável para quatro valores de cargas distintas (ABNT).

S_{fe}	Secção transversal do núcleo magnético (m^2).
t	Estágios de carga
T	Período de um ciclo de carga (hora).
t_{AC}	Tempo de aceleração (s).
TD	Tensão Desbalanceada (%).
TIR	Método de análise pela taxa interna de retorno.
TM	Tensão média entre as três linhas AB, BC e CA (V).
TMD	Tensão máxima desviada da tensão média (V).
$T_{pay\ back}$	Tempo de retorno do capital ou tempo de “pay back”.
t_{MRB}	Tempo máximo permitido do rotor permanecer bloqueado (s).
$t_{MRB} (B)$	Tempo máximo permitido do rotor permanecer bloqueado para classe térmica B (s).
$t_{MRB} (F)$	Tempo máximo permitido do rotor permanecer bloqueado para classe térmica F (s).
$t_{MRB} (H)$	Tempo máximo permitido do rotor permanecer bloqueado para classe térmica H (s).
t_{MRBR}	Tempo máximo permitido do rotor permanecer bloqueado com tensão reduzida (s).
U_{AB}	Tensão entre as linhas AB (V).
U_{BC}	Tensão entre as linhas BC (V).
U_{CA}	Tensão entre as linhas CA (V).
U_n	Tensão de alimentação nominal do motor (V).
U_R	Tensão de alimentação reduzida do motor (V).
V	Volume do núcleo (m^3).

VF	Vantagem Financeira (R\$).
VLP	Valor Líquido Presente (R\$).
w_C	Velocidade angular da carga (rad / s).
w_R	Velocidade angular do rotor (rad / s).

ALFABETO GREGO

α_0	Coefficiente médio de temperatura dos materiais dos enrolamentos (°C ⁻¹).
ΔC	Diferença de custos entre o motor Standard e o de Alto Rendimento (R\$).
ΔEE_{anual}	Energia anual evitada (kWh).
Δt	Acréscimo incremental de tempo (s).
Δt_i	Tempo do estágio de carga i (hora).
Δt_{if}	Tempo do motor permanecer funcionando com carga nula (hora).
Δt_{ir}	Tempo do motor permanecer desligado e em repouso (hora).
$\Delta \omega$	Acréscimo incremental da velocidade angular (rad / s).
η	Rendimento do motor (p.u.).
η_{AR}	Rendimento do motor Alto Rendimento (p.u.).
η_i	Rendimento do motor para o estágio de carga i (p.u.).
η_{St}	Rendimento do motor Standard (p.u.).
v	Velocidade periférica do rolamento (m/s).

RESUMO

A proposta do trabalho é apresentar e discutir aspectos técnicos e econômicos para o dimensionamento e análise de investimento para motores trifásicos industriais que operem com velocidade constante e alimentação diretamente da rede, sem controles ou acionamentos eletrônicos intermediários.

As situações são para acionamentos de cargas extremamente variáveis e ciclos intermitentes. A energia anual consumida é determinada pelo real rendimento dos motores, mesmo nas condições de cargas reduzidas quando apresentam baixos rendimentos, incluindo a energia consumida durante os processos de partida.

O trabalho também oferece as principais ferramentas de análise de investimentos em cenário com aumento do custo da energia no decorrer dos anos, os incentivos fiscais e as atuais linhas de financiamento para projetos específicos de conservação de energia.

A análise comparativa é realizada entre os três principais fabricantes nacionais de motores elétricos de indução, linhas Standard e Alto Rendimento. A escolha é definida pela marca e linha de motor com a melhor relação consumo de energia evitado e custo de aquisição ou investimento inicial requerido.

A metodologia e procedimentos de cálculo desenvolvidos são empregados em programa aplicativo que propõe o dimensionamento do motor para acionar carga variável de ciclo determinado. O programa realiza análise econômica e fornece indicadores financeiros que permitem ao usuário a escolha da melhor alternativa entre as linhas de motores Standard ou Alto Rendimento.

O banco de dados do programa, contendo as informações técnicas e preços dos motores, são obtidas dos catálogos eletrônicos e listas de preços vigentes em setembro/2000 dos respectivos fabricantes.

ABSTRACT

The proposal of this paper is show and discuss technical and economic aspects for sizing and investment analysis for three-phase industrial motors that operate with constant speed and are direct supplied by electrical net, without any controls or intermediary electronic drives.

The situations are for extremely variable loads and intermittent cycles. The annual consumed energy is estimated by real motor's efficiency, even by applications with reduced load, when the motors present low efficiency, including the consumed energy during their starting up.

This paper also offers the main tools to analyze economic viability for choosing of branch and line of motors, beside the scenery of the increasing cost of energy along the years, rated and fiscal incentives and financing lines for specific energy conservation projects.

The comparison analysis is made among the three main national electrical induction motor's manufacturers, Standard lines and High Efficient ones. The right choose is defined between the supplier and motor line with the best relation between consumed energy avoid and the purchasing price or initial investment required.

The methodology and calculation procedures developed are applied on application software that proposes motor sizing to act on variable loads on start up and permanent conditions. The software accomplishes economical analyses and furnishes financial indicators that allow to the user to choose the best alternative between Standard motor lines and High Efficient one.

The motor's data on the software with technical information and purchasing prices are gotten from actually electronic catalogues and from price list current on september/2000 of each manufacture.

I APRESENTAÇÃO

I.1 ASPECTOS GERAIS DA ENERGIA ELÉTRICA E IMPACTO AMBIENTAL

As projeções da organização internacional IEO – “International Energy Outlook” - indicam que no ano 2020, a soma total do consumo mundial de energia, será 75% (setenta e cinco por cento) maior que o consumo realizado em 1995, ou seja, dos últimos 25 anos. As mesmas projeções indicam que enquanto o PIB mundial irá crescer à taxa de 3,1% ao ano, o consumo de energia está projetado para 2,2% ao ano. A Figura I.1. ilustra o histórico do consumo mundial de energia e a projeções para os próximos 20 anos.

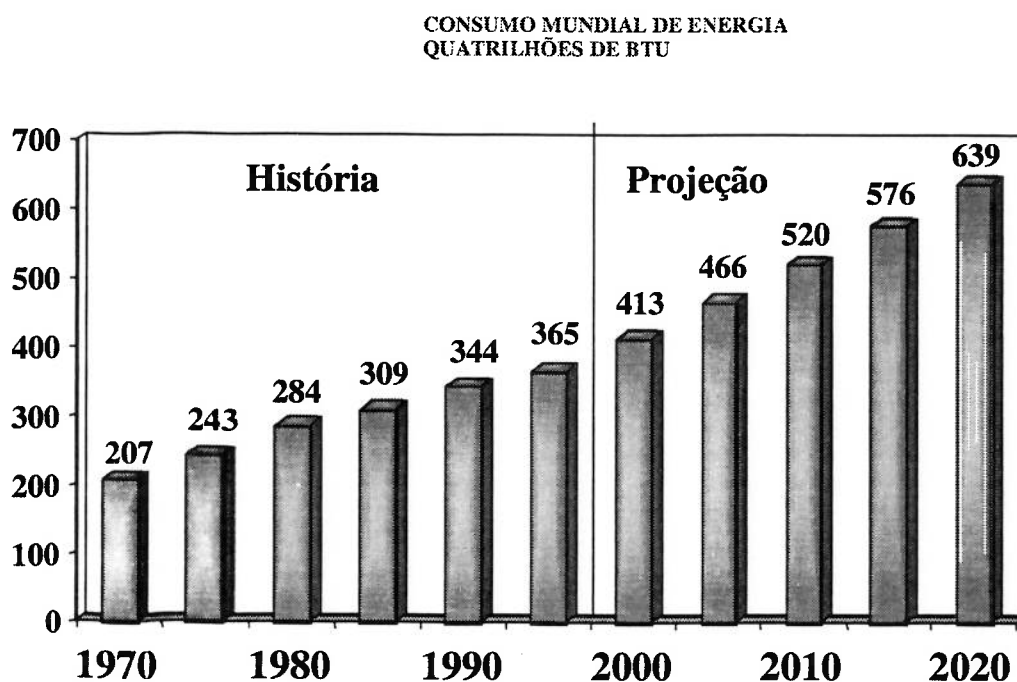


Figura I.1 Histórico do consumo mundial de energia e projeções para os próximos 20 anos

Fonte "IEO" 1999

As recentes crises econômicas dos países asiáticos e dos países em desenvolvimento, particularmente o Brasil, reduzem momentaneamente o crescimento econômico e a necessidade do consumo de energia. Passado esses períodos tanto o crescimento econômico como o energético, retornam normalmente mais vigorosos e em média as projeções de longo prazo se confirmam.

Esse crescimento, sem dúvida, irá produzir enorme impacto nos mercados futuros de energia. As projeções indicam a necessidade de significativos novos investimentos em todas as fases, desde a produção até distribuição, afim de atender essa crescente demanda.

Os governos nas diversas partes do mundo, realizam ações de fiscalização e de incentivo à iniciativa privada para economizar e produzir energia que possa garantir o desenvolvimento sustentado e a melhoria na qualidade de vida da sociedade.

Por outro lado, o acordo de dezembro de 1977 no Japão, o protocolo de Kyoto, estabeleceu limites máximos de emissões de gases em países industrializados para reduzir o efeito estufa na atmosfera. A Figura I.2 apresenta por vários indicadores de emissão de CO₂ a situação do Brasil em relação as demais regiões.

INDICADORES DE EMISSÃO DE CO ₂ - Ano de referência: 1997					
ESPECIFICAÇÃO	BRASIL	EUA	JAPÃO	AMÉRICA*	MUNDO
t CO ₂ / hab	1,8	20,5	9,3	2,2	4,0
t CO ₂ / tep de Oferta Interna de Energia	1,8	2,5	2,3	2,0	2,4
t CO ₂ / 10 ³ US\$(85) de PIB	0,52	0,83	0,35	0,77	0,90
t CO ₂ / km ² de superfície	35	595	3107	48	113

* América Latina

Figura I.2 Indicadores de emissão de CO₂

Fonte Procel

Assim, as futuras gerações de energia deverão ser limpas e associadas à não agressão ao meio ambiente, o que indica a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias e utilização de fontes alternativas, preferencialmente renováveis, bem como realizar esforços no sentido da conservação e do uso eficiente de todas as formas de energia.

A energia elétrica nos países desenvolvidos é atualmente a principal alternativa para redução dos impactos ambientais, postergação dos investimentos do lado da oferta e aumento da produtividade e competitividade do lado da demanda.

A qualidade de vida dos povos está intimamente ligada ao consumo de energia. Os atuais registros de consumo mundial de energia, realizados pela IEO - "International Energy Outlook" indicam que 40 % são provenientes do petróleo e derivados, 26 % do carvão, 21 % de gás natural, 7 % de energia nuclear, 4 % de hidroeletricidade e 2 % de outras fontes de energia. Estima-se que aproximadamente 35 % dos derivados de petróleo sejam utilizados para a geração de eletricidade.

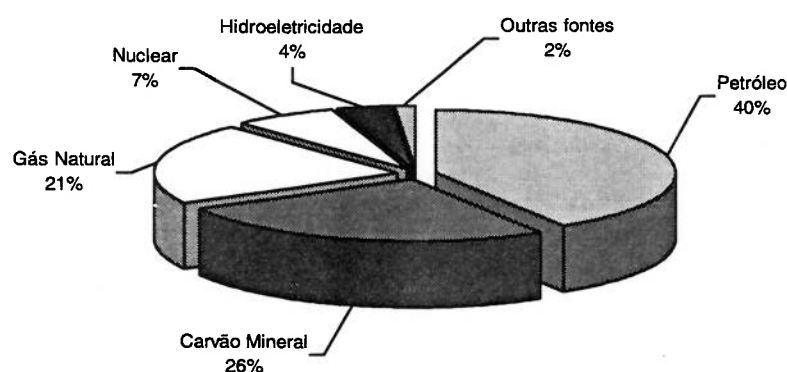


Figura I.3: Fontes de energia mundial

Fonte: Fonte "IEO" 1999

A importância do petróleo é capital para a disponibilidade de energia mundial e sendo combustível fóssil, estima-se atualmente que as reservas mundiais sejam suficiente para suprir as necessidades energéticas das próximas cinco décadas. O agravante é que o abastecimento de 40% da necessidade mundial do petróleo, está concentrada pelo cartel da OPEP que manipula a produção e o preço, provocando grandes oscilações na economia mundial, principalmente naquelas emergentes e que dependem intensamente da importação do produto.

A necessidade do uso eficiente da energia foi detectada pelos países desenvolvidos no início da década de 70, quando da primeira grande crise de abastecimento de petróleo.

Para análise comparativa e exemplificar o potencial de conservação de energia, José Eli da Veiga em artigo Tendências Para o Setor de Energia, de 12/02/2000, cita que no Relatório Sobre o Desenvolvimento Humano está registrado que em 1996 para cada 8 t.e.p. (tonelada equivalente de petróleo) consumido por habitante no Japão resultavam US\$ 20 do PIB por habitante e que comparado aos EUA, a mesma quantidade de energia per capita, o indicador correspondia apenas US\$ 3. Evidentemente esta comparação deve ser analisada com reservas e considerações sobre os costumes e cultura de cada economia. Todavia, o Canadá e Austrália acompanham o péssimo desempenho americano, enquanto que os países nórdicos apresentavam níveis semelhante aos da economia japonesa e a comunidade européia valores um pouco abaixo.

As modernas alternativas para o aumento da oferta de energia estão nas fontes renováveis, ainda a um custo elevado, e na conservação e racionalização do

uso final da energia disponível, normalmente a custos atrativos e de imediatos resultados.

Entre essas fontes o aproveitamento da energia solar é considerado uma das principais alternativas aos derivados de petróleo. Mesmo assim, pesquisas continuam sendo realizadas com o objetivo de melhorar principalmente os custos para aproveitamento das energias eólica, geotérmica e das provenientes das células de combustíveis.

I.2 A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

No Brasil, a atual matriz energética, devido as características dos rios e das bacias hidrográficas difere do perfil das fontes de energia mundial

Nos últimos trinta anos, a eletricidade conquistou marcante importância na matriz brasileira de consumo final de energia, sendo atualmente o principal energético. A Figura I.4, apresenta a evolução no Brasil dos valores do Consumo Final de Energia por Fonte - %.

FONTE	1970	1980	1990	1997	1998
Total – 10 ³	69.166	127.702	169.418	221.595	228.288
Óleo Diesel	7,6	12,1	12,0	12,1	12,3
Óleo	9,4	12,5	5,6	5,4	5,2
Gasolina	10,5	6,8	4,3	6,3	6,4
Gás Natural	0,1	0,7	1,8	2,2	2,2
Eletricidade	16,6	27,9	37,3	38,6	39,0
Carvão	2,4	3,7	4,5	4,6	4,5
Lenha	42,7	20,2	12,6	7,7	7,5
Alcool	0,4	1,3	3,6	3,3	3,1
Outras	10,2	15,1	18,2	19,8	19,8

Figura I.4 Consumo final de energia por fonte - %
Fonte: Balanço Energético Nacional - Sinopse –1999

Em 1998, estatísticas registram que 39 % de toda energia consumida no Brasil foi de origem elétrica, seguida da energia dos derivados de petróleo (óleo diesel, óleo combustível e gasolina) com participação de 24 %. No histórico da matriz energética nacional registra-se que em 1970, a participação da eletricidade no consumo final da energia foi de apenas 16,6 %. Portanto, nestes últimos 28 anos, a participação percentual da eletricidade na matriz energética triplicou. A Figura I.5 indica o perfil de fontes de energia no Brasil no ano de 1999.

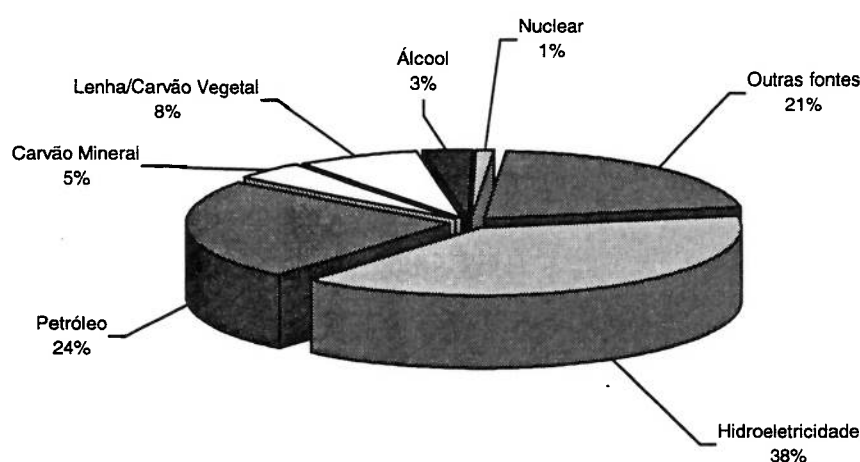


Figura I.5: Fontes de energia no Brasil –Ano de 1999

Fonte: Balanço Energético Nacional - Sinopse –1999

A Figura I.6 indica que apesar da predominância das fontes de energia renovável no Brasil, entre as décadas dos anos 70 e 80 houve aumento de participação percentual das fontes de energia não renovável. Na década dos anos 90, a importância das fontes renováveis novamente cresceu, principalmente devido as fontes de origens hidráulica e biomassa (cana de açúcar).

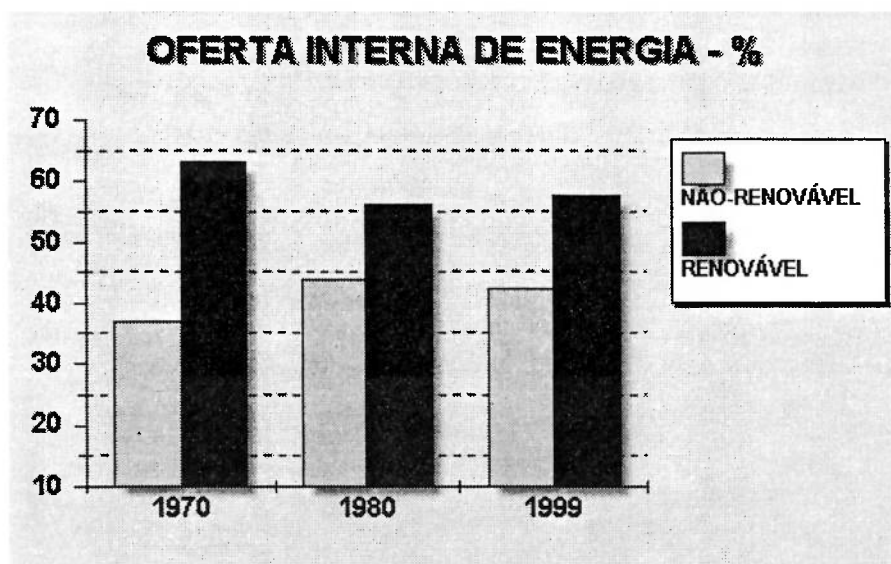


Figura I.6 Tipos de fontes de energia no Brasil

Fonte: Balanço Energético Nacional - Sinopse -1999

II. DESENVOLVIMENTO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

II.1 ELASTICIDADE ENTRE A TAXA DE CRESCIMENTO DO PIB E TAXA DO CRESCIMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Mesmo em 1998 quando houve queda do nível de atividade econômica no Brasil, o PIB - Produto Interno Bruto - apresentou uma retração de 0,12 %, o consumo global de energia manteve ascensão, ao registrar taxa de crescimento de 3% em relação à 1997.

Todavia, devido às peculiaridades de um país em desenvolvimento, o Brasil não apresenta o mesmo perfil de elasticidade entre o PIB e o consumo de energia das economias mais desenvolvidas.

No período de 1990 à 1998, o Brasil apresentou em média, taxa de crescimento do PIB de 2,6 % ao ano, enquanto que o consumo final de energia cresceu 3,8 % ao ano e o da energia elétrica, 4,4 % ao ano. A Figura II.1 indica a comparação da taxa de crescimento do PIB e taxa de crescimento da energia elétrica nas últimas décadas e projeção para 2004.

A predominância atual do consumo de energia elétrica na matriz energética brasileira é da hidroeletricidade e o tamanho do mercado consumidor possibilita ao País possuir a décima maior potência instalada de geração do mundo e o 3º maior parque hidroelétrico.

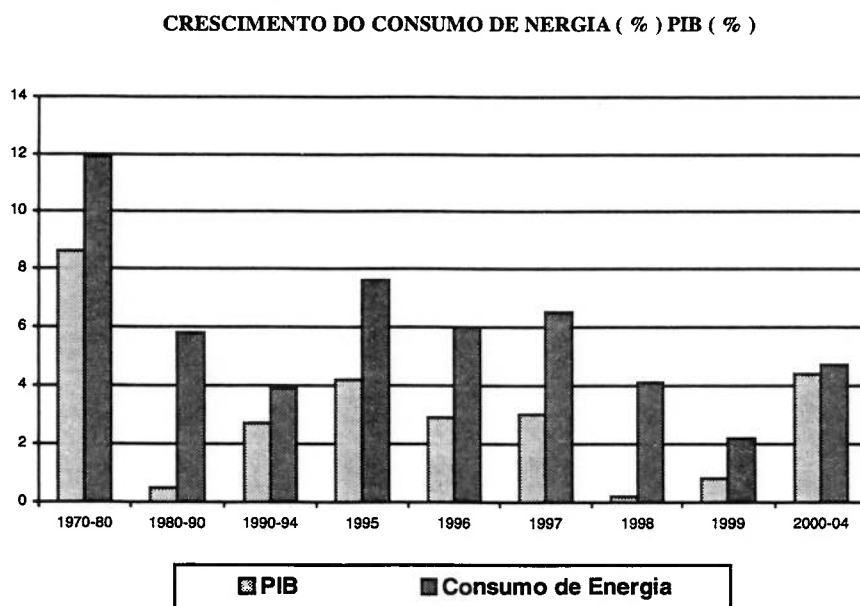


Figura II.1. Comparação do Crescimento (%) do PIB e do Consumo de Energia Elétrica.

Fonte Eletrobrás

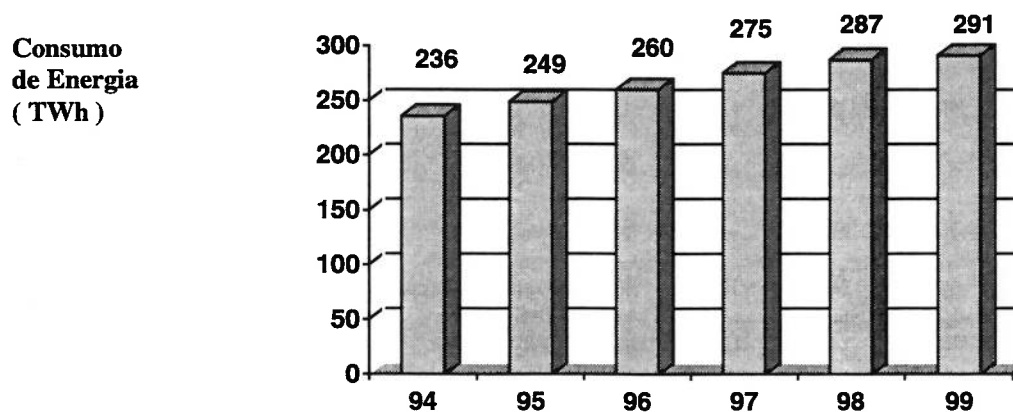


Figura II.2 Evolução do Mercado de Consumo de Energia Elétrica – TWh

Fonte Eletrobrás

A Figura II.2 indica a evolução do mercado de consumo de energia elétrica brasileiro no período de 1994 a 1999. O ambicioso programa brasileiro em implantação de usinas térmicas apontam para os próximos cinco anos, a participação

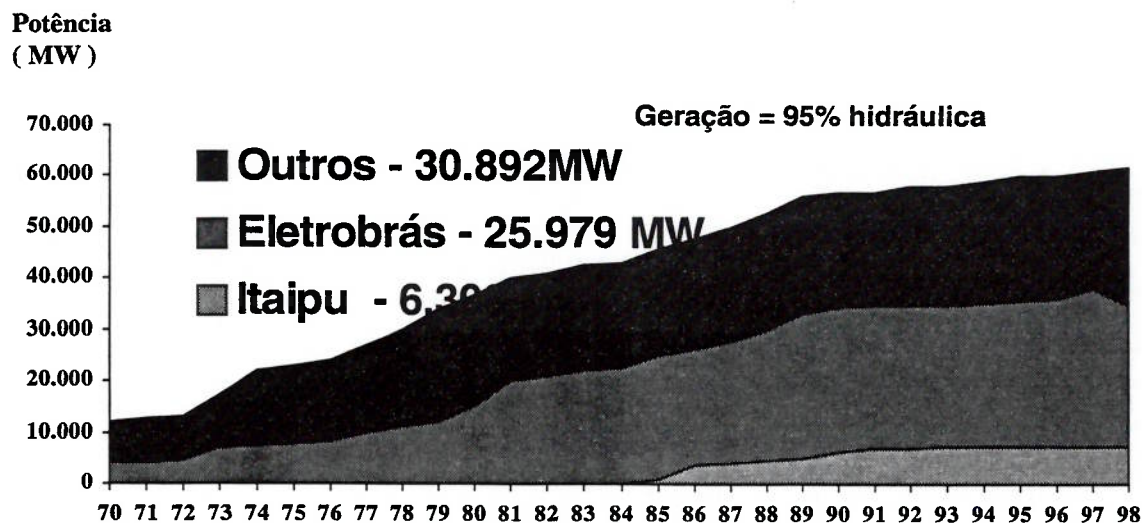
acima de 15% do gás natural na geração de energia elétrica e acima de 5% na matriz energética nacional.

II.2 ALTERNATIVAS PARA GARANTIR O DESENVOLVIMENTO SUSTENTADO

Atualmente o Brasil apresenta os limites máximos de oferta de eletricidade. As privatizações das geradoras, transmissoras e concessionárias de energia elétrica bem como as novas regulamentações do mercado de energia, são expectativas para o adequado atendimento do crescente consumo de energia elétrica. A Figura II.3 indica a evolução da capacidade nominal de geração de energia elétrica no Brasil.

É importante ressaltar que a escassez de recursos públicos e privados nacionais, conduzem à importação de poupança externa para sustentar o desenvolvimento nacional. Essa dependência, principalmente diante do endividamento externo nacional, é um complicador que tende reduzir o desenvolvimento e a comprometer a própria estabilidade econômica.

A busca nas soluções, muitas vezes simples, encontra enormes dificuldades de aplicação devido a atual cultura nacional de desperdício, nada preocupada na conservação dos recursos naturais e meio ambiente.



**Figura II.3 - Capacidade nominal instalada (Total 63.171 MW)
Fonte Eletrobrás - 1.999**

Por outro lado, deve ser considerada a inserção do Brasil no mercado globalizado, que cada vez mais exige alta produtividade e competitividade de produtos e serviços e em muitos deles a energia elétrica é matéria prima de relevante importância.

Atitudes e procedimentos que objetivam a conservação de energia não são apenas economicamente atraentes para o consumidor em particular, mas também benéfica, em vários aspectos, para toda a sociedade.

Ações foram estabelecidas pelo Governo Federal, diante do fato comprovado de que é mais atrativo a aplicação de recursos em conservação e uso racional da energia, quando comparado com os custos marginais da oferta. Dados do Ministério das Minas e Energia registram que enquanto o custo da oferta do quilowatt gerado em usinas hidroelétricas encontra-se próximo a US\$ 2000, o custo do quilowatt conservado não ultrapassa US\$ 700.

Diversas organizações não governamentais também contribuem para a disseminação da cultura do uso racional das diversas formas de energia disponível. Destaca-se o Instituto Nacional de Eficiência Energética – INEE e as empresas com configuração Esco, “Energy Service Company”, com diretrizes originárias nos EUA. São entidades privadas que promovem o melhor aproveitamento de sistemas e equipamentos através dos estudos de profissionais especializados em serviços de consultoria e gerenciamento voltados para o aproveitamento das oportunidades econômicas pelo uso racional e economia do consumo de energia.

II.3 PROCEL – PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

A eficiência energética é um conjunto de políticas e ações fundamentais que tem por finalidade a redução dos custos da energia efetivamente utilizada ou ainda aumente a quantidade de energia oferecida sem aumento da geração e podem ser listados como segue:

- Planejamento integrado de recursos - são ações que avaliam os custos e benefícios do lado da oferta (geração) e do lado da demanda (consumidor final) de forma que a energia utilizada pelo sistema seja a de menor custo financeiro e produza o menor impacto ambiental.
- Eficiência pelo lado da oferta (Geração, Transmissão e Distribuição) - são aplicações de tecnologias que estimulam a eficiência da energia gerada e entregue aos consumidores finais.

- Gerenciamento pelo lado da demanda - são políticas e ações e incentivos que estimulam o consumidor final a utilizar a energia de forma mais eficiente.
- Eficiência pelo lado da demanda - são aplicações de tecnologias que resultem na maior eficiência energética no consumidor final. Nessa categoria de ações se inclui o estudo de viabilidade econômica para utilização dos motores de Alto Rendimento, tanto para as novas instalações como para aquelas existentes e em operação que possam ser atualizadas.

A eficiência pelo lado da demanda é de responsabilidade do usuário final que deve ser informado e incentivado a utilizar energia de modo racional e despertar para as oportunidades que se apresentam para reduzir o custo do consumo, através de ações simples e econômicas que no seu conjunto, apresentam importantes resultados financeiros.

A adequada utilização dos motores elétricos, pela quantidade de unidades e número de horas em operação, possui enorme potencial de eficiência, traduzindo substancial redução do custo operacional.

Em dezembro de 1985, o Governo Federal criou o Procel – Programa Nacional de Conservação de Energia - como programa de governo e com objetivo principal e específico de:

"Racionalizar o uso da energia elétrica e, como decorrência da maior eficiência, propiciar o mesmo produto ou serviço com menor consumo, eliminando desperdícios e assegurando redução global de custos e de investimentos em novas instalações no sistema elétrico".

Foi estabelecido um conjunto de estratégias básicas para abordagens que induzem o aumento da eficiência energética em todos os segmentos, até o consumo final.

O plano estratégico proposto pelo Procel contempla um horizonte futuro de 10 anos e que diante da dinâmica dos fatos o plano é revisto periodicamente.

A meta global entre 1996-2005 é obter uma economia progressiva de energia elétrica e alcançar no final do período 130 mil GWh.

Para conseguir atingir este objetivo, o Procel conta com o apoio de órgãos representativos da sociedade, como fabricantes, usuários, centros de pesquisas, Agência Nacional de Energia Elétrica e outros organismos especialistas em conservação de energia.

A fim de incentivar os fabricantes a desenvolverem produtos de alta eficiência o decreto Presidencial de 08/12/93 instituiu o Selo de Eficiência Energética para os equipamentos elétricos oferecidos ao mercado interno.

O Selo Procel de Economia de Energia é um instrumento promocional, concedido anualmente, desde 1993, aos equipamentos elétricos que dentro da sua categoria apresentem os melhores índices de eficiência energética. O objetivo é estimular a fabricação nacional de produtos e componentes mais eficientes e orientar o consumidor no ato da compra, de forma que possa adquirir equipamentos que apresentem os melhores níveis de eficiência energética e assim contribuir pontualmente para a redução ao desperdício de energia elétrica. A Figura II.4 destaca a evolução dos resultados obtidos pelo Procel desde 1986, quando os primeiros resultados do programa começaram a ser contabilizados.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - RESULTADOS DO PROCEL					
ESPECIFICAÇÃO	1986-93	1994	1995	1998	1999
REDUÇÃO DE CARGA NA PONTA (MW)	149	70	103	398	392
ENERGIA TOTAL ECONOMIZADA(GWh/ano)	930	344	572	1900	2100
USINA EQUIVALENTE (MW)	220	80	135	394	436

Figura II.4: Resultados do Procel

III POTENCIAL DO USO EFICIENTE DA ENERGIA E OS MOTORES ELÉTRICOS

III.1 PRODUÇÃO NACIONAL DE MOTORES ELÉTRICOS

No Brasil, a energia elétrica é historicamente oferecida pelo aumento da produção ou pelo lado da oferta. A escassez de recursos, o crescimento da demanda, o controle dos impactos ambientais e a longa maturação dos projetos voltados à hidroeletricidade, indicam como importante alternativa a busca de eficiência energética pelo lado do consumidor final, ou seja, pelo lado da demanda.

Quanto ao perfil do consumo de energia elétrica, 44 % é de responsabilidade do setor industrial e desta parcela, 51 % é proveniente de força motriz. Isto significa que praticamente 23 % de toda energia elétrica produzida é consumida através dos motores elétricos. A Figura III.1 apresenta os gráficos de participação de cada segmento no uso final da energia elétrica no Brasil, bem como a importância dos motores elétricos.

O melhor projeto, fabricação e aplicação dos motores elétricos implica em resultados imediatos, disponibilizando substancial quantidade de energia elétrica à custos significativamente mais atraentes quando comparados com os custos da produção ou da oferta. A Figura III.2 apresenta as estatísticas da ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica das quantidades de motores elétricos fabricados no Brasil e as respectivas potências.

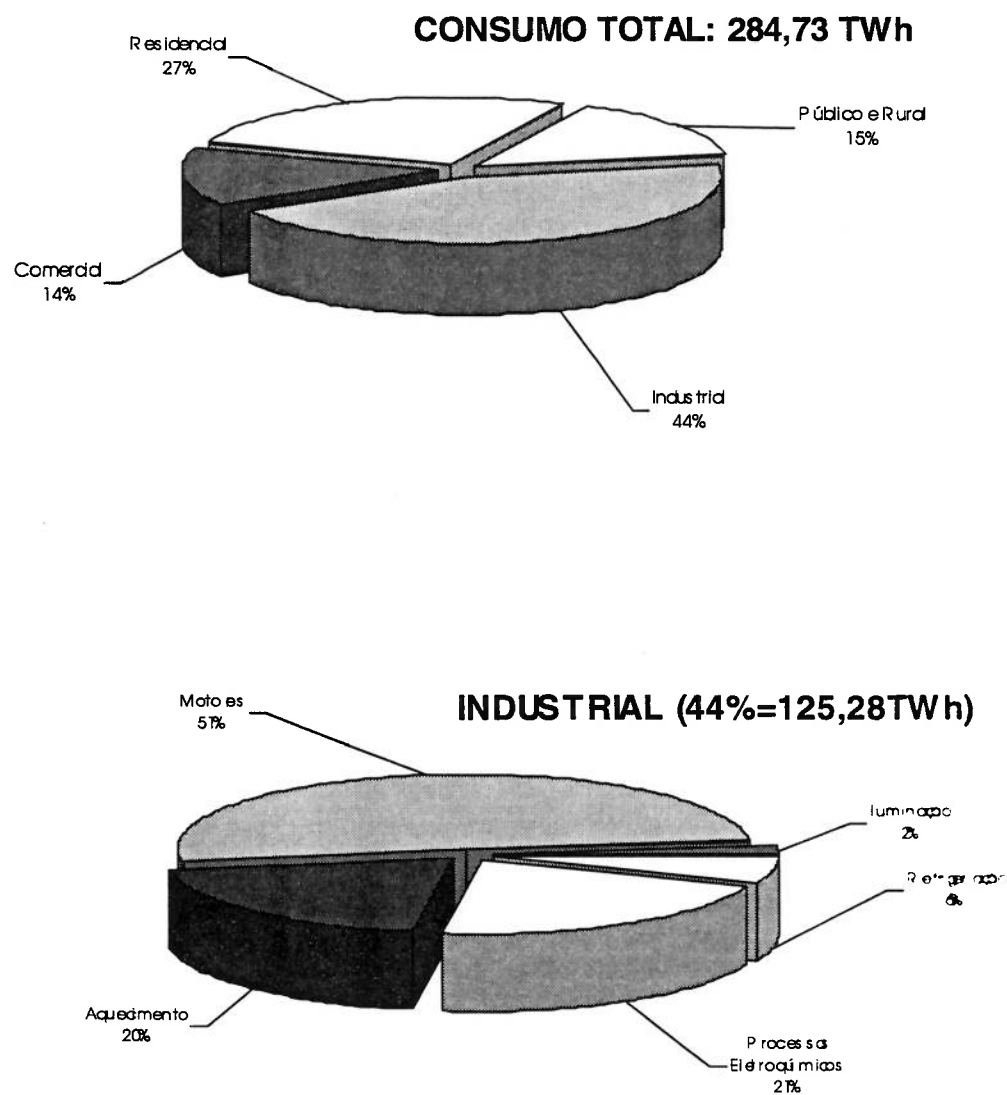


Figura III.1 Participação dos motores elétricos no consumo de energia no Brasil
Fonte Eletrobrás – 1.999

Os dados estatísticos da ABINEE também indicam que predominante o tipo de motor aplicado é o trifásico de indução, gaiola, classe de tensão < 600 Volts, potências menores que 300 cv e uso industrial.

Os motores monofásicos e fracionários, além de possuírem pequena potência, são intensamente utilizados em eletrodomésticos e em outras aplicações de operação intermitente e reduzidos ciclos de trabalho e horas de operação.

Nos motores trifásicos industriais a melhoria de alguns pontos percentuais do rendimento, obtidos no projeto e processo de fabricação, bem como o correto dimensionamento, adequada instalação e operação são traduzidos em significativa redução do consumo de energia elétrica e conseqüentemente economia financeira para o usuário.

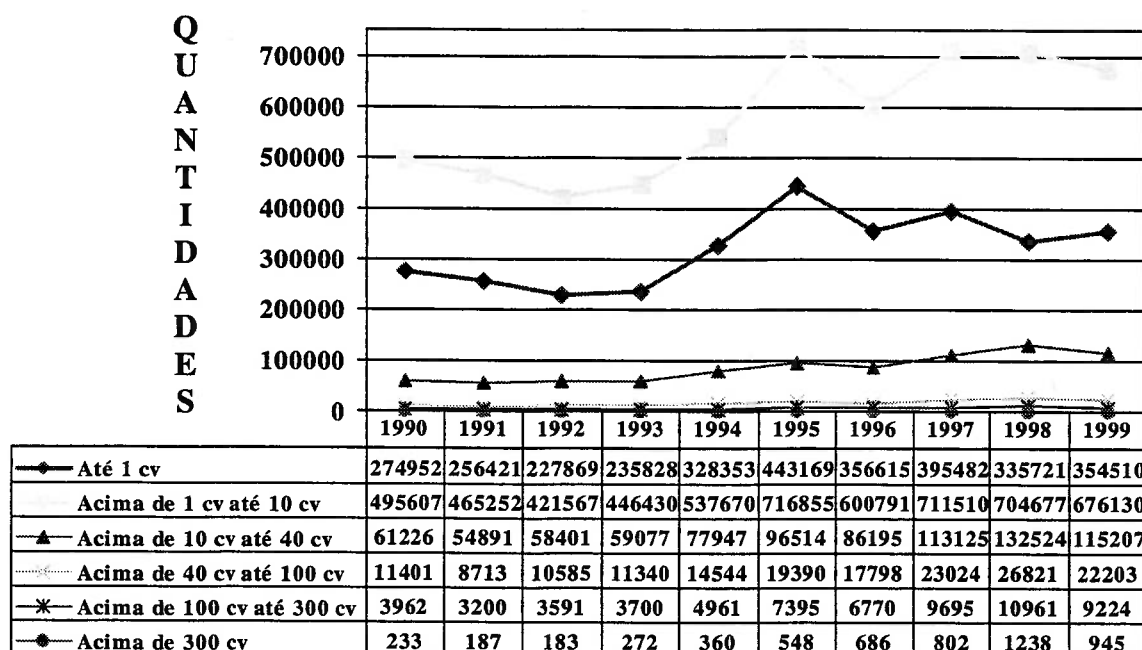


FIGURA III.2 Quantidades de motores elétricos fabricados no Brasil

Fonte ABINEE

III.2 ALTERNATIVAS NA APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

Os três principais fabricantes de motores elétricos nacionais, Kohlbach, Eberle e WEG representam quase a totalidade do volume de unidades e da somatória da potência dos motores industriais de baixa tensão oferecido ao mercado nacional. Seguindo a tendência dos maiores fabricantes mundiais, oferecem ao mercado duas linhas de produtos para aplicação industrial, uma denominada Standard e a outra de Alto Rendimento. As características técnicas, elétricas e mecânicas, são semelhantes e uma vez definida a potência nominal do motor, qualquer das linhas atende perfeitamente o acionamento da carga.

A linha de Alto Rendimento é de preço de aquisição de 20 a 50% mais elevado que a linha Standard, porém apresenta menor consumo de energia em operação ou menor custo operacional. Outras diferenças entre as duas linhas de motores e de importâncias relevantes também são apresentadas e discutidas neste trabalho.

A escassez de energia elétrica e a conseqüente tendência de futuro encarecimento, tiveram importante impacto no mercado de motores elétricos. Atualmente os fabricantes desenvolvem técnicas de fabricação e aplicam materiais na construção de motores que objetivam não somente a redução do custo de fabricação, mas principalmente, a obtenção de maiores valores de rendimento e diminuição do custo operacional.

Atualmente os fabricantes não disponibilizam as estatísticas das quantidades dos motores de Alto Rendimento fabricadas. Informam que o número de unidades está crescendo, mas não supera 2% do volume total. Isto ocorre principalmente

pela acomodação e falta de conhecimento do usuário da elevada incidência do custo da energia elétrica nos processos, pela tímida divulgação governamental e dos próprios fabricantes.

Experiência de campo comprovam que as unidades mais antigas e que operam acima de 2200 horas/ano possuem grande potencial de redução de consumo de energia e ganhos econômicos, pois normalmente estão superdimensionados e operam com baixos valores de rendimento.

III.3 PROPOSTA DO TRABALHO

Os próprios fabricantes oferecem programas de análise técnica e econômica para a decisão da melhor alternativa entre suas linhas de produtos. As considerações são de que os motores operam de modo contínuo, com carga permanentemente constante e rendimento nominal, ou seja, de plena carga.

Sem dúvida, esta simplificação é razoável e válida, desde que a carga não seja inferior à 50% da potência nominal. Analisando a família de curvas de rendimentos de motores, constata-se que para cargas acima de 50 % da potência nominal, o rendimento é relativamente constante variando no estreito intervalo de 1 à 3 % (um a três por cento).

Para os motores que operam com cargas variáveis, nos baixos carregamentos, apresentam queda substancial nos valores de rendimento e o critério de análise dos fabricantes distorce totalmente a análise econômica. Nos regimes intermitentes, deve-se salientar que a energia consumida pelos motores nas sucessivas partidas é considerável e também não estão incluídas na análise. Além

disto, os fabricantes comparam apenas as suas linhas de produtos, não realizando comparações com as linhas dos demais fabricantes.

Motor Trifásico de Alto Rendimento	
Motor funcionando em 100% da sua potência nominal	
Motor Funcionando em regime contínuo	
Retorno do investimento (estimado em anos)	
	ΔC
Retorno =	$\frac{\Delta C}{0,736 \times CV \times Nh \times CkWh \times \left[\frac{100}{\eta_{St}} - \frac{100}{\eta_{AR}} \right]}$
ΔC = Diferença de custos entre o motor Standard e o de Alto Rendimento em Reais CV = Potência do motor em cv (cavalo vapor) Nh = Número de horas de trabalho em um ano η_{St} = Rendimento do motor normal em % η_{AR} = Rendimento do motor Alto Rendimento em % $CkWh$ = Custo do kWh em Reais	

Figura III.3 : Critérios para o Cálculo do Investimento do fabricante Weg

A Figura III.4 exemplifica que o motor Weg, 25 cv, Standard à plena carga o rendimento é 90 %, enquanto que com 20 % de carga a queda no valor do rendimento é significativa, passando para 75 %. Todavia, para 60 % de carga o rendimento é de 88 %, inferior apenas 2 pontos percentuais do rendimento nominal. Nos carregamentos de 80 % e 120 %, o rendimento é 90 %, o mesmo valor do rendimento de plena carga.

A questão central é com o conhecimento prévio do ciclo e das características da carga dimensionar a potência adequada e decidir corretamente, entre os três fabricantes nacionais, qual a linha de motor que apresenta a melhor vantagem econômica, considerando os reais rendimentos com cargas variáveis e a energia consumida durante os processos de partidas.

O trabalho desenvolvido oferece os critérios com recomendações dos fabricantes ao usuário para o correto dimensionamento da potência do motor.

O banco de dados foi extraído dos catálogos eletrônicos dos principais fabricantes nacionais, Eberle, Kohlbach e Weg, últimas versões e disponíveis em setembro de 2000. A análise econômica desenvolvida no programa é realizada pelas tradicionais ferramentas da engenharia econômica: Vantagem Financeira (VF); Tempo de Retorno do Capital Investido, usualmente denominado "Pay Back"; Valor Líquido Presente (VLP); Índice de Lucratividade (I_L) e a Taxa Interna de Retorno (TIR).

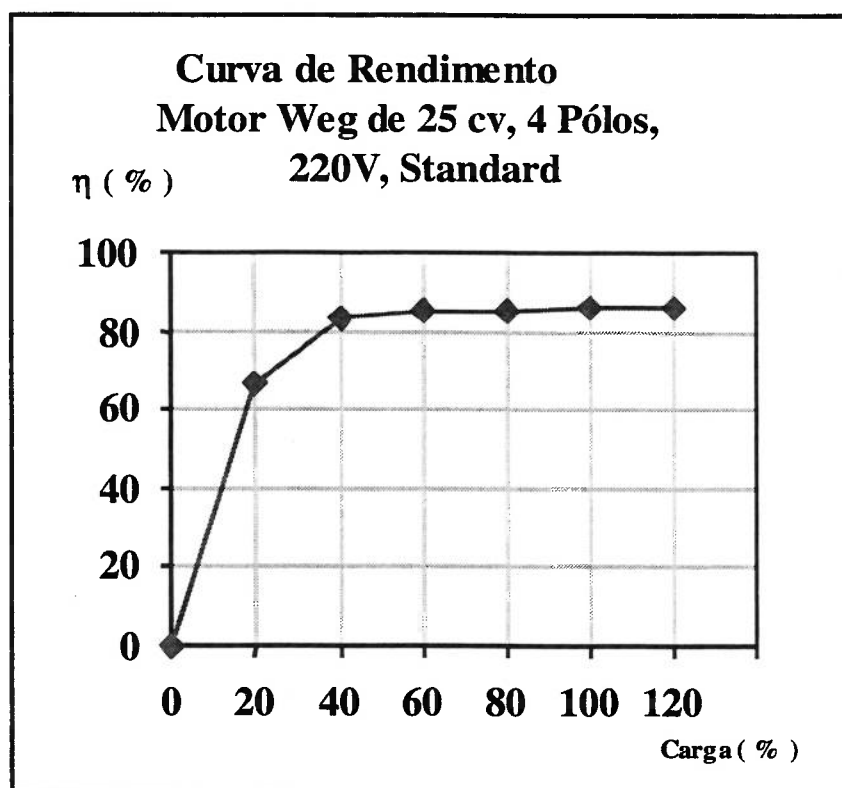
O trabalho também apresenta os incentivos oferecidos pelos fabricantes para a substituição ("retrofit") dos motores em operação e as principais linhas de financiamento disponíveis para projetos voltados para conservação de energia.

Do ponto de vista da sociedade, a melhor alternativa é sempre a utilização dos equipamentos de melhor rendimento e que apresentam o menor consumo de energia em operação.

Analisado do aspecto estritamente econômico, principalmente para ciclos de operação extremamente curtos, poderão ocorrer situações em que o investimento adicional para a aquisição do motor de Alto Rendimento não é devidamente recompensado financeiramente.

Para o usuário, sob a óptica do dispêndio, a melhor alternativa é a que apresenta o menor custo quando considerado não somente o custo inicial da aquisição e instalação, mas também os custos operacionais de consumo de energia e manutenção.

A seleção e aplicação do motor elétrico deve ser avaliada como oportunidade de investimento e a análise não deve ser limitada apenas ao preço de aquisição e sim considerado o custo do consumo de energia elétrica durante toda sua vida útil e demais vantagens adicionais agregadas.



Carga(%)	20	40	60	80	100	120
Potência(cv)	5	10	15	20	25	30
Rendimento (%)	75	85	88	90	90	90

Figura III.4 Curva e tabela de rendimento - motor industrial - Standard -
25 cv - 4 pólos - 220 V

IV MOTORES ELÉTRICOS, CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E CUSTOS OPERACIONAIS

IV.I MOTORES ELÉTRICOS E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

O conceito de conservação de energia pode ser apresentado pela prestação do mesmo serviço ou mesma quantidade de produtos produzidos com o menor consumo de energia, desde a sua geração até o consumo final.

Estes objetivos podem ser conseguidos pelo uso racional e eliminação do desperdício, aumento da eficiência dos mais diversos componentes e conversores de energia, correta instalação e operação dos mesmos e gerenciamento energético de todo o sistema.

Particularmente no Brasil a escassez de recursos e as significativas taxas de crescimento previstas para o desenvolvimento, associado aos limites atuais da disponibilidade da energia elétrica, torna-se indispensável programas de racionalização do uso da energia elétrica que além de serem relativamente pouco dispendiosos, rapidamente apresentam resultados significativos.

A eficiência energética é um conjunto de políticas e ações fundamentais que tem por finalidade a redução dos custos da energia efetivamente utilizada ou ainda aumente a quantidade de energia oferecida sem aumento da geração.

A eficiência pelo lado da demanda é de responsabilidade do usuário final que deve ser informado e incentivado a utilizar energia de modo racional e despertar para as oportunidades de ganhos financeiros que se oferecem por reduzir o custo do consumo. Em muitas situações, cuidados simples e imediatos, apresentam sensível redução de consumo energético e importantes resultados financeiros são obtidos.

IV.2 CUSTO OPERACIONAL E “PAY BACK”

A adequada utilização dos motores elétricos, pelas quantidades instaladas e número de horas em operação, possui enorme potencial de eficiência, traduzindo significativa redução do custo operacional.

Como exemplo, a tabela da Figura IV.1, apresenta para motores de fabricação Kohlbach, a comparação dos preços de aquisição e o custo mensal da energia consumida e respectivo "pay back", entre três potências de motores que operam, a plena carga, 10 horas por dia útil, mês de 22 dias (semana de cinco dias úteis) e custo médio da energia 0,10 R\$ / kWh.

Potência	Alto Rendimento		Standard		Custo Mensal de Energia	
	Preço	Rendimento	Preço	Rendimento	AR	ST
cv						
1	89,40	83.6	69,00	77,00	19.36	21,02
10	306,40	91.1	235,81	87,00	177,74	188,61
100	2427,10	94.5	2016,80	92,00	1713,43	1760,00

Figura IV.1 Preços de aquisição e o custo mensal da energia consumida motores industriais Kohlbach, IP 54 1800 rpm

Notas explicativas:

1) Os preços foram obtidos da lista pública 01/2000 do fabricante Kohlbach, em vigor em setembro/2000, considerando 40% de desconto comercial e acrescidos de todos os impostos (ICMS - alíquota 12% e IPI - alíquota 5%).

2) Os valores de rendimento foram obtidos do catálogo do fabricante Kohlbach, disponível em setembro de 2000, e declarado atualizado pelo fabricante.

3) O custo da energia elétrica foi considerado o valor do R\$ / kWh, da concessionária Eletropaulo São Paulo – Tarifa HoroSazonal – Fora de Ponta, com imposto de ICMS na alíquota de 18% inclusos, para Consumidor A- 4 - Resolução n.º 256 de 03/07/2000 da ANEEL - DOU de 04/07/2000 - válida para leituras a partir de 04/07/2000 Setembro – 2000.

4) No exemplo é considerado regime de trabalho contínuo com carga nominal, ou seja, regime de trabalho S 1 da norma ABNT, NBR 7094.

O "pay back ", ou tempo de retorno do investimento é determinado pelo quociente das parcelas representadas pela diferença dos preços de aquisição dos motores Alto Rendimento e Standard e pela diferença dos custos mensal de energia consumida dos respectivos motores.

O resultado, indicado na Figura IV.2, representa o número de meses que amortiza o acréscimo de custo de aquisição, pela decisão de escolher o motor de Alto Rendimento.

Potência cv	Diferença Custo (R\$)	Diferença Consumo Mensal (R\$)	"Pay back " meses
1	20,40	1,66	12,3
10	70,59	11,27	6,3
100	410,30	46,57	8,8

**Figura IV.2 Exemplos de Resultado do "Pay back"
Motores Kohlbach**

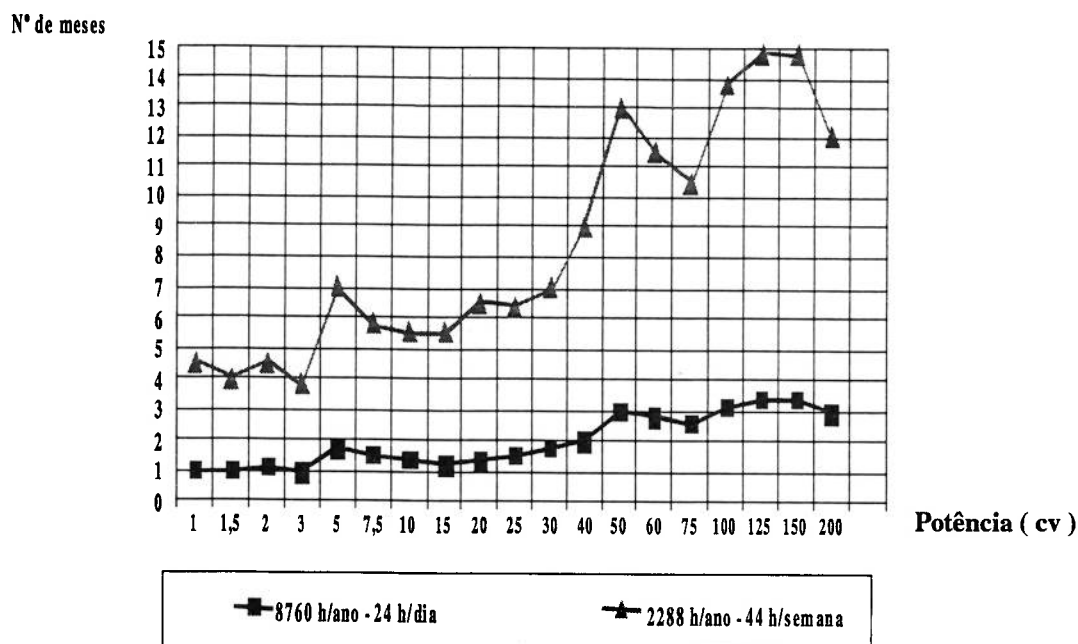


Figura IV.3 Retorno de investimento - motores trifásicos industriais

Weg - 1800 rpm - IP-54

Neste regime de trabalho de carga constante, de 44 hs/semana ou 2288 hs / ano, o “pay back” para os fabricantes nacionais, não ultrapassa 16 meses.

Nos motores com regime de trabalho mais intenso, regime direto e ininterrupto de 24 hs / dia, 8760 hs/ano, o “pay-back” normalmente não ultrapassa 4 meses. A Figura IV.3 ilustra o “pay-back” médio para os motores industriais da marca Weg.

Com os dados apresentados na Figura IV.1 conclui-se que o custo do consumo de energia durante 12 dias de um motor de 10 cv, linha Standard, quatro pólos, rendimento de 87 % e operação no regime contínuo é superior ao seu valor de aquisição de R\$ 236,00.

Ou seja:

$$(0,10 \text{ R\$ / kWh}) \times 24 \text{ horas / dia} \times 12 \text{ dias} \times 10 \text{ c.v.} \times 0,736 \text{ kW} / 0,87 = \text{R\$ } 243,41$$

Para o regime de 44 hs / semana, o custo do consumo de energia de praticamente de um mês (29 dias) reproduz o custo de aquisição do mesmo motor.

Os motores elétricos com programas de manutenção adequados e satisfatoriamente instalados e operados apresentam uma expectativa de vida próxima de 10 anos, permitindo concluir que é significativa a vantagem econômica no investimento de motores do tipo de Alto Rendimento, principalmente para operações acima de 2200 horas / ano. O custo inicial de aquisição torna-se irrelevante quando comparado com o custo operacional da energia consumida durante toda vida útil.

IV.3 DESPERDÍCIO PELO SOBREDIMENSIONAMENTO

A adequação da potência nominal para o acionamento de determinada carga é de significativa importância na aplicação de motores. Como exemplo considere um motor industrial de 100 cv, 4 pólos, categoria N, linha Standard, fabricante Weg e acionando uma carga constante que requer apenas 25 cv.

O referido motor será substituído por outra unidade de mesmas características, todavia de potência nominal de 25 cv. Os valores de rendimentos foram obtidos do catálogo eletrônico da Weg, versão 3.1, em vigor em abril / 2001.

Os preços dos motores foram obtidos considerando desconto comercial de 40 % aplicado sobre a lista de preços de abril / 2001, acrescido o valor de IPI na alíquota de 5 %.

O motor de 100 cv com 25 % de carga apresenta rendimento de 81,1 %, enquanto o motor de 25 cv com 100 % de carga possui rendimento de 90,1 %.

Portanto, a potência absorvida pelo motor de 100 cv é determinada por:

$$P_{\text{abs100}} = [25 \times 0,736] / 0,811 = 22,69 \text{ kW}$$

Analogamente, a potência absorvida pelo motor de 25 cv é determinada por:

$$P_{\text{abs25}} = [25 \times 0,736] / 0,901 = 20,42 \text{ kW}$$

A energia anual evitada, ΔEE , pela utilização do motor corretamente dimensionado em períodos de 10 hs / dia, 22 dias / mês é :

$$\Delta EE = (22,69 \text{ kW} - 20,42 \text{ kW}) \times (10 \text{ hs/dia}) \times (22 \text{ dias/mês}) \times (12 \text{ meses}).$$

$$\Delta EE = 5993 \text{ kWh.}$$

Considerando o custo da energia elétrica do horário fora de ponta de 0,10 R\$ / kWh, determina – se o custo anual da energia evitada, CEE por:

$$CEE = 5993 \text{ kWh} \times 0,10 \text{ R\$ / kWh} = 599,30 \text{ R\$}$$

O preço de aquisição do motor Standard de 25 cv incluindo os impostos é de 521,00 R\$, resultando “pay-back” de onze meses.

Todavia, caso a substituição seja realizada com uma unidade da linha Alto Rendimento, com rendimento de 92,5 % e preço de aquisição de 798,00 R\$, a mesma avaliação resulta em “pay-back” de treze meses.

Ressalta – se que a garantia do motor novo é de dois anos.

V MOTORES ELÉTRICOS DE ALTO RENDIMENTO

V.1 HISTÓRICO

Durante o período em que a energia era abundante e de baixo custo, a tecnologia dos motores elétricos estava direcionada para fabricação de unidades duráveis, versáteis e principalmente de baixo custo.

Desde o descobrimento do campo girante pelo croata Nicolas Tesla em 1887 e em seguida do motor de indução pelo Eng^o Michael Von Dobrovolsky, os motores elétricos possuem uma longa história de desenvolvimento. Inicialmente com objetivo de conseguir potências e conjugados que atendessem as mais diversas condições de carga e posteriormente na competição dos mercados, o desenvolvimento tecnológico produziu motores com menores quantidades de materiais e de custos reduzidos.

Atualmente os esforços são focados para redução das perdas, aumento do rendimento e conseqüente redução de consumo de energia.

A Figura V.1, mostra o histórico do efeito do desenvolvimento tecnológico sobre a relação massa dos motores elétricos / potência (kg / kW).

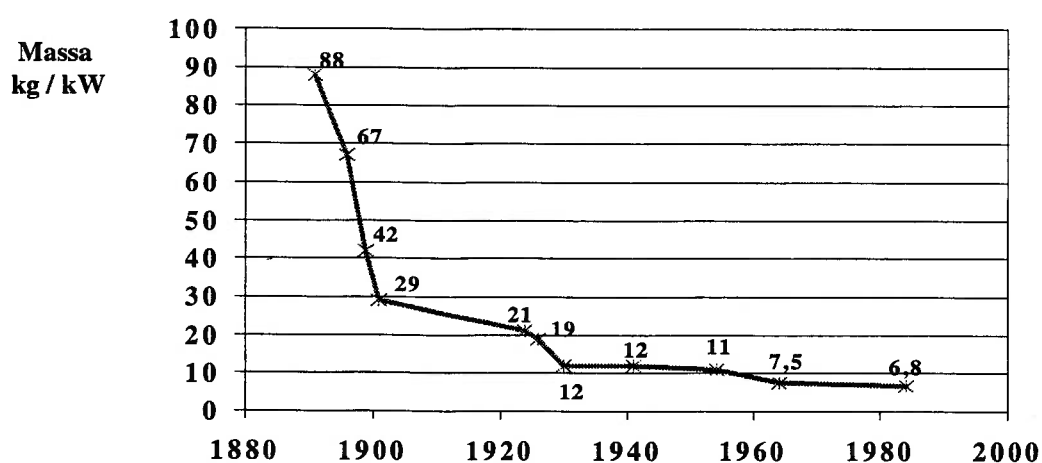


Figura V.1 Redução da relação massa (kg) / potência (kW) – motores 4 Pólos

Fonte ASEA

A necessidade de motores com maiores rendimentos tornou-se aparente na década de 70 pela perspectiva de escassez de energia e o seu inevitável aumento do preço. Como agravante, as políticas de não agressão ao meio ambiente dificultam e encarecem a exploração de novas fontes, principalmente as não tradicionais.

Até então, a competição dos mercados orientava os projetos para o maior aproveitamento dos materiais pelo aumento da carga magnética e das densidades de correntes, proporcionando aumento das perdas e temperaturas, redução dos rendimentos, aumento do consumo de energia em operação, mas com diminuição do custo de fabricação e baixo preço de venda. A Figura V.2, mostra a evolução histórica da redução da massa de um motor de 1HP / 0,75 kW, 1800 rpm, fabricação ASEA.

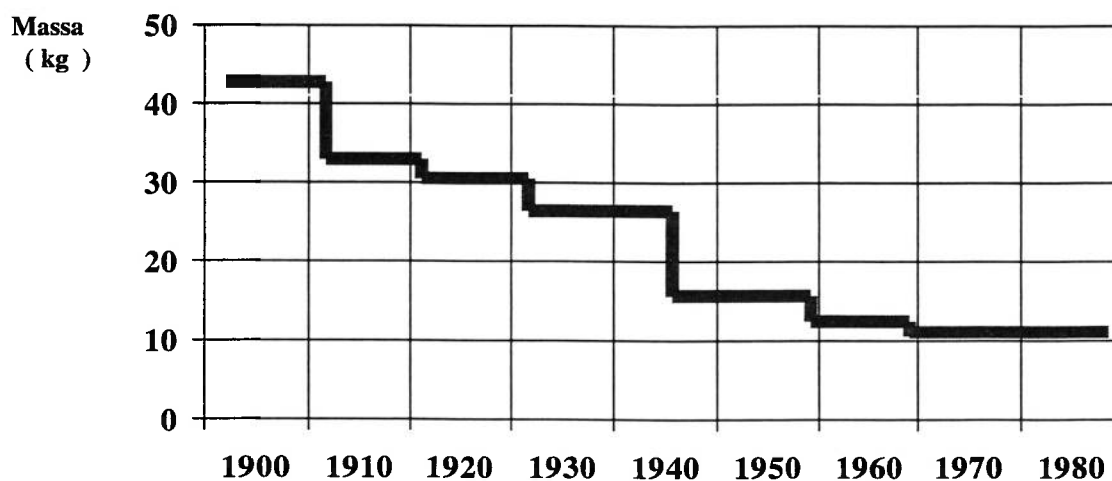


Figura V.2 Motor elétrico ASEA 0.75kW = 1 HP - 1800rpm

Assim, as unidades tornavam-se cada vez menores em dimensões e pesos. O aprimoramento dos projetos e a tecnologia de fabricação apontavam para utilização de materiais isolante de classes térmicas mais elevadas e sistemas de refrigeração otimizados que garantiam a viabilidade técnica e econômica do modelo.

Como exemplo, a carcaça 445, Norma NEMA, em 1930, abrigava um motor de 50 HP à 1800 rpm. Hoje, na mesma carcaça é possível desenvolver, na mesma rotação a potência de 200 HP. Em 1955, motores com potências menores que 10 HP, apresentavam rendimentos de 4 a 6 pontos percentuais superiores aos fabricados na década de 70. Nas potências superiores à 10 HP, as diferenças atingiram níveis de 2 a 5 pontos percentuais. Para ilustrar este histórico, a Figura V.3 indica a evolução dos rendimentos médios dos motores no mercado americano.

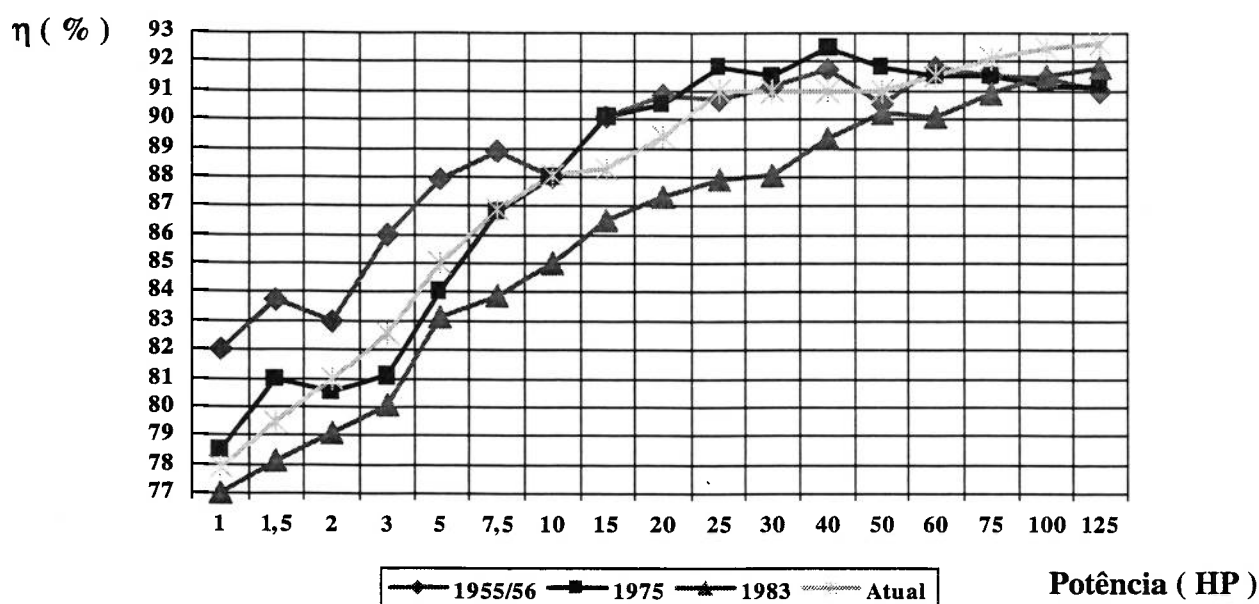


Figura V.3 Evolução dos rendimentos médios de motores no mercado americano

Fonte Departamento de Energia - EUA

O impacto desses eventos nos motores elétricos foi traduzido em novos conceitos de projetos e aplicação. Atualmente os principais fabricantes mundiais de motores apresentam duas linhas distintas de produtos e que atendem perfeitamente à determinada carga. Uma denominada Standard, com rendimento convencional e preço de aquisição mais competitivo, e a outra de projeto e fabricação mais elaborados, com menores perdas, denominados de Alto Rendimento, porém com preço de aquisição de 20 a 50% mais elevados. Os modernos motores de Alto Rendimento também possuem

maior expectativa de vida útil e apresentam menores índices de falhas quando comparados com os seus semelhantes da linha Standard. Mesmo para operações em ambientes severos, com alto índice de insalubridade e umidade e instalados em locais de atmosferas carregadas de pós e gases e componentes químicos agressivos, constata-se a perfeita operação dos atuais motores de Alto Rendimento.

A criteriosa seleção da linha para uma aplicação específica é realizada computando-se simultaneamente, o preço de aquisição do motor e respectivo custo da energia consumida em operação durante a vida útil da unidade ou do projeto. Além das considerações econômicas, essa nova visão é anti-inflacionária e muito contribui com a indústria de transformação e prestadores de serviços, pois é possível com a correta escolha da linha de motor reduzir custos e tornar-se mais competitivo.

V.2 ORIGENS DAS PERDAS

Nos motores elétricos, para a conversão eletromecânica de energia, inevitavelmente parte da energia absorvida é transformada em calor devido a perdas inerentes a sua concepção e funcionamento. Todavia, deve-se salientar que o motor elétrico é intrinsecamente um equipamento de alto rendimento quando comparado com todos os demais conversores de energia. Os valores de rendimento nos motores industriais, tipo Standard, acima de 15 cv normalmente situam-se ao redor de 85%, sendo que para os de potências mais elevadas, alcançam com facilidade valores próximos a 95%.

O conhecimento das perdas é de importância relevante, pois delas dependem o rendimento, o custo da operação e o aquecimento do motor que em última instância limita as potências disponível, nominal e máxima de operação.

As elevações de temperatura nos motores, não devem ultrapassar determinados limites estabelecidos em função da qualidade dos materiais isolantes especificadas por classes de temperatura e que garantem a expectativa de vida útil.

No presente trabalho são apresentadas as perdas que ocorrem nos motores elétricos trifásicos, de indução, tipo gaiola, de uso industrial, tensão nominal menor que 600 V ($U_N \leq 600V$), na faixa de 0,16 à 500 HP e que são normalmente fabricados no Brasil. No trabalho as duas linhas de motores, Standard e Alto Rendimento, são denominados genericamente de “motor”.

As causas das perdas são funções de diferentes fenômenos que ocorrem em diferentes partes do motor elétrico, destacando-se as principais:

- Perdas Joule nos enrolamentos do estator e rotor;
- Perdas no Ferro do núcleo magnético;
- Perdas mecânicas, pelo atrito e ventilação;
- Perdas suplementares dos condutores e material magnético.

V.2.1 PERDAS JOULE NOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR E ROTOR

As perdas por efeito Joule nos enrolamentos do estator e rotor dos motores trifásicos é expresso por $3xRxI^2$, sendo:

R Resistência ôhmica de fase do enrolamento, em corrente contínua, do estator ou rotor e corrigida para temperatura especificada pela norma ABNT, NBR 7094.

I Corrente eficaz por fase do respectivo enrolamento.

A norma ABNT, NBR 7094, item 13.2 estabelece que as perdas Joule, devem ser corrigidas para temperatura ambiente de 25° C acrescida da elevação de temperatura determinada com carga nominal pelo método da variação da resistência.

Caso a elevação de temperatura à potência nominal não tiver sido determinada, as perdas Joule devem ser corrigidas para temperatura de referência, extraída da referida norma e indicada na Figura V.4.

Classificação Térmica do Isolamento do Enrolamento	A	B	F	H
Temperatura de Referência °C	75°	95°	115°	130°

Figura V.4. Elevação de temperatura à potência nominal

ABNT, NBR 7094, item 13.2

Nos motores em que a elevação de temperatura admissível for de classe térmica inferior a temperatura de referência da norma, a correção das resistências deve ser efetuada para esta classificação térmica inferior.

As perdas Joule variam proporcionalmente ao quadrado da potência desenvolvida no motor e são responsáveis à plena carga por aproximadamente 40 % das perdas totais.

A resistência ôhmica em corrente contínua é medida através de ponte de resistência e corrigida para a temperatura estabelecida, norma ABNT NBR 5383, pela expressão:

$$R' = 1 / \alpha_0 + t' \quad [V.1]$$

$$R = 1 / \alpha_0 + t \quad [V.2]$$

R' Resistência ôhmica em corrente contínua, por fase, do estator ou rotor corrigida para a temperatura t'

R Resistência ôhmica em corrente contínua, por fase, do estator ou rotor na temperatura ambiente t .

t' Temperatura conforme norma ABNT NBR 5383.

t Temperatura ambiente na qual foi realizada a medição.

α_0 Coeficiente médio de temperatura do material do enrolamento, normalmente executado em cobre ou alumínio.

$$\text{para o cobre} \quad \alpha_0 = 1 / 234,5 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = 0,00427 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\text{para o alumínio} \quad \alpha_0 = 1 / 225 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = 0,00390 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Nos motores trifásicos de indução tipo gaiola a medição da resistência elétrica é de fácil realização, permitindo o imediato cálculo das perdas Joule. Porém, o enrolamento do rotor não sendo acessível, as perdas Joule são determinadas pelo ensaio de rotor bloqueado ou pelo ensaio de carga.

Os enrolamentos do estator são distribuídos e executados para permitir eficiente transmissão de calor pelas cabeças das bobina. As barras do rotor são prolongadas e desenhadas para facilitar a sua própria dissipação térmica e contribuírem com a ventilação do motor.

V.2.2 PERDAS NO FERRO DO NÚCLEO MAGNÉTICO

Com aplicação de tensão alternada trifásica, as correntes circulando nos enrolamentos do estator, produzem o campo magnético variável, campo girante, no núcleo ferromagnético causando dois tipos de perdas no ferro:

- perdas por efeito de correntes de Foucault
- perdas por efeito de Histerese

As perdas por efeito das correntes de Foucault são provenientes das tensões e respectivas correntes induzidas na massa do núcleo e são determinadas pela expressão:

$$P_{FC} = K_{FC} \cdot (f \cdot B_m \cdot e)^2 \cdot V \quad [\text{ref.2}] \quad [V.3]$$

As perdas por efeito de histerese são provenientes da orientação alternada do campo magnético na estrutura cristalina do núcleo de ferro e são determinadas pela expressão:

$$P_H = K_H \cdot (f \cdot B_m^n) \cdot V \quad [\text{ref.2}] \quad [V.4]$$

K_{FC} e K_H Coeficientes que dependem das propriedades dos materiais.

B_m Indução máxima do núcleo.

f Frequência das induções ou frequência da tensão de alimentação

n Coeficiente que depende da propriedade dos materiais e do próprio valor de B_m .

Normalmente o expoente n , para os diversos materiais ferromagnéticos, encontra-se entre 1,5 à 2,5.

Os materiais magnéticos de uso normal, com induções máximas próximas da $1,2 \text{ Wb / m}^2$ apresentam n próximos 2,0.

e Espessura da chapa do material magnético que compõe núcleo.

V Volume do núcleo magnético.

A Equação [V.3] é deduzida para induções que variam senoidalmente no tempo. A Equação [V.4] é empírica e foi estudada pelo físico alemão Steinmetz, sendo válida para ciclos de histerese simétricos em relação à origem dos eixos de coordenadas.

Para efeito de análise imediata, admite-se $n = 2,0$ e as perdas totais do ferro, ou seja, a soma das perdas por efeito de Foucault e de Histerese podem ser determinadas por:

$$P_{FE} = P_{FC} + P_H = (K_{FC} \cdot f \cdot e^2 + K_H) \cdot f \cdot B_m^2 \cdot V \quad [V.5]$$

Com núcleos de propriedades e dimensões definidas e submetidas a frequência industrial constante, conclui-se que as perdas são proporcionais ao quadrado da indução máxima, ou ainda, ao quadrado da tensão eficaz por fase de alimentação, V_{ef} , pois:

$$V_{ef} = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot S_{FE} \cdot B_m \quad [V.6]$$

N_1 Número de espiras efetivas do enrolamento do estator, por fase
 S_{fe} Secção transversal do núcleo ferromagnético.

As expressões apresentadas são úteis para compreensão e análise do comportamento das perdas no ferro do motor elétrico. Todavia, a determinação numérica dessas perdas é efetuada pelas curvas próprias dos fabricantes das chapas magnéticas, ajustadas por coeficientes empíricos, determinados para cada região do núcleo do motor.

Na frequência industrial, particularmente no Brasil de 60 hz, é possível a determinação da perda total do ferro em função dos diferentes valores de indução máxima para cada trecho do núcleo.

As perdas no ferro de determinada região do núcleo é calculada multiplicando-se a perda específica do material do trecho, pelo respectivo volume e pelo coeficiente empírico de ajuste.

A aplicação deste coeficiente é para ajuste do cálculo no trecho considerado, devido as características próprias de estampagem e empacotamento das chapas no processo de fabricação dos núcleos magnéticos. É conveniente salientar, que as curvas das perdas específicas das chapas fornecidas pelos fabricantes são determinadas em condições diferentes daquelas que ocorrem nas diversas partes da máquina em funcionamento.

No motor, a maior quantidade de perdas no ferro ocorrem no núcleo do estator. As perdas no núcleo do rotor, devido à baixa frequência de regime das induções, são de pequeno valor ou até mesmo desprezíveis. Em operação normal, o escorregamento do motor, mesmo para os de pequena potência normalmente não ultrapassa 5%. Isto significa frequência do campo magnético do rotor de 5% da

freqüência da tensão de alimentação. No Brasil 60 hz, a freqüência dos campos no rotor são praticamente limitados em 3 hz.

Considerando que a tensão e a freqüência de alimentação sejam constantes em regime, as perdas no ferro são praticamente constantes e independentes da carga.

V.2.3 PERDAS ADICIONAIS OU SUPLEMENTARES

As perdas adicionais ou suplementares podem ser apresentadas pelas duas parcelas principais:

- perdas suplementares nos enrolamentos
- perdas suplementares no núcleo de ferro

V.2.3.1 PERDAS SUPLEMENTARES NOS ENROLAMENTOS

As perdas Joule, determinadas nos enrolamentos do estator e rotor pelo cálculo de $3 \times R \times I^2$, são inferiores as perdas que efetivamente se desenvolvem nos enrolamentos do motor em carga. Os enrolamentos do motor são submetidos à correntes alternadas e na presença do efeito pelicular (adensamento de corrente na parte externa ao condutor) ocorre substancial aumento da resistência ôhmica em corrente alternada (c.a.). Nos motores elétricos trifásicos em regime o fenômeno se pronuncia nos enrolamentos do estator executados com barras. Este aumento poderá em certos casos atingir 100% (cem por cento) da resistência ôhmica c.c. O alojamento dos condutores em ranhuras, parcialmente ou totalmente envolvidos pelo ferro, aumenta substancialmente o efeito pelicular.

Para o motor em regime, as frequências de campo no rotor não superiores a 3 Hz, e o efeito pelicular é desprezível.

As perdas Joule que efetivamente ocorrem em operação são aquelas desenvolvidas com resistência ôhmica em c.a., ou resistência efetiva.

A variação do fluxo magnético na própria massa do enrolamento de cobre do estator, produz perdas semelhantes às de Foucault e são importantes para os enrolamentos de barras com induções na frequência da tensão de alimentação. No rotor em regime essas perdas são desprezíveis.

V.2.3.2 PERDAS SUPLEMENTARES NO FERRO

As perdas no ferro também são maiores que aquelas definidas no item V.2.2., pois as forças magneto motrizes de reação de armadura, modificam as distribuições de induções próximas do entreferro. Por outro lado, as correntes de carga, também produzem fluxos dispersos que atingem partes estruturais (parafusos, suportes, tirantes, tampas, eixos, etc) contribuindo com as perdas adicionais.

Na região do entreferro, as ranhuras do rotor e estator, introduzem campos magnéticos de alta frequência, produzindo perdas adicionais no ferro. Essas perdas também são englobadas como perdas suplementares no ferro.

As perdas suplementares dos enrolamentos e do ferro são englobadas em uma única e também denominadas de perdas adicionais e representadas por P_{sc} .

Normalmente as perdas suplementares são nulas ou desprezíveis com o motor em vazio e variam proporcionalmente com o quadrado da carga.

Assim é possível considerar, para efeito de análise, as perdas divididas em duas categorias:

(A) perdas no cobre e perdas no ferro como especificado nos itens V.2.1 e V.2.2, denominadas de perdas principais. Os seus valores são determinados com relativa facilidade através de ensaios de laboratório.

(B) perdas suplementares do cobre e ferro, são de difícil determinação por cálculo algébrico ou pelo ensaio de laboratório e motor em carga.

A norma ABNT NBR 5383 estabelece que para o efeito da determinação das perdas suplementares, a prática de considerá-las variando com o quadrado da potência desenvolvida pelo motor e para a potência de plena carga o seu valor correspondendo à 0,5% da potência nominal.

V.2.4 PERDAS MECÂNICAS

Parte das perdas mecânicas dos motores de indução, são aquelas desenvolvidas pelos atritos nos rolamentos e pelo atrito do movimento do rotor com o ar. A potência requerida pelo ventilador próprio necessário para auto ventilação do motor também é classificada como perda e englobado nas perdas mecânicas.

O cálculo prévio e preciso das perdas mecânicas não é tarefa simples. As perdas de atrito nos rolamentos dependem dos estados da lubrificação, dos alinhamentos e dos níveis de tolerâncias de montagem do motor.

As perdas de atrito, P_A , são expressas por:

$$P_A = k_A \cdot f \cdot v \quad [V.7]$$

- k_a Coeficiente de atrito.
- f Força normal exercida sobre o rolamento.
- v Velocidade periférica.

As perdas de ventilação, P_V são expressas por:

$$P_V = k_v \cdot n^x \quad [V.8]$$

- k_v Constante de ventilação.
- n Rotação do motor,
- x Expoente que nos casos mais comuns é da ordem de 2 à 3.

As perdas de ventilação são extremamente variáveis, com as formas e tamanho das aberturas de entrada e saída de ar, dutos de ventilação, forma das barras do rotor e etc.

Quando o motor opera com rotação constante não há interesse especial em determinar especificamente as perdas de atrito em separado das perdas de ventilação.

As perdas de atrito e ventilação, $P_{A,V}$, são englobadas em uma única, denominada perdas mecânicas.

As perdas no ferro e as perdas de atrito e ventilação são perdas que ocorrem no motor independente da carga. Por esta razão, estas perdas agregadas são também denominadas de rotacionais e são fundamentais na determinação do valor de rendimento nas condições de carga reduzida e na determinação do consumo de energia para operação em vazio ou de espera ligado.

V.3 NORMA ABNT – NBR 7094 - RENDIMENTO E PERDAS - ENSAIOS

A Norma ABNT - NBR 7094 – Rendimento e Perdas, item 13.1.2, estabelece que os motores trifásicos de indução tipo gaiola, categoria N e H de potência nominal superior a 0,75 kW (1 CV) até 150 kW (200 CV), 2, 4, 6 e 8 pólos, 60 Hz, tensão nominal igual ou inferior a 600 V, qualquer forma construtiva, para serem considerados de Alto Rendimento, devem possuir rendimento à plena carga, no mínimo os valores da Tabela 17 da referida norma e reproduzida na Figura V.6. Os motores da linha Standard não possuem qualquer limitação de rendimento mínimo.

POTÊNCIA NOMINAL		Velocidade Síncrona rpm			
kW	cv	3600	1800	1200	900
		Rendimento Nominal			
0,75	1,0	Não definido	80,0	75,5	72,0
1,1	1,5	78,5	81,5	82,5	75,5
1,5	2,0	81,5	82,5	82,5	82,5
2,2	3,0	82,5	84,0	84,0	81,5
3,7	5,0	85,5	85,5	85,5	84,0
5,5	7,5	85,5	87,5	87,5	85,5
7,5	10,0	87,5	87,5	87,5	87,5
11	15,0	97,5	88,5	89,5	88,5
15	20,0	88,5	90,2	89,5	89,5
18,5	25,0	89,5	91,0	90,2	89,5
22,0	30,0	89,5	91,0	91,0	90,2
30,0	40,0	90,2	91,7	91,7	90,2
37,0	50,0	90,2	92,4	91,7	91,0
45,0	60,0	91,7	93,0	91,7	91,7
55,0	75,0	92,4	93,0	93,0	93,0

POTÊNCIA NOMINAL		Velocidade Síncrona rpm			
kW	cv	3600	1800	1200	900
		Rendimento Nominal			
75,0	100,0	93,0	93,6	93,0	93,0
90,0	125,0	93,0	93,6	93,0	93,6
110,0	150,0	93,0	94,1	94,1	93,6
150,0	200,0	94,1	94,5	94,1	94,1

**FIGURA V.5 – Valores de Rendimentos Mínimos à Plena Carga –
Motores de Alto Rendimento**

(Tabela 17 - Norma ABNT - NBR 7094 – item 13 Rendimento e Perdas)

Para quaisquer outros motores de indução não há valores mínimos de rendimento normalizados nem método de ensaio estabelecido. O fabricante deve marcar o rendimento na placa de identificação e indicar o método de ensaio nas propostas e catálogos.

O rendimento mínimo da linha Alto Rendimento não deve ser inferior ao valor obtido no ensaio, aplicando-se ao rendimento nominal da Figura V.5, a tolerância estabelecida na seção 20 / tabela 22 – tolerâncias para rendimento, da referida norma.

rendimento η (valor em p.u.)

grandeza	tolerância
$\eta \geq 0,851$	- 0,20 (1 - η)
$\eta < 0,851$	- 0,15 (1 - η)

Figura V.6 Tolerância de rendimentos

NORMA ABNT - NBR 7094 – item 13 Rendimento e Perdas

notas:

- 1) tolerância superior, sem limites.
- 2) rendimento nominal é o rendimento médio de uma grande quantidade de motores do mesmo projeto.
- 3) o valor do rendimento deve ser expresso em porcentagem com três dígitos.

V.3.1 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO

A norma ABNT, NBR 7094, item 13.2 – Determinação do Rendimento e das Perdas, estabelece que os motores da linha Alto Rendimento e da linha Padrão ou Standard, o rendimento e as perdas devem ser determinados de acordo com o método de ensaio da norma ABNT NBR 5383, denominado “ensaio dinanométrico”, com medição indireta das perdas suplementares e medição direta das perdas Joule no estator e rotor, no núcleo e por atrito e ventilação.

A norma NBR 5383 - item 12.7.1 – Rendimento Comentado e Precisão na Determinação do Rendimento, estabelece que o rendimento garantido é o determinado pela adição de todas as parcelas de perdas, para cada solicitação de carga ou carregamento.

A norma também ressalta que para pequenos motores e rendimento da ordem de 90 %, o rendimento poderá ser determinado pelas medidas das potências absorvidas e fornecidas.

Para a determinação do rendimento nos diversos carregamentos, as parcelas correspondentes à cada perda são obtidas e separadas pelos seguintes ensaios:

1. Ensaio em vazio, com tensão variável e frequência nominal
2. Ensaio em carga, com tensão e frequência nominais

V.3.1.1 ENSAIO EM VAZIO, COM TENSÃO VARIÁVEL E FREQUENCIA NOMINAL

Este ensaio é descrito e fundamentado no item 12.8.1 da norma ABNT NBR 5383 - perdas independente de corrente.

O ensaio é realizado com o motor desacoplado da carga e com ponta de eixo totalmente livre. As medições dos valores de potência absorvida e corrente de linha são efetuadas para os diversos valores de tensão variável à frequência nominal.

A potência absorvida é constituída pelas parcelas;

- perdas no ferro, na tensão do ensaio
- perdas mecânicas (atrito e ventilação)
- perdas no enrolamento do estator

Na condição de ensaio sem carga, o escorregamento é praticamente nulo e as perdas no enrolamento do rotor são desprezíveis. O conjugado desenvolvido pelo motor é apenas o necessário para vencer os conjugados resistentes de atritos e ventilação inerentes ao seu funcionamento e que são considerados constantes no ensaio.

O ensaio é realizado com alimentação de fonte de tensão trifásica e variável. Ao reduzir em demasia a tensão, o conjugado motor desenvolvido é substancialmente diminuído e os conjugados resistentes aumentam o escorregamento. A corrente de linha também aumenta e causa acréscimo das perdas do enrolamento do rotor. Nessas

condições, as perdas de atrito e ventilação não podem ser mais considerados constantes.

Portanto, durante o ensaio com a redução da tensão de alimentação, monitora-se a corrente de linha e deve ser observada a recomendação da norma de ensaio, item 13.6.1, na qual a redução da tensão não cause aumentos acima de 15 a 30% do valor da corrente inicial do ensaio. Normalmente para os motores elétricos industriais, a redução da tensão de alimentação até níveis de 30% da tensão nominal o ensaio poderá ser realizado com a consideração de escorregamento próximo a zero. O menor valor da tensão de ensaio de vazio é $V_{L\text{mín}}$.

Na operação em carga nominal o escorregamento para os pequenos motores poderá atingir 5%, mesmo assim as perdas de atrito e ventilação são consideradas constantes.

A potência absorvida no ensaio, denominada de perdas rotacionais, P_{10} , é a soma das parcelas:

$$P_{10} = P_{\text{CU}10} + P_{\text{FE}} + P_{\text{A,V}} \quad [\text{V.9}]$$

- P_{FE} Perdas no ferro e variam conforme a expressão:

$$P_{\text{FE}} = K_{\text{FE}} \times V_L^2 \quad [\text{V.10}]$$

V_L Tensão de alimentação de linha.

- $P_{\text{CU}10}$ Perdas no enrolamento do estator do ensaio determinadas por:

$$P_{\text{CU}10} = (3/2) \times R_{\text{MED}} \times I_L^2 \quad [\text{V.11}]$$

R_{MED} Resistência ôhmica (c.c.) medida entre dois terminais do motor

I_L Corrente de linha.

A resistência R_{MED} deve ser corrigida para a temperatura de referência conforme norma e descrito no item V.2.1

- $P_{A,V}$ Perdas de atrito e ventilação, consideradas constantes durante o ensaio, até o limite de $V_{L\text{MÍN}}$.

A subtração de P_{10} de P_{cu10} resulta:

$$P_{10} - P_{cu10} = P_{FE} + P_{A,V} = K_{FE} \times V_L^2 + P_{A,V} \quad [V.12]$$

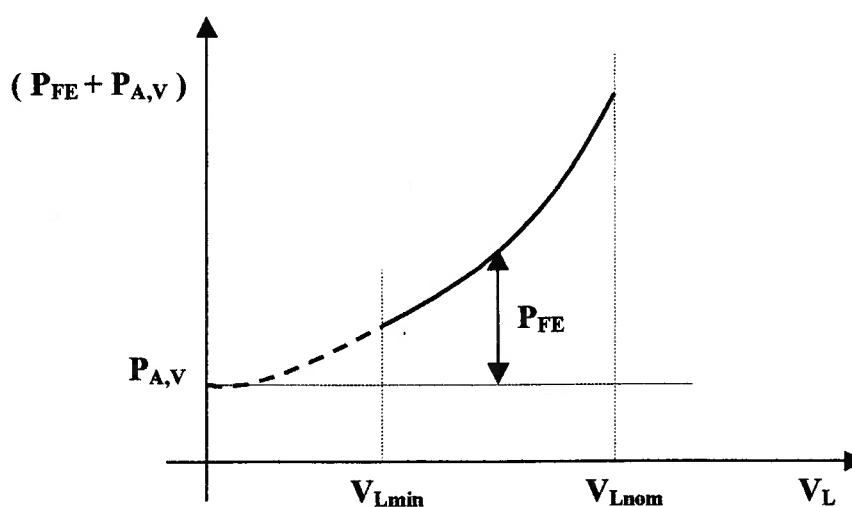


Figura V.7: Gráfico $(P_{FE} + P_{A,V}) \times V_L$

No gráfico de $(P_{FE} + P_{A,V}) \times V_L$ a separação P_{FE} de $P_{A,V}$ é obtida pela extrapolação de V_L para o valor nulo. Para V_L nulo o valor de $(P_{FE} + P_{A,V})$ é o próprio valor das perdas de atrito e ventilação, $P_{A,V}$. Todavia, afim de evitar na função quadrática a extrapolação para V_L e se obter maior precisão na separação das perdas é construído o gráfico de $(P_{FE} + P_{A,V}) \times V_L^2$, que é linear e apresenta o aspecto da Figura V.8.

O valor de P_{FE} é determinado graficamente para qualquer tensão pela subtração de $P_{A,V}$ do valor agregado de $(P_{FE} + P_{A,V})$. De particular interesse é determinado P_{FE} para a tensão nominal.

No ensaio de vazio determina – se as perdas rotacionais e as perdas que são consideradas constantes com a carga, ou seja perdas no ferro e perdas de atrito e ventilação

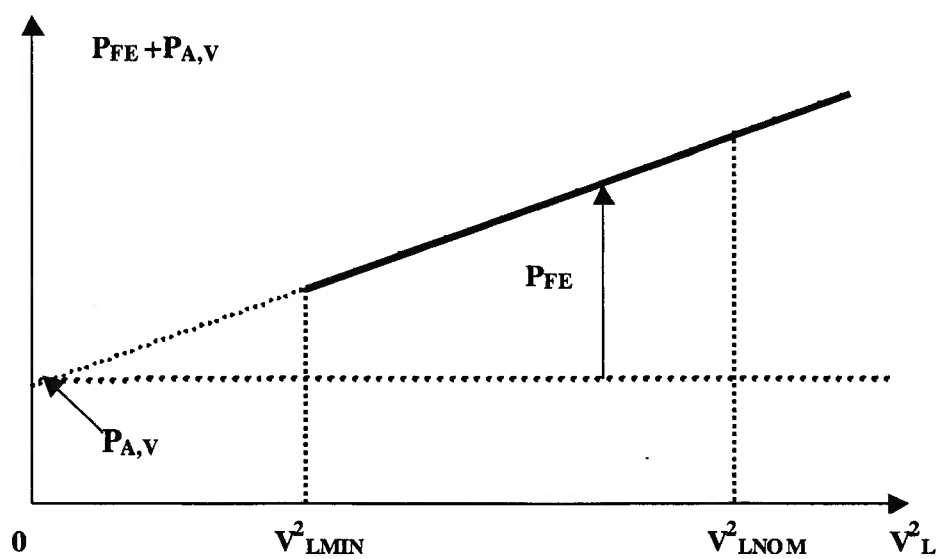


Figura V.8: Gráfico ($P_{FE+PA,V}$) x V^2_L

V.3.1.2 ENSAIO EM CARGA, COM TENSÃO CONSTANTE E FREQUENCIA NOMINAL

Inicialmente com utilização de freio, aplica-se plena carga ao motor e após a estabilidade da temperatura, a potência elétrica absorvida no ensaio em carga, P_{ABS} , é o resultado da soma das parcelas de perdas e da potência entregue a carga acionada, ou seja:

$$P_{ABS} = P_{CU1} + P_{FE} + P_{CU2} + P_{A,V} + P_{SC} + P_{MEC} \quad [V.13]$$

P_{CU1} Perdas no enrolamento do estator em carga.

P_{CU2} Perdas no enrolamento do rotor em carga.

P_{SC} Perdas suplementares em carga.

P_{MEC} Potência mecânica desenvolvida no motor e entregue a carga.

- Perdas no enrolamento do estator em carga (P_{CU1})

as perdas no enrolamento do estator em carga, P_{CU1} , são determinada por:

$$P_{CU1} = (3/2) \times R_{MED} \times I_L^2 \quad [V.14]$$

I_L Corrente de linha em carga, obtida por leitura no ensaio

R_{MED} Resistência ôhmica medida entre dois terminais do motor na temperatura de referência.

- Perdas no enrolamento do rotor em carga (P_{CU2})

As perdas no enrolamento em carga, P_{CU2} são determinadas conforme estabelece o item 12.8.2.2 da norma 5383 ABNT, pela equação:

$$P_{CU2} = s \cdot P_2, \quad [V.15]$$

s escorregamento em pu, obtido no ensaio, pela leitura da rotação em cada carregamento e pela rotação síncrona.

P_2 Potência eletromagnética enviada pelo estator ao rotor ou potência total do rotor, determinada por:

$$P_2 = P_{ABS} - P_{CU1} - P_{FE} \quad [V.16]$$

$$P_{CU2} = s.P_2 = s.(P_{ABS} - P_{CU1} - P_{FE}) \quad [V.17]$$

- Perdas suplementares ou adicionais em carga (P_{SC})

O item 12.8.3 da norma NBR 5383 admite que as perdas suplementares em carga, P_{SC} , variam com o quadrado da corrente primária ou de alimentação e que o seu valor total, na carga nominal é 0,5% (meio por cento) da potência absorvida, P_{ABS} , correspondente à potência nominal do motor, P_n .

Então, o cálculo das perdas suplementares para determinada carga é realizado como segue:

$$P_{SC} = 0,005. (P_n / \eta_n) . (I_L / I_{Ln})^2 \quad [V.18]$$

η_n Rendimento do motor para a carga nominal

I_{Ln} Corrente nominal de linha do motor

V.3.1.3 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO

V.3.1.3.1 MÉTODO DE SEPARAÇÃO DAS PERDAS

Com as considerações expostas o rendimento, η , obtido pelo método da separação das perdas, para cada carregamento, é determinado em porcentagem por:

$$\eta (\%) = [P_{MEC} / (P_{CU1} + P_{FE} + P_{CU2} + P_{A,V} + P_{SC} + P_{MEC}).] 100 \quad [V.19]$$

P_{MEC} Potência fornecida a carga obtida pelas leituras do conjugado no freio e rotação do rotor.

V.3.1.3.2 MÉTODO DIRETO

A norma também estabelece que para os pequenos motores e rendimento da ordem de 90 %, poderá ser determinado pelo método direto através das leituras das potências elétrica absorvida, P_{ABS} , e potência mecânica fornecida a carga, P_{MEC} :

$$\eta (\%) = [P_{MEC} / P_{ABS}] \cdot 100 \quad [V.20]$$

V.4 REDUÇÃO DE PERDAS

Os motores de Alto Rendimento são construídos com projetos otimizados e materiais das melhores qualidades, objetivando a redução das perdas.

Portanto, deve-se buscar reduções em cada uma das parcelas que compõem as perdas até o limite de viabilidade econômica. Não é possível a redução sistemática das perdas acima de limites físicos e que tornem proibitivo o custo do acréscimo do rendimento à partir desse limite. A redução de cada uma das parcelas de perdas é conseguida no projeto e fabricação dos motores com as seguintes principais inovações tecnológicas e procedimentos básicos:

1º Perdas Joule no estator: são reduzidas pela diminuição da resistência ôhmica através do aumento da seção dos condutores e redução das cabeças de bobinas. Normalmente este aumento de seção de cobre nos motores de Alto Rendimento é de aproximadamente 10% quando comparado com os enrolamentos dos motores Standard. A temperatura é outro item que influencia as perdas Joule.

Nos enrolamentos os tipos escolhidos são os que permitem excelente ventilação e contribuem para reduzir a temperatura de operação.

As Figuras V.9 e V.10 ilustram, respectivamente, os gráficos comparativos das linhas Alto Rendimento e Standard dos acréscimos de temperatura dos enrolamentos do rotor e do estator, á plena carga, de determinada marca americana de motor industrial , realizadas por Oak National Laboratory - EUA.

2º Perdas Joule no rotor: também são reduzidas de modo semelhante ao do estator. A excessiva diminuição da resistência do rotor compromete o conjugado de partida o que é um limitador para este procedimento. A fim de contribuir com a dissipação térmica e melhorar a ventilação, as barras do rotor são prolongadas de forma adequada.

3º Perdas no ferro: são reduzidas pela aplicação de chapas de aço de baixas perdas magnéticas. Procura-se também reduzir a densidade de fluxo magnético pelo aumento no volume do material magnético. Os núcleos dos motores da linha Alto Rendimento possuem maior volume de ferro ativo.

4º Perdas mecânica: são reduzidas pela otimização do ventilador e de toda a refrigeração do motor. Os motores de Alto Rendimento, por possuírem menores perdas normalmente requerem ventiladores com menores potências para ventilação.

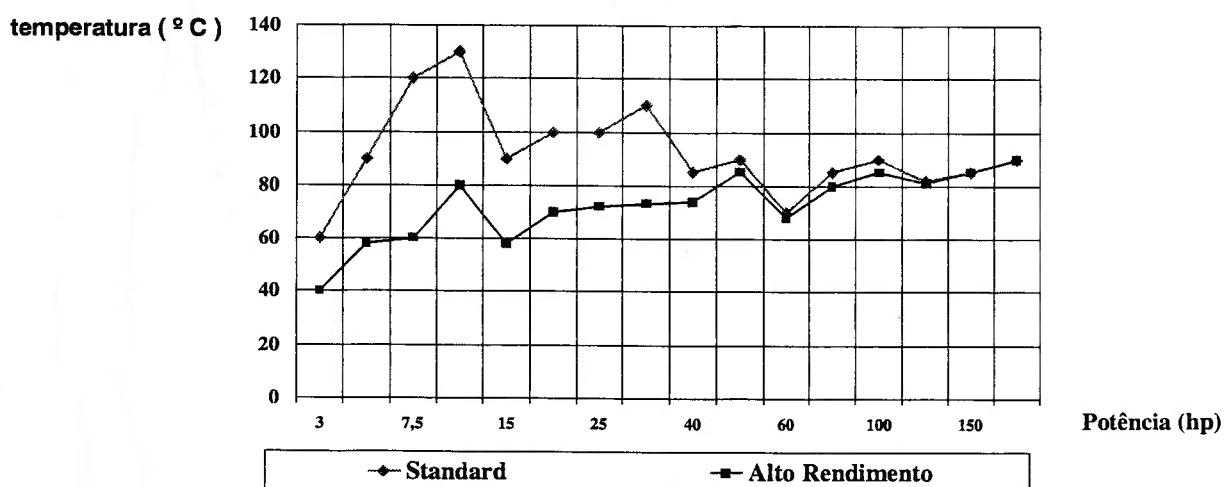


FIGURA V.9 ACRÉSCIMO DE TEMPERATURA NOS ROTORES
FONTE OAK NATIONAL LABORATORY - EUA

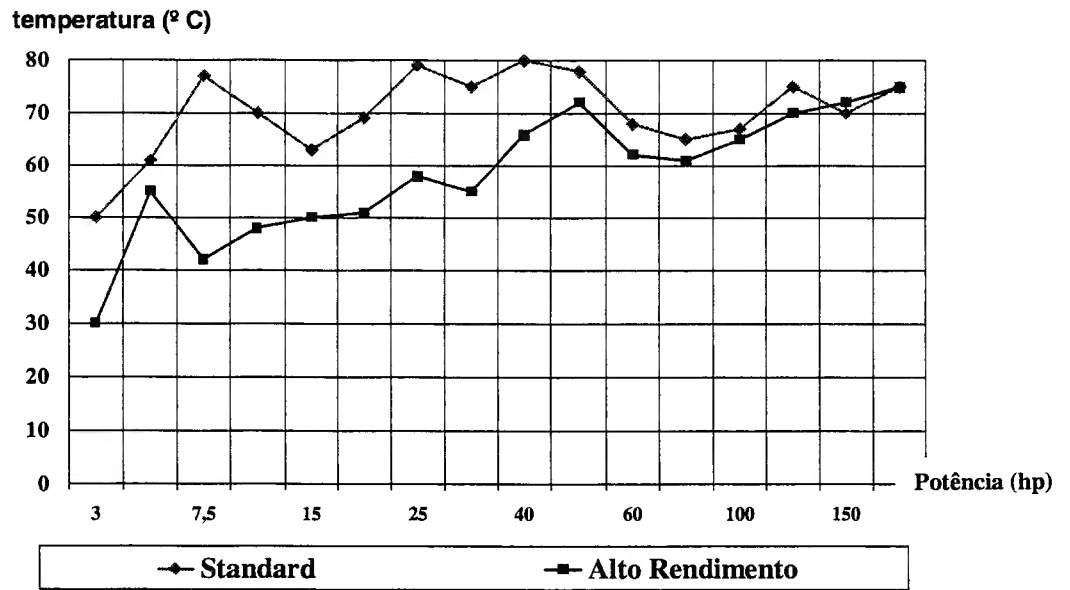


Figura V.10 Acréscimo de temperatura nos enrolamentos do estator

Fonte OAK NATIONAL LABORATORY – EUA- REF. 4

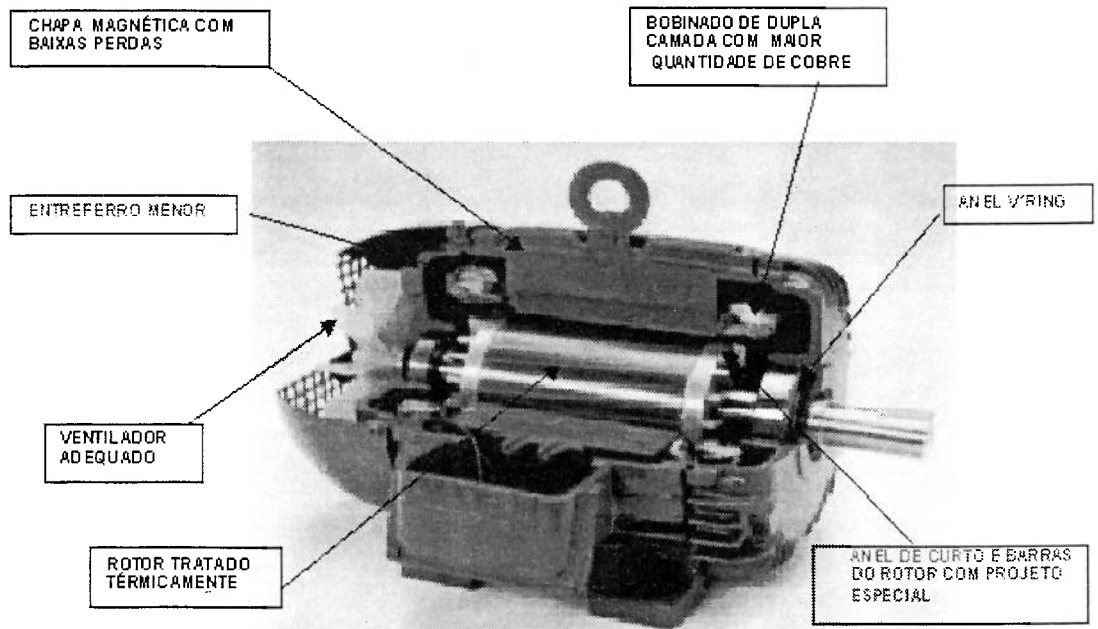


Figura V.11 Motor Industrial de Alto Rendimento. Cortesia Weg

5° Perdas suplementares: são minimizadas pelo desenho de enrolamentos que visam reduzir os fluxos dispersos das ranhuras e dentes do estator e rotor e também por reduzirem a pulsação do fluxo na região do entreferro.

6° Os motores de Alto Rendimento possuem maior precisão de montagem e perfeita centralização do conjunto estator/rotor. A redução das perdas nos rolamentos é conseguida pelo adequado alinhamento evitando a presença de apertos ou esforços excessivos.

7° Os entreferros dos motores de Alto Rendimento normalmente são menores e contribuem para a redução das correntes de magnetização e melhoria no fator de potência de toda a instalação.

AUMENTO DE CUSTO (%)

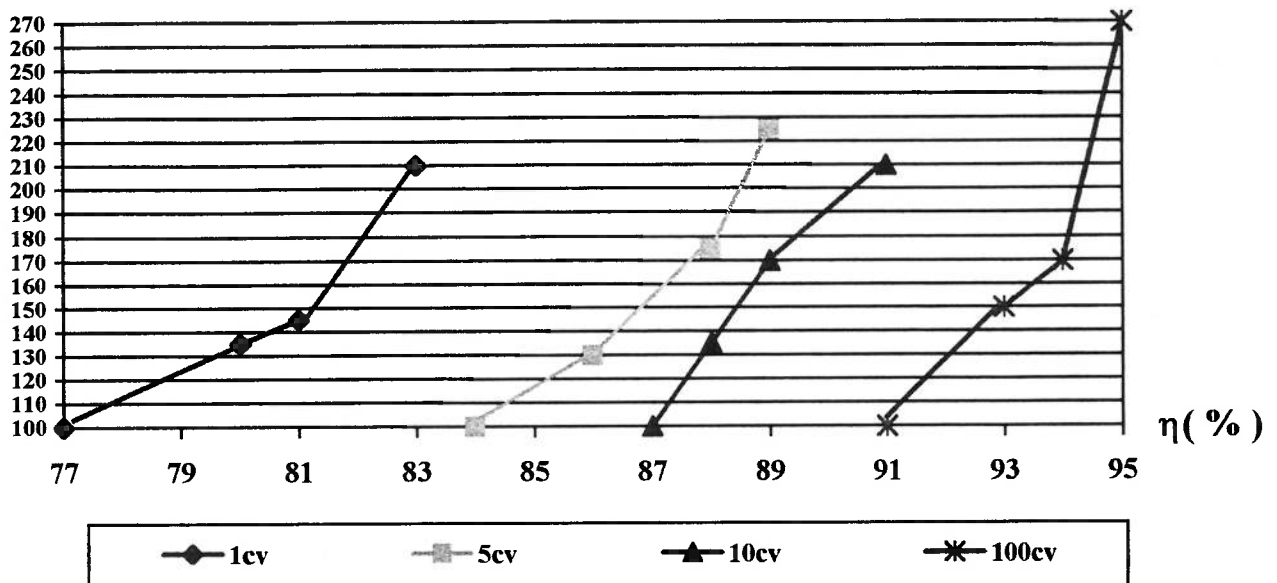


Figura V.12 Custos relativos em função do acréscimo de rendimento

Fonte: Catálogo Técnico Weg

A contínua busca de maiores rendimentos é limitada pelos substanciais acréscimos dos custos de fabricação, que alongam os retornos de investimentos e que os usuários não estão dispostos a absorver. A Figura V.12, apresenta os acréscimos de custos de fabricação das diversas potências, relativos a construção de motores com

maiores rendimento apresentados pelo fabricante Weg. No futuro podemos esperar motores com maiores rendimentos, proporcionados pelo desenvolvimento tecnológico e redução dos custos de fabricação.

V.5 VANTAGENS ADICIONAIS E CUIDADOS PELA UTILIZAÇÃO DE MOTORES DA LINHA DE ALTO RENDIMENTO

As melhorias inseridas nos projetos e fabricação dos motores de Alto Rendimento também implicam em vantagens adicionais de difícil avaliação econômica, destacando-se:

- apresentam menores perdas, operam mais frios e disponibilizam maiores fatores de serviço, portanto maior duração dos rolamentos e dos materiais de isolamento,
- as montagens são de melhor qualidade e por possuírem alinhamentos de maior precisão operam com menores vibrações,
- possuem menores ventiladores e operam de modo mais silencioso além de introduzirem menores aquecimentos no ambiente,
- apresentam menor nível de defeitos e maior expectativa de vida útil, os fabricantes estimam em até 15 anos. Os motores da linha Standard possuem expectativa de vida útil de 10 anos,
- custo de manutenção preventiva é menor, pois apresentam elevada reserva térmica e os períodos de troca ou de relubrificação dos rolamentos são maiores,
- as perdas nas instalações são menores por apresentarem em geral menores de correntes em operação,

- os entreferros dos motores de Alto Rendimento também são usualmente menores, apresentam reduzidas correntes em vazio e introduzem menor consumo de reativos indutivos, contribuindo para melhor fator de potência da instalação.

Nos motores que operam com baixas cargas a redução das perdas rotacionais da linha Alto Rendimento implica considerável aumento do rendimento e reduzido consumo de energia na condição de motor ligado em vazio.

Salienta-se que nos projetos dos motores Alto Rendimento, cuidados adicionais devem ser observados pelo aumento da corrente de partida devido a redução das impedâncias, intrínsecas às melhorias introduzidas, e também a tendência de redução do conjugado de partida, caso a resistência do rotor seja excessivamente diminuída.

V.6 JUSTIFICATIVA PARA UTILIZAÇÃO DE MOTORES DE ALTO RENDIMENTO

Os motores da linha Alto Rendimento possuem valores de aquisição mais elevados, cerca de 15 à 50 % do que os motores da linha Standard, todavia o rendimento é de 2 a 6 pontos percentuais superior, mesmo nas condições de baixos valores de carga.

Essa diferença é traduzida em menor quantidade de perdas para a mesma potência mecânica disponível no eixo. Ao longo da vida útil, o custo inicial de aquisição do motor Alto Rendimento é plenamente compensado pelo baixo consumo de energia em operação. A justificativa para se utilizar motores Alto Rendimento, é avaliada pela quantidade do número de horas de utilização.

É importante ressaltar o trabalho apresentado pela Weg, mostrando curvas de acréscimo dos custos relativos em função do aumento dos rendimentos dos motores industriais. A Figura V.12 mostra com clareza que a busca por maiores rendimentos traduz aumentos consideráveis de custos que inviabilizam a sua aplicação. Observa-se da figura que para o motor de 10 cv e rendimento nominal de 87 % é possível se obter o rendimento de 89 % com acréscimo de custo de 70 % . Para o rendimento de 91 % o acréscimo é 110 %, valores que atualmente dificilmente seriam aceitos pelo usuário.

Nos programas de análise e estudo de viabilidade apresentados pelos fabricantes, é considerado que o motor opera no regime de carga constante e possui rendimento único e igual ao nominal. Quando a operação é sob cargas variáveis estima-se um fator de carga constante para todo o ciclo de operação.

Nos ciclos de operação com cargas extremamente variáveis, incorre-se em erro quando da determinação da energia consumida nos carregamentos menores que 50 % do valor nominal, pois o rendimento não é constante e substancialmente inferior ao rendimento nominal.

O trabalho apresenta metodologia para minimizar este erro de avaliação, permitir ao usuário critérios para o correto dimensionamento da potência do motor além de fornecer indicadores econômicos para análise financeira e decisão da melhor escolha para o projeto.

VI DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO DE INDUÇÃO – TIPO ROTOR DE BARRAS

VI.1 A IMPORTÂNCIA DO DIMENSIONAMENTO

Pesquisas realizadas por concessionárias indicam que grande maioria dos motores operam com potência abaixo do seu valor nominal. Para quantificar essa informação, estudos efetuados pela CEMIG – Centrais Elétricas de Minas Gerais – na sua área de concessão, registraram que no universo de 3425 motores, equivalente a 78.850 cv, 28,7 %, encontravam-se superdimensionados e 5,9 % com sobrecarga.

O dimensionamento com excessiva margem de segurança, o desconhecimento das cargas, tamanhos preferenciais ou padronizados e requisitos de elevados conjugados de partida implicam que a grande quantidade dos motores atualmente instalados no Brasil, por grande período de sua vida útil, operam com cargas inferiores a 50 % da potência nominal e muitas vezes por longos períodos, praticamente sem carga.

VI 2 REQUISITOS PRELIMINARES PARA O DIMENSIONAMENTO

O processo da correta seleção do motor, deve atender aos seguintes requisitos básicos compatíveis com o local da instalação e aplicação da carga:

- Fonte de Alimentação: tensão C.A. trifásica equilibrada
- Frequência: no Brasil 60 Hz.
- Especificação da Carga: aspecto da curva de conjugado resistente e respectivos valores de conjugados de partida e nominal, rotação nominal, regime de

funcionamento (contínuo ou intermitente), ciclo de aplicação da carga (constante ou variável) e o número de partidas frenagens ou reversões por hora.

- Condições Ambientais: temperatura ambiente, altitude, umidade relativa, presença de gases, pós ou elementos químicos que possam influenciar na confiabilidade de operação do motor.

VI.3 POTÊNCIA DO MOTOR E REGIME DE OPERAÇÃO

VI.3.1 ASPECTOS PRINCIPAIS

A Norma ABNT NBR 7094, item 5.4 define a potência nominal do motor como sendo a potência mecânica disponível no eixo acompanhado da definição do regime tipo de trabalho. Quando não houver definição do regime - tipo, entende-se como contínuo com carga constante, S-1.

Preliminarmente para o dimensionamento da potência nominal do motor elétrico trifásico, os seguintes principais aspectos são considerados:

- Capacidade do conjugado motor desenvolvido superar o conjugado resistente, desde a condição de repouso até o regime;
- A elevação de temperatura, proveniente das perdas nas condições de partida, regime e frenagens ser limitado à classe de temperatura do motor.

Nos regimes de cargas intermitentes, normalmente a primeira condição prevalece sobre a segunda, pois é possível apropriar grandes potências ou conjugados em tempos relativamente curtos de modo a não prejudicar a integridade dos materiais de isolamento. Os períodos de repouso devem permitir o adequado resfriamento para o período seguinte de carga.

No regime de carga constante, não há períodos de resfriamento e assim a segunda condição prevalece sobre a primeira.

Nos momentos da partida, períodos relativamente curtos, as perdas por efeito Joule são substancialmente superiores àquelas que se verificam em regime. A norma brasileira ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 7094 classifica o motor como regime S-1, se o número de partidas for tal que o aquecimento proveniente dessa condição for desprezível, quando comparado com a temperatura do motor em regime.

O regime de operação é classificado como intermitente quando solicitado por curtos períodos e permanece em funcionamento, em vazio ou desligado em repouso, entre duas sollicitação de carga e a temperatura não ultrapassar o limite da classe térmica.

Caso o motor no regime intermitente permanecer desligado, em repouso, nas carcaças tipo auto - ventilados, deve-se controlar o número de partidas pois a ausência de ventilação poderá produzir sobre elevação de temperatura acima da classe térmica. Como agravante, durante a nova partida a elevada corrente produz excessivos sobreaquecimentos que contribuem para danificar o motor.

A diferença entre os regimes de serviço contínuo ou intermitente refere-se à variação de carga no tempo. Os regimes reais, normalmente são irregulares e não se enquadram perfeitamente nos regimes definidos pelas normas. O ciclo de operação escolhido para análise e dimensionamento deve ser o de maior sollicitação mecânica.

VI.3.2 POTÊNCIA NOMINAL

A potência nominal, P_n , é a potência constante na qual o motor está dimensionado e construído para operar continuamente, regime S-1 da norma ABNT, nas condições ambientais especificadas, com tensão e frequência de alimentação da rede nos valores nominais. Nos casos em que houverem desligamentos, os mesmos serão suficientemente longos para o motor retornar à temperatura ambiente e estar apto para novo processo de partida.

Nos regimes de cargas variáveis a potência nominal é definida pelo conceito de potência eficaz. Todavia é necessário também considerar as características do local da instalação e verificar o tempo de aceleração e ainda se a limitação da potência do motor devido as condições de partida e parada, é adequada para o ciclo de operação.

VI 4 DIMENSIONAMENTO PARA CARGAS EM REGIME VARIÁVEL

O trabalho focaliza o estudo de viabilidade econômica para escolha entre as alternativas de motores tipo Standard ou de Alto Rendimento, na condição de cargas variáveis, com alimentação direta da rede de alimentação ou com métodos convencionais de partida, todavia sem acionamentos ou controles eletrônicos.

Nas condições de cargas menores que 50 % da potência nominal do motor, o rendimento não é constante e a análise não poderá ser realizada apenas utilizando um único fator de carga.

A condição de carga variável inclui também aquele estabelecido pela Norma ABNT – NBR 7094, item 5.1.2, regime para cargas distintas, tipo S-10, definido como segue:

“Regime incluindo no máximo quatro valores distintos de carga (ou cargas equivalentes), cada valor sendo mantido por tempo suficiente para que o equilíbrio térmico seja atingido”.

Conforme determina o anexo C da norma ABNT NBR 7094, as cargas P_i , ($i = 1, 2, 3$ e 4) equivalem a qualquer momento ao regime S-1 (carga constante, com temperatura térmica equilibrada).

Os valores P_i , no período Δt_i , não são cargas necessariamente constantes e sim cargas equivalentes calculadas pela integração dos valores de potência no período Δt_i . No regime tipo S-10 uma potência constante e adequadamente determinada é definida como potência eficaz e escolhida como a potência nominal do motor.

VI.5 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

A escolha da potência nominal para operação contínua não oferece qualquer dificuldade, pois coincide com o conceito de potência nominal do motor corrigida para as condições locais da instalação devido a altitude e temperatura ambiente.

Nos regimes intermitentes de cargas variáveis, com períodos de repouso ou de operação em vazio e seqüência de partidas torna-se necessário para o correto dimensionamento do motor considerar os conceitos de potência eficaz e potência disponível.

Os critérios para o dimensionamento podem ser listados nos seguintes itens fundamentais:

- 1) Dimensionamento pelo critério de Potência Eficaz; corrigida pelos efeitos da altitude e temperatura no local da instalação
- 2) Dimensionamento pelo critério do Conjugado Máximo Motor;
- 3) Dimensionamento pelo critério de Potência Disponível;
- 4) Dimensionamento pelo critério do Tempo de Aceleração;

VI.5.1 DIMENSIONAMENTO PELO CRITÉRIO DA POTÊNCIA EFICAZ

A potência eficaz do motor para um ciclo intermitente e de cargas variáveis conforme o ciclo de cargas da Figura VI.1, com tensão e rotação constantes, ou seja ventilação normal e potência variável é justificado pelas seguintes razões:

- 1) A quantidade de calor Q_C , gerado pelas perdas com o motor operando com a potência constante e nominal P_n durante o período T é determinado por:

$$Q_C = A.T + B.P_n^2.T, \quad \text{com } A \text{ e } B \text{ constantes.} \quad [\text{VI.1}]$$

$A.T$ é a parcela do calor gerado ou energia dissipada, no tempo T , devido as perdas rotacionais e que são constantes (perdas mecânicas, perdas magnéticas e perdas Joule em vazio).

$B.P_n^2.T$, é a parcela do calor gerado ou energia dissipada no tempo T , pelas perdas por efeito Joule, ou variáveis com a carga.

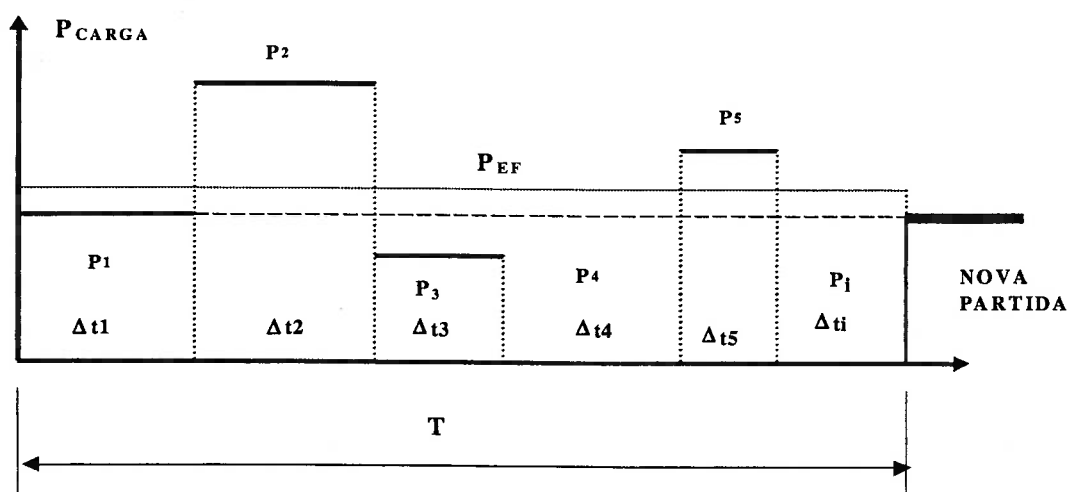


Figura VI.1 Dimensionamento para cargas variáveis

- 2) Para um ciclo completo de operação com carga variável, inicialmente supondo-se que na condição sem carga o motor continue operando em vazio e ventilação preservada, embora na presença das perdas rotacionais.

$$Q_i = A \cdot T + B \cdot \sum_{i=1}^n P_i^2 \cdot \Delta t_i \quad [VI.2]$$

$$T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad [VI.3]$$

- 3) Igualando as duas expressões, equações VI.1 e VI.2, ou seja, impondo que a quantidade de calor produzido pelo regime constante, \$Q_C\$, seja idêntica a quantidade de calor do regime intermitente, \$Q_i\$, tem-se:

$$Q_C = Q_i, \text{ ou } A \cdot T + B \cdot P_n^2 \cdot T = A \cdot T + B \cdot \sum P_i^2 \cdot \Delta t_i \quad [VI.4]$$

$$\text{Logo, } T \cdot P_n^2 = \sum P_i^2 \cdot \Delta t_i \quad [VI.5]$$

$$\therefore P_n = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 \cdot \Delta t_i}{T}} \quad [VI.6]$$

Nas situações nas quais a condição sem carga é também de repouso, potencia P_i da Figura VI.1, as perdas rotacionais são nulas e para os motores tipo auto - ventilados a ausência de refrigeração causa aumento de temperatura do motor pelo calor gerado anteriormente ao desligamento.

Experimentalmente verificou-se que a introdução da constante K_v , fator de ventilação, introduzido na expressão a fim de considerar os efeitos de aumento de temperatura devido ao repouso do motor, corrige convenientemente o valor da potência eficaz.

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 \cdot \Delta t_{if}}{\sum [\Delta t_{if} + \frac{\Delta t_{ir}}{K_v}]} \quad [VI.7]$$

Δt_{if} Período do motor ligado em funcionando com a carga P_i , inclusive com carga nula ($P_i = 0$).

Δt_{ir} Período do motor desligado e em repouso .

K_v Coeficiente de ventilação, depende do tipo de ventilação do motor e normalmente oferecido pelo fabricante.

Usualmente $3 \leq K_v \leq 4$ para motores auto ventilados (abertos ou fechados) e $K_v \cong 1,0$ para motores nos quais a ventilação é independente do funcionamento do motor (ventilação forçada ou motor sem nenhuma ventilação).

Os fabricantes nacionais indicam em seus catálogos $K_v = 3,0$ para os motores industriais, construção auto ventilados de carcaça aberta ou totalmente fechada, linhas Standard ou de Alto Rendimento.

O valor da potência nominal do motor, P_n , deve ser inicialmente superior ao valor da potência eficaz, P_{EF} , logo:

$$P_n > P_{EF}$$

VI.5.1.1 CORREÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL DEVIDO A ALTITUDE E TEMPERATURA DO LOCAL DA INSTALAÇÃO.

A potência nominal estabelecida pela norma ABNT NBR 7094, é para locais de altitudes limitadas a 1.000 m e temperaturas ambiente máxima de 40° C.

O Brasil, país de enorme dimensão e clima tropical, as temperaturas mínimas raramente, em alguns poucos locais e épocas específicas do ano, atingem zero graus centígrados, todavia instalações em locais de temperaturas ambiente até 60° C são mais comuns.

Nas temperaturas ambientes superiores a 40° C além da redução da capacidade do meio refrigerante há a limitação do sobreaquecimento produzido pelas próprias perdas do motor em operação.

Altitudes acima de 1.000 metros possuem ar rarefeito que reduzem a capacidade de refrigeração do motor. A norma ABNT, NBR 7094, estabelece que os limites de elevação de temperatura da classe de isolamento, devem ser reduzidos de 1% para cada 100m de altitude acima de 1.000m.

A potência eficaz deve ser corrigida devido aos efeitos da altitude e temperatura máxima ambiente no local da instalação. É importante ressaltar que perdas de refrigeração pelo aumento da altitude poderão ser devidamente compensadas pela diminuição da temperatura ambiente.

O fabricante Weg apresenta no catálogo técnico uma tabela com coeficientes de correção, K_{TH} , da potência nominal dos motores classe de isolamento B, em função das variáveis altitude (H) em metros e temperatura máxima ambiente (T_A) em °C, reproduzida na tabela da Figura VI.2.

T_A temperatura ambiente em °C

H altitude em metros

T_A / H	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m	3500m	4000m
10 °C	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
15 °C	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	0,99
20 °C	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	0,99	0,93
25 °C	1,05	1,05	1,05	1,05	0,98	0,93	0,88
30 °C	1,04	1,04	1,04	0,92	0,92	0,87	0,82
35 °C	1,02	1,02	0,96	0,91	0,86	0,81	0,77
40 °C	1,00	0,94	0,89	0,85	0,80	0,76	0,72
45 °C	0,92	0,87	0,83	0,78	0,74	0,70	0,67
50 °C	0,85	0,80	0,76	0,72	0,68	0,65	0,62
55 °C	0,77	0,74	0,70	0,66	0,63	0,60	0,57
60 °C	0,71	0,67	0,64	0,60	0,57	0,52	0,52

Figura VI.2 – Tabela de Coeficientes de Correção da Potência Nominal, K_{TH}

Fonte Catálogo Técnico Weg

No trabalho a metodologia adotada é de corrigir a potência eficaz para as condições locais da instalação do motor, efetuando-se o quociente de potência eficaz, determinada pelo ciclo de carga, pelo coeficiente, K_{TH} .

$$P'_{EF} = P_{EF} / K_{TH}$$

O valor da potência nominal, P_n , deve ser superior a potência eficaz, corrigida P'_{EF} , :

$$P_n > P'_{EF}$$

VI.5.2 DIMENSIONAMENTO PELO CRITÉRIO DA POTÊNCIA DISPONÍVEL

Nos momentos de partida e aceleração, as perdas Joule nos enrolamentos são excessivas e o acréscimo de temperatura não é desprezível. Em muitas aplicações para reduzir o tempo de parada o motor não é apenas desenergizado, mas também frenado com c.c aplicada ao enrolamento do estator. Em outras situações é usual também ser realizado a reversão elétrica (inversão de duas fases).

No aspecto térmico constata-se que uma frenagem impõe ao motor sobreaquecimento equivalente a três partidas sucessivas e uma reversão elétrica o mesmo que quatro partidas também sucessivas. Ref [1]

Portanto é necessário reduzir a potência do motor para suportar os sobreaquecimentos originários dessas condições de operação. A potência disponível para o motor acionar a carga é conceituada como a potência que poderá ser requerida do motor mesmo submetido a partidas, frenagens ou reversões, sem comprometer a sua integridade ou dos materiais isolantes.

A expressão para determinação da potência disponível é discutida e apresentada na Ref. [1]

$$P_{Disp} = P_n \cdot \sqrt{\frac{3600 - k_{pfr} \cdot N_p \cdot t_{AC} \cdot \left(\frac{I_p}{I_n}\right)^2}{3600 - 2 \cdot N_p \cdot t_{AC}}} \quad [\text{VI.8}]$$

P_{Disp} Potência disponível, para o motor acionar a carga.

k_{pfr} Coeficiente em função de:

partida $k_{pfr} = 1$

frenagem $k_{pfr} = 3$

reversão $k_{pfr} = 4$

N_p Número de partidas, frenagens ou reversões por hora

$\frac{I_p}{I_n}$ Relação entre as correntes de partida e nominal do motor

t_{AC} Tempo de aceleração (definido no item VI.5)

A potência disponível do motor para operar nas condições de partida e parada deve ser superior a potência eficaz corrigida e exigida pela carga em regime ou:

$$P_n > P_{Disp} > P'_{EF}$$

VI.5.3 DIMENSIONAMENTO PELO CRITÉRIO DO CONJUGADO MÁXIMO MOTOR E MAIOR CONJUGADO RESISTENTE EM REGIME

Outro aspecto do dimensionamento que deve ser considerado é que nos ciclos de carga variáveis há momentos que o maior conjugado resistente da carga, C_{Rmax} , é superior ao conjugado nominal do motor. Mesmo para essa situação, o motor escolhido deve possuir conjugado máximo, C_{Mmax} , que supere o maior conjugado resistente, incluindo margem de segurança de pelo menos 20 %, ou :

$$C_{Mmax} > 1,2 \cdot C_{Rmax}$$

A Figura VI.3 apresenta a curva do aspecto típico do conjugado do motor pela rotação e indicação dos pontos relevantes.

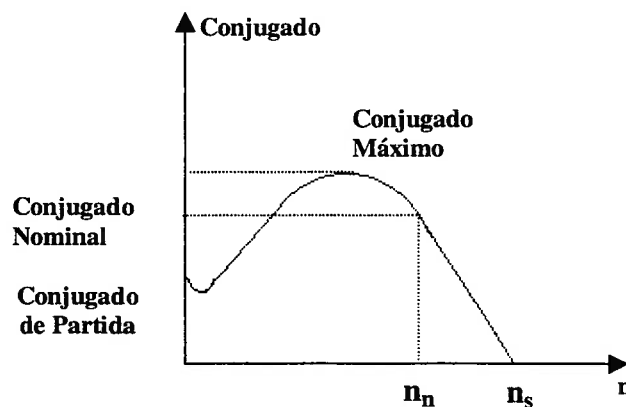


Figura VI.3 Curva típica de conjugado motor

O conjugado motor de partida, C_{MP} também deve ser sempre superior ao conjugado resistente de partida, C_O .

$$C_{MP} > C_O$$

VI.5.4 DIMENSIONAMENTO PELO CRITÉRIO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO

Os motores elétricos podem ser acionados desde o repouso até a rotação de regime, sob as seguintes condições de carga:

1. Sem qualquer solicitação de carga ou em vazio.
2. Com solicitação de carga ou de potência mecânica durante à partida.

Para a condição descrita no item 1, a curva do conjugado mecânico desenvolvida pelo motor, C_M , deve ser suficiente para acelerar a própria inércia do rotor e da carga até a rotação de regime de vazio, quando então é aplicada carga.

Na condição de partida com carga, item 2, é necessário que o motor desenvolva conjugado motor, C_M , sempre superior ao conjugado resistente de modo a acelerar a carga desde o repouso até a rotação de regime, em tempo suficiente para que o aquecimento produzido pelas altas correntes durante a partida, não danifiquem os enrolamentos e barras do rotor. É essencial para o motor que parte em carga o conhecimento do tempo de aceleração, t_{AC} , ou seja, o tempo necessário para o motor acionar à carga desde o repouso até a rotação de regime.

Os fabricantes recomendam que este tempo de aceleração não seja superior ao tempo máximo permitido ao motor permanecer com o rotor bloqueado, sob tensão e frequências nominais, incluindo um fator de segurança de pelo menos 20 %. Este tempo, específico para cada motor, é fornecido nos catálogos dos fabricantes e definido como Tempo Máximo de Rotor Bloqueado, t_{MRB} , e expresso em segundos.

A potência mecânica, P_{mec} , desenvolvida pelo motor e disponível na ponta do eixo é determinada pela equação:

$$P_{mec} = C_M \cdot w \text{ (Watts)} \quad [VI.9]$$

C_M Conjugado motor (N. m).

w Velocidade angular do rotor (radianos / segundo).

$$w = (2\pi \cdot n) / 60, \quad [VI.10]$$

n Rotação do rotor (rpm).

Os diversos tipos de cargas mecânicas aplicadas ao motor, de maneira geral, podem ser classificadas em cinco diferentes tipos, de acordo com a equação da variação do conjugado resistente da carga pela rotação.

As cargas mecânicas em geral, apresentadas na Figura VI.3, podem ser apresentadas pela equação genérica:

$$C_{carga} = C_0 + K_c \cdot n^e \quad [VI.11]$$

C_0 Conjugado de partida da carga.

K_c Constante.

n Rotação da carga (acoplamento direto coincide com a rotação do motor).

e Expoente, que poderá ser: -1, 0, 1 ou 2.

Os tipos de carga são diferenciados em função do expoente:

a) $e = 0$, carga constante ou independente da rotação.

$$C_{Carga} = C_0 + K_c = K, \text{ constante} \quad [VI.12]$$

Exemplos de cargas constantes: guinchos, gruas, guindastes e transportadoras

b) $e = 1$, carga linear.

$$C_{Carga} = C_0 + K_c \cdot n. \quad [VI.13]$$

Exemplos de cargas lineares: moinhos de rolos, bombas de pistão, plainas e serra de madeira.

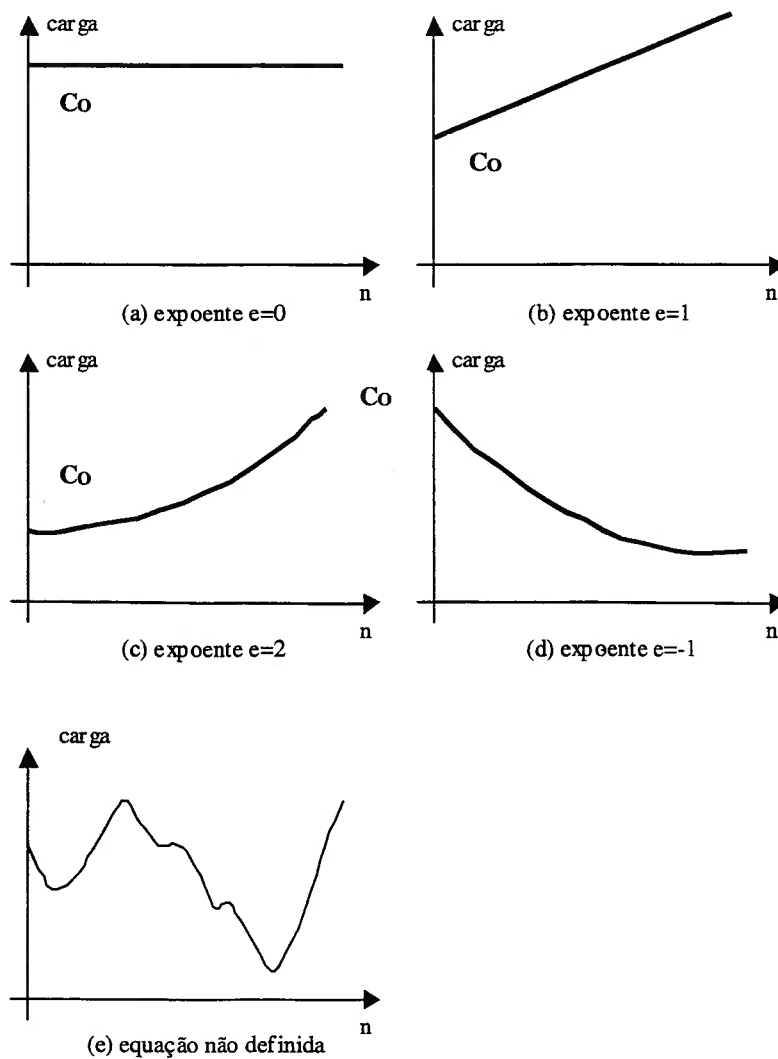


Figura VI.4 Tipos de carga aplicadas ao motor

c) $e = 2$, carga parabólica.

$$C_{\text{Carga}} = C_0 + K_c \cdot n^2. \quad [VI.14]$$

Exemplos de cargas parabólicas: ventiladores, centrífugas, bombas centrífugas, exaustores e compressores.

d) $e = -1$ e $C_0 = 0$, carga hiperbólica.

$$C_{\text{Carga}} = K_c / n \quad [VI.15]$$

Nas cargas hiperbólicas reais para $n = 0$, a constante C_0 , que representa o conjugado de partida, não é nulo.

Exemplos de cargas hiperbólicas: máquinas operatrizes (frezadoras e mandrilhadoras).

e) Carga com variação não definida com a rotação. São aplicações nas quais não é possível aproximações por funções matemáticas simples.

Exemplos de cargas não uniformes: forno rotativo de grande porte.

O dimensionamento do motor é adequado quando o conjugado motor desenvolvido, C_M , é suficiente para movimentar a carga desde o estado de repouso até o funcionamento com rotação de regime, na região estável da curva do conjugado motor. Para qualquer instante da partida o conjugado de aceleração desenvolvido, C_{AC} , é determinado por:

$$C_{AC} = C_M - C_{\text{Carga}} \quad [VI.16]$$

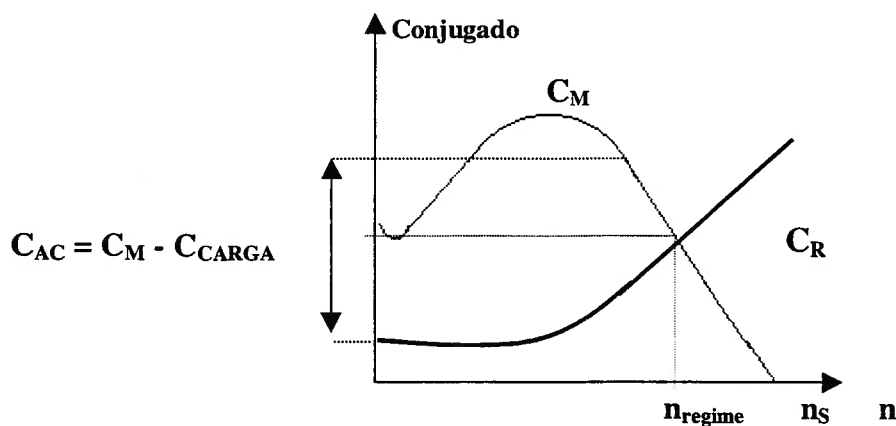


Figura VI.5: Curvas dos Conjugados motor, carga e de aceleração

Para a adequada aceleração, do repouso até a rotação de regime, C_{AC} deve ser sempre positivo e o tempo de aceleração, t_{AC} , é limitado afim de que o excessivo aquecimento do processo de partida não danifique o motor.

A Norma ABNT NBR 7094, item 6.1.1.6 – Requisitos de partida, especifica que o número de partidas dos motores industriais à frio, na temperatura ambiente é no máximo de duas consecutivas e para o motor à quente, que encontrava-se em funcionamento apenas uma. Para novos ciclos de partida é necessário, o motor voltar em todos os seus pontos à temperatura ambiente.

VI.5.4.1 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO (t_{AC})

VI.5.4.1.1 EQUAÇÕES GERAIS

Nos sistemas rotativos, a equação geral da mecânica que determina a relação entre conjugado de aceleração (C_{AC}) e a aceleração angular ($d\omega/dt$) da massa inercial J_t é determinada por:

$$C_{AC} = C_M - C_{Carga} = J_t \cdot d\omega / dt, \quad [VI.17]$$

$$J_t = J_{CR} + J_R \quad [VI.18]$$

J_t Momento de inércia total do rotor e da carga ($kg.m^2$).

J_R Momento de inércia do próprio do rotor ($kg.m^2$).

J_{CR} Momento de inércia da carga e acoplamento, referidos à velocidade de regime do motor ($kg.m^2$).

J_{CC} Momento de inércia da carga na rotação da carga n_C ($kg.m^2$)

O momento da carga referido à velocidade do motor pelo princípio da conservação da energia cinética e determinado por:

$$J_{CR} = (n_C / n)^2 \cdot J_{CC} \quad [VI.19]$$

$d\omega / dt$ Aceleração angular (rad / s²)

A norma ABNT NBR 7094 estabelece limites máximos de momento de inércia a ser aplicado ao motor na rotação nominal, afim de permitir as condições de duas partidas sucessivas com o motor frio, na temperatura ambiente e uma partida com o motor quente, na temperatura de operação e logo após o desligamento.

O momento de inércia máximo, J_{CCMAX} , permitido pela norma é :

$$J_{CCMAX} = 0,04 \cdot P_n^{0,9} \cdot p^{2,5} \quad [VI.20]$$

J_{CCMAX} Momento de inércia máximo (kgm²)

P_n Potência nominal (kW)

p Número de pares de pólos

O conjugado de aceleração, C_{AC} , é o conjugado desenvolvido pelo motor, C_M , subtraído de todos os conjugados resistentes, C_R , referidos à rotação do rotor, incluindo eventuais conjugados de atritos e resistentes inerentes aos acoplamentos e acionamentos (polias, correias, engrenagens, luvas elásticas, etc).

Do mesmo modo, a inércia total, J_t inclui os momentos de inércia do próprio rotor, da carga e do acoplamento, referido à velocidade do rotor.

A aceleração $d\omega/dt$, poderá ser determinada resolvendo-se à equação,

$$C_{AC} \cdot dt = J_t \cdot d\omega \quad \text{entre os instantes } t_1 \text{ e } t_2. \quad [VI.21]$$

$$\int_{t_1}^{t_2} C_{AC} \cdot dt = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J_t \cdot d\omega \quad [VI.22]$$

Com a redução do intervalo t_1 à t_2 de modo a considerar C_{AC} , constante tem – se:

$$C_{AC} \cdot (t_2 - t_1) = J_t \cdot (\omega_2 - \omega_1) \quad [VI.23]$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad e \quad \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \quad [VI.24]$$

$$\Delta t = J_t \cdot \Delta\omega / C_{AC} \quad [VI.25]$$

O tempo total de aceleração t_{AC} , entre os instantes da partida do repouso até a rotação de regime estável é o somatório dos Δt , ou $t_{AC} = \Sigma \Delta t$, determinado pelas respectivas curvas do conjugado motor, C_M e do conjugado resistente C_R .

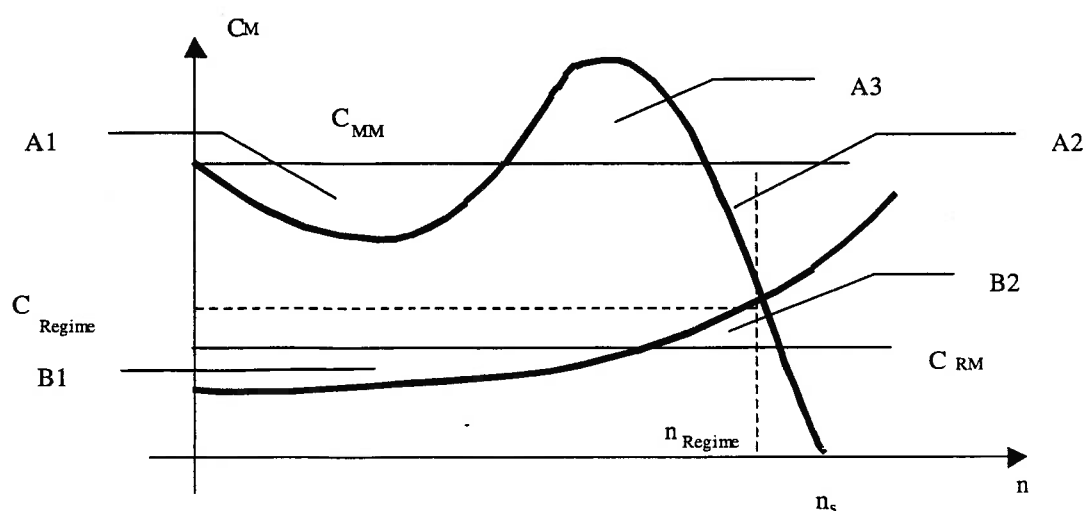


Figura VI.6 Curvas para determinação dos conjugados médios,
motor e resistente

A determinação de t_{AC} , poderá ser efetuado através da resolução das funções de C_M e C_R , por métodos gráficos e o conhecimento das curvas C_M e C_R .

A Figura VI.6, exemplifica a determinação gráfica dos conjugados médios motor, resistente e de aceleração. Todavia, os métodos aproximados considerando os

valores médios dos conjugados motor e resistente e recomendados pelos fabricantes de motores com resultados consagrados pelas aplicações práticas são amplamente empregados.

No presente trabalho é considerado o método apresentado pelo catálogo dos fabricantes, onde são determinados pelos respectivos valores médios dos conjugados motor e resistente.

O conjugado do motor médio, C_{MM} é determinado na curva do conjugado do motor, de modo que as áreas A_1 , A_2 e A_3 sejam:

$$A_3 = A_1 + A_2. \quad [VI.26]$$

Analogamente, o conjugado resistente médio, C_{RM} é determinado na curva do conjugado resistente, de modo que as áreas B_1 e B_2 sejam:

$$B_1 = B_2 \quad [VI.27]$$

O conjugado de aceleração médio, C_{ACM} é determinado por:

$$C_{ACM} = C_{MM} - C_{RM}. \quad [VI.28]$$

O tempo de aceleração é determinado entre o intervalo do repouso, $\omega_1 = 0$ até o regime ω_2 ,

$$\omega_2 = (2.\pi . n) / 60; \quad [VI.29]$$

$$t_{AC} = \{ [(2.\pi . n) / 60]. J_t \} / C_{ACM} \quad [VI.30]$$

A precisão do cálculo do tempo de aceleração t_{AC} , resume-se à precisão da determinação dos conjugados médios do motor e da carga. Os motores apresentam diferentes aspectos da forma de conjugado motor em função de rotação devido principalmente ao número de pólos, potência e categoria.

Nas aplicações práticas é possível estimar com razoável segurança o conjugado médio do motor, C_{MM} e o conjugado médio da carga, C_{MR} .

VI.5.4.1.2 CONJUGADO MOTOR MÉDIO (C_{MM})

O Conjugado Médio Motor, C_{MM} , para os motores categoria N e H, recomendado nos catálogos dos fabricantes é determinado pela média aritmética, reduzida de 10% (dez por cento), entre os valores do conjugado motor de partida, C_{MP} e o conjugado motor máximo, C_{Mmax} :

$$C_{MM} = 0,45.(C_{MP} + C_{Mmax}) \quad [VI.31]$$

e para os motores categoria D,

$$C_{MM} = 0,60.C_{MP} \quad [VI.32]$$

VI.5.4.1.3 CONJUGADO RESISTENTE MÉDIO (C_{RM})

Os Conjugados Resistentes Médios (C_{RM}), são determinados pela característica da carga aplicada ao motor. Os conjugados resistentes são referidos à rotação de regime, pela equação de potência:

$$P_R = C_{RC} \cdot \omega_C = C_R \cdot \omega_R \quad [VI.33]$$

P_R Potência resistente desenvolvida pela carga.

C_{RC} Conjugado resistente da carga, na velocidade de regime da carga.

C_R Conjugado resistente da carga, referido a velocidade do motor.

ω_C Velocidade angular de regime da carga.

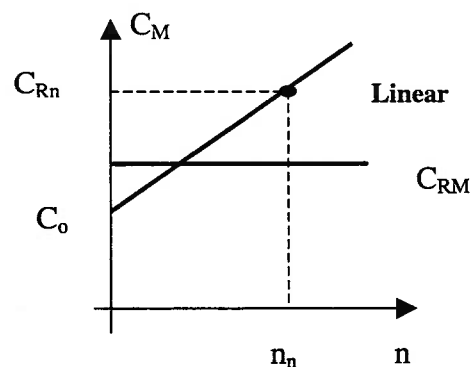
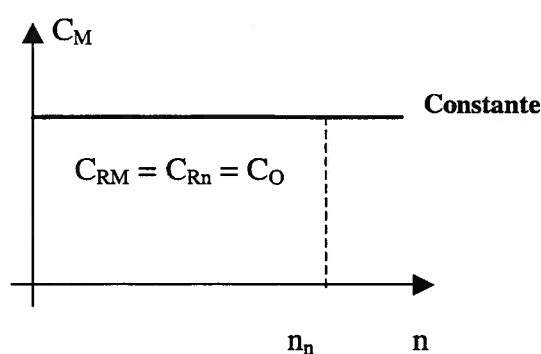
As equações para determinação dos conjugados resistentes médios, C_{RM} são realizados como segue:

a) Conjugado Resistente Constante

Na equação VI.11, com $e = 0$, resulta, $C_{Carga} = K_c + C_0$, constante

$$C_{RM} = C_{Rn} \quad [VI.34]$$

C_{Rn} Conjugado resistente à rotação nominal do motor



b) Conjugado Resistente Linear

Na equação VI.11, com $e = 1$, resulta $C_{\text{Carga}} = C_0 + K_c \cdot n$ [VI.35]

$$\text{ou : } C_{\text{RM}} = (C_0 + C_{\text{Rn}}) / 2 \quad [\text{VI.36}]$$

c) Conjugado Resistente Parabólico

Na equação VI.11, com $e = 2$, resulta $C_{\text{Carga}} = C_0 + K_c \cdot n^2$ [VI.37]

$$\text{ou, } C_{\text{RM}} = \left[\int_0^{n_n} (C_R \cdot dn) \right] / n_n = \left[\int_0^{n_n} (C_0 + K_c \cdot n^2 \cdot dn) \right] / n_n \quad [\text{VI.38}]$$

$$C_{\text{RM}} = (C_0 \cdot n_n) / n_n + (K_c \cdot n_n^3) / 3 \cdot n_n \quad [\text{VI.39}]$$

$$C_{\text{RM}} = C_0 + (K_c \cdot n_n^2) / 3 \quad [\text{VI.40}]$$

Sendo C_{Rn} o conjugado da carga na rotação nominal,

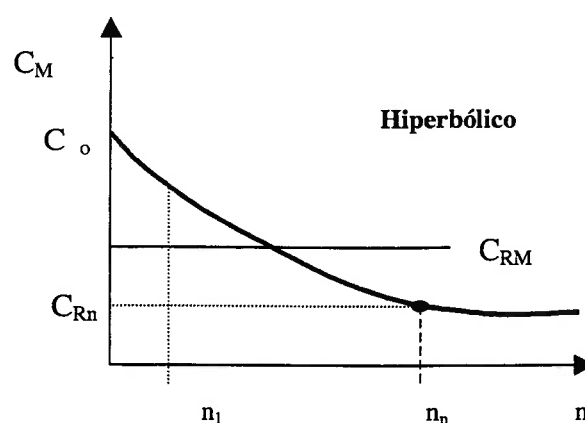
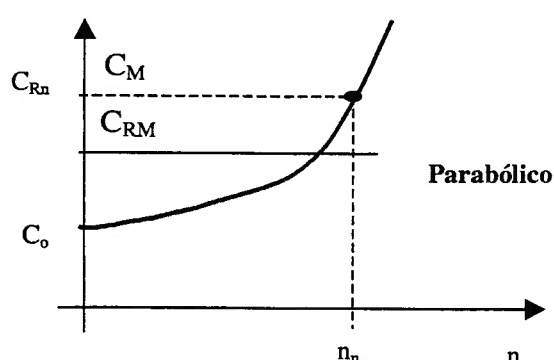
$$\text{ou } C_{\text{Rn}} = C_0 + K_c \cdot n_n^2 \quad [\text{VI.41}]$$

$$K_c \cdot n_n^2 = C_{\text{Rn}} - C_0 \quad [\text{VI.42}]$$

$$\text{Logo; } C_{\text{RM}} = C_0 + [C_{\text{Rn}} - C_0] / 3 \quad [\text{VI.43}]$$

$$C_{\text{RM}} = [3 \cdot C_0 + C_{\text{Rn}} - C_0] / 3 \quad [\text{VI.44}]$$

$$C_{\text{RM}} = (2 \cdot C_0 + C_{\text{Rn}}) / 3 \quad [\text{VI.45}]$$



c) Conjugado Resistente Hiperbólico

Na equação VI.11, com $e = -1$, resulta $C_{Carga} = C_0 + K_c \cdot n^{-1}$ [VI.46]

Impondo a função hiperbólica perfeita, $C_R = K_c / n$ [VI.47]

Nas condições nominais $C_{Rn} = K_c / n_n \Rightarrow K_c = n_n \cdot C_{Rn}$ [VI.48]

$$C_{RM} = \left[\int_{n_1}^{n_n} (C_R \cdot dn) \right] / [n_n - n_1] \quad [VI.49]$$

$$C_{RM} = \left[\int_{n_1}^{n_n} (K_c / n) dn \right] / [n_n - n_1] \quad [VI.50]$$

$$C_{RM} = K_c [\ln(n_n) - \ln(n_1)] / [n_n - n_1] \quad [VI.51]$$

$$C_{RM} = K_c \cdot [\ln(n_n / n_1)] / [n_n - n_1] \quad [VI.52]$$

$$C_{RM} = C_{Rn} \cdot n_n [\ln(n_n / n_1)] / [n_n - n_1] \quad [VI.53]$$

Nas cargas reais, n_1 é obtido da equação [VI.47] para $C_R = C_0$, sendo C_0 o conjugado de partida da carga.

d) Conjugado Resistente Nulo

No caso de partida do motor em vazio, ou seja, sem carga, o conjugado médio de aceleração é o próprio conjugado médio motor.

e) Conjugado Resistente Não Definido

Neste caso não é possível a determinação do conjugado resistente médio sem o conhecimento prévio da curva conjugado resistente pela rotação. A solução é obtida através de métodos gráficos.

VI.5.4.1.4 CONJUGADO DE ACELERAÇÃO MÉDIO (C_{ACM})

Com os valores médios dos conjugados motor e dos conjugados resistentes é possível determinar os conjugados de aceleração médio para cada tipo de carga.

Para as diversas situações de carga os conjugados de aceleração médios dos motores categorias N e H são determinados pela solução das equações [VI.28], [VI.34], [VI.36], [VI.45] e [VI.53]

1) Carga Resistente Constante

$$C_{ACM} = 0,45 \cdot (C_{MP} + C_{Mmax}) - C_{Rn} \quad [VI.54]$$

2) Carga Resistente Linear

$$C_{ACM} = 0,45 \cdot (C_{MP} + C_{Mmax}) - 0,5 \cdot (C_0 + C_{Rn}) \quad [VI.55]$$

3) Carga Resistente Parabólica

$$C_{ACM} = 0,45 \cdot (C_{MP} + C_{Mmax}) - (0,67 \cdot C_0 + 0,33 C_{Rn}) \quad [VI.56]$$

4) Carga Resistente Hiperbólica

$$C_{ACM} = 0,45 \cdot (C_{MP} + C_{Mmax}) - C_{Rn} \cdot [\ln(n_n / n_1)] / [n_n - n_1] \quad [VI.57]$$

5) Carga Resistente Nula

$$C_{ACM} = 0,45 \cdot (C_{MP} + C_{Mmax}) \quad [VI.58]$$

Nos motores categoria D, o método para determinação do conjugado de aceleração médio é semelhante, substituindo – se na expressão [VI.28] o conjugado médio motor pela expressão [VI. 32] para cada tipo de carga.

VI.5.4.1.5 TEMPO MÁXIMO DE ROTOR BLOQUEADO (t_{MRB})

O Tempo Máximo de Rotor Bloqueado (t_{MRB}) é o tempo máximo que o motor poderá permanecer com as correntes de rotor e estator nos valores de partida ou arranque, suportando um acréscimo de aquecimento, logo após o funcionamento de regime, sob condições nominais e que não ultrapasse os limites de temperaturas de pico estabelecidos em normas. Este tempo é determinado para cada motor e fornecido e garantido pelos fabricantes nas folhas de dados e catálogos.

As Normas NEMA e IEC apresentam os limites de temperatura para essa condição de partida como segue:

Classe Térmica	Norma MG1.12.53	IEC 79.7
B	175°	185°
F	200°	210°
H	225°	235°

Figura VI.7 Limites de pico de temperatura na partida e classe de isolamento do motor

Nas partidas realizadas com tensão reduzida a corrente e as perdas também são diminuídas. As perdas variam com a função quadrática da tensão ou da corrente de alimentação.

Na hipótese que a energia dissipada seja preservada durante a partida, ou seja, a mesma energia é dissipada com partida de tensão plena ou com tensão reduzida, o tempo máximo de rotor bloqueado poderá ser aumentado como segue:

$$t_{MRBR} = t_{MRB} \cdot (U_n / U_R)^2 \quad [VI.59]$$

U_n Tensão nominal do motor

U_R Tensão reduzida de partida

Os tempos de rotor bloqueado apresentadas em catálogos dos fabricantes de motores estão sempre referenciadas à classe térmica B. Para os motores que apresentam limitações pelo tempo máximo de rotor bloqueado na classe de isolamento B é possível substituir a classe térmica por outra de nível térmico superior, F ou H, e portanto aumentar o tempo de rotor bloqueado. A construção é considerada especial e de preço de aquisição aumentado.

No catálogo técnico de Motores Industriais WEG são fornecidos os acréscimos do Tempo Máximo de Rotor Bloqueado para as classes térmicas F e H.

Classe Térmica	Tempo Máximo Rotor Bloqueado
B	100%
F	138%
H	177%

Figura VI.8 Relação: classe térmica e o acréscimo do tempo máximo de rotor bloqueado

ou ainda:

$$t_{MRB} (F) = 1,38 \cdot t_{MRB} (B)$$

$$t_{MRB} (H) = 1,77 \cdot t_{MRB} (B)$$

A fim de que a temperatura máxima durante o pico da partida não ultrapasse os limites da classe térmica estabelecidos na Figura VI.7, os fabricantes recomendam por precaução, que o tempo de aceleração, t_{AC} , seja inferior a 80% do tempo máximo de rotor bloqueado, t_{MRB} . (Características e Especificações de Motores Elétricos - CA - Weg / DT-2 Divulgação Tecnológica)

$$t_{AC} \leq 0,8 \cdot t_{MRB} \quad [VI.60]$$

VII DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DOS MOTORES NO “CHÃO DE FÁBRICA”

VII.1 PROCEDIMENTOS

Atualmente aparelhos digitais e portáteis com funções de análise e medida de grandezas, permitem com facilidade o registro dos valores de tensão, corrente, potência e fator de potência do motor em operação. A rotação também sem dificuldade é registrada com tacômetro óptico.

O conhecimento dos valores medidos e comparados com os nominais declarados na placa de identificação do fabricante são indicadores de análise e avaliação do carregamento do motor.

Um procedimento de fácil realização para o diagnóstico energético de motores elétricos é recomendado no Manual de Administração de Energia – Força Motriz de 1997, editado pela Agência para Aplicação de Energia de São Paulo.

O diagnóstico é realizado com medições e anotações, para todo ciclo de carga. Os procedimentos para cada estágio de carga são listados como segue:

- A) Anotar os valores nominais, declarados na placa de identificação do motor.
- B) Medir as tensões de linha das três fases; U_{AB} , U_{BC} e U_{CA}
- C) Medir as correntes de linha das três fases; I_{LA} , I_{LB} e I_{LC}
- D) Medir a potência total absorvida pelo motor; P_{ABS}
- E) Medir a rotação mecânica do rotor; n

VII.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A) Análise do equilíbrio das tensões de linha

O desbalanceamento nas tensões de linha é responsável por sobreaquecimentos no enrolamento do estator devido a circulação de correntes de seqüência zero. Portanto, a limitação da temperatura e a preservação da expectativa de vida do motor somente é conseguida pela redução da potência nominal.

A norma NEMA MG 1 – 1993, recomenda um fator de redução de potência do motor, quando alimentado com tensões de linha desbalanceadas e determinado como segue:

$$TM = (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}) / 3 \quad [VII.1]$$

TM Tensão Média das linhas AB, BC e CA

$$TMD = \text{Maior valor de } (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}) - TM \quad [VII.2]$$

TMD Tensão Máxima Desviada da Tensão Média

$$TD \% = (TMD / TM) \cdot 100 \quad [VII.3]$$

TD % Percentagem da Tensão Desbalanceada

A Figura VII.1, extraída da norma NEMA MG 1 – 1993, indica o fator de redução de potência que deve ser aplicado em motores em função da Percentagem da Tensão Desbalanceada, TD %, afim de garantir a expectativa de vida do motor.

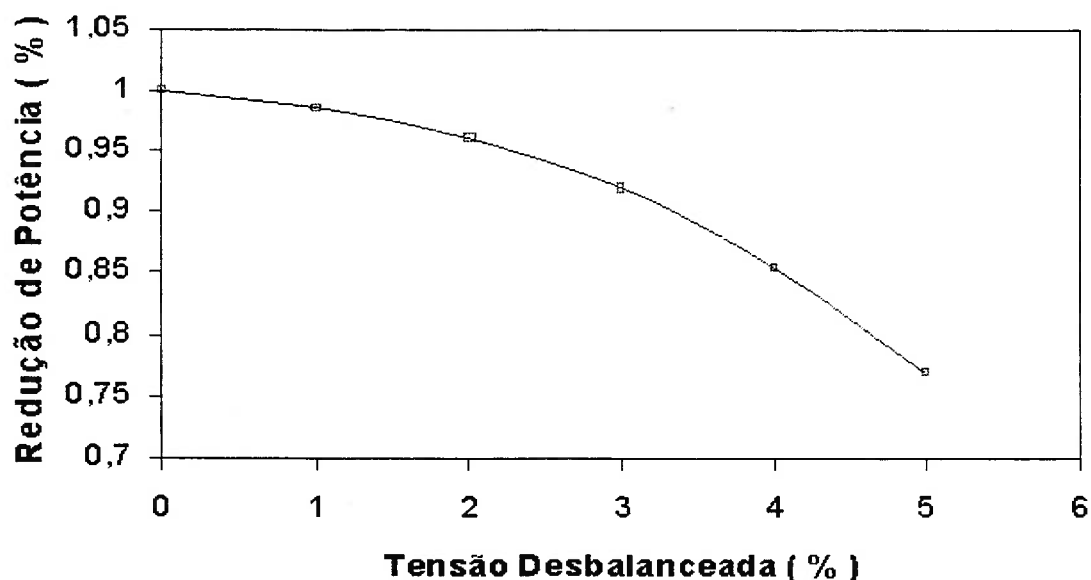


Figura VII.1 Fator de redução da potência nominal em função do desbalanceamento da rede

B) Análise do nível de carregamento no ciclo de operação

A principal grandeza para análise comparativa do carregamento do motor é a corrente absorvida. O equilíbrio das correntes e não superiores ao valor nominal é indicador da normalidade de operação do motor, sem aparentes anomalias no sistema de isolamento e desbalanceamento das tensões de alimentação. Correntes equilibradas e elevadas indicam situações de sobre carregamentos ou ainda sub ou sobre tensão de alimentação.

Na temperatura estabilizada do motor, a comparação das rotações com o respectivo valor nominal nos diversos estágios do ciclo de carga, além de indicar o nível de carregamento do motor permite determiná-lo.

Na região de operação estável, definida entre as rotações síncrona e de plena carga, a curva do conjugado motor em função da rotação é linear. A Figura VII.2

ilustra as características de conjugado motor e corrente em função da rotação e as curvas de desempenho de um motor de 15 hp, Standard marca Weg. Constata-se também que as curvas de corrente em função da potência ou da rotação são funções bastante lineares, permitindo com facilidade a determinação do carregamento do motor.

Através dos valores nominais de potência e rotação determina-se o conjugado nominal e para os diversos valores de rotação determinam-se os respectivos conjugados motor e potências, ou:

$$C_{Mn} = P_n / (2 \cdot \pi \cdot n_n / 60) , \quad [\text{VII.4}]$$

C_{Mn} Conjugado nominal (N.m).

n_n Rotação nominal do motor (rpm)

Na condição da rotação n , igual a rotação síncrona, n_s , o conjugado motor é nulo. Considerando a linearidade das curvas conjugado motor em função da rotação determinam-se os conjugados nas diversas rotações do ciclo de cargas como segue:

$$C_M = [(n_s - n) / (n_s - n_n)] \cdot C_{Mn} \quad [\text{VII.5}]$$

e as respectivas potências desenvolvidas, por:

$$P_{mec} = C_M \cdot (2 \cdot \pi \cdot n / 60) \quad [\text{VII.6}]$$

P_{mec} Potência mecânica (Watt)

C_M Conjugado motor (N.m)

n Rotação de regime do motor (rpm)

Na eventualidade do motor operar durante um período do ciclo de carga em vazio, deve-se anotar a potência absorvida, P_{ABSO} , utilizada na determinação da potência eficaz e energia consumida durante um ciclo.

Os diversos valores de potências e correspondentes tempos de duração permitem determinar a potência eficaz conforme apresentado no item VI.5.2 Potência Eficaz.

Esta metodologia possibilita a comparação da potência nominal do motor existente com a potência eficaz, verificando-se o correto dimensionamento ou a necessidade da substituição da unidade existente. Em caso de substituição, a análise deve ser completada pelos demais procedimentos descritos no capítulo IV.

O rendimento para os diversos estágios de carga é determinado por:

$$\eta (\%) = (P_{mec} / P_{ABS}) .100 \quad [VII.7]$$

P_{mec} Potência mecânica desenvolvida pelo motor em carga.

P_{ABS} Potência elétrica absorvida pelo motor em carga.

A curva de rendimento, $\eta = f (P_{mec})$, do motor existente é também importante parâmetro de comparação com a respectiva curva do novo motor.

Apesar do método descrito ser bastante prático e de fácil realização deve-se ressaltar o cuidado na análise desses resultados. Os valores nominais de conjugado e escorregamento declarados na placa de identificação dos motores são valores para as condições de plena carga e temperatura de regime estabilizada.

A rotação ou escorregamento variam sensivelmente com a temperatura. Os motores que operam com valores reduzidos de carga poderão não estar suficientemente aquecidos e as medições serem realizadas em temperaturas estabilizadas inferiores à temperatura de regime nominal. Assim, os conjugados

determinados nessas condições resultam em valores de carga equivocados e inferiores aos carregamentos efetivos.

Nos períodos de longa duração com carregamentos próximos a potência nominal a temperatura é estabilizada de modo que os erros nos conjugados calculados pelo método descrito são irrelevantes.

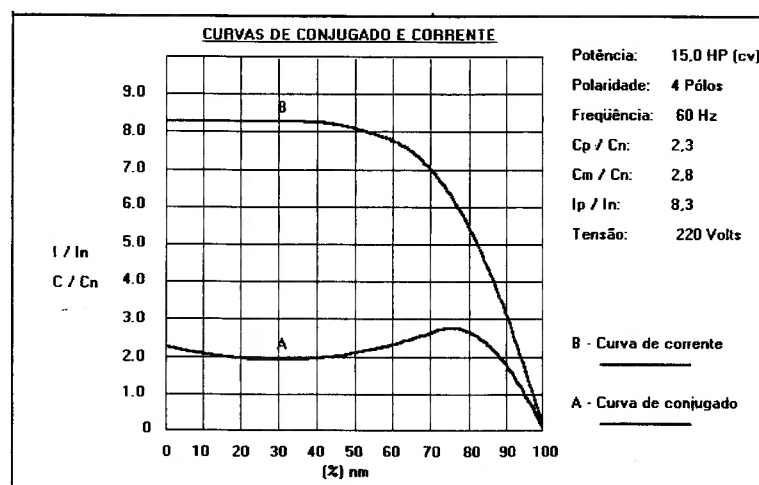
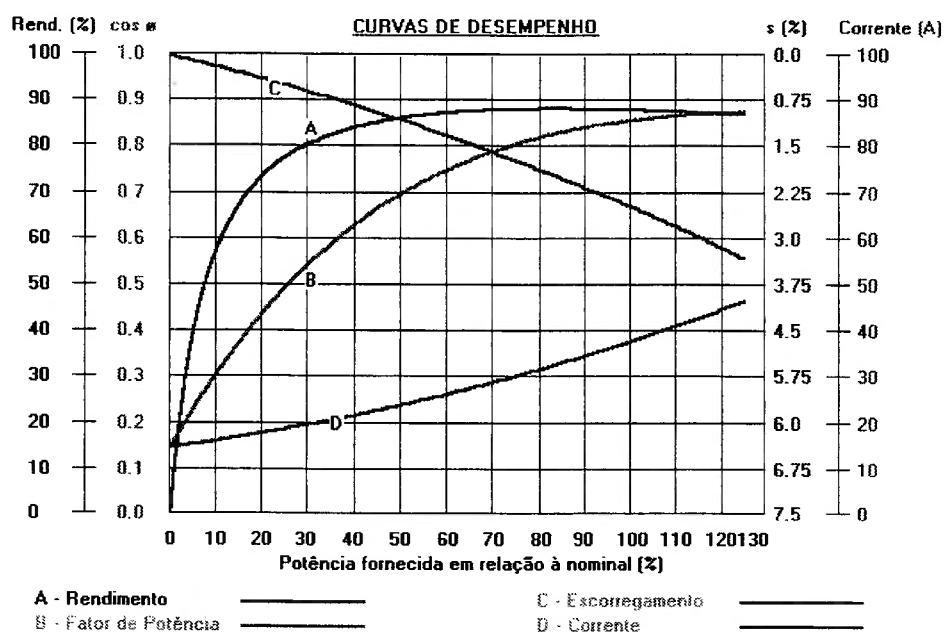


Figura VII.2 Curvas de Corrente, Conjugado e Desempenho do motor de 15 hp Industrial Cortesia Weg

VIII CUSTOS DO PROJETO

VIII.1 CONCEITO DE CUSTOS

Inicialmente é importante estabelecer que no projeto o conceito de custos é a diferença entre os custos de aquisição das duas linhas de motores, Alto Rendimento e Standard.

A decisão de investir em projetos de conservação de energia envolvendo aplicação de motores de Alto Rendimento requer maiores custos iniciais que ao longo do tempo, gradativamente, são compensados pelos menores custos operacionais.

VIII.1.1 CUSTOS INICIAIS

Os custos iniciais dos motores de projetos novos são apenas os custos de aquisição. Os demais custos de instalação são semelhantes aos dos motores Standard.

O custo de aquisição dos motores de Alto Rendimento é de 20% a 50% superior ao dos motores Standard de características técnicas equivalentes. Os custos de aquisição são obtidos das listas de preços dos fabricantes com aplicação dos descontos comerciais, normalmente situados entre 40% (quarenta por cento) e 50% (cinquenta por cento), acrescidos do valor do imposto federal IPI (Imposto de Produtos Industriais) e que atualmente para os motores industriais a alíquota é de 5% (cinco por cento). Quanto ao imposto estadual ICMS, (Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), a alíquota é de 12% (doze por cento). A atual legislação estadual estabelece que o usuário contribuinte de ICMS, possui o benefício do

crédito integral do imposto no livro fiscal, que é anualmente diferido durante o período de amortização do motor. Esta significativa vantagem marginal não será considerada para reduzir o preço de aquisição dos motores.

Nos projetos já implantados e com unidades existentes a serem substituídas é conveniente contabilizar nos custos iniciais, os custos adicionais inerentes a substituição, tais como:

- 1) Custo de adaptação da instalação para a nova unidade
- 2) Custo do número de horas paralisadas

Todavia, o motor usado existente em qualquer estado de conservação, poderá gerar receita proveniente de sua própria comercialização ou ainda pelo abatimento adicional de 10% (dez por cento) do preço de venda da unidade nova, incentivo que os fabricantes oferecem para substituição por unidades de Alto Rendimento.

VIII.1.2 CUSTOS OPERACIONAIS

Nos custos operacionais é considerado apenas o custo da energia consumida pelo motor em funcionamento. As unidades de Alto Rendimento, por possuírem menores perdas possuem menores custos de energia consumida. Os demais custos operacionais do motor de Alto Rendimento também são menores, principalmente o item manutenção. As demais vantagens da aplicação dos motores de Alto Rendimento e discutidas no item V.4, são de difícil quantificação financeira e entendidas como vantagens marginais.

O custo operacional para um ciclo de operação com diversos estágios de carga é determinado pela soma das parcelas das energias absorvidas em regime e partida, respectivamente, E_{cicloR} e E_{ABSP} .

VIII.1.2.1 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA ABSORVIDA EM UM CICLO, NA CONDIÇÃO DE REGIME

Na condição de motor em regime, a energia absorvida no ciclo de t estágios de carga é determinada por:

Período (horas)	P_{mec} (kW)	Rendimento η (%)	P_{ABS} (kW)	Energia Consumida no Regime (kWh)
t_1	P_1	η_1	P_1 / η_1	$P_1 \cdot t_1 / \eta_1$
t_2	P_2	η_2	P_2 / η_2	$P_2 \cdot t_2 / \eta_2$
t_3	Zero	Zero	Zero ou P_{ABS0}	(Zero ou P_{ABS0}) t_3
t_t	P_t	η_t	P_t / η_t	$P_t \cdot t_t / \eta_t$

Figura VIII.1 Energia consumida no ciclo de operação do motor em regime

No intervalo de tempo t_3 a potência fornecida pelo motor é nula. Poderão ocorrer duas situações de consumo de energia, uma com motor desligado e em repouso e potência absorvida nula e outra com o motor ligado em estado de espera, absorvendo a potência de vazio, P_{ABS0} .

A energia absorvida pelo motor em regime no ciclo, $E_{\text{ciclo R}}$ é determinada pela equação:

$$E_{\text{cicloR}} = P_1.t_1 / \eta_1 + P_2.t_2 / \eta_2 + (\text{Zero ou } P_{\text{ABS0}}) .t_3 + \dots + P_t.t_t / \eta_t \quad [\text{VIII.1}]$$

O período do ciclo, T em horas é determinado por:

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_t \quad [\text{VIII.2}]$$

VIII.1.2.2 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA ABSORVIDA NA PARTIDA

No acionamento da carga desde o repouso até a velocidade de regime é necessário fornecer energia ao motor suficiente para acelerar as partes girantes do próprio rotor, da carga, do acoplamento e ainda suprir as perdas do sistema.

No processo de aceleração as perdas do núcleo magnético, atrito e ventilação podem ser desprezadas sem incorrer em grande erro. A quantidade de calor desenvolvida nos enrolamentos durante a partida é praticamente a energia dissipada durante a aceleração.

Conforme o demonstrado na Ref. [1] a energia dissipada no enrolamento do rotor, $E_{\text{partida rotor}}$, durante a aceleração desde o repouso até o regime é determinado por:

$$E_{\text{partida rotor}} = \frac{J_t \omega_s^2 . CM}{2 . [CM - CR]} \quad [\text{VIII.3}]$$

Nas partidas realizadas sem carga ou na condição de conjugado resistente nulo, $C_R = 0$, a energia dissipada no rotor coincide com a energia cinética das massas girantes do rotor na velocidade síncrona.

Com facilidade demonstra-se pelo circuito equivalente do motor que a energia dissipada no enrolamento do estator, $E_{\text{partida estator}}$, é proporcional à relação das resistências por fase do estator e do rotor referida ao estator.

$$E_{\text{partida estator}} = [R_1 / R'_2] \cdot E_{\text{partida rotor}} \quad [\text{VIII.4}]$$

R_1 Resistência ôhmica, por fase, do estator.

R'_2 Resistência ôhmica, por fase, do rotor, referida ao estator.

As resistências R_1 e R'_2 variam durante a partida do motor devido ao aquecimento desenvolvido pelo calor gerado. A maior alteração é de R'_2 agravada pelo efeito pelicular devido a variação da frequência das correntes do rotor.

Mesmo assim, as resistências R_1 e R'_2 são consideradas constantes durante todo o processo de partida.

A energia total dissipada nos enrolamentos durante uma partida, E_{partida} é determinada por:

$$E_{\text{partida}} = E_{\text{partida rotor}} + E_{\text{partida estator}} \quad [\text{VIII. 5}]$$

A energia total absorvida nas partidas, E_{ABSP} , é o somatório das energias dissipadas em cada uma das N_p partidas do ciclo.

$$E_{\text{ABSP}} = \sum_{i=1}^{N_p} \left(\frac{J_T \cdot \omega_s^2 \cdot C_M}{2 \cdot (C_M - C_{Ri})} + \left[\frac{R_1}{R'_2} \right] + \frac{J_T \cdot \omega_s^2 \cdot C_M}{2 \cdot (C_M - C_{Ri})} \right) \quad [\text{VIII. 6}]$$

N_p Número de partidas de um ciclo de carga

Na eventualidade das partidas serem idênticas, a energia dissipada no ciclo é determinado por:

$$E_{ABSP} = N_p \cdot E_{partida}, \text{ ou:}$$

$$E_{ABSP} = N_p \cdot \left[\frac{J_t \cdot \omega_s^2 \cdot C_M}{2 \cdot [C_M - C_R]} + [R_1 / R'_2] \cdot \frac{J_t \cdot \omega_s^2 \cdot C_M}{2 \cdot [C_M - C_R]} \right] \quad [\text{VIII. 7}]$$

VIII.1.2.3 CUSTO ANUAL DA ENERGIA CONSUMIDA

A energia consumida em um ciclo é determinada por:

$$E_{ciclo} = E_{partida} + E_{cicloR} \quad \text{ou,} \quad [\text{VIII. 8}]$$

$$E_{ciclo} = \left\{ [P_1 \cdot t_1 / \eta_1 + P_2 \cdot t_2 / \eta_2 + (\text{Zero ou } P_{ABS0}) \cdot t_3 + \dots + P_t \cdot t_t / \eta_t] + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^{N_p} \left(\frac{J_T \cdot \omega_s^2 \cdot C_M}{2 \cdot (C_M - C_{Ri})} + \left[\frac{R_1}{R'_2} \right] + \frac{J_T \cdot \omega_s^2 \cdot C_M}{2 \cdot (C_M - C_{Ri})} \right) \right\} \quad [\text{VIII. 9}]$$

A energia anual consumida é determinada por:

$$E_{anual} = 12 \cdot E_{ciclo} \cdot H_m / T \quad [\text{VIII. 10}]$$

E_{anual} Energia anual consumida pelo motor em kWh

H_m Número de horas de operação do motor por mês

O custo anual da energia consumida ou custo anual operacional, CO_{anual} em R\$ / Ano é determinada por

$$CO_{anual} = CE \cdot E_{anual} = 12 \cdot E_{ciclo} \cdot CE \cdot H_m / T \quad \text{em R\$/kWh.} \quad [\text{VIII. 11}]$$

CE Custo Médio da Energia da Concessionária em R\$ / kWh.

$$E_{\text{anual}} = 12 \cdot Hm / T \left\{ \left[P_1 \cdot t_1 / \eta_1 + P_2 \cdot t_2 / \eta_2 + (\text{Zero ou } P_{\text{ABS0}}) \cdot t_3 + \dots P_t \cdot t_t / \eta_t \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{i=1}^{Np} \left(\frac{J_T \cdot W_s^2 \cdot C_M}{2 \cdot (C_M - C_{Ri})} + \left[\frac{R_1}{R'_2} \right] + \frac{J_T \cdot W_s^2 \cdot C_M}{2 \cdot (C_M - C_{Ri})} \right) \right] \right\} \quad [\text{VIII. 13}]$$

A energia anual consumida por cada linha de motor, Alto Rendimento e Standard, são determinados na expressão [VIII.13] pela aplicação dos respectivos parâmetros.

VIII.1.3 CUSTO MÉDIO ANUAL DA ENERGIA - CE

O custo médio anual da energia de uma unidade consumidora, CE, é um custo único e equivalente de energia, que independe da época do ano ou horário do consumo. Para a determinação deste valor é de fundamental importância a compreensão do sistema tarifário nacional. O enquadramento tarifário da unidade consumidora é classificada pelos grupos:

- grupo B (Baixa tensão)
- grupo A (Alta Tensão)

VIII.1.3.1 Grupo B

As unidades consumidoras do grupo B (Baixa Tensão), alimentadas com tensão inferior a 2,3 kV, são classificadas na tarifa Convencional. Nesta modalidade de tarifa, o custo da energia é único, para qualquer horário e época do ano.

O faturamento é realizado apenas pelo consumo de energia efetivo e registrado para a unidade consumidora. Nesta tarifa estão enquadrados os pequenos consumidores com demanda menor que 50 kW. O custo médio anual da energia coincide com a tarifa de consumo de baixa tensão, TBC.

Logo:

$$CE = TBC \quad [VIII.14]$$

VIII.1.3.2 GRUPO A

As unidades consumidoras do grupo A (Alta Tensão) são aquelas alimentadas com tensões superiores a 2,3 kV . O faturamento é baseado na aplicação de um tarifa binômia, composta de uma componente referente ao consumo (kWh) e outra referente a demanda (kW). Para o Grupo A existem duas estruturas de tarifas:

- Convencional
- Horo-Sazonal.

III.1.3.2.1 CONVENCIONAL

A tarifa Convencional é aplicada para as unidades consumidoras ligadas em tensão inferior a 69 kV e que nos últimos onze meses, apresentaram pelo menos três demandas mensais, iguais ou inferiores a 500 kW. Caso contrário a tarifa obrigatoriamente é tarifa Horo-Sazonal. Nesta modalidade de tarifa é faturada uma parcela referente a Demanda e outra referente ao Consumo.

A Demanda faturada é o maior valor entre as alternativas:

- a) Demanda Contratada
- b) Demanda Mínima: 85% da maior Demanda registrada por medição, nos últimos onze meses
- c) Demanda Registrada no período da medição.

A definição de Demanda Registrada no período da medição é a maior potência média durante quinze minutos no respectivo período de medição.

Na modalidade convencional as tarifas de demanda e de consumo são independentes do horário e da época do ano da medição. As tarifas de demanda e consumo também são subdivididas pelo nível de tensão e tipo de rede de alimentação, aérea ou subterrânea. Quanto maior o nível da tensão de alimentação menores são as tarifas de demanda e consumo. Redes subterrâneas que requerem menores custos de manutenção possuem menores tarifas que as redes aéreas. Assim são definidas duas tarifas únicas para todos os horário e meses do ano:

- Tarifa de Demanda (TD)
- Tarifa de Consumo (TC)

VIII.1.3.2.2 HORO-SAZONAL

Na modalidade de tarifa horo-sazonal, o custo mensal da energia elétrica é determinado por um componente devido ao consumo de energia e o outro referente à demanda de potência.

A disponibilidade de energia elétrica no Brasil é acima de noventa por cento proveniente de hidro-eletricidade. Nos períodos secos, de maior dificuldade de geração de energia elétrica, e nos segmentos de horários de maior consumo a estrutura tarifária procura inibir ou deslocar o consumo, pelo aumento dos custos.

A tarifa horo-sazonal estabelece tarifas diferenciadas, de segunda a sexta feira e horários de maior consumo (ponta) e para os demais dias e horários (fora de ponta). As tarifas para os meses de maior e menor disponibilidade de energia elétrica, são também diferenciadas, respectivamente períodos úmido (dezembro a abril) e seco (maio a novembro).

O horário de ponta é definido pela concessionária local que atende a região da unidade consumidora, de segunda a sexta feira, por um período de três horas consecutivas escolhido entre dezessete e vinte e duas horas. As demais horas que não se enquadram neste horário é denominado de horário fora de ponta.

A tarifa horo-sazonal apresenta duas modalidades:

- Tarifa Azul
- Tarifa Verde.

VIII.1.3.2 2.1 TARIFA AZUL

A tarifa Azul é aplicada compulsoriamente para todas as unidades alimentadas com tensão igual ou superior a 69 kV, independentemente do valor da demanda. Abaixo destes limites é opção da unidade consumidora optar pelo tipo de tarifa.

A demanda mensal faturada é constituída de duas parcelas, uma de ponta e outra fora de ponta e escolhidas entre os maiores dos seguintes valores:

- Demanda contratada

Maior demanda registrada para cada segmento horo-sazonal, no período do faturamento.

As demandas para os períodos secos e úmidos são iguais e possuem os seguintes valores de tarifa para os segmentos de horários de ponta e fora de ponta:

- Tarifa de Demanda de Ponta (TDP)
- Tarifa de Demanda Fora de Ponta (TDFP)

O consumo de energia faturado, também é constituído de duas parcelas, referentes a medição de consumo de ponta e fora de ponta e para períodos seco ou úmido.

O consumo possui os seguintes valores de tarifa horo-sazonal:

- Tarifa de Consumo para período de ponta seca (TCPS)
- Tarifa de Consumo para período de fora de ponta seca (TCFPS)
- Tarifa de Consumo para período de ponta úmido (TCPU)
- Tarifa de Consumo para período de fora de ponta úmida (TFPU)

VIII.1.3.2 2.2 TARIFA VERDE

A tarifa Verde é aplicada, por opção, para as unidades consumidoras alimentadas com tensões inferiores a 69 kV e demanda inferior a 500 kW.

A Demanda mensal faturada é o maior valor entre:

- Demanda contratada
- Maior demanda registrada no período do faturamento.

A Tarifa de Demanda é única no segmento de horário de ponta e fora de ponta.

- Tarifa de Demanda (TD)

O Consumo de energia faturado é aquele efetivamente medido em cada segmento Horo-Sazonal com os seguintes valores:

- Tarifa de Consumo para período de ponta seca (TCPS)
- Tarifa de Consumo para período de fora de ponta seca (TCFPS)
- Tarifa de Consumo para período de ponta úmido (TCPU)
- Tarifa de Consumo para período de fora de ponta úmida (TFPU)

As tarifas Verde e Azul no segmento de horário fora de ponta possuem os mesmos valores. No segmento de horário de ponta a tarifa Azul possui valores para demanda e de consumo e a tarifa Verde apenas para consumo.

A estrutura das tarifas é formatada de modo que as unidades de consumo, que no de horário de ponta possuem elevados fatores de carga (acima de 0,75) devem contratar tarifa Azul, caso contrário tarifa Verde.

Nos dois tipos de tarifa as ultrapassagens da demanda contratada acima de tolerâncias regulamentadas implica em severas multas, específicas para cada modalidade.

As tarifas também são sobre taxadas pelo excesso de energia reativa consumida, indutiva ou capacitiva. Atualmente o fator de potência mínimo para as instalações elétricas é de 0,92 indutivo ou capacitivo.

As tarifas de energia das concessionárias estão sem o imposto estadual de ICMS (Imposto Sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e Sobre Prestação de Serviços de Transportes Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação). Para unidades consumidoras comerciais e industriais, a atual alíquota do imposto estadual ICMS para o estado de São Paulo é de 18 % (dezoito por cento).

Com o devido enquadramento tarifário da unidade consumidora, o Custo Médio da Energia Anual, CE, em R\$ / kWh, é determinado pelo quociente da soma dos custos com impostos de doze contas consecutivas de energia pelo consumo total de energia nesse mesmo período.

VIII.3 INVESTIMENTO INICIAL

Na análise financeira do projeto, o investimento inicial é a diferença dos custos iniciais entre os dois tipos de motores. A decisão é para escolha entre duas alternativas de motores que tecnicamente são semelhantes e capazes de realizar o mesmo trabalho com preços de aquisição diferentes. O investimento inicial, é determinado por:

$$\mathbf{II = CI_{AR} - CI_{ST}} \quad [\text{VIII.15}]$$

II Investimento Inicial

CI_{AR} Custo Inicial do motor de Alto Rendimento

CI_{ST} Custo Inicial do motor Standard

VIII.4 RECEITAS DO INVESTIMENTO

As receitas consideradas são aquelas obtidas anualmente até o final do projeto, geradas pelo custo da energia evitada, pela decisão de escolha de motor de maior eficiência. No atual cenário brasileiro de economia estabilizada, a base de tempo é anual coincidindo com os períodos de reajustes das tarifas de energia elétrica. As receitas do investimento são determinadas por:

$$\mathbf{RI = CO_{ST} - CO_{AR}} \quad [\text{VIII.16}]$$

RI Receita Anual do Investimento ou Custo da Energia Evitada

CO_{ST} Custo Operacional do Motor Standard

CO_{AR} Custo Operacional do Motor Alto Rendimento

$$\mathbf{RI = CE . (Energia_{St} - Energia_{AR})} \quad [\text{VIII.17}]$$

$Energia_{St}$ Energia anual consumida pelo motor Standard em kWh

$Energia_{AR}$ Energia anual consumida pelo motor Alto Rendimento em kWh

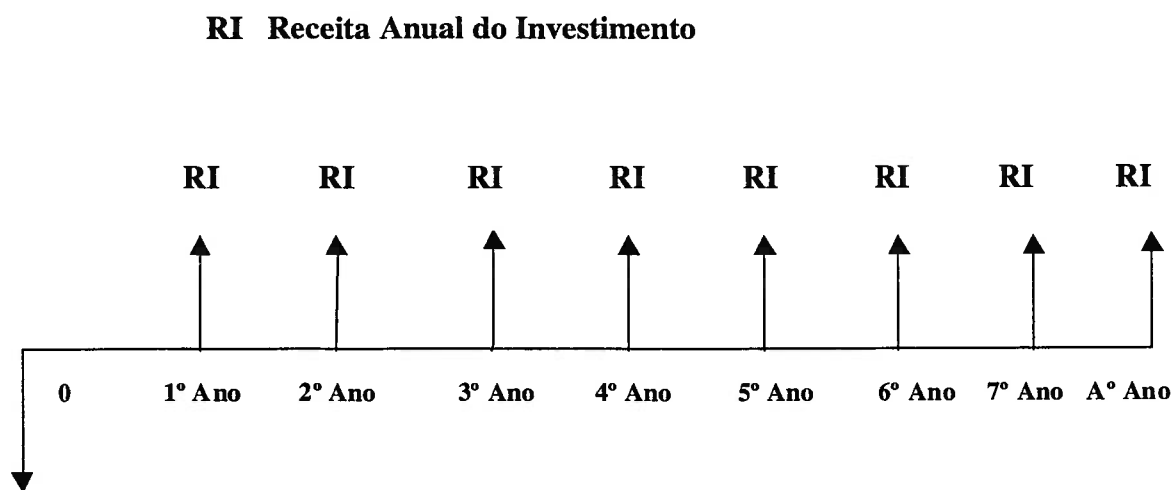
A economia anual de energia, ΔEE_{anual} é determinada por:

$$\Delta EE_{\text{anual}} = (\text{Energia}_{\text{St}} - \text{Energia}_{\text{AR}}) \quad [\text{VIII.18}]$$

Logo:
$$\text{RI} = \text{CE} \cdot \Delta EE_{\text{anual}} \quad [\text{VIII.19}]$$

O fluxo de caixa do projeto com alocação do Investimento Inicial e das Receitas de Investimento é representado na Figura VIII.2.

A convenção de representação adotada é da engenharia econômica sendo as receitas anuais, RI, com setas direcionadas para cima e o investimento inicial, II, a seta é direcionada para baixo.



II Investimento Inicial

Figura VIII.2 Fluxo de caixa ou fluxo de investimento e receita

IX LINHAS DE FINANCIAMENTOS - TAXA DE JUROS E TAXA DE AUMENTO DO CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA

IX.1 LNHAS DE FINANCIAMENTOS

As linhas de financiamentos para os programas de conservação de energia podem ser obtidas de fundos próprios para estes programas da Eletrobrás ou pelas linhas consolidadas do BNDES e disponíveis nos agentes financeiros.

As principais linhas de financiamentos para a aquisição de motores elétricos no mercado nacional estão detalhadas no manual da ELETROBRÁS *“Diretrizes Básicas para Auxiliar o Desenvolvimento das Empresas de Serviços de Conservação de Energia Elétrica – ESCO’s”* e podem ser destacadas como segue:

- Financiamentos através da Eletrobrás / RGR
- Financiamentos através do BNDES

IX.1.1 FINANCIAMENTOS ATRAVÉS DA ELETROBRÁS / RGR

A ELETROBRÁS dispõe de um fundo, denominado Reserva Global de Reversão, RGR, específico para financiamentos de projetos com enfoque na conservação e uso racional da energia elétrica, tanto no lado da demanda, ou do usuário final, como também no lado da oferta, ou da geração, transmissão e distribuição.

O RGR é um fundo constituído pelas contribuições compulsórias das próprias concessionárias de energia elétrica, estatais ou privadas e gerido pela área financeira da ELETROBRÁS.

As solicitações de financiamentos devem ser encaminhadas por empresas especializadas em conservação de energia (Esco's) e acompanhados por projetos detalhados contendo cronogramas de implantação, desembolsos financeiros e principalmente das projeções das economias em energia evitada e ganhos econômicos.

Os critérios de alocação de recursos são definidos pelo Comitê de Priorização da Conservação de Energia, formado pela própria Eletrobrás, que analisa cada projeto no aspecto técnico- orçamentário com base nos seguintes principais parâmetros:

- 1) relação custo / benefício,
- 2) adequação tecnológica,
- 3) preservação ambiental,
- 4) integração e / ou mobilização das empresas ou regiões,
- 5) atendimento das metas previstas no Plano de Conservação da Energia Elétrica,
- 6) percentual de participação de recursos do financiamento no montante global do projeto,
- 7) conformidade com os custos de referência disponíveis na ELETROBRÁS.

Os principais instrumentos operacionais que regem o financiamento do fundo RGR são:

- Limites de financiamentos por região:
 - Sistema Interligado Sul / Sudeste: até 50 %.
 - Sistema Interligado Norte/ Nordeste: até 60 %.
 - Sistema Isolado: até 70 %.
- Prazo de execução : até 12 meses, mas passível de extensão.

- Prazo de Amortização: até 36 meses a partir do término da carência.
- Prazo de Carência: até 24 meses.
- Taxa de juros: 5% aa (ao ano) acrescido de 1% aa sobre saldo devedor e paga mensalmente.
- Garantias requeridas: Vinculação de receita ou outra à satisfação da ELETROBRÁS.
- Correção do saldo devedor: mesma periodicidade e mesmos índices utilizados pela ELETROBRÁS para correção do RGR.
- Liberação de recursos: 25 % do valor do financiamento na assinatura do contrato, e os demais, em três parcelas, contra comprovação de eventos contratuais e liberados até 12 meses da data da assinatura do contrato.
- Encerramento do crédito: a parcela de crédito não utilizada até 6 meses após a data prevista no cronograma é automaticamente cancelada.

IX.1.2 FINANCIAMENTOS ATRAVÉS DO BNDES

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES - pertencente ao governo federal e de fomento ao desenvolvimento, possui linhas de financiamentos que podem ser utilizadas em projetos de eficiência energética. Os principais instrumentos operacionais dessas linhas são enumeradas como segue:

- Classificação pelo porte da empresa e agrupamento econômico.

O porte da empresa já implantada é definido pelo sua receita operacional líquida anual, com base no último exercício social:

- 1) Pequena empresa: até R\$ 4 milhões de reais;

- 2) Média empresa: entre R\$ 4 milhões de reais e R\$ 15 milhões de reais;
- 3) Grande empresa: acima de R\$ 15 milhões de reais.

Para as empresas em fase de implantação, a classificação do porte será realizado pelas projeções das receitas anuais de vendas no empreendimento.

Independentemente do porte da empresa, todavia sendo controlada ou comandada por “grande grupo” a classificação será de grande empresa. É classificado como “grande grupo” aquele que no final do exercício, tenha patrimônio superior a 30 milhões de reais.

- Diferenciação Regional

O Sistema BNDES classifica as regiões para apoio e liberação dos financiamentos como segue:

Região I: Acre, Amazonas, Rondônia, Amapá, Pará, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Distrito Federal, Tocantins e Minas Gerais (região incluída na área da SUDENE)

Região II: Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, exceto as regiões incluídas nas áreas da SUDENE

- Classificação da operação

Operação Direta: realizada diretamente com o BNDES

Operação Indireta: realizada através de Agente Financeiro

Operação Mista : realizada em conjunto BNDES e Agente Financeiro

Os agentes financeiros do BNDES são a maioria dos bancos comerciais privados, Banco do Brasil, Caixa Econômica Federal e demais bancos estaduais.

- Linhas de Financiamentos

O BNDES possui diversas linhas de financiamento com critérios que variam para as diversas regiões do País e tamanho ou porte da empresa a ser financiada. Os principais programas são que podem ser utilizados para financiamentos de empresa para aquisição de motores elétricos destacados como segue:

IX.1.2.1 BNDES AUTOMÁTICO

A) Pequena Empresa das Regiões I e II

- Valor máximo do financiamento: R\$ 5 milhões de reais a cada 12 meses:
- Modalidade; Indireta
- Prazo máximo: 60 meses
- Prazo máximo de carência: 24 meses
- Limite de participação do BNDES: 85 % para região I e 75 % para região II
- Custo financeiro máximo: TJLP acrescido de encargos de 0,5 % ao ano e comissão do agente do financeiro 3 % ao ano, para conduzir a operação e assumir o risco.
- Garantias: a critério do Agente Financeiro.

B) Média e Grande Empresa das Regiões I e II

- Valor máximo do financiamento: R\$ 5 milhões de reais a cada 12 meses:
- Modalidade; Indireta
- Prazo máximo: 60 meses
- Prazo máximo de carência: 24 meses
- Limite de participação do BNDES: 85 % para região I e 75 % para região II
- Custo financeiro máximo: TJLP acrescido de encargos de 1,5 % ao ano e comissão do agente do financeiro 3 % ao ano, para conduzir a operação e assumir o risco.
- Garantias: a critério do Agente Financeiro.

IX.1.2.2 FINEM – FINANCIAMENTO À EMPRESA

- Empresa de qualquer porte das Regiões I e II
- Modalidade: Direta, Indireta ou Mista
- Prazo máximo: 120 meses
- Limite de participação do BNDES: 75 %
- Custo financeiro máximo: TJLP acrescido de encargos de 1,5 % ao ano e comissão do agente do financeiro 3 % ao ano, para conduzir a operação e assumir o risco
- Garantias: 130 % do valor do financiamento e nas operações indireta, fiança solidária do agente financeiro ou de instituição de primeira linha.
- Encargos eventuais:

1) Comissão de Estudo: 0,2 % do valor do financiamento e no máximo de R\$ 37.000,00;

2) Comissão de Reserva de Crédito: 0,1 % por período de 30 dias ou fração, incidente sobre o valor do crédito cancelado, não utilizado ou não contratado;

3) Despesas a reembolsar: despesas efetivamente pagas pelo BNDES para fiscalização, segurança, conservação ou realização dos direitos creditórios;

4) Multa de Ajuizamento: 10 % sobre o saldo devedor.

IX.1.2.3 FINAME

O FINAME, Financiamento Nacional de Máquinas e Equipamentos, é uma linha de crédito que tem como fonte a Agência Especial de Financiamento Industrial através da rede de agentes financeiros credenciados. Objetiva o financiamento a aquisição de máquinas e equipamentos para uso da empresa / pessoa financiada, produzidos no Brasil, com índice de nacionalização em valor e peso maior que 60 %.

IX.1.2.4 FINAME AUTOMÁTICO

A) PEQUENA EMPRESA DAS REGIÕES I E II

- Modalidade; Indireta
- Prazo máximo: 12 a 60 meses
- Prazo de carência: 3 a 24 meses

- Limite de participação FINAME: 90 % para região I e 80 % para região II
- Custo financeiro máximo: TJLP acrescido de encargos de 0,0 % ao ano para região I e 1 % para região II e também comissão do agente do financeiro 3 % ao ano, para conduzir a operação e assumir o risco
- Garantias: alienação fiduciária ou outras a critério do FINAME

B) MÉDIA E GRANDE EMPRESA DA REGIÃO I

- Modalidade; Indireta
- Prazo máximo: 12 a 60 meses
- Prazo de carência: 3 a 24 meses
- Limite de participação FINAME: 80 % para região I e 70 % para região II
- Custo financeiro máximo: TJLP acrescido de encargos de 2,5 % ao ano para região I e 3,5 % para região II e também comissão do agente do financeiro 3 % ao ano, para conduzir a operação e assumir o risco;
- Garantias: alienação fiduciária ou outras a critério do FINAME

IX.1.2.5 FINAME LEASING

Empresas das regiões I e II

- Modalidade; Indireta
- Prazo máximo: 48 meses
- Prazo de carência: 6 meses

- Limite de participação FINAME: 80 % para pequena empresa e 70 % para média e grande empresa.
- Custo financeiro: TJLP acrescido de encargos de 6,5 % ao ano e comissão do agente financeiro 3 % ao ano, para conduzir a operação e assumir o risco.
- Garantias: alienação fiduciária ou outras a critério do FINAME

IX.2 TAXA DE JUROS E TAXA DE AUMENTO DO CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA

Normalmente os projetos voltados para conservação de energia são de média e longa maturação e a análise contempla períodos de cinco a dez anos. Apesar do estudo focar economia estabilizada, nestes períodos a taxa de juros, j (%), e a taxa de aumento do custo da energia elétrica, e (%), não são desprezíveis.

A introdução desses dois ingredientes na análise financeira indicam de modo adequado as reais possibilidades econômicas do projeto.

Taxas de juros elevadas inibem investimentos por tornarem os projetos de produção pouco atrativos. Atualmente a taxa de juros anual básica no Brasil, TJLP, encontra-se situada em 10 % (dez por cento) com tendência de declínio. É conveniente salientar que as taxas de juros são extremamente variáveis e fortemente influenciadas por fatores políticos e econômicos internos e externos ao País.

A taxa de juros a ser considerada é a taxa de juros que irá financiar o projeto, acrescida de todos os encargos e comissões, que poderá ser incentivada por linhas de

específicas para conservação de energia ou ainda por outras taxas, normalmente mais elevadas, próprias de cada tipo de atividade e dimensão do projeto global.

A taxa de aumento do custo da energia elétrica, por outro lado, incentiva compulsoriamente projetos de conservação de energia pela motivação de oportunidades de ganho financeiro. Esta taxa também é extremamente vulnerável a acontecimentos políticos e econômicos, mas apresenta uma performance mais estável que a taxa de juros, por ser considerada uma “commodity” globalizada, cotada em dólares americanos. As atuais projeções mundiais apontam para inevitáveis futuros aumentos no custo da energia elétrica.

A análise de viabilidade do projeto é restrita ao resultado econômico no período do projeto influenciada pelos dois fatores apresentados e de efeitos contrários.

IX.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O INVESTIMENTO E A DECISÃO DA ESCOLHA

A justificativa do capital inicial para compra é provavelmente uma das maiores dificuldades encontradas pelos usuários, principalmente devido aos diversos métodos de cálculo e muitas opiniões sobre qual é a decisão correta.

Sempre existem pressões para redução do custo da implantação do novo projeto e isto implica na redução de imediato dos investimentos iniciais. Deve-se sempre considerar que o custo inicial é apenas parte de todo o

investimento e o custo da energia consumida na vida útil do projeto é substancialmente superior ao capital inicial.

Na maioria das organizações "pay-back" de até 2 anos é suficientemente atrativo para investimentos. Todavia, para um cálculo aprimorado do "pay-back" deve ser introduzido a previsão de taxa de aumento da tarifa de energia elétrica devido ao seu inevitável encarecimento e incluir o custo do capital ou a taxa de juros.

Mesmo assim, afim de melhor avaliar o volume de recursos próprios investidos, são também utilizados outros recursos de análise, como o Valor Presente Líquido de todos os custos e receitas envolvidos e a Taxa Interna de Retorno, calculados no período da vida do projeto. Quando o projeto for financiado a análise resume-se a comparação das taxas, incluindo encargos, conseguidas para o financiamento e a taxa interna de retorno, descontado o risco inerente do empreendimento.

A somatória das vantagens marginal pela aplicação dos motores de Alto Rendimento é de difícil quantificação monetária, embora de fácil compreensão e visualização.

Para processos implantados e em perfeito funcionamento a atração para a substituição dos motores da linha Standard e em operação é um pouco mais complicado, pois podem ser necessárias adaptações da instalação, tempos de espera que prejudicam a produção. Apesar de que também possam ocorrer situações em que a criteriosa medição e correta avaliação das condições de carga registre resultados que indicam substanciais sobredimensionamentos dos motores. Nessas condições, o excessivo

desperdício de energia indicam para a imediata redução da potência das unidades e a utilização da linha de Alto Rendimento.

A oportunidade para a aplicação do motor de Alto Rendimento, também ocorre quando da necessidade da recuperação do motor Standard e que apresenta falha em operação. Apesar de não haver registros estatísticos, grande quantidade de motores com potência até 15 hp são recuperados anualmente no Brasil. As falhas mais comuns são deterioração do material isolante com "queima" ou "massa" das fases do enrolamento do estator, abertura das barras do rotor, quebra dos rolamentos e os conseqüentes danos causados ao estator e rotor e a ruptura da ponta de eixo. Em todas essas situações de manutenção corretiva o motor permanece fora de operação por períodos relativamente longos e o custo do processo muitas vezes, por si, justifica a imediata substituição da unidade defeituosa por outra nova.

Nas situações que houver necessidade de substituição do enrolamento danificado do estator, dependendo da técnica do processo de retirada do enrolamento, poderá ocorrer a redução do valor original do rendimento do motor recuperado de 1 e 2 pontos percentuais. Se nessas condições a comparação for realizada com motor Standard recuperado ou adquirir um novo motor, a diferença do valor de rendimento, à plena carga, poderá ser superior à 5 % favorável ao motor Alto Rendimento. Deve-se considerar que a garantia do motor novo é de 2 anos enquanto que a do motor recuperado é de 3 meses.

X AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROJETO

O tratamento dos ganhos financeiros pelas ferramentas usuais de economia oferecem condições para avaliação e decisão da escolha da linha de motor mais conveniente.

A análise da viabilidade do projeto poderá ser efetuado pela simples intuição empresarial, por indicadores econômicos ou pelos atuais e sofisticados modelos matemáticos desenvolvidos pela engenharia econômica.

No entanto, os métodos tradicionais de análise são considerados suficientemente precisos e adequados ao projeto. Os métodos abordados são:

- 1) Vantagem Financeira - VF
- 2) Tempo de Retorno do Capital, ou “pay - back”
- 3) Valor Presente Líquido - VPL
- 4) Índice de Lucratividade - I_L
- 5) Taxa Interna de Retorno – TIR

X.1 VANTAGEM FINANCEIRA

A Vantagem Financeira é definida pela diferença monetária entre o custo total do motor Standard e o custo total do Alto Rendimento para determinado número A de anos.

Então: VF Vantagem Financeira para A anos do projeto

$$VF = CT_{ST} - CT_{AR} \quad [X.1]$$

O custo total para cada linha de motor em A anos de operação é determinada:

$$CT_{ST} = CI_{ST} + CO_{ST} \quad \text{motor Standard} \quad [X.2]$$

$$CT_{AR} = CI_{AR} + CO_{AR} \quad \text{motor Alto Rendimento} \quad [X.3]$$

das equações [VIII.15] e [VIII.16] resulta:

$$CI_{ST} - CI_{AR} = - II$$

$$CO_{ST} - CO_{AR} = RI.A$$

$$VF = RI.A - II = RI_T - II \quad [X.5]$$

$$RI_T = RI.A \quad \text{Receita totalizada para os A anos do projeto}$$

A Vantagem Financeira é o lucro líquido obtido no projeto, pela decisão de escolher o motor de Alto Rendimento que requer maior investimento no presente, na aquisição, e menores gastos futuros devido ao menor consumo de energia. Na determinação da Vantagem Financeira não são considerados a taxa de juros do capital e a taxa de aumento da energia elétrica do decorrer do projeto, que não deixa de ser considerável imprecisão para longos períodos de análise.

A Vantagem Financeira depende do número A de anos da análise. No início do projeto é negativa e posteriormente, com o decorrer do tempo, torna-se positiva. Vantagem Financeira positiva aponta no período analisado, custo total do motor Standard superior ao custo total do motor de Alto Rendimento. A Figura X.1 ilustra o gráfico da Vantagem Financeira com o decorrer do tempo

A questão é se o tempo decorrido para Vantagem Financeira se tornar positiva é atraente para o usuário ou empreendedor.

A Vantagem Financeira nula representa o tempo de retorno do capital investido, ou tempo de “pay - back”.

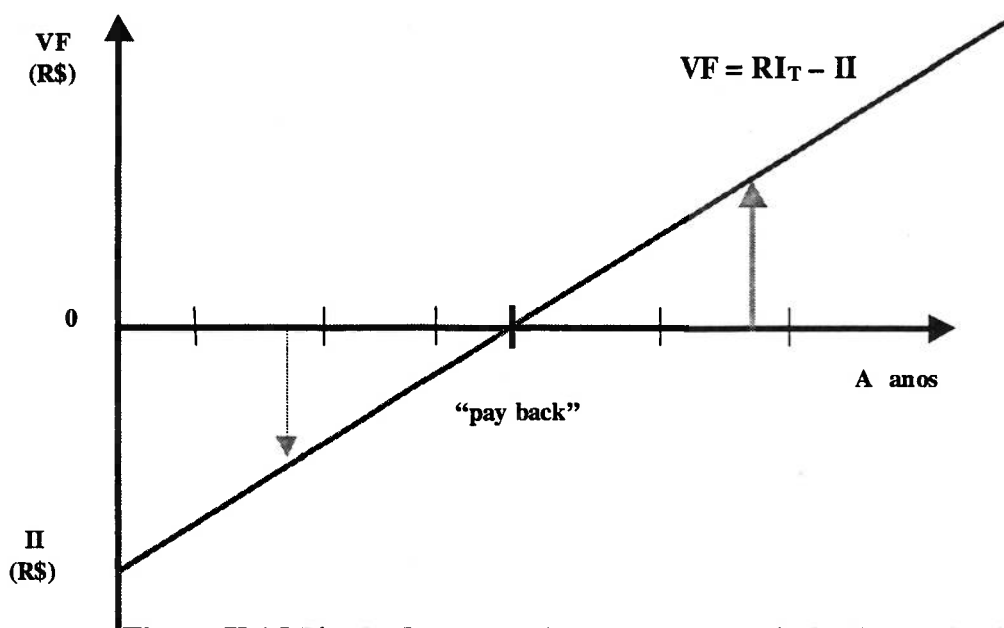


Figura X.1 Método do tempo de retorno do capital - "pay - back"

X.2 MÉTODO DO TEMPO DE RETORNO DO CAPITAL OU "PAYBACK"

O método do tempo de retorno do capital investido ou "pay - back" apesar de ser indicador sem qualquer rigor econômico é extremamente empregado pela simplicidade de sua aplicação. Está fundamentado no conceito de tempo no qual a soma das receitas provenientes de determinado projeto reproduz o total do capital investido para sua implantação. O tempo é expresso em número de meses.

Este método é simplificado e também não considera para o período de análise a taxa de juros e a taxa de aumento do custo da energia elétrica. O conhecimento deste indicador é mais valioso quanto menor for o seu valor. Experiências no Brasil mostram que os empreendedores são atraídos por investimentos com "pay - back" limitados a dois anos. Países com economias estabilizadas e desenvolvidas por apresentarem menores taxas de juros os empreendedores sentem-se recompensados por "pay - back" de até cinco anos.

Neste projeto, o investimento é único, realizado no primeiro momento e apresentado como investimento inicial, II, Equação [VIII.15]. As receitas do investimento são anuais e constantes representando o custo da energia evitada, RI, Equação [VIII.16].

O “pay back”, tempo no qual o investimento inicial, II, é equivalente ao número de receitas anuais, RI, é determinado por :

$$T_{\text{pay - back}} = \text{II} / \text{RI} \quad [\text{X.6}]$$

$T_{\text{pay - back}}$ Tempo de Retorno do Capital ou Tempo de “pay - back”

Assim, o critério de viabilidade econômica do projeto, pelo método do tempo de retorno do capital ou “pay - back” é definido por:

$$T_{\text{pay - back}} < 24 \text{ meses} \Rightarrow \text{Projeto viável} \quad [\text{X.7}]$$

Os fabricantes nacionais de motores apresentam nos catálogos apenas esta ferramenta financeira de análise e decisão para o investimento.

X.3 MÉTODO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO - VPL

O método do Valor Presente Líquido, VPL, está fundamentado no conceito do valor da soma algébrica de todos os investimentos e receitas referendadas a uma única data pela taxa de juros. Normalmente a data escolhida é a do primeiro desembolso financeiro. Por convenção da engenharia econômica, os investimentos, despesas ou custos são considerados com sinal negativo e as receitas com sinal positivo.

No projeto, o investimento é único e realizado na data inicial, pelo acréscimo de investimento na aplicação do motor de Alto Rendimento e apresentado como II.

As receitas anuais, que traduzem o custo da energia evitada, são acrescidas no decorrer do tempo, pela taxa de crescimento do custo da energia elétrica.

Na Equação [VIII.16] de RI, o valor do custo médio da energia, CE, é afetado pela taxa de aumento da energia, e (%).

Os valores de CE₁, CE₂..... CE_a são custos médios futuros da energia (R\$ / kWh) projetados pela taxa de aumento da energia elétrica, e (%), nos respectivos anos, 1º, 2º ,...Aº

As receitas anuais, no 1º, 2º ,...Aº anos, são determinadas por:

$$RI_1 = CE_1 \cdot \Delta EE_{\text{anual}} \quad [X.8]$$

$$RI_2 = CE_2 \cdot \Delta EE_{\text{anual}} \quad [X.9]$$

$$RI_A = CE_A \cdot \Delta EE_{\text{anual}} \quad [X.10]$$

A soma das receitas anuais, referendadas ao presente pela taxa de juros, RI_{TP}, são:

$$RI_{TP} = RI_{P1} + RI_{P2} + \dots + RI_{PA} \quad [X.11]$$

$$RI_{TP} = (CE_{P1} + CE_{P2} + \dots + CE_{PA}) \cdot \Delta EE_{\text{anual}} \quad [X.12]$$

$$CE_{TP} = CE_{P1} + CE_{P2} + \dots + CE_{PA} \quad \text{ou} \quad [X.13]$$

$$RI_{TP} = CE_{TP} \cdot \Delta EE_{\text{anual}} \quad [X.14]$$

Assim, o custo da energia, CE (R\$ / kWh), acrescida da taxa de aumento anual, e (pu), e referendada ao presente pela taxa de juros anual, j (pu), nos A anos do projeto é determinada por:

Anos	CE (R\$ / kWh)	CE_P (R\$ / kWh)
1°	$CE_1 = CE$	$CE_{P1} = CE / (1+j)$
2°	$CE_2 = CE.(1+e)$	$CE_{P2} = CE.(1+e) / (1+j)^2$
3°	$CE_3 = CE.(1+e)^2$	$CE_{P3} = CE.(1+e)^2 / (1+j)^3$
A°	$CE_A = CE.(1+e)^{(A-1)}$	$CE_{PA} = CE.(1+e)^{(A-1)} / (1+j)^A$

$$CE_{PA} = CE.(1+e)^{(A-1)} / (1+j)^A \quad [X.15]$$

CE_1, CE_2, \dots, CE_A Custo da Energia nos anos 1°, 2° ... A° projetadas ao futuro pela taxa de aumento da energia elétrica (e), R\$ / kWh.

$CE_{P1}, CE_{P2}, \dots, CE_{PA}$, Custo da Energia no final dos anos 1°, 2° ... A°, referendadas ao presente pela taxa de juros (j), R\$ / kWh.

A soma de todos os custos anuais referendados ao presente, $CE_{P1}, CE_{P2}, \dots, CE_{PA}$, equivalem a soma dos termos de uma progressão geométrica de n termos de razão, $q = (1+e) / (1+j)$ e primeiro termo, $a_1 = CE_{P1} = CE / (1+j)$.

A expressão dos termos de uma progressão geométrica finita é dado por:

$$1^\circ \text{ caso: para } q \neq 1 \quad S_n = \frac{a_1 \times (q^n - 1)}{(q - 1)} \quad [X.16]$$

$$2^{\circ} \text{ caso: para } q = 1 \quad S_n = a_1 \times n \quad [X.17]$$

Aplicando nas equações [X.16] e [X.17] os termos correspondentes resulta:

$$1^{\circ} \text{ caso: para } q \neq 1 \text{ ou } e \neq j \quad CE_{TP} = CE \left[\frac{\left[\frac{1+e}{1+j} \right]^A - 1}{[e-j]} \right] \quad [X.18]$$

$$2^{\circ} \text{ caso: para } q = 1 \text{ ou } e = j \quad CE_{TP} = [CE / (1 + j)] \cdot A \quad [X.19]$$

O valor de CE_{TP} , é a soma das parcelas CE_{P1} , CE_{P2} , CE_{P3} , CE_{PA}

Determinado o valor de CE_{TP} calcula-se, RI_{TP} na Equação [X 14]

O Valor Presente Líquido, VPL do projeto é determinado por:

$$\mathbf{VPL = RI_{TP} - II = CE_{TP} \cdot \Delta EE_{anual} - II} \quad [X.20]$$

O critério de viabilidade econômica do projeto, pelo método do Valor Presente Líquido, é que VPL seja necessariamente positivo ou as receitas referendadas ao presente devem ser superiores aos investimentos, $RI_{TP} > II$.

$$\mathbf{VPL > 0 \quad \text{ou} \quad RI_{TP} > II \Rightarrow \text{projeto é viável}} \quad [X.21]$$

X.4 MÉTODO DO ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE I_L

A relação entre a soma de todas as receitas, referendadas à data do início do projeto, RI_{TP} e o investimento para a sua implantação, II , é denominado índice de

lucratividade, I_L , ou ainda relação benefício / custo. Das expressões de Π , Equação [VIII.15] e de RI_{TP} , Equação [X 14], determina-se I_L :

$$I_L = RI_{TP} / \Pi \quad [X.22]$$

Este importante indicador revela que o investimento no projeto é viável para valores de I_L maior que a unidade.

$$I_L > 1 \Rightarrow \text{projeto é viável} \quad [X.23]$$

X.5 MÉTODO DA TAXA INTERNA DE RETORNO

A Taxa Interna de Retorno, i_r , é uma taxa equivalente de juros que aplicada aos valores do fluxo de caixa e referenciados à data de início do projeto torna nulo o Valor Presente Líquido. O critério de viabilidade econômica, é que a Taxa Interna de Retorno seja superior a taxa de juros do investimento.

A viabilidade econômica está também vinculada ao critério de uma taxa de atratividade mínima e aceitável definida pelo investidor. Normalmente nos projetos de conservação de energia, por serem de baixo risco, a Taxas Interna de Retorno superior a 30% (trinta por cento) da taxa de juros do investimento são atraentes para o empreendedor.

A captação de recursos poderá ser realizada por linhas incentivadas e específicas para conservação de energia provenientes de percentual das receitas brutas das concessionárias, Reserva Global de Reversão - RGR, ou por linhas normais de financiamentos apresentado e descrito no capítulo IX Linhas de Financiamentos - Taxa de Juros e Taxa de Aumento do Custo da Energia Elétrica.

No projeto o investimento é único e inicial, II. Então a soma das receitas anuais, RI_T , devem ser referendadas ao presente, início do projeto pela taxa de retorno interna.

A Equação [X 14], da soma das receitas anuais, referendadas ao presente é transformada em:

$$RI_{Tir} = CE_{TPir} \cdot \Delta EE_{anual} \quad [X.24]$$

CE_{TPir} , é a soma dos termos CE_P com o valor da taxa interna de retorno i_r e determinada conforme apresentado para CE_{TP} , Equação [X 18]. Na hipótese da taxa interna de juros resultar diferente da taxa de crescimento da energia elétrica, $e \neq i_r$, determina - se CE_{TPir} por :

$$CE_{TPir} = CE \left[\frac{\left[\frac{1+e}{1+i_r} \right]^A - 1}{[e - i_r]} \right] \quad [X.25]$$

A taxa interna de retorno é determinada pela equação:

$$II = RI_{Tir} = CE_{TPir} \cdot \Delta EE_{anual} \quad [X.26]$$

A solução desta equação para o valor de taxa interna de retorno, é obtida pela escolha do número A de anos de análise e pelos métodos matemáticos de tentativas e aproximações sucessivas.

Atualmente, o critério razoável de viabilidade econômica pela Taxa Interna de Retorno, é de i_r superior em pelo menos trinta por cento da taxa de juros do projeto:

$$i_r (\%) > 1,3 \cdot j (\%) \Rightarrow \text{projeto viável} \quad [X.27]$$

XI “SOFTWARE” “SMART MOTOR”

A metodologia de dimensionamento da potência nominal do motor e determinação do custo da energia anual evitada é empregada em aplicativo, denominado “SMART MOTOR”, linguagem “Visual Basic” e suporte de banco de dados “Access”, com os seguintes objetivos principais:

- I) Dimensionar a potência nominal do motor com informações fornecidas pelo usuário do ciclo de carga, condições de regime e de partida e das características do local das instalação;
- II) Analisar a viabilidade econômica de aplicar motores das linhas Alto Rendimento ou Standard nas novas instalações ou para substituir os motores existentes e em funcionamento (“retrofit”);
- III) Permitir a comparação econômica entre as principais marcas de motores fabricados no Brasil (Eberle, Kohlbach e Weg) e respectivas linhas oferecidas (Alto Rendimento e Standard);
- IV) Facilitar ao usuário o acesso das principais informações técnicas (“data sheet”) constantes no banco de dados de motores industriais, linhas Alto Rendimento e Standard, dos principais fabricantes nacionais;
- V) Promover e incentivar as oportunidades de conservação e uso racional da energia elétrica, pela aplicação dos motores elétricos, com ganhos econômicos para o usuário e para toda a sociedade.

XI.1 ESTRUTURA DO “SOFTWARE” “SMART MOTOR”

MÓDULO I

BANCO DE DADOS

- Módulo com as principais informações técnicas (“data sheet”) e econômicas (Listas de Preços) dos três principais fabricantes nacionais de motores industriais, linhas Alto Rendimento e Standard.
- O usuário possui acesso ao banco de dados e aos estudos cadastrados e anteriormente realizados.

MÓDULO II

DIMENSIONAMENTO DE REGIME

- Entrada:

Usuário informa:

Número de estágios de carga no ciclo ($i = 1, 2, \dots, i$)

Os valores de $P_i \times \Delta t_i$, “status” da carga:

se: $P_i \neq 0$ (partida / regime)

se: $P_i = 0$ (desligado / ligado)

Características do local da instalação (temperatura ambiente máxima e altitude).

- Saídas :

P_{EF} (kW ou cv)

Período do ciclo (T)

Nº de ciclos / hora

Nº de partidas por hora (N_P)

Nº de partidas por ciclo

MÓDULO IV

ANÁLISE DE INVESTIMENTO

- Entradas

Usuário informa :

Motores A e B a serem comparados

Marca (Weg / Eberle / Kohlbach)

Linha (Alto Rendimento ou Standard)

Número de pólos (2,4,6 ou 8)

Tensão de Rede (220V / 380V/ 440V)

Potência Absorvida em Vazio (P_{ABSO})

Relação entre as Resistências dos Enrolamentos (R_1 / R'_2)

Custo Atual da energia elétrica (R\$ / kWh)

Taxa anual de juros j (%)

Taxa anual do aumento do custo da energia elétrica e (%)

Número de anos do período de análise (A)

Número de horas mensal de operação (H_m)

Desconto ou preço de aquisição do motor A

Desconto ou preço de aquisição do motor B

- Saídas

Taxa anual de juros j (%)

Taxa anual do aumento do custo da energia elétrica e (%)

Número de anos do período de análise (A)

Custo de aquisição dos motores A e B

Investimento Inicial (II)

Energia Anual Evitada (ΔEE_{anual})

Custo Anual da Energia Evitada (RI)

“Pay Back “

Taxa Interna de Retorno

Gráfico: Vantagem Financeira x Tempo ($VF \times t$)

Gráfico: Valor Presente Líquido x tempo ($VPL \times t$)

Gráfico: Índice de Lucratividade x tempo ($I_L \times t$)

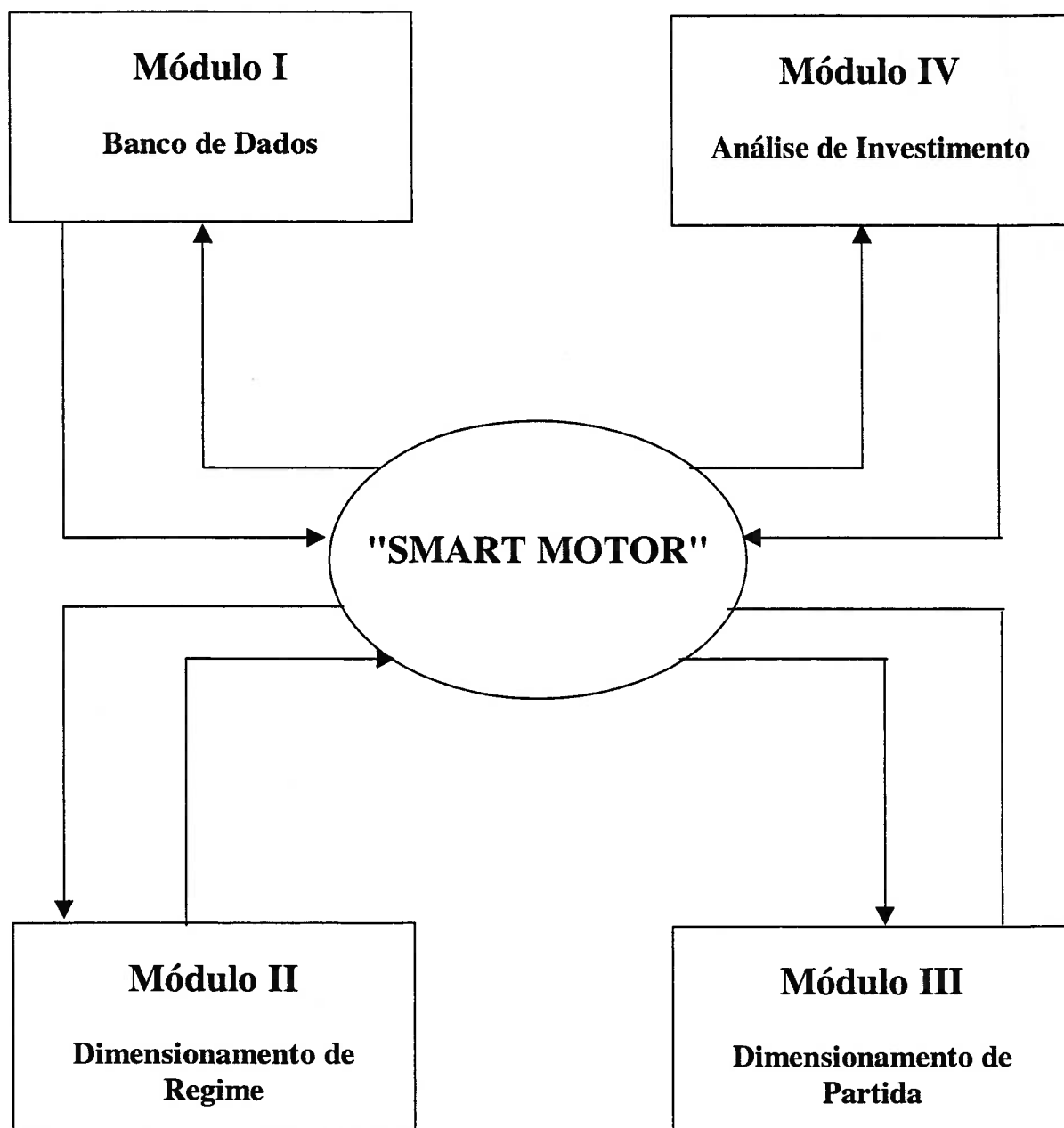


Figura XI.1: Diagrama do "software" "Smart Motor "

CONCLUSÃO

Importante vantagem econômica é conseguida pela substancial redução do consumo de energia elétrica através do correto dimensionamento dos motores aplicados em acionamentos de velocidade constante e cargas variáveis, principalmente quando a operação é realizada com motores de Alto Rendimento utilizados acima de 2200 horas/ ano.

O trabalho motiva os usuários a racionalizar o uso de energia elétrica, identificar oportunidades de ganhos financeiros e comprovar as vantagens quando da escolha da linha de motor entre os principais fabricantes nacionais.

Na metodologia de dimensionamento da potência nominal é utilizado o conceito de potência eficaz que contribui sensivelmente para a redução do consumo de energia elétrica dos motores que operam com ciclos de carga variável.

A análise econômica é apresentada em cenário econômico com taxas de juros e taxas de aumento do custo de energia elétrica e permite a comparação entre os custos totais dos motores das linhas Standard e Alto Rendimento.

A metodologia de cálculo apresentada aprimora a determinação da energia consumida através motores pelo fato de considerar o valor do rendimento no real carregamento e não utilizando apenas o rendimento nominal para qualquer condição de carga. Na avaliação da energia consumida também são consideradas as perdas que ocorrem nos momentos de partidas e frenagens.

No aspecto financeiro são abordadas as ferramentas clássicas de análise de investimentos e consideradas suficientes para decisão da escolha da linha de melhor alternativa. Nos critérios de viabilidade econômica os valores mínimos dos

indicadores foram apresentados como orientativos, pois a análise financeira geralmente é mais complexa e depende fundamentalmente da taxa de juros de financiamento do projeto e de cada situação específica.

Evidentemente, para escolha da marca do motor, outras considerações de aspectos específicos e individuais devem ser analisadas. Assim, destaca-se a padronização dos motores do projeto, garantias adicionais, funcionamento e testes de campo, rede de assistência técnica, facilidade e respectivo custo de peças de reposição, relacionamento com o distribuidor local, qualidade e nível das informações disponíveis, etc

Atualmente aplicações de motores de indução acionados com chaves eletrônicas de partida, “soft start”, ou controlados por inversores em operações que requerem velocidade variável apresentam importantes crescimento.

A proposta para a continuação do trabalho é introduzir a determinação da energia consumida durante a partida nos acionamentos com chaves “soft start” e o dimensionamento da potência nominal do motor quando controlados por inversores considerando a variação da velocidade e os efeitos dos harmônicos no aumento das perdas e consumo de energia elétrica.

Todavia, neste outono de 2001, o particular momento que a sociedade brasileira está presenciando com o racionamento de energia elétrica, compulsória mudança de hábitos, alteração da qualidade de vida e comprometimento do desenvolvimento econômico permite concluir que a motivação para aplicação dos motores de Alto Rendimento supera a expectativa de qualquer vantagem financeira.

MÓDULO III

DIMENSIONAMENTO DE PARTIDA

- Entradas

1) Usuário informa:

Método de partida (Direta , Chave Estrela / Triângulo, Chave Compensadora)

Tipo de partida (Vazio / Carga)

Características da Carga:

Tipo da Carga (Constante, Linear, Parabólica ou Hiperbólica)

Operação (Partida / Frenagem / Reversão)

Para a maior carga de partida do ciclo:

Conjugado de resistente de partida (C_O)

Rotação de regime da carga (N_C)

Momento de Inércia da carga J_{CC}

Escolha de um motor

Marca (Weg / Eberle / Kohlbach)

Linha (Alto Rendimento ou Standard)

Número de pólos (2, 4, 6 ou 8)

Tensão de Rede (220V / 380V/ 440V)

Potência / Carcaça (Advertência : $P_n > P'_{ef}$)

- Saídas

Potência Eficaz Corrigida

Potência Disponível

Potência Nominal

Tipo de Carcaça

Tensão Nominal

Corrente Nominal

Corrente de Partida

Conjugado Motor de Partida

Conjugado Motor Nominal

Conjugado Motor Máximo

Fator de Potência Nominal

Rendimentos (50% , 75 % e 100%)

Momento de Inércia do motor (J_M)

Tempo de Rotor Bloqueado (T_{MB}) (Classe Térmica B, F e H)

Limite Térmico ($0,8 \times T_{MB}$) (Classe Térmica B, F e H)

Tempo de Aceleração (t_{AC})

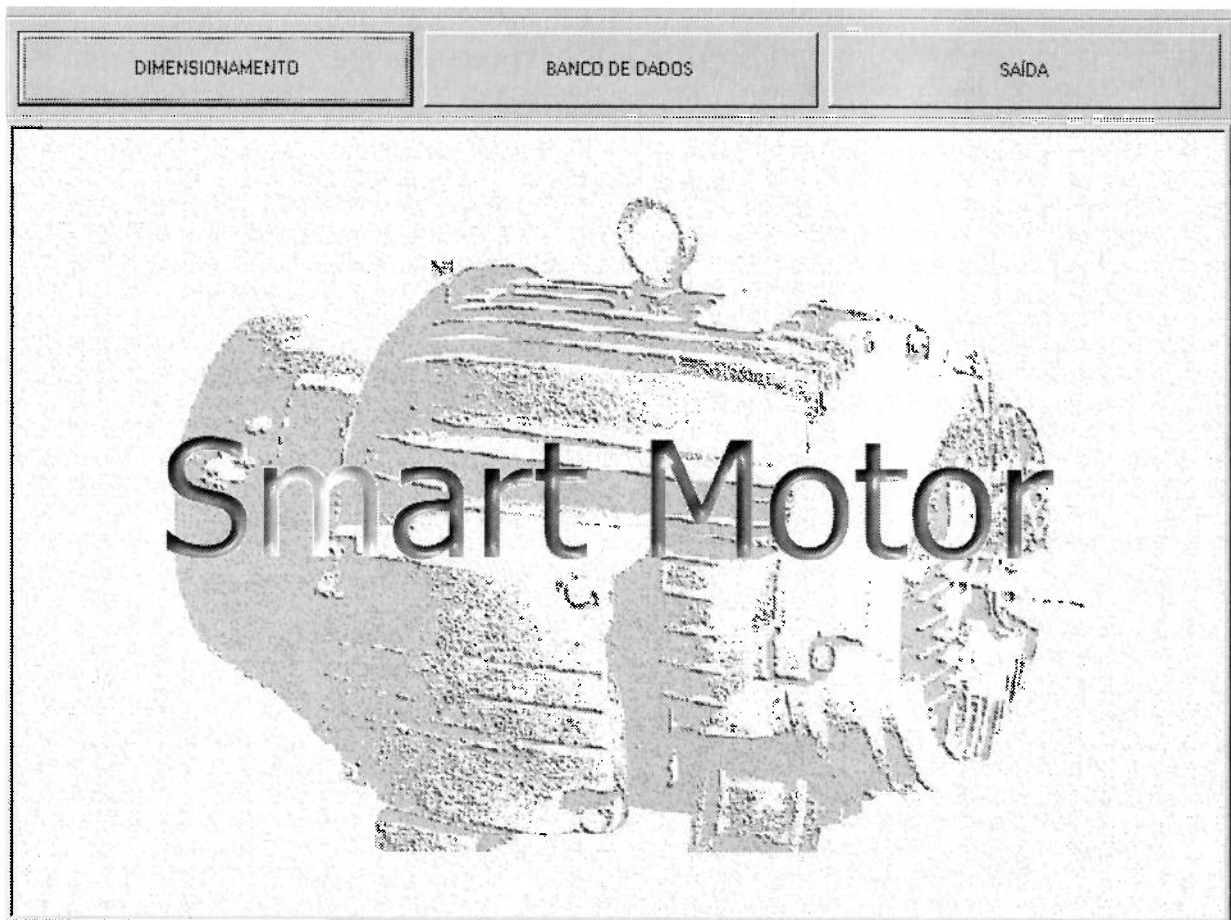
Rotação Nominal (n_n)

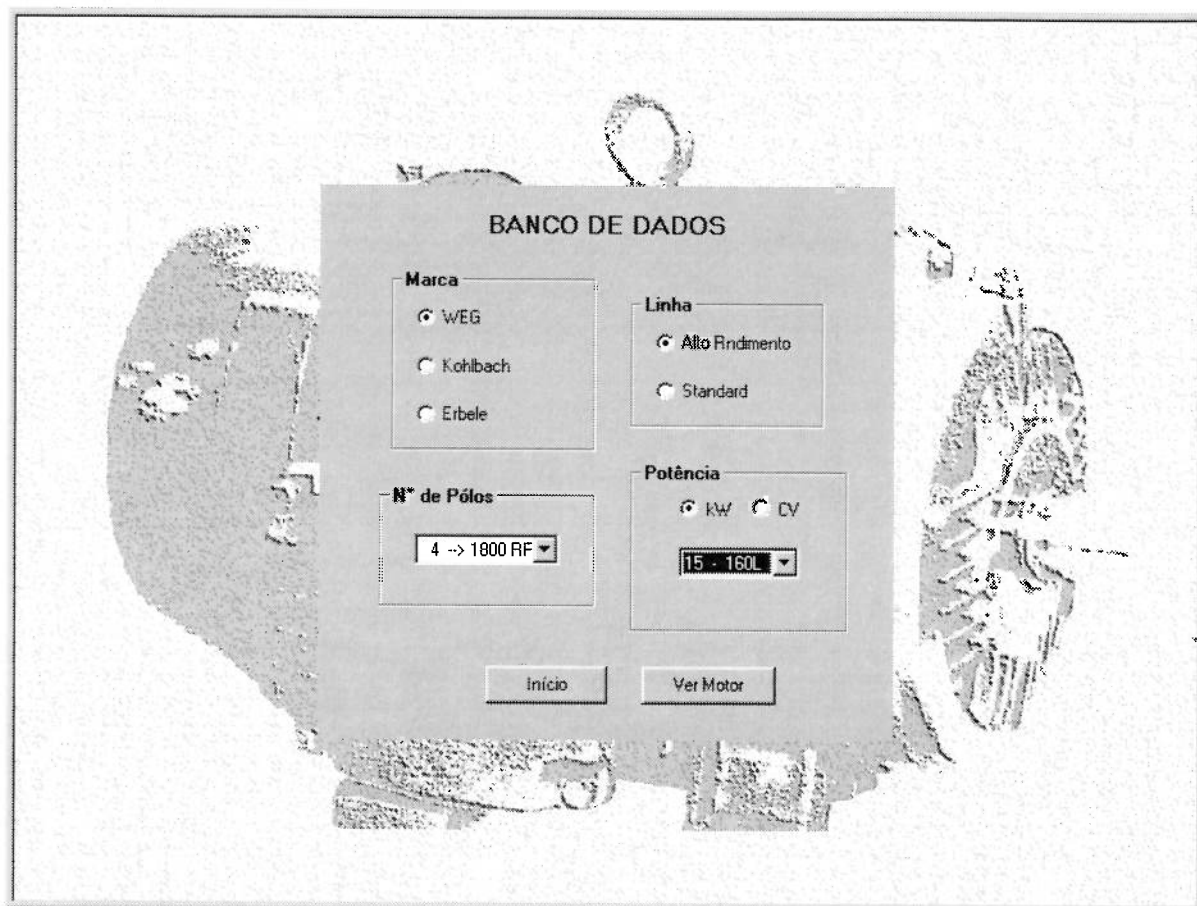
Rotação de regime para o maior carregamento (n_R)

Conjugado Resistente Médio (C_{RM})

Conjugado de Aceleração Médio (C_{AM})

ANEXOS: TELAS DO PROGRAMA APLICATIVO “SMART MOTOR”



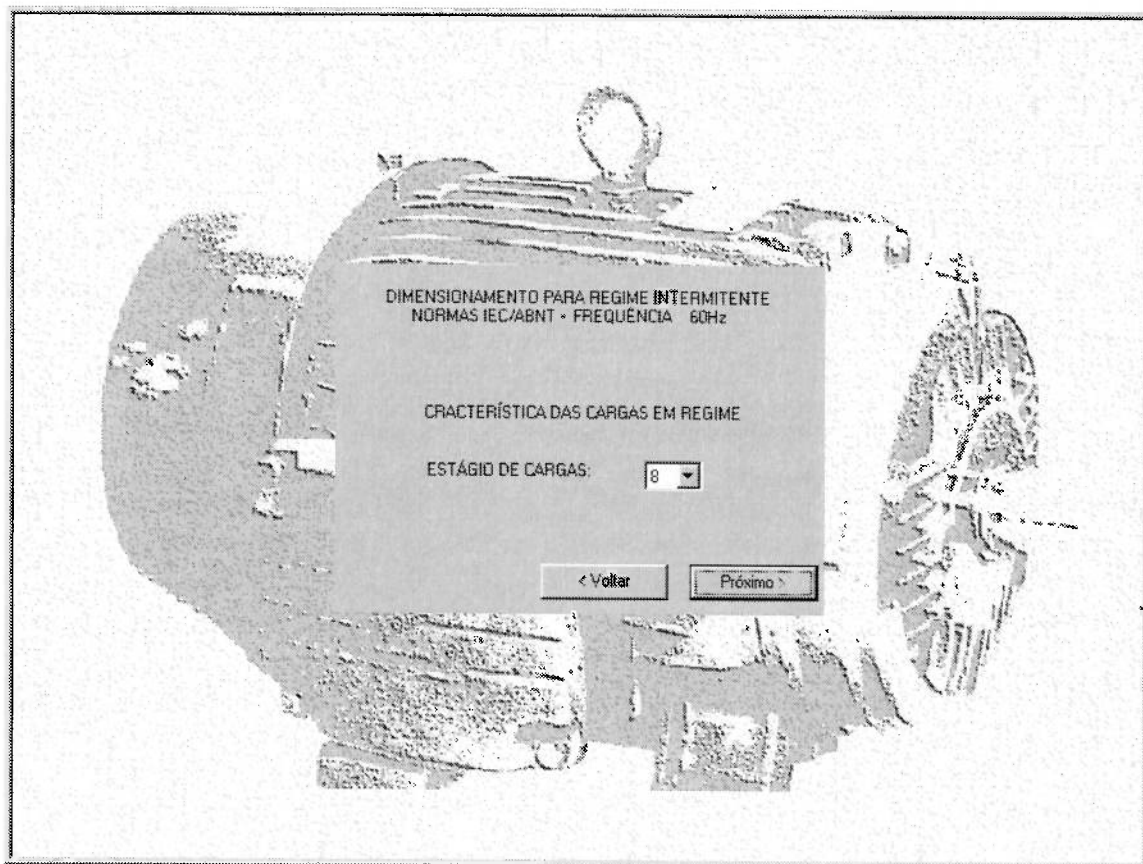


WEG**1800 rpm - 60 Hz - Alto Rendimento**

Potência (CV)	Cargaça (ABNT)	Rotação (rpm)	Corrente		Conjugado			Rendimento			Fator de Potência			F _s	Momento de Inércia J(km ²)	Masa (kg)
			I _n (A)	I _p /I _n	C _n (kg)	C _p /C _n	C _{máx} /C _n	50%	75%	100%	50%	75%	100%			
▶ 20	160L	1760	50,1	6	8,15	2,2	2,4	90,2	0,82	92,4	0,72	0,82	0,85	1,15	0,095351	115

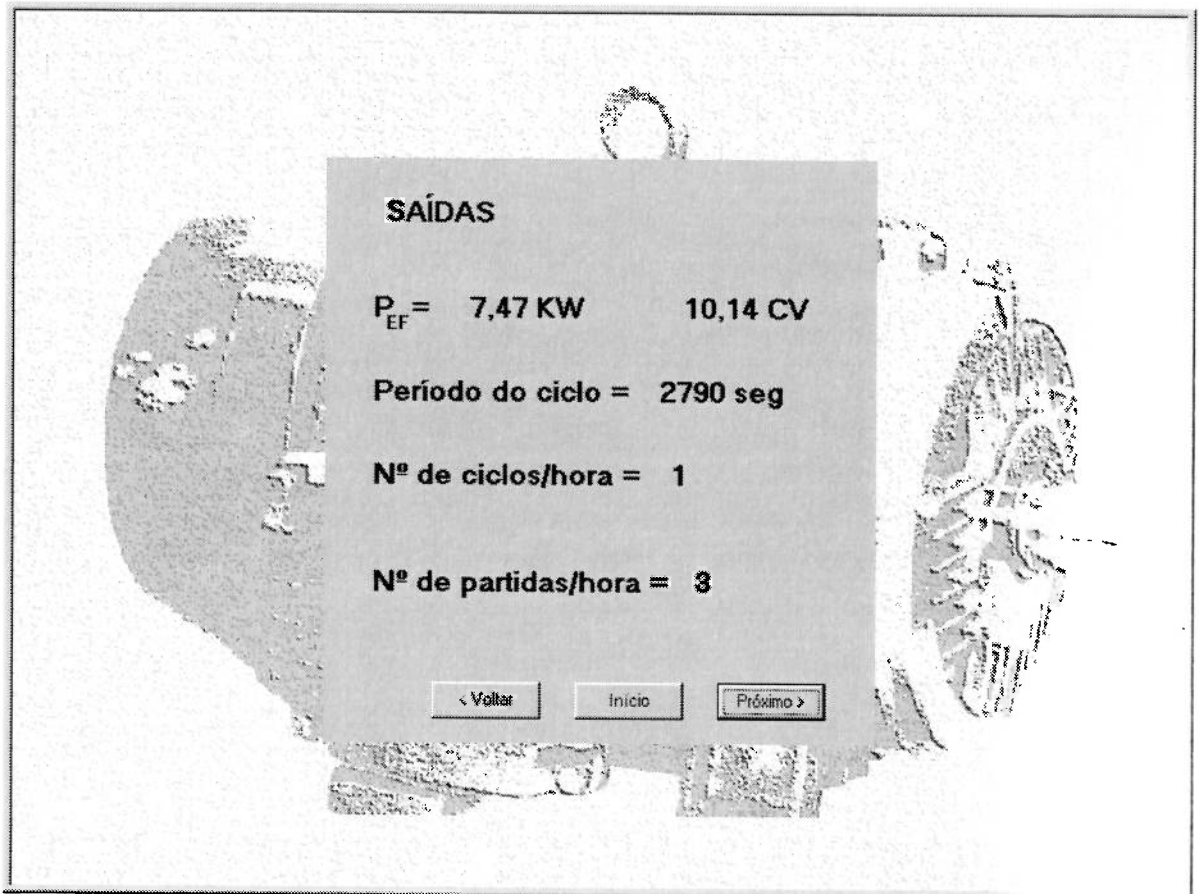
< Voltar

Início



The screenshot shows a configuration interface for a machine with 8 loads (P01 to P08). The interface is divided into three main sections: 'Digite o valor de cada carga' (Enter the value for each load), 'Digite o tempo de cada carga' (Enter the time for each load), and 'Escolha o status' (Choose the status). The 'Digite o valor de cada carga' section has radio buttons for 'KW' (selected) and 'CV'. The 'Digite o tempo de cada carga' section has radio buttons for 'seg', 'min' (selected), and 'horas'. The 'Escolha o status' section has a vertical list of dropdown menus for each load, with options like 'Partida', 'Regime', 'Ligado', and 'Desligado'. Navigation buttons include '< Voltar', 'Início', and 'Próximo >'. The background image shows a control panel with a large circular dial and various buttons.

Carga	Digite o valor de cada carga		Digite o tempo de cada carga			Escolha o status
	<input checked="" type="radio"/> KW	<input type="radio"/> CV	<input type="radio"/> seg	<input checked="" type="radio"/> min	<input type="radio"/> horas	
P 01	3.3		25			Partida
P 02	7.8		42			Regime
P 03	4.3		56			Regime
P 04	0		25			Ligado
P 05	6.2		12.6			Regime
P 06	13.12		7.4			Regime
P 07	0		6.5			Desligado
P 08	6.3		5.2			Partida



DIMENSIONAMENTO DA PARTIDA

Local da Instalação do Motor

<i>Altitude</i>	<i>Temperatura Ambiente Máxima</i>
Até <input type="text" value="2000"/> metros	Até <input type="text" value="40"/> °C

Condições de Partida <input type="radio"/> Vazio <input checked="" type="radio"/> Carga	Método de Partida <input checked="" type="radio"/> Direta <input type="radio"/> Chave Y/A <input type="radio"/> Compensadora Tap	Operação <input type="text" value="Partida"/>
--	--	---

Tipo de Carga <input type="radio"/> Constante <input checked="" type="radio"/> Linear <input type="radio"/> Parabólica <input type="radio"/> Hiperbólica	Perfil da Maior Carga de Partida do Ciclo Conjugado de Partida (Co) <input type="text" value="86"/> N.m Rotação de Regime (Nc) <input type="text" value="2000"/> rpm Momento de Inércia (Jcc) <input type="text" value="1.02"/> Kg.m ²
---	---

ESCOLHA DO MOTOR

Potencia Eficaz Corrigida = 8,39 KW 11,40 CV

Marca <input type="radio"/> WEG <input type="radio"/> Kohlbach <input checked="" type="radio"/> Eberle	Linha <input checked="" type="radio"/> Alto Rendimento <input type="radio"/> Standard	Nº de Pólos 4 -> 1800 RPM
Tensão da Rede 220/127 V	Potência <input checked="" type="radio"/> KW <input type="radio"/> CV 11 - 132M	

SAÍDAS:

Potência Nominal = 11 KW 15 CV

Potência Disponível = 9.94 KW 13.50 CV

Potência Eficaz Corrigida = 8.39 KW 11.40 CV

Carcaça = 132M

Tensão = 220/127 V

Corrente Nominal = 36,40 A

Corrente de partida = 313,04 A

Conjugado nominal = 60,88 N.m

Conjugado de partida = 188,72 N.m

Conjugado máximo = 188,72 N.m

Rotação Nominal = 1755 rpm

Fator de Potência 50% carga = 0,75 || 75% carga = 0,84 || 100% carga = 0,87

Momento de Inércia do Motor (J) = 0,23 Kg.m²

Rendimento 50% carga = 90,9% || 75% carga = 91,3% || 100% carga = 91,7%

Conjugado resistente = 71,72 N.m

Conjugado médio do motor = 169,85 N.m

Conjugado médio resistente = 78,86 N.m

Tempo de Rotor Bloqueado = B 7 (s) F 10 (s) H 12 (s)

Limite Térmico (0,8.Trb) = B 6 (s) F 8 (s) H 11 (s)

Tempo de aceleração = 3,15 s

< Voltar

Início

Análise Financeira

Análise Financeira

ENTRADAS Use ¹, ¹ (ponto) para separar as casa decimais ex. 0.36

Hm (Hs) Horas mensal de Funcionamento

CE (R\$/kWh) Custo atual da Energia Elétrica

i (%) Taxa anual de Juros

e (%) Taxa de Aumento anual da Energia

A (anos) Período de Análise do Projeto

ESCOLHA DO MOTOR Potencia Dimensionada = 15 CV 11 KW

Motor Alto Rendimento

Weg R1/R'2

Erbele P_ABS0 KW

Kohlbach

Valor

Banco de Dados Desconto de Lista (%) Standard

Fornecido Desconto de Lista (%) Alto Rendimento

Motor Standard

Weg R1/R'2

Erbele P_ABS0 KW

Kohlbach

Nº de Pólos

Potência KW

KW CV

SAÍDAS

Custo do motor Alto Rendimento = R\$ 806,43
Custo do motor Standard = R\$ 706,68
Investimento Inicial (II) = R\$ 99,75
Receita Anual = R\$ 470,72
Energia Anual Conservada = 4707,15 kWh
Tempo de Pay Back (Tpayback) = 2,54 meses
Vantagem Financeira (VF) = R\$ 4607,40
Valor Presente Líquido (VPL) = R\$ 3163,44
Índice de Lucratividade (I_L) = 32,71
Taxa Interna de Retorno (TIR) = 486,91%

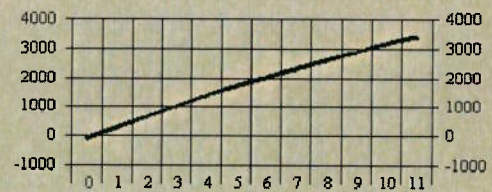
< Voltar

Início

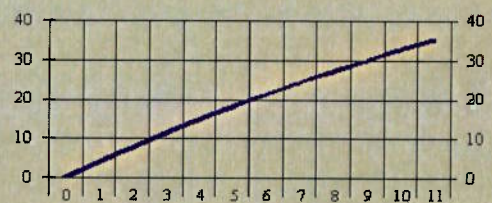
Vantagem Financeira (R\$) x Anos de Análise (anos)



Valor Presente Líquido (R\$) x Anos de Análise (anos)



Índice de Lucratividade x Anos de Análise (anos)



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LOBOSCO, O. S., DIAS, J. L. P. DA Seleção e Aplicação de Motores Elétricos. Vol. 1 e 2; Ed. McGraw-Hill 1.988
- [2] JORDÃO, RUBENS GUEDES, Máquinas Síncronas; Ed. Universidade de São Paulo, 1980
- [3] FALCONE, AURIO GILBERTO, Eletromecânica, Vol. 1 e 2, Ed. Edgard Blucher Ltda 1979
- [4] KUECK, J. D., CASADA, A.D., OTADUY, J. P., A Comparison of two Energy Efficient Motors - OAK National Laboratory - IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, nº 2, June 1998
- [5] COSTA, J.M, OLIVEIRA, D., TEIXEIRA, C.A., Adequação de Força Motriz - Estudo do caso na fabricação de Papel Reciclado
- [6] Diretrizes Básicas para Auxiliar o Desenvolvimento da Energia de Serviços de Conservação de Energia Elétrica - ESCO's - Procel, setembro/1997
- [7] LEMOS, A. N., VINSON, G. E., Perdas em Máquina Assíncrona Alimentada através de Controlador Tensão - Frequência - II Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica - Escola Politécnica - USP - SP/Brasil - Setembro, 1998
- [8] SZYZSKA, E.J., AMERICO, M., COSTA, R. S., Diagnósticos Energéticos na Indústria: Curso Prático - II Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica - Escola Politécnica - USP - SP/Brasil - Setembro, 1998
- [9] POOLE, A. D., GELLER, H., O Mercado de Serviços de Eficiência Energética do Brasil, INEE - Instituto Nacional de Eficiência Energética Abril - 1997

- [10] COGO, J. R., SÁ, J. S., OLIVEIRA, A. F.º., Economia de Energia em Motores de Indução Trifásicos - Revista Eletricidade Moderna, abril, 1996 - nº 265
- [11] TABOSA, P. R. SOARES, A. G., Ações Tecnológicas de Conservação de Conservação de Energia em Motores e Acionamentos, Revista Eletricidade Moderna, nº 263 - Fev./1996
- [12] FURTADO, C.H., Avaliação do desempenho de Materiais Ferromagnéticos para Motores - XIII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - Combustíveis, Outubro - 1995
- [13] NAU, L. S., Motores Elétricos de Indução: O que muda com a nova NBR 7094 - Revista Eletricidade Moderna nº 263 março, 1997
- [14] MAHERZI, S., CONTANT, J., GENOIS, J., LAFRANCE, G., O Impacto dos Motores de Alto Rendimento a Longo Prazo, Traduzido por MORENO, H, XIII Congresso Internacional sobre aplicações de Eletricidade - UIE - União Internacional de Eletrotecnologias e BNC - Comitê Nacional Britânico de Eletrotermia, Birminghham - Inglaterra, Junho, 1996
- [15] LANDGRAF, F.J.G., Aços Carbono e Aço Sicílio para Fins Elétricos - Curso aberto do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas - USP, 1999
- [16] MANUAL PARA ELABORAÇÃO DE PROGRAMAS DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO - Agência Nacional de Energia Elétrica, ciclo 1999/2000
- [17] CONVERSÃO DE ENERGIA: AS ESTRATÉGIAS PARA OS PRÓXIMOS ANOS - SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ESTRATÉGIAS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA PARA O BRASIL - Rio de Janeiro, Out., 1994 - realização PROCEL

- [18] LEWIS, C., WALTON, S.J., PWNNY, J. R., Monitoração de Rendimento sem o uso de Transdutores de Torque - XIII Congresso Internacional sobre aplicações de Eletricidade - UIE - União Internacional de Eletrotecnologias e BNC - Comitê Nacional Britânico de Eletrotermia, Birminghham - Inglaterra, Junho, 1996 - traduzido por MORENO, H.
- [19] LEE, W. J., Effects of Nonsinusoidal Voltage on the Operation of a Three-phase Induction Motors - IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, nº 2, June, 1990
- [20] WILLIANS, Operation of Three-phase induction Motors on Unbalanced Voltages, AIEE Transactions, pt. III-A, Power Apparatus and Systems, Vol. 73, pp. 125-137, Apr. 1954
- [21] GAFFORD, W.C., DUESTER, HOEFT, MOSHEK, C.C., Heating of Induction Motors on Unbalanced Voltages, AIEE Transactions, Power Apparatus and Systems, Vol.-PAS-78, pp 282-297, June, 1959
- [22] NAILEN, L.R., Utility Rebates for Efficient Motors – The Outlook For Demand – Side Management – IEEE – Transactions On Industry Applications, Vol. 33, nº 1, January/February, 1997
- [23] NAILEN, L.R., Can Field Tests Prove Motor Efficiency IEEE – Transactions On Industry Applications, Vol. 25, pp. 391/396, May/June, 1996
- [24] BONNET, A. H., Understanding Efficiency in Squirrel - Cage Induction Motors, IEE Transactions on Industry Applications, Vol. 16, July/August, 1980
- [25] STANDARD TEST PROCEDURE FOR POLYPHASE INDUCTION MOTORS – IEEE STANDARDS, 112, 1991

- [26] HEINTZ, J. R., HOUTON, R. L., NEMA NOMINAL EFFICIENCY - WHAT IS IT AND WHY?, IEE Transactions on Industry Applications, Vol. A-17, September/October, 1981
- [27] HENZEL, J., Understanding Premium-Efficiency Motor Economics, Plant Eng., pp 83-86, December 10 - 1992
- [28] BONNETT, H., Reliability Comparison Between Standard and Energy Efficient Motors - IEE Transactions on Industry Applications, On Industry Applications Vol. 33, nb. 1, January/February, 1997
- [29] JORDAN, E. H., Energy Efficient Electric Motors And Their Applications – Second Edition, Plenum Press, New York And London - 1994
- [30] Manual da Administração de Energia Nº 2 – Força Motriz – publicação da Agencia para aplicação de Energia de São Paulo –1997
- [31] Estatística – Produção de motores elétricos nacionais, período 1990-1999, ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica.
- [32] Relatório Eletrobrás – Setor Elétrico Brasileiro, março/2000
- [33] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas:
- NBR 5383 – Máquinas Elétricas Girantes – Máquinas de Indução – Determinação das Características –1982
 - NBR 7094 – Máquinas elétricas Girantes – Motores de Indução – Especificação, Nov/1996
 - NBR 5432 – Máquinas Elétricas Girantes – Dimensões e Potências Nominais, Ago/1983
- [34] NEMA – National Electric Manufactures Association: MG1-12 – Motors And Generators

- [35] IEC 34-12 Methods For Determining Losses And Efficiency Of Rotating Electric Machinery Form Tests
- [36] IEEE – 112 – IEE Standard Test Procedure For Polyphase Induction Motors Generators
- [37] BEN – Balanço Energético Nacional – 1999
- [38] BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Social, Informe Infra-estrutura – Área de Projetos de Infraestrutura, Agosto, 1999
- [39] SIEGFRIED, K., Motores de Alto Rendimento, Uma Economia Viável?, Eletricidade Moderna, Outubro, 1998
- [40] ALBUQUERQUE, P. C., Motores de Alto Rendimento: Vale a Pena Pagar Mais?, Eletricidade Moderna – Agosto, 1982
- [41] SENS, M. R., Avanços Tecnológicos nos Motores Elétricos, Eletricidade Moderna, Abril 1985
- [42] NETO, S.C.P., ROLIM, D. G., GONZAGA, A. N., DUARTE, D. M., Análise Técnico - Econômica da Substituição de Motores de Baixa Potência, Eletricidade Moderna, Março, 1990
- [43] HUMES A. F. de P. C; MELO I.S. H. de; MARTINS W. T., Noções de Cálculo Numérico; Ed Mc Graw- Hill do Brasil, 1984
- [44] Catálogo Geral – Motores elétricos- Edição 2000 – Weg
- [45] Motores Elétricos Trifásicos - Edição 2000 - Catálogo Kohlbach
- [46] Motores Elétricos Trifásicos para Uso Industrial - Edição 2000 – Catálogo Eberle

[47] Motores de Indução de Gaiola Alimentados por Inversores de Frequencia;
Publicação do Departamento de P&D do Produto – Weg Indústria - Divisão Motores
– Novembro 2.000

Internet

<http://www.energia.sp.gov.br>

<http://www.eletropaulo.com.br>

<http://www.motor.doe.gov.br/procel>

<http://www.ceeformat.org>

<http://www.nema.org>

<http://www.eimotors.com/qa.html>

<http://www.bge.cpm/modsrv/bvs/conserved/efficientmotors.html>

<http://www.energy.ca.gov>

<http://www.eia.doe.gov/oca7/ilo99/world.html>

<http://www.ax.apc.org/~inee>

<http://www.weg.com.br>

<http://www.eberle.com.br>

<http://www.kolbach.com.br>

<http://www.bge.com/prodsrv/bus/conserved/efficientmotors.htm>