

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS TÉCNICOS E ECONÔMICOS NA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS DE 1CV A 10 CV

MARCOS ANTONIO DA SILVA

Orientador:

MANUEL LOSADA y GONZALEZ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da UFMG, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

PPGEE – UFMG
Dezembro, de 2009

AGRADECIMENTOS

Se hoje posso-me orgulhar de um sonho realizado, é porque pude contar primeiramente com Deus e com pessoas que sempre estiveram ao meu lado, em cada etapa dessa construção e em cada momento de felicidade e angústia.

A minha esposa Beth agradeço pelo amor, companheirismo, carinho, paciência e apoio incondicional nos diversos momentos de alegria e de dificuldades durante a execução deste trabalho.

Aos meus filhos Josias, Thiago e Lucas pelo carinho, apoio e incentivo.

Ao meu orientador, prof. Manuel, pelo apoio, estímulo e disponibilidade que teve na orientação desse trabalho. Você é merecedor de minha admiração por ser uma pessoa humana diferenciada e pela sua competência técnica e ética profissional.

Aos professores do PPGEE – UFMG Carlos Barreira Martinez, Hélder de Paula e Selênio Rocha Silva e todos os colegas professores do CEFET-MG que contribuíram por diversas vezes com seus tempos na solução de dúvidas.

Aos meus companheiros do Laboratório de Pesquisa em Conservação de Energia da Escola de Engenharia da UFMG que me apoiaram em todos os momentos na escrita desta dissertação.

A todos os meus amigos que estiveram ao meu lado nessa caminhada e em especial para Rafaela.

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma estratégia para a determinação do momento de substituição de um motor elétrico, focada em análises técnica e econômica. Essa estratégia tem como principal objetivo a conservação de energia na utilização de motores trifásicos de indução em consumidores industriais, devido ao crescente uso destes nas últimas décadas.

No Brasil, o consumo de energia elétrica em 2007 foi de 376,90 TWh, nos diversos setores da economia, sendo que os motores de indução consumiram aproximadamente 25%, ou seja, 94,22 TWh. Com participação tão significativa no consumo de energia, evidenciou a necessidade de melhorar suas eficiências energéticas.

O procedimento de melhoria da eficiência energética foi acelerado em 2002, principalmente devido ao racionamento de energia elétrica de 2001-2002, quando foi sancionado o decreto federal de número 4508 (2002) do PRESIDENTE DA REPUBLICA, que dispunha sobre a regulamentação específica dos níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução de rotor gaiola. Este decreto classificava os motores em tipo padrão e alto rendimento, e definia seus rendimentos. Posteriormente, a portaria interministerial número 553 (2005), editada em 8 de dezembro 2005, estabeleceu os níveis mínimos de rendimento nominal, sem a distinção entre as linhas padrão e de alto rendimento.

O Ministério de Minas e Energia, as concessionárias de energia e os fabricantes de motores têm desenvolvido intensas campanhas para que se efetue a aquisição de motores de alto rendimento ou substitua o motor padrão das empresas pelo motor de alto rendimento. Todavia, deve-se antecipadamente analisar se a aquisição ou substituição é vantajosa para o usuário final.

Nesta dissertação, é verificada a viabilidade de aquisição ou substituição de motores, fundamentada em uma análise de parâmetros técnicos e econômicos. Os motores analisados têm potências de 1, 5 e 10 CV, pois a faixa de 0 a 10 CV representa aproximadamente 86% dos motores vendidos no mercado brasileiro nos últimos vinte anos.

A análise de parâmetros técnicos consiste em verificar as condições de operação dos motores, quando os mesmos operam fora de suas condições nominais, tais como: carregamento, desequilíbrio de tensão, sobretensão, subtensão, harmônicas, temperatura de operação e fatores ambientais. Esses parâmetros alteram as suas perdas internas, variando as temperaturas de operação e alterando as vidas úteis.

A análise de parâmetros econômicos consiste em determinar o tempo de retorno de investimento e custo por hora de operação, onde os custos dos motores, taxa de juros do mercado, rendimentos, tarifas de energia e demanda são utilizadas nos cálculos.

Finalmente, o tempo de vida útil e o tempo de retorno de investimento são simulados em ambiente computacional, com o uso de Matlab, para condições específicas de uso de motores, e os seus valores são confrontados, definindo então a viabilidade da aquisição ou substituição desses motores.

Palavras Chaves - Motores de indução trifásicos, vida útil, parâmetros técnicos, parâmetros econômicos.

ABSTRACT

This dissertation presents a strategy to determine when to replace motors, focusing on technical and economic analysis. The main objective of this strategy is the conservation of energy in the use of three-phase induction motors in industrial consumers due to the increasing usage of these motors in recent decades.

In Brazil, the electricity consumption in 2007 was 376.90 TWh in various sectors of the economy, and induction motors consume about 25%, or 94.22 TWh. Having such a significant share of energy consumption, the need to improve the energy efficiency of these motors became evident.

The procedure for energy efficiency improvement originated in 2002, mainly due to electricity rationing in 2001-2002, when the President of the Republic sanctioned decree number 4508 (2002), which deals with the specific regulation of the minimum energy efficiency of three-phase squirrel cage induction motors. The decree described the motors in both standard and high yield, and set their performance. Subsequently, ministerial decree number 553 (2005), published in December 8, 2005, established the minimum levels of nominal performance, without distinction between standard lines and high yield.

The Ministry of Mines and Energy, electric utilities and motor manufacturers have developed intense campaigns to acquire high performance motors or replace the standard motors companies with high-performance motors. However, one should consider in advance whether the acquisition or replacement is advantageous for the end user.

In this dissertation, the feasibility of acquisition and replacement of motors was checked, based on an analysis of technical and economic parameters. The motors have analyzed powers of 1, 5 and 10 CV, because the track 0 -10 CV represents approximately 86% of motors sold on the Brazilian market over the past twenty years.

The analysis of technical parameters consists in checking the conditions of operation of the motors when they operate outside their nominal conditions, such as loading, voltage unbalance, overvoltage, undervoltage, harmonics, operating temperature and environmental factors. These parameters alter the internal losses of the motors, varying their operating temperatures and changing the motors' operational life.

The analysis of economic parameters consists in determining the time of return on investment and cost per hour of operation, where costs of the motors, the interest rate market, income, energy rates and demand rates are used in the calculations.

In conclusion, the operational lifetime and the time of return on investment are simulated in a computerized environment, using Matlab, for specific conditions related to motor use, and these values are then compared, thus defining the feasibility of the acquisition or replacement of these motors.

Keywords - Three-phase induction motor, lifetime of the motor, technical parameters, economic parameters.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Invenção do motor elétrico	1
1.2	Evolução tecnológica dos motores elétricos	2
1.3	Evolução tecnológica focada em conservação de energia	3
1.4	Consumo de energia no Brasil	4
1.5	Motores padrão e de alto rendimento	5
1.6	Análise da substituição do motor padrão pelo de alto rendimento	6
1.7	Análise econômica	7
1.8	Análise técnica	8
1.9	Objetivos do trabalho	8
2	Influência da Temperatura na Vida Útil do Motor	10
2.1	Introdução	10
2.2	Partes constituintes do motor	10
2.2.1	Enrolamentos do estator	10
2.2.2	Rotor tipo gaiola	11
2.2.3	Rotor bobinado	11
2.2.4	Entre ferro	11
2.2.5	Mancais rolamento	11
2.3	Classe de isolamento	12
2.4	Comportamento térmico dos motores de indução	15
2.5	Comportamento das perdas do motor de indução	18
2.6	Regimes de operação de um motor elétrico	19
2.7	Altitude de operação e meio refrigerante	21
2.8	Modelo térmico	21
2.9	Conclusão	25
3	Efeitos da Tensão de Alimentação não Ideal na Vida do Útil do Motor	26
3.1	Introdução	26
3.2	Limites de tensão e frequência	26
3.3	Circuito equivalente dos motores de indução	27
3.4	Efeitos da sobretensão e subtensão em motores	28
3.5	Desequilíbrio de tensão	28
3.5.1	Métodos de cálculo	29
3.5.2	Efeitos do desequilíbrio em motores de indução	30
3.5.3	Perdas devido ao desequilíbrio de tensão em motores de indução	31
3.5.4	Temperatura em função do desequilíbrio de tensão em motores de indução	32
3.5.5	Efeito do desequilíbrio de tensão no conjugado desenvolvido	32
3.6	Harmônicos	33
3.6.1	Distorção harmônica total	33

3.6.2	Circuito equivalente de motores de indução para componentes harmônicas	34
3.6.3	Aumento das perdas no motor de indução devido as componentes harmônicas	37
3.6.4	Fator harmônico de tensão	39
3.6.5	Outros efeitos de harmônicos em motores de indução	40
3.6.6	Conversores estáticos de frequência	41
3.6.6.1	Componentes harmônicas nas correntes de linha	42
3.6.6.2	Influência do conversor estático sobre as perdas do motor de indução	42
3.7	Conclusão	42
4	Manutenção de Motores	43
4.1	Introdução	43
4.2	Tipos de manutenção	43
4.2.1	Manutenção corretiva	43
4.2.2	Manutenção preventiva	44
4.3	Confiabilidade	44
4.4	Vida útil de motores	46
4.5	Influência dos fatores ambientais na vida útil do isolamento	47
4.6	Quantificação dos fatores ambientais	47
4.7	Vida útil dos mancais	48
4.7.1	Efeito do carregamento na vida útil dos mancais	49
4.7.2	Efeito do desbalanceamento na vida útil dos mancais	49
4.7.3	Efeito do desalinhamento na vida útil dos mancais	50
4.8	Custos de Manutenção em motores	51
4.8.1	Calendário de manutenção	51
4.8.2	Estudo de caso do custo de manutenção	52
4.9	Conclusão	53
5	Análise Econômica	54
5.1	Introdução	54
5.2	Ciclo de vida de um motor de indução	54
5.3	Custos do motor durante seu ciclo de vida	54
5.3.1	Custos de projeto de instalação e instalação	55
5.3.2	Custos de aquisição.	55
5.3.3	Custos de manutenção	57
5.3.4	Custos de operação	59
5.3.4.1	Custo com rendimento	59
5.3.4.2	Custo com carregamento	59
5.3.4.3	Custo com desequilíbrio de tensão	59
5.3.4.4	Custo com subtensão	59
5.3.4.5	Custo com sobretensão	60
5.3.4.6	Custo devido às componentes harmônicas de tensão	60
5.3.4.7	Custo da energia contratada	60
5.4	A análise econômica	63
5.4.1	Valor presente líquido	64

5.4.2	Taxa interna de retorno	65
5.4.3	Tempo de retorno de investimento	66
5.5	Conclusão	67
6	Estimativas de Vida Útil do Motor	68
6.1	Introdução à simulação	68
6.2	Análise de parâmetros técnicos	68
6.2.1	Considerações iniciais	68
6.2.2	Casos simulados	70
6.2.3	Simulações	70
6.2.4	Metodologia para a determinação da vida útil do motor	70
6.2.4.1	Efeito do carregamento na vida útil do motor	73
6.2.4.2	Efeito do desequilíbrio de tensão	75
6.2.4.3	Efeitos da subtensão e do desequilíbrio de tensão	76
6.2.4.4	Efeitos da sobretensão e do desequilíbrio de tensão	77
6.2.4.5	Efeitos de harmônicas e desequilíbrio de tensão	78
6.2.4.6	Efeitos da temperatura ambiente e desequilíbrio de tensão	80
6.3	Análise de parâmetros econômicos	81
6.3.1	Metodologia para a determinação de parâmetros econômicos	82
6.3.2	Simulações	84
6.3.2.1	TRI com tarifa verde - motor de 1 CV	84
6.3.2.2	TRI com tarifa verde para motor de 5 CV	88
6.3.2.3	TRI com tarifa verde para motor de 10 CV	91
6.3.2.4	TRI com tarifa azul para motor de 1 CV	94
6.3.2.5	TRI com tarifa azul para motor de 5 CV	96
6.3.2.6	TRI com tarifa azul para motor de 10 CV	97
6.3.2.7	TRI com tarifa convencional para motor de 1 CV	99
6.4	Conclusão	100
	Conclusões Finais e Propostas de Trabalhos Futuros	102
	Referências Bibliográficas	104
	Anexo A - Determinação de Parâmetros Internos dos Motores de Indução	109
	Anexo B - Simulações de Temperaturas de Operação dos Motores de Indução	116
	Anexo C - Tarifas de Energia Elétrica	122

1 INTRODUÇÃO

1.1 Invenção do motor elétrico

O ano de 1866 pode ser considerado como o de invenção da máquina elétrica, quando o cientista alemão Werner Siemens inventou o primeiro gerador de corrente contínua auto-excitado. Entretanto, esta máquina elétrica foi o último estágio de um processo de estudos, pesquisas e invenções de muitos outros cientistas, durante mais de dois séculos. A primeira máquina eletrostática foi construída em 1663, pelo alemão Otto Guericke, e aperfeiçoada em 1774 pelo suíço Martin Planta. O físico dinamarquês Hans Christian Oersted, em 1820, verificou por acaso que a agulha magnética de uma bússola era desviada de sua posição norte-sul quando passava perto de um condutor no qual circulava corrente elétrica. Essa observação foi o primeiro passo em direção ao desenvolvimento do motor elétrico. Em 1832, o cientista italiano S. Dal Negro construiu a primeira máquina de corrente alternada com movimento de vaivém. Em 1833 o inglês W. Ritchie inventou o comutador, construindo um pequeno motor elétrico em que o núcleo de ferro era envolvido com uma bobina elétrica, por onde circulava uma corrente, girava sobre ação de um ímã permanente. Para realizar uma rotação completa, a polaridade do eletroímã era alternada a cada meia volta, através do comutador. A inversão da polaridade foi demonstrada pelo mecânico parisiense H. Pixii ao construir um gerador com um ímã em forma de ferradura que girava diante de duas bobinas fixas com um núcleo de ferro. A corrente alternada era transformada em corrente contínua pulsante através de um comutador.

Em 1838, o professor alemão Moritz Hermann von Jacobi desenvolveu um motor elétrico rudimentar e o aplicou a um bote de navegação. O motor era alimentado por células de baterias, sendo que o bote transportou 14 passageiros e navegou a uma velocidade de 4,8 quilômetros por hora. A aplicação prática da energia elétrica em trabalho mecânico ficou assim comprovada. Entretanto, toda a energia provinha de baterias, que eram caras e de uso restrito. A preocupação, então, voltou-se à geração de energia elétrica de baixo custo.

Em 1866, Siemens construiu um gerador sem ímã permanente, provando que a tensão necessária para o magnetismo podia ser retirada do próprio enrolamento do rotor, isto é, que a máquina podia se auto-excitar. O primeiro gerador de Werner Siemens possuía uma potência de aproximadamente 30 watts e uma rotação de 1.200 rpm. A máquina podia também funcionar como motor, desde que se aplicasse aos seus bornes uma corrente contínua. Em 1879, a firma Siemens & Halske apresentou a primeira locomotiva elétrica, com potência de 2 kW. Mas a máquina tinha alto custo e era vulnerável em serviço, exigindo o desenvolvimento de um motor mais barato, robusto e de menor custo de manutenção.

Em 1885, o engenheiro eletricitista italiano Galileo Ferraris construiu um motor de corrente alternada de duas fases. Em 1887, o iugoslavo Nikola Tesla apresentou um pequeno protótipo de motor de indução bifásico com rotor em curto-circuito. Em 1889, o engenheiro eletricitista russo Michael von Dolivo Dobrowolsky, da firma AEG, de Berlim, persistindo na pesquisa do motor de corrente alternada, entrou com pedido de patente de um motor trifásico com rotor de gaiola. Ele era simples, robusto, silencioso e tinha menos manutenção e alta segurança em operação. Em 1891, Dobrowolsky iniciou a fabricação em série de motores de indução, nas potências de 0,4 a

7,5 kW, sendo que até o final do século XIX, praticamente quase todos os tipos de motores elétricos foram desenvolvidos (SENS, M.; 2001).

A figura 1.1 mostra os principais tipos de motores elétricos existentes, divididos em: motores de corrente alternada, motores de corrente contínua e motor universal, ressaltando que este último pode operar tanto em tensão contínua quanto em tensão alternada (MAMEDE, J.; 1997).

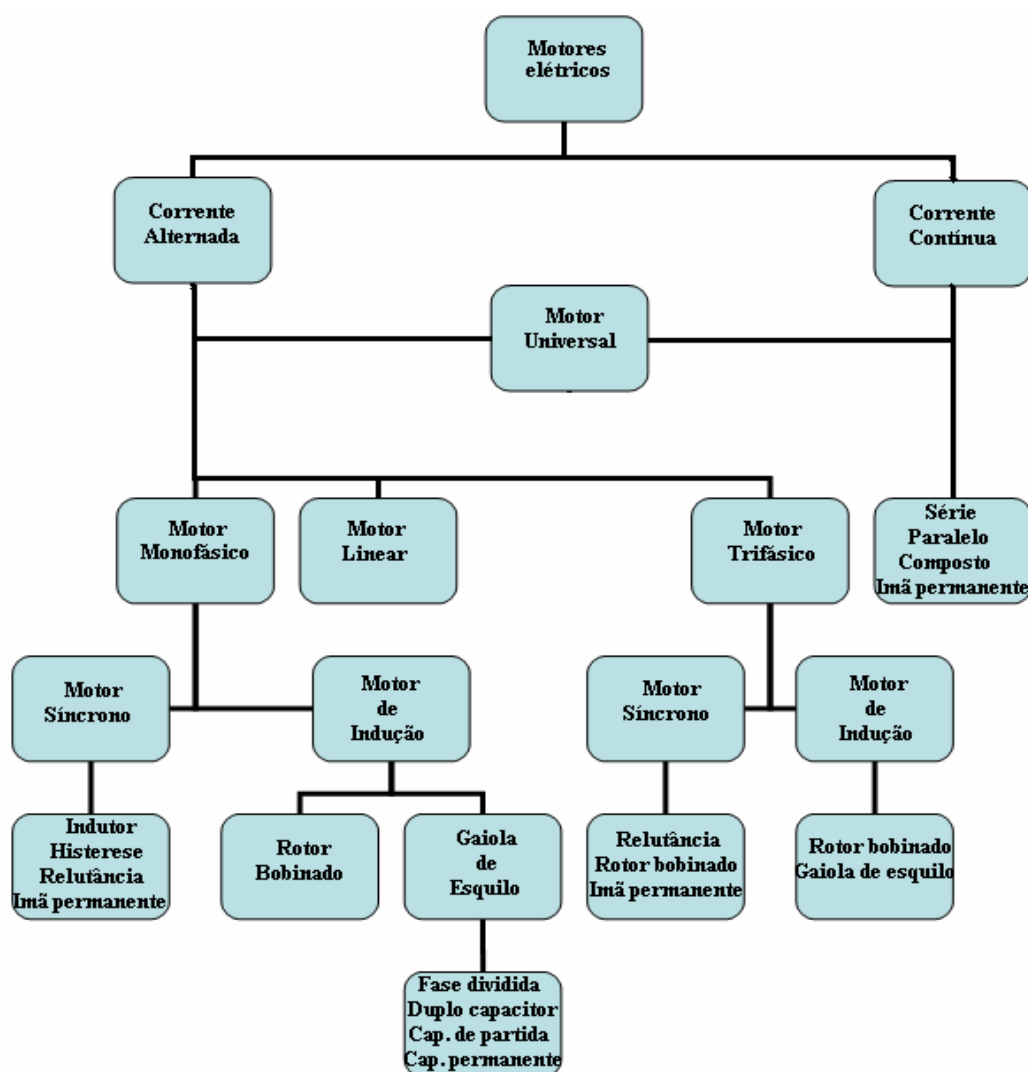


Fig. 1.1 Principais tipos de motores elétricos

1.2 Evolução tecnológica dos motores elétricos

Do início até a metade do século XX, foi um período de intensas pesquisas industriais, onde os motores e geradores de corrente contínua eram amplamente utilizados em atividades industriais que necessitassem de tensão contínua, controle de velocidade e conjugados elevados. Os motores síncronos eram utilizados para correção de fator de potência, cargas de grande impacto com baixa velocidade e elevada potência, como moinho de bola em indústrias de cimento, enquanto que os motores de indução eram utilizados em atividades de menor significância.

A partir da década de 50, com o desenvolvimento dos dispositivos eletrônicos de retificação em estado sólido, os geradores de corrente contínua praticamente viraram peça de museu. Nos anos 80, com o desenvolvimento em escala industrial dos conversores estáticos de frequência, foi a vez de certas aplicações dos motores de corrente contínua, e do motor síncrono, serem substituídas pelos motores de indução. O motivo dessa substituição deve-se ao fato de que a utilização de conversores estáticos, acionando e controlando a velocidade e o conjugado dos motores de indução, fez com que a utilização dos mesmos se tornasse mais vantajosa quando comparada aos motores de corrente contínua e motores síncronos. Isso se deve ao menor custo, menos gastos com manutenção, capacidade de operar em ambientes mais poluídos e construção robusta e compacta.

Para atender a demanda, projetos cada vez mais arrojados são desenvolvidos para melhorar o desempenho e custo dos motores de indução. Um bom exemplo é a relação peso-potência, que em 1891 era da ordem de 88 kg/kW e passou para 5,7 kg/kW no ano 2.000, como mostrados na figura 1.2 (CONSERVAÇÃO DE ENERGIA, 2006).

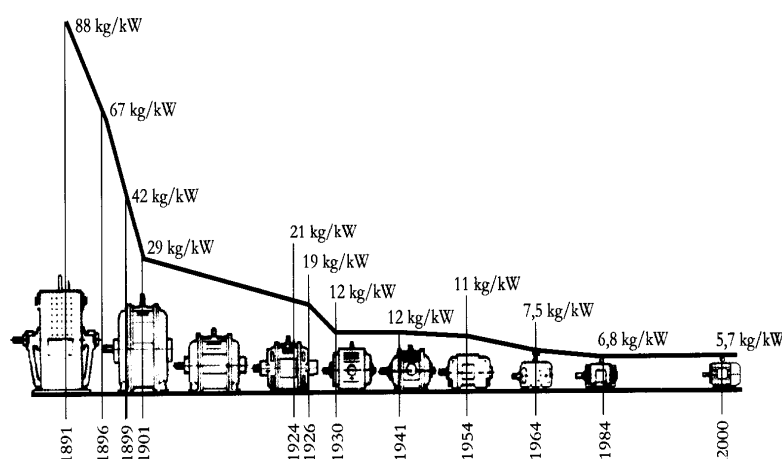


Fig. 1.2 Evolução dos motores elétricos

1.3 Evolução tecnológica focada em conservação de energia

A utilização nacional crescente dos motores de indução nos acionamentos nas últimas décadas, com uma participação cada vez mais significativa no consumo de energia, evidenciou a necessidade de melhorar sua eficiência energética. A tabela 1.1 apresenta o número de motores vendidos entre os anos 2001 a 2006 no Brasil, conforme ABINEE (2007).

Tabela 1.1 Número de motores trifásicos vendidos no mercado interno

Faixa de potência	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Total
1. Até 1 CV	433.287	403.204	404.317	486.177	499.690	686.286	2.912.961
2. de 1 CV até 10 CV	760.608	758.017	779.439	915.329	910.902	1.034.762	5.159.057
3. de 10 CV até 40 CV	132.857	136.692	152.191	182.306	188.442	233.083	1.025.571
4. de 40 CV até 100 CV	28.356	28.093	31.247	37.858	42.305	55.408	223.267
5. de 100 CV até 300 CV	11.451	12.348	13.338	14.695	16.923	20.030	88.785
6. de 300 CV	1.253	1.281	1.525	1.606	2.157	2.572	10.394
TOTAL	1.367.812	1.339.635	1.382.057	1.637.971	1.660.419	2.032.141	9.420.035

Ao analisar essa tabela, verifica-se que os motores de potência igual e inferior a 10 CV representam aproximadamente 86% de todos os motores trifásicos vendidos.

Atualmente, no mercado brasileiro, os esforços de projetos e fabricação são focados no aumento dos rendimentos e conseqüente redução de consumo de energia dos motores de indução. A referência HADDAD, J.; SANTOS A.H. (2008), cita que a faixa de motores com potência inferior a 10 CV corresponde a 89% dos motores de indução trifásicos vendidos nos últimos vinte anos no mercado brasileiro, conforme figura 1.3. E que esses motores apresentam possibilidades de desenvolvimento de projetos eficientes em conservação de energia.

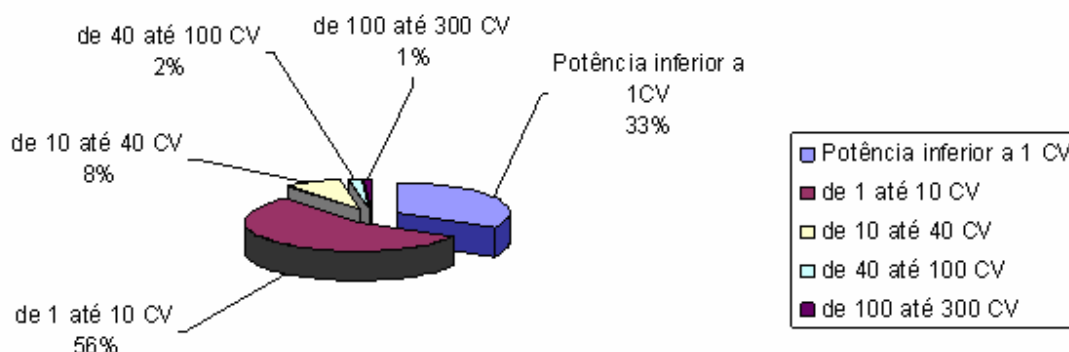


Fig. 1.3 Motores vendidos por faixa de potência

1.4 Consumo de energia no Brasil

No Brasil, o consumo de energia elétrica em 2007 foi de 376,90 TWh, nos diversos setores da economia (EPE, 2008). O setor industrial tem a maior participação no mercado e consumiu 46%, enquanto que os setores residencial, comercial e demais setores consumiram, respectivamente, 24%, 14% e 16% de toda a energia elétrica produzida, conforme é mostrado na figura 1.4. Desse total de energia, os motores de indução consumiram aproximadamente 25%, ou seja, 94,22 TWh. Nestes termos, um aumento de 0,5% no rendimento do sistema motriz, equivale à construção de uma central geradora virtual de 120 MW, resultando em uma economia de quase duzentos milhões de dólares por ano (HADDAD, J.; SANTOS A.H.; 2008).

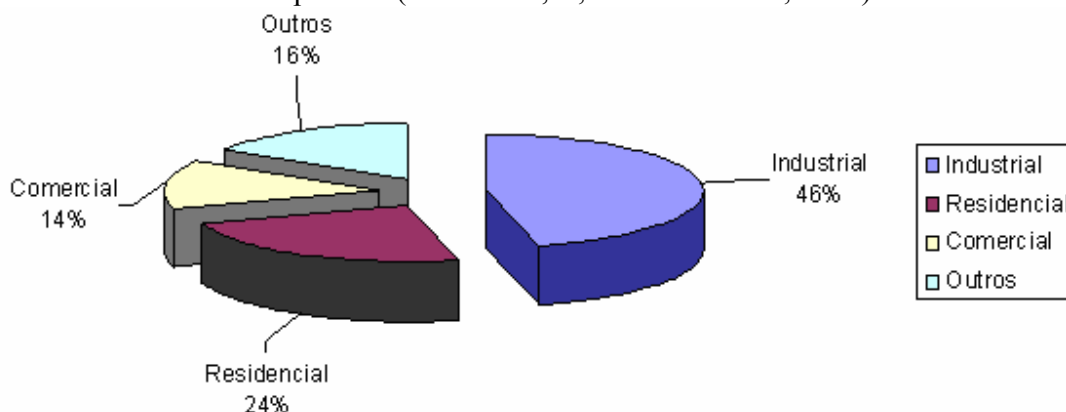


Fig. 1.4 Consumo de energia no Brasil em 2007

A figura 1.5 mostra o consumo de energia elétrica por área de processo na indústria brasileira.

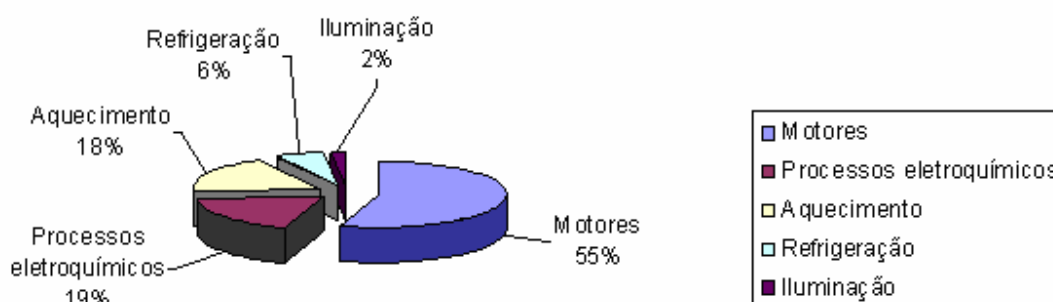


Fig. 1.5 Consumo de energia elétrica na indústria

1.5 Motores padrão e de alto rendimento

Em 2002, principalmente devido ao racionamento de energia elétrica de 2001-2002, foi sancionado o decreto número 4508 (2002), que dispunha sobre a regulamentação específica dos níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução de rotor gaiola de esquilo, de fabricação nacional ou importados para comercialização ou uso no Brasil. Este decreto classificava os motores em tipo padrão e de alto rendimento, e definia seus rendimentos mínimos, como mostrados nas tabelas 1.2 e 1.3.

Tabela 1.2. Rendimento de motores Padrão

Potência CV / HP	kW	Pólos			
		2	4	6	8
1	0,8	77	78	73	66
1,5	1,1	79	79	75	74
2	1,5	81	82	77	77
3	2,2	82	83	79	78
4	3	83	83	81	79
5	3,7	85	85	84	80
6	4,5	85	86	84	82
7,5	5,5	86	87	85	84
10	7,5	88	88	86	85
12,5	9,2	88	88	88	86
15	11	88	89	89	88
20	15	89	90	90	89
25	19	90	91	90	89
30	22	90	91	91	90
40	30	90	92	92	90
50	37	92	92	92	91
60	45	92	93	92	91
75	55	92	93	92	92
100	75	93	93	93	92
125	90	93	93	93	93
150	110	93	94	94	93
175	132	94	94	94	
200	150	94	95	94	
250	185	94	95		

Tabela 1.3 Rendimento motores de alto rendimento

Potência CV / HP	kW	Pólos			
		2	4	6	8
1	0,8	80	81	80	70
1,5	1,1	82,5	82	77	77
2	1,5	83,5	84	83	83
3	2,2	85	85	83	84
4	3	85	86	85	85
5	3,7	87,5	88	88	86
6	4,5	88	89	88	86
7,5	5,5	88,5	90	88	86
10	7,5	89,5	90	89	89
12,5	9,2	89,5	90	89	89
15	11	90,2	91	90	89
20	15	90,2	91	90	90
25	19	91	92	92	90
30	22	91	92	92	91
40	30	91,7	93	93	91
50	37	92,4	93	93	92
60	45	93	94	94	92
75	55	93	94	94	93
100	75	93,6	95	94	93
125	90	94,5	95	94	94
150	110	94,5	95	95	94
175	132	94,7	95	95	
200	150	95	95	95	
250	185	95,4	95		

Posteriormente, a portaria interministerial número 553 (2005), editada em 8 de dezembro 2005, estabeleceu que, a partir de sua publicação, os níveis mínimos de rendimento nominal, sem a distinção entre as linhas padrão e de alto rendimento, são aqueles mostrados na tabela 1.3. Tais níveis correspondem aos níveis mínimos dos motores de alto rendimento definidos pelo Decreto 4.508.

A figura 1.6 mostra as curvas de rendimento entre motores de alto rendimento e padrão de quatro pólos e potência de 1 até 200 CV.

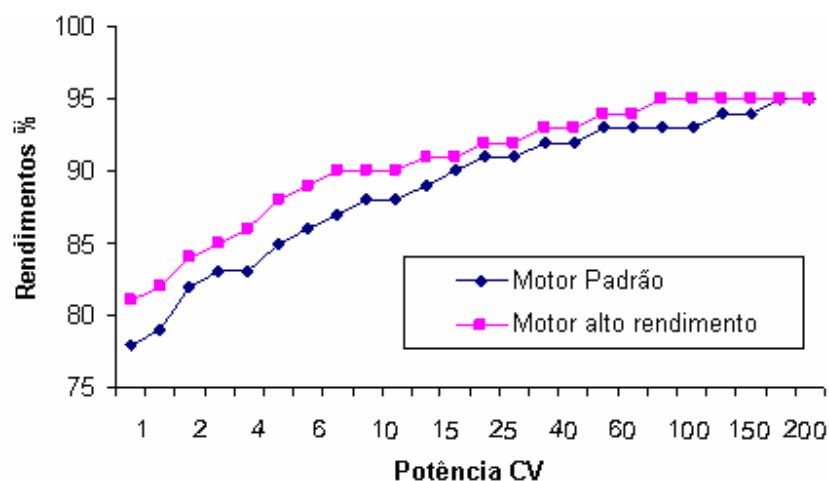


Fig. 1.6 Rendimentos de motores padrão e de alto rendimento de 4 pólos

Ao analisar essa figura, pode-se notar que a diferença de rendimentos é maior para motores de potência inferior e esse valor tende a diminuir quando comparadas aos motores de maior potência, devido a maior qualidade aplicada no processo de fabricação desses últimos.

1.6 Análise da substituição do motor padrão pelo de alto rendimento

Como a portaria interministerial número 553 (2005) define que os fabricantes de motores têm o prazo de quatro anos para atender a nova legislação no que concerne à fabricação e 4,5 anos para finalizar a comercialização de motores de indução tipo padrão, tem-se, nesse período, no mercado, motores novos de alto rendimento e do tipo padrão para serem comercializados.

A NBR-7094 (2003), em seu item 13.1, define os tipos de motores que se enquadram na definição de motores de alto rendimento. Esses motores são de indução, rotor de gaiola, trifásicos, regime tipo S1, velocidade única, categorias N e H, potência nominal igual ou superior a 0,75 kW até 185 kW, com 2, 4, 6 e 8 pólos, 60 Hz, tensão nominal igual ou inferior a 600 V, grau de proteção IP44, IP54 ou IP55. O grau de proteção IP55 substitui plenamente os requisitos dos inferiores (algarismos menores). Isto permite a padronização da produção em um único tipo que atenda a todos os casos, com vantagem adicional para o comprador nos casos de ambientes menos exigentes (WEG, 2007). Segundo a mesma norma, os motores de indução tipo padrão não possuem valores de rendimento normalizado nem método de ensaio estabelecido para tal, cabendo ao fabricante marcar o rendimento na placa de identificação.

Quanto aos aspectos construtivos, o que difere o motor de alto rendimento do motor padrão são:

- Chapas magnéticas com aço-silício de melhor qualidade;
- Maior volume de cobre, o que reduz a temperatura de operação;

- Enrolamentos especiais que reduzem as perdas estatóricas;
- Rotores tratados termicamente reduzindo as perdas rotóricas;
- Alto fator de enchimento das ranhuras que possibilita a melhor dissipação do calor gerado;
- Anéis de curto-circuito dimensionados para produzir menores perdas;
- Projetos das ranhuras otimizados para incrementar o rendimento.

O governo federal, representado pelo Ministério de Minas e Energia, as concessionárias de energia e os fabricantes de motores, têm desenvolvido intensas campanhas para que se efetue a aquisição de motores de alto rendimento ou substitua o motor padrão das empresas pelo motor de alto rendimento. Todavia, antes de aceitar cegamente esse apelo comercial, deve-se analisar se a substituição é vantajosa para o usuário. Portanto, uma análise econômica e técnica deve ser efetuada para viabilizar ou não a substituição do motor, que consiste em um dos objetivos do presente trabalho.

1.7 Análise econômica

O professor Aníbal de Almeida, da Universidade de Coimbra, fez a seguinte afirmação: “Em uma indústria, um motor de indução pode consumir por ano, em energia elétrica, o equivalente de 5 a 10 vezes o custo de sua aquisição, e ao longo de seu ciclo de vida, em torno de 12 a 20 anos, um total de 60 a 200 vezes do custo de aquisição” (ANÍBAL, A.T.; 2006).

Portanto, a análise econômica é mais significativa para definir o momento da sua substituição, apesar da relevância dos fatores técnicos, pois o custo total com tarifas de energia corresponde a 97,3% do custo total das despesas efetuada com o motor durante sua vida útil. A figura 1.7 mostra, além do consumo de energia, o custo percentual de aquisição e de rebobinamento de motor (HOLMQUIST, J.; MALINOWSKI, J.; 2006).

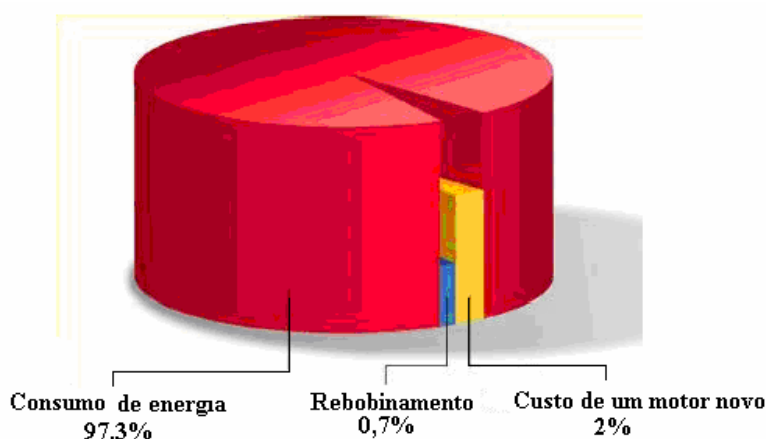


Fig. 1.7 Custos de energia, aquisição de motor e rebobinamento.

No Brasil, outro fator econômico que deve ser analisado é o contrato de fornecimento de energia, devido à diversidade de tarifas (convencional, horo-sazonal verde e azul) e ainda os horários de ponta e fora de ponta, pois uma escolha técnica/econômica de fornecimento de energia elétrica pode reduzir significativamente o custo da tarifa de energia, afetando o momento ideal de substituição do motor.

1.8 Análise técnica

A análise técnica consiste em verificar as condições de operação do motor, avaliando o seu rendimento, situação da rede elétrica de alimentação, horas anuais de operação, localização física, temperatura ambiente, temperatura de operação, classe de isolamento, altitude de operação, carregamento e procedimentos de manutenção. Portanto, uma abordagem técnica minuciosa de cada item deve ser realizada.

Como a legislação vigente permite a comercialização simultânea de motores dos tipos padrão e de alto rendimento somente até dezembro de 2009, têm-se as seguintes opções de análise:

- instalar um motor novo em um projeto novo ou uma ampliação do projeto existente;
- substituir um motor padrão em operação por um motor de maior rendimento;
- manter o motor padrão existente.

Na primeira opção, a escolha de um motor de alto rendimento ao invés de um motor padrão é, em princípio, viável economicamente, pois o que difere é a diferença de custos entre eles, que é relativamente pequena.

Entretanto, há também de ressaltar que a aplicabilidade do motor de alto rendimento nem sempre é viável tecnicamente. Pode-se citar como exemplo o acionamento de cargas de elevada inércia com freqüentes acelerações, cujas perdas elétricas decorrente de tais acelerações do motor podem ser muito maior que as perdas elétricas em operação contínua do motor, inviabilizando sua utilização. Outro exemplo é o acionamento de bombas e ventiladores, cujo conjugado resistente irá solicitar um acréscimo de potência mecânica variando com o cubo da velocidade (devido ao aumento da velocidade nominal), e tendo, como conseqüências, o aumento das perdas elétricas do motor.

Na segunda opção, o investimento a ser considerado não é somente o custo de aquisição do motor de alto rendimento. Este custo deve ser acrescido de revisão de projeto de instalação e transporte, instalação e parada de produção. Esses custos adicionais podem tornar esta opção inviável economicamente.

Na terceira opção, devem ser analisados os custos de manutenção do motor, a sua expectativa de vida útil, os custos de paralisações não programadas do sistema produtivo, redução do rendimento após a manutenção e o acréscimo de consumo de energia elétrica. Esses fatos podem também tornar esta opção inviável economicamente.

1.9 Objetivos do trabalho

O presente trabalho será desenvolvido com motores de 1, 5 e 10 CV, pois a faixa de 0 a 10 CV representa a faixa de maior quantidade comercializada e por apresentar o maior potencial de conservação de energia. Como o objetivo principal desse trabalho é definir o momento correto de substituição de um motor, esta definição é efetuada conforme a seguinte orientação.

No capítulo 2 são descritos os efeitos da temperatura na vida útil dos motores, nas diversas condições de carregamento e regime de operação. São mostradas as fontes de calor que definem a temperatura de operação, devido às perdas internas do motor, fundamentadas em um modelo térmico. De posse da temperatura ambiente, da temperatura de operação, da classe de isolamento, da altitude de operação, das condições ambientais e do meio refrigerante, pode-se determinar a vida útil do isolamento das bobinas do estator e, como conseqüência, a vida útil do motor.

No capítulo 3 são avaliados os efeitos da tensão de alimentação aplicada aos motores, quando os mesmos são submetidos a desequilíbrios de tensão, subtensão, sobretensão, e distorções harmônicas, com os valores permitidos pela legislação vigente. Esses distúrbios de tensão são analisados em um circuito equivalente de motores de indução, onde os seus parâmetros internos são obtidos com os dados de placa fornecidos pelos fabricantes. Mostram-se também os efeitos desses distúrbios no desempenho do motor, como conjugado pulsante aplicado à carga, vibração, sobre corrente e sobre aquecimento.

No capítulo 4 são descritos os modelos de manutenção adequados aos diversos tipos de carregamento e operação dos motores de indução. Tais modelos têm como objetivo propiciar a confiabilidade do sistema motriz, visando manter a expectativa de vida útil do motor. Como os mancais de rolamentos e o rompimento da rigidez dielétrica dos enrolamentos das bobinas do estator são responsáveis por aproximadamente 80% das causas de falhas do motor, desenvolveu-se uma análise individual para essas partes constituintes do motor (PENROSE, H.W.; 1999). Para os mancais de rolamentos, determinou-se os efeitos do carregamento, alinhamento e desbalanceamento na vida útil dos mesmos. Para as bobinas do estator foram analisadas as temperaturas de operação para as diversas condições de carregamento associadas aos fatores que afetam a temperatura e, como consequência, a vida útil do isolamento da bobina do estator.

O capítulo 5 tem como objetivo mostrar os custos durante o ciclo de vida do motor, fundamentado em uma análise econômica. Estes custos são devido à projeto de instalação, aquisição, instalação, manutenção e operação do motor. Os custos são distribuídos uniformemente ao longo do tempo de vida útil estimada para o motor em um fluxo de caixa, onde estes custos representam as despesas. As receitas são representadas pela economia de energia, devido ao uso de um motor de maior rendimento. Após a distribuição uniforme desse fluxo de caixa, e com o uso de matemática financeira, avalia-se a viabilidade econômica da substituição ou não do motor.

Os procedimentos de simulação, dentro de um contexto técnico e econômico desenvolvido, são apresentados no capítulo 6, onde dados levantados, quantificados e comparados resultam em uma combinação de ações conduzidas para substituir ou não um motor. Após a opção, espera-se que o motor escolhido opere dentro de uma disponibilidade especificada em um intervalo de tempo também especificado. Assim, o momento ideal para substituir um motor envolve um conjunto de questões técnicas e administrativas que permitem à empresa proprietária atingir suas metas de confiabilidade, disponibilidade operacional e manutenibilidade de forma econômica.

2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA VIDA ÚTIL DO MOTOR

2.1 Introdução

A temperatura de operação é um dos principais fatores que afetam o desempenho e a vida útil dos motores de indução quando a mesma ultrapassa os limites de projeto. Isto ocorre quando o motor fica submetido às condições adversas de operação, tais como sobrecarga, altitude elevada, sistema de ventilação obstruído, temperatura ambiente elevada, desequilíbrio da tensão de alimentação, componentes harmônicas, partículas abrasivas, poeira, desequilíbrio mecânico, etc.

A elevação da temperatura dos motores de indução basicamente tem origem em três dos seus principais componentes: o estator, o rotor e os mancais de rolamento. Cada um desses componentes deve ser analisado de forma individual, e, em seguida, deve-se verificar a ação conjunta destes no que tange à transferência de calor e seus efeitos em outros componentes, tais como a degradação do isolamento das bobinas do estator e rotor, e quanto isto afeta a vida útil do equipamento.

2.2 Partes Constituintes do Motor

2.2.1 Enrolamentos do estator

O enrolamento do estator de um motor de indução é constituído de bobinas trifásicas de cobre, distribuídas uniformemente nas ranhuras das chapas de ferro laminadas em torno do corpo da máquina, e deslocadas 120° graus elétricos entre si. Teoricamente, quando se aplica uma tensão trifásica equilibrada nos terminais destas bobinas, circula pelas mesmas uma corrente trifásica equilibrada que produz um campo magnético girante na velocidade síncrona, induzindo uma tensão no rotor. Esta tensão faz circular uma corrente no rotor. A interação entre a corrente do rotor e campo magnético resultante no entreferro produz um conjugado que tende a girar o rotor no mesmo sentido de rotação do campo magnético girante do estator.

Na presença de uma carga mecânica no eixo do motor, a potência elétrica necessária, que é convertida em potência mecânica, é suprida pela fonte de alimentação, aumentando a intensidade de corrente que circula nos enrolamentos do estator e elevando a temperatura de trabalho. Essa elevação de temperatura é considerada adequada para carregamentos igual ou inferior ao nominal. Carregamentos acima das condições nominais reduzem significativamente a vida útil do isolamento das bobinas do estator. Quando se fala em diminuição da vida útil do isolamento, não se refere às temperaturas suficientemente elevadas em que o isolante se queima e o enrolamento é destruído de forma abrupta. Vida útil do isolamento, em termos de temperatura de trabalho, mesmo abaixo daquela temperatura em que o material se deteriora, refere-se ao envelhecimento gradual e cumulativo do isolante, que vai deteriorando e tornando-se ressecado, perdendo a rigidez dielétrica, até que não suporte mais a tensão aplicada e leve a um curto-circuito entre as espiras, por exemplo. Como o motor de indução é uma máquina robusta e de construção simples, a sua vida útil depende quase que exclusivamente da vida útil do isolamento dos enrolamentos do estator, que representa 37% das falhas. Outros fatores que afetam o

isolamento são: umidade, vibrações, ambientes corrosivos, altitude, temperatura ambiente e carregamento.

A expectativa de vida média do isolamento é aproximadamente 20.000 horas quando um motor trabalha dentro das condições nominais (AUSTIN, H.B.; 1992). Estudos realizados em enrolamentos do estator mostram que 50% destes continuam em operação por mais de quinze anos, e os demais apresentam falhas no isolamento em um período de sete anos. Em caso de rebobinamento, 50% apresentam falhas no isolamento em um período de três anos e meio (BRANCATO, E.L.; 1992).

2.2.2 Rotor tipo gaiola

O rotor do tipo gaiola é constituído por um núcleo de chapas de ferro magnéticas, isoladas entre si, sobre o qual são colocadas barras de alumínio ou cobre, dispostas paralelamente entre si com certa inclinação, para aumentar o conjugado de partida e evitar vibrações e ruídos, e são unidas nas suas extremidades por dois anéis condutores, em alumínio ou cobre. A vantagem deste rotor é sua construção robusta e barata em relação aos outros tipos de rotores.

2.2.3 Rotor bobinado

O rotor bobinado é constituído por um núcleo ferromagnético laminado sobre o qual são alojadas as espiras que constituem o enrolamento trifásico do rotor, geralmente em estrela, com neutro isolado. Os três terminais livres das bobinas do enrolamento trifásico são ligados a três anéis coletores no eixo do rotor, o que permite alterar as características internas através de resistores externos em série com suas bobinas.

2.2.4 Entreferro

Entreferro consiste no espaço livre entre o rotor e o estator, sendo que sua função é permitir movimento giratório do rotor sem contato físico com o estator. Porém este espaço deve ser mínimo para reduzir as perdas com fluxo disperso. O desenvolvimento tecnológico atual possibilita a produção de motores com espaçamento da ordem de décimo de milímetro com pequena ovalidade do rotor, da ordem de 10 a 20% do espaço do entreferro (AUSTIN, H. B. 1992).

2.2.5 Mancais de rolamento

Mancal é qualquer superfície que suporta, ou é suportada, por outra superfície. Os mancais servem para suportar o conjunto móvel do motor (rotor) e permitir o movimento giratório em relação ao conjunto fixo (estator). Um bom mancal deve ser composto de material que seja suficientemente forte para resistir às pressões impostas a ele, e deve permitir que a outra superfície se movimente com um mínimo de atrito e desgaste. As peças que o constitui têm que ser montadas dentro de pequenas tolerâncias, para proporcionar um funcionamento eficiente e silencioso, e ainda, permitir liberdade de movimento e elevado rendimento. Os mancais são requeridos para suportar cargas radiais, cargas de empuxo axiais ou uma combinação das duas. Existem dois meios pelos quais as superfícies dos mancais se movem uma em relação à outra: pelo movimento de deslizamento de um metal contra o outro e/ou pelo rolamento de uma superfície sobre outra.

Dois tipos de mancais são normalmente utilizados em motores de indução, sendo rolamentos de esfera, para motores com potência igual ou inferior a 10 CV, ou rolamentos de rolos, para potência superior a 10 CV.

Os mancais de rolamento apresentados na tabela 2.1 constam do manual técnico da (WEG, 2007). Os mancais ZZ, de numeração 6201 a 6308, são para carcaças dos tipos 63 até 132M, utilizadas em motores de indução trifásicos com potências iguais ou inferiores a 10 CV. O manual técnico indica também que tais mancais têm uma vida útil em torno de 20.000 horas e recomenda que não sejam relubrificadas, mas substituídos ao final dessa vida útil.

Tabela 2.1 Tipos de rolamentos

Rolamentos de motores totalmente fechados com ventilador externo						
carcaças		63	71	80	90S	90L
rolamentos	dianteiro	6201ZZ	6203ZZ	6204ZZ	6205ZZ	6205ZZ
	traseiro	6201ZZ	6202ZZ	6203ZZ	6204ZZ	6204ZZ
carcaças		100L	112M	132S	132M	160M
rolamentos	dianteiro	6206ZZ	6207ZZ	6208ZZ	6208ZZ	6309-C3
	traseiro	6205ZZ	6206ZZ	6207ZZ	6207ZZ	6209-ZC3
carcaças		160L	180M	180L	200L	200M
rolamentos	dianteiro	6309-C3	6311-C3	6311-C3	6312-C3	6312-C3
	traseiro	6209-ZC3	6211-ZC3	6211-ZC3	6212-ZC3	6212-ZC3
carcaças		225S/M	250S/M	280S/M	315S/M	355M/L
rolamentos	dianteiro	6314-C3	6314-C3	6314-C3	6319-C3	NU322-C3
	traseiro	6314-C3	6314-C3	6316-C3	6316-C3	6319-C3

As carcaças de 160M até 355M/L necessitam de relubrificação em períodos definidos no manual técnico, para temperatura nominal de 100 °C. Contudo é ressaltado que, para cada 15° C de elevação de temperatura acima de 100 °C, o período de relubrificação deve ser reduzido à metade.

2.3 Classe de isolamento

Como o aumento de temperatura afeta a vida útil do isolamento, e, como consequência, a do motor, o catálogo do fabricante, em conformidade com a norma NBR 7094 (2003), deve estabelecer a temperatura de operação máxima admissível para os enrolamentos das bobinas do estator, conforme tabela 2.2 (WEG, 2007).

Tabela 2.2 Temperatura de operação em função da classe de isolamento

Classe de isolamento		A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	°C	40	40	40	40	40
Δt - elevação da temperatura (método da resistência)	°C	60	75	80	105	125
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média	°C	5	5	10	10	15
Total de temperatura no ponto mais quente	°C	105	120	130	155	180

Esta tabela mostra a classificação dos diversos tipos de isolamento e as respectivas elevações admissíveis de temperatura. Se o motor opera dentro das condições nominais, o isolamento tem uma estimativa de vida média de 20.000 horas. Se operar em uma temperatura acima da nominal, ocorre uma degradação do isolamento; em caso contrário, uma sobre vida.

A degradação térmica do material orgânico utilizado no isolamento é conhecida há muitas décadas. A reação química de envelhecimento do isolamento pode ser representada pela equação 2.1 (ROBERT, R. D.; 1980).

$$\frac{\partial R}{\partial t} = Ae^{\left(-\frac{E}{kT}\right)} \quad (2.1)$$

onde:

$\frac{\partial R}{\partial t}$ – taxa de redução da capacidade de isolamento [1/s];

A – constante que depende da propriedade do material isolante;

k – constante de Boltzmann [J/K];

T – temperatura absoluta [K];

E – energia de ativação do envelhecimento do isolante [eV].

A fim de permitir a extrapolação dos dados de um tempo reduzido, para prever o desempenho em longo prazo, deve-se efetuar a integração da equação 2.1, onde, em seguida, a mesma pode ser analisada em escala logarítmica, conforme equação 2.2.

$$\ln t = \left(\frac{E}{k}\right) \frac{1}{T} + B \quad (2.2)$$

onde:

t – tempo em horas;

$\frac{E}{k}$ – representa a inclinação da reta da função de Arrhenius;

B – constante do material isolante.

O valor de B é determinado por $\ln B = \left(\frac{R - R_0}{A}\right)$, sendo R_0 a capacidade de isolamento no tempo t_0 e R a capacidade de isolamento no tempo t .

Como a representação gráfica da equação 2.2 é uma reta, pode-se então determinar e traçar as famílias de retas que representam a degradação de isolamento no tempo. Para isto, é necessário conhecer dois pontos de cada reta ou um ponto e sua respectiva inclinação.

Um procedimento prático pode ser efetuado para conhecer os pontos da reta, supondo hipoteticamente que certo tipo de isolante aquecido a uma temperatura 150 °C tenha seu isolamento degradado totalmente em 4.000 horas, enquanto que o mesmo isolamento aquecido a uma temperatura de 60 °C, leve 5 anos ou 43.830 horas para se degradar. Com o conhecimento desses pontos, pode-se então traçar a reta de degradação do material. Porém, o tempo para se obter o segundo ponto é muito longo, e se for utilizado um ponto muito perto de 150 °C pode-se incorrer em erros. A outra opção é utilizar um ponto e a inclinação da reta, sendo que a inclinação E/K pode ser determinada utilizando o valor tabelado da constante de Boltzmann K , que é igual $1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K, ou $8,617 \cdot 10^{-5}$ eV/K, enquanto que a energia de ativação de envelhecimento do material isolante E é obtida conforme valores da tabela 2.3.

Os procedimentos apresentados, juntos com os valores de energia de ativação em elétrons-volts ou joule pela constante de Boltzmann, são suficientes para traçar as curvas de Arrhenius, de uma maneira conservadora e confiável. A validade de usar a energia de ativação de envelhecimento e um ponto da curva é que, com um tempo relativamente pequeno, pode-se prever uma vida útil do isolamento por um extenso período.

É importante citar que o isolamento das bobinas do estator de um motor de indução em baixa tensão normalmente tem classe de isolamento do tipo B ou F, e são compostos dos seguintes materiais isolantes (WEG, 2007):

- Classe B, materiais à base de poliéster e poli-imídicos aglutinados com materiais orgânicos ou impregnados com esters;
- Classe F, materiais à base de mica, amianto e fibra de vidros aglutinados com materiais sintéticos, usualmente silicones, poliésteres ou epóxis.

A tabela 2.3 mostra alguns dos tipos de materiais isolantes, suas propriedades e suas respectivas energias de ativação em quilo calorias por mol e também em elétron-volts, sendo que a relação mais completa desses materiais é encontrada na referencia bibliográfica (ROBERT R. D.; 1980).

Tabela 2.3 Energia de ativação de envelhecimento do material isolante

Energia de ativação para determinados materiais isolantes			
Material	Propriedade do material isolante	Energia de ativação	
		kcal/mol	Elétron-volts
Melamina-vitrificada (G-5)	Dielétrico Str	6,7	0,29
Verniz epóxis	Dielétrico Str	10,9	0,48
Ester-vitrificado (GPO-3)	Flexível Str	13,1	0,57
Silicone (RTV)	Elastômero	13,8	0,60
Polipropileno	Óxido	18,7	0,81

Srt - representa a permissividade elétrica da camada dielétrica isotrópica

Após ter sido mostrado o processo para obtenção das curvas de Arrhenius, pode-se ver as curvas de degradação de vida de isolamento de uso comercial na figura 2.1.

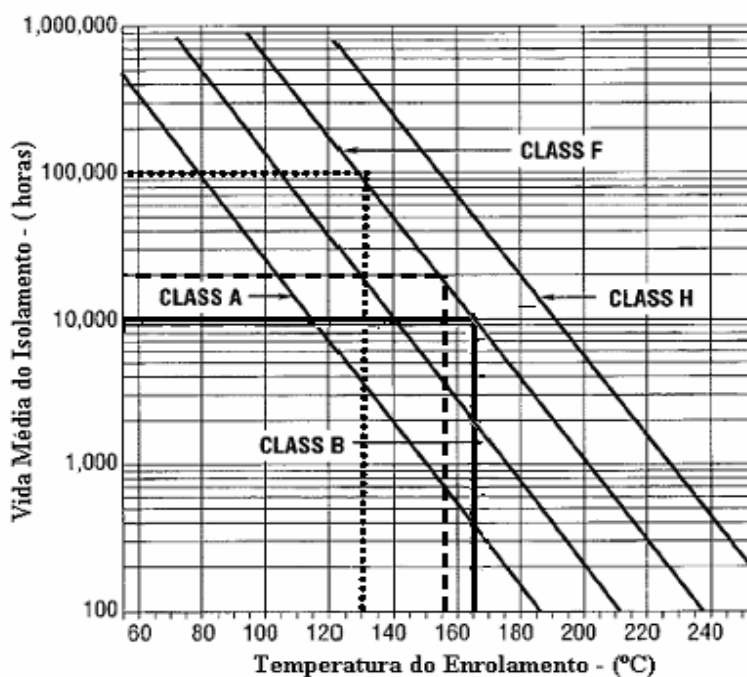


Fig. 2.1 Vida útil do isolamento em função da temperatura de operação

Analisando a figura 2.1, pode-se comprovar a expectativa de vida útil de 20.000 horas do isolamento classe F de um motor operando nas condições nominais (temperatura de 155 °C no ponto mais quente), conforme mostra a linha tracejada. Observa-se também uma redução da expectativa de vida útil para 10.000 horas quando o motor opera 10 °C acima das condições nominais de sua classe de isolamento, conforme mostra a linha contínua. Outra análise que pode ser comprovada é que se um motor opera na classe de isolamento B com uma de temperatura de 130 °C, tendo um isolamento classe F, sua vida útil aumentará para 100.000 horas, conforme linha pontilhada redonda.

2.4 Comportamento térmico dos motores de indução

O motor de indução possui em seu interior varias fontes de calor, tais como estator, rotor, mancais de rolamento, sendo as mesmas de desiguais intensidades. Porém, para os objetivos desta análise, o motor será considerado um corpo homogêneo no qual toda energia térmica gerada por suas fontes de calor será fornecido ao ambiente de forma uniforme, com comportamento de possuir uma única fonte térmica (JOCELIO, S.S.; 1989). A intensidade da fonte térmica do motor depende do carregamento que o mesmo está submetido. Quanto maior for o carregamento, maior será a energia térmica liberada, tendo como consequência uma elevação de temperatura. Para elevar a temperatura de uma parcela $\Delta\tau$ é necessária uma quantidade de energia térmica ΔQ_1 , conforme a equação 2.3.

$$\Delta Q_1 = C\Delta\tau \quad (2.3)$$

onde:

$\Delta\tau$ – variação da temperatura [K];

ΔQ_1 – variação de energia térmica [J];

C – capacidade térmica do material [J/K].

Estando o motor com uma temperatura τ acima da temperatura ambiente τ_0 , a quantidade de calor transferida para o ambiente será determinada conforme equação 2.4.

$$\Delta Q_2 = A \times \tau \times \Delta t \quad (2.4)$$

onde:

ΔQ_2 – quantidade de calor transferida para o meio ambiente [J];

A – fator de transmissão de calor [J/K.min];

τ – temperatura do motor em um tempo t [K];

Δt – intervalo de tempo em [min].

Considerando o motor com uma potência de perdas P , pode-se determinar essas perdas para um determinado intervalo de tempo Δt , considerando-se as adições infinitesimais de energia térmica, conforme equação 2.5.

$$P.\Delta t = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 \Leftrightarrow P\partial t = C\partial\tau + A\tau\partial t \quad (2.5)$$

Dividindo a equação 2.5 por A e ∂t , resulta na equação 2.6 que admite como solução a equação 2.7.

$$\frac{C}{A} \times \frac{\partial \tau}{\partial t} + \tau = \frac{P}{A} \quad (2.6)$$

$$\tau = \tau_f - (\tau_f - \tau_0) \cdot e^{-\frac{t}{T_A}} \quad (2.7)$$

onde:

τ – temperatura do motor no instante t [°C];

τ_f – temperatura atingida pelo motor após longo período de operação ($t \rightarrow \infty$) [°C];

τ_0 – temperatura ambiente [°C];

T_A – constante de tempo de aquecimento [min].

Subtraindo τ_0 de τ , tem-se:

$$\Delta\tau = (\tau - \tau_0) = (\tau_f - \tau_0) * (1 - e^{-\frac{t}{T_A}})$$

e

$$\Delta\tau = \Delta\tau_{f0} * (1 - e^{-\frac{t}{T_A}}) \quad (2.7-a)$$

Onde:

$\Delta\tau$ – elevação de temperatura do motor a partir da temperatura ambiente

$\Delta\tau_{f0}$ – temperatura máxima da classe de isolamento menos a temperatura ambiente

Com base na equação 2.6, pode-se também deduzir as equações 2.8 e 2.9.

$$\tau_f = \frac{P}{A} \quad (2.8)$$

$$T_A = \frac{C}{A} \quad (2.9)$$

Com o uso da equação 2.7-a, pode-se analisar o comportamento da elevação de temperatura de um motor durante o início do seu acionamento e também após o mesmo alcançar o equilíbrio térmico. Um exemplo deste comportamento da temperatura do motor em função do tempo é mostrado na figura 2.2.

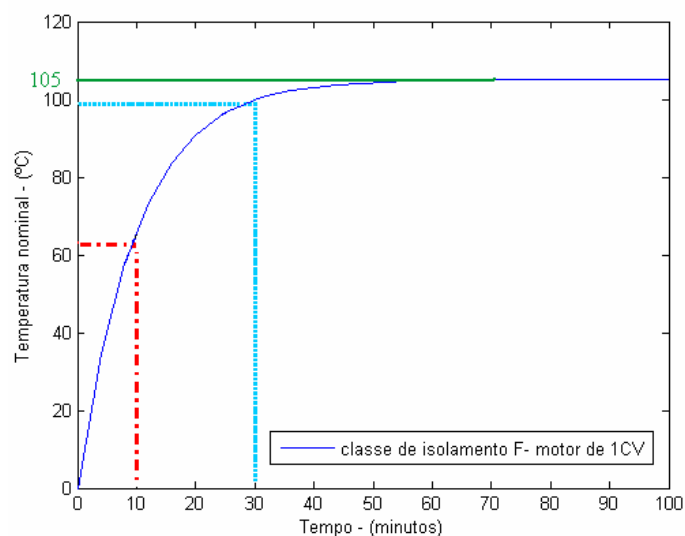


Fig. 2.2 Comportamento da elevação de temperatura em função do tempo

A análise da figura permite tirar as conclusões relevantes sobre o comportamento térmico deste motor, tais como:

- Para um tempo decorrido igual à constante de tempo de aquecimento, a elevação da temperatura do motor é 63,3% da elevação final de temperatura, conforme se pode verificar na linha vermelha tracejada da figura, ressaltando-se que a constante de tempo de aquecimento para esse motor é dez.
- Para um tempo decorrido igual a três vezes a constante de tempo de aquecimento, a elevação de temperatura do motor é aproximadamente 95% da elevação final de temperatura, conforme se pode verificar na linha azul pontilhada da figura.

As condições de carga alteram a elevação de temperatura no interior do motor, aumentando ou reduzindo a temperatura de operação, devido à alteração das perdas internas, conforme figura 2.3.

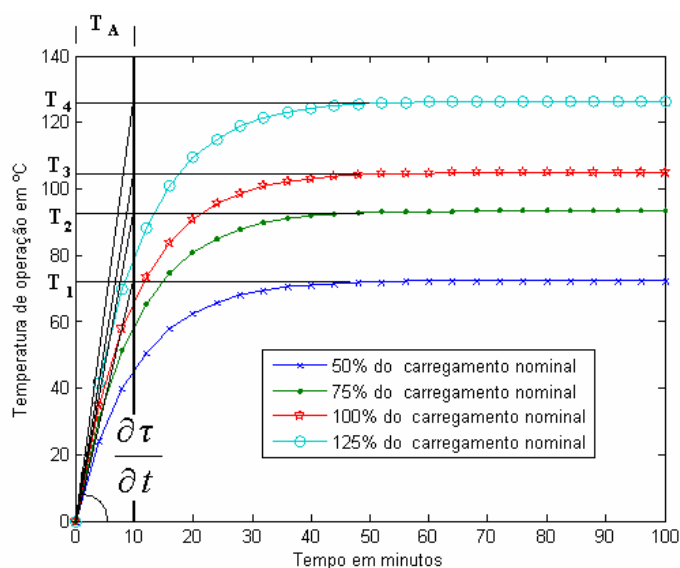


Fig. 2.3 Curvas de temperatura para diversas condições de carga

Esta figura mostra as alterações nas temperaturas de operação T_1 , T_2 , T_3 e T_4 , para os carregamentos de 50%, 75%, 100% e 125% da carga nominal em um motor de 1 CV.

A constante de tempo de aquecimento T_A é determinada pela projeção no eixo do tempo da tangente à curva de aquecimento, definida da origem do gráfico até a temperatura final de operação, para um determinado carregamento. Este método de determinação de T_A baseia-se na hipótese da homogeneidade do motor e os resultados apresentados devem ser encarados como orientativos (JOCELIO, S.S. 1981).

2.5 Comportamento das perdas do motor de indução

Para a análise do desempenho térmico dos motores de indução trifásicos, é necessário conceituar as perdas do motor para as diversas condições de carregamento. De uma forma simplificada, as perdas totais podem ser separadas em três parcelas, conforme equação 2.10.

$$P_T = P_j + P_{fe} + P_m \quad (2.10)$$

onde:

P_T - Perdas totais [W];

P_j - Perdas por efeito Joule [W];

P_{fe} - Perdas no ferro por histerese e Foucault [W];

P_m - Perdas mecânicas por atrito e ventilação [W].

As perdas por efeito Joule nos enrolamentos estão associadas à circulação de corrente nos condutores do estator e rotor, sendo responsáveis por parcela significativa de aquecimento do motor, e podem representar 55% das perdas totais (ANDREAS, J.C.; 1982). Tais perdas variam com a carga no eixo e em proporção quadrática com a variação da corrente.

Considerando que o motor opera com frequência constante, as perdas por histerese ocorrem, em grande parte, no estator, e variam diretamente com a tensão aplicada. Já as perdas por correntes de Foucault resultam da circulação das correntes induzidas no interior do material magnético e variam quadraticamente com a tensão aplicada. O conjunto das perdas magnéticas pode representar de 20% a 36% das perdas totais de um motor sob carga nominal (ANDREAS, J.C.; 1982). Considerando que o motor opera com tensão e frequência constantes, essas perdas podem ser consideradas também constantes.

Perdas mecânicas (atrito e ventilação) originam-se do atrito dos mancais com o conjunto rotativo dos motores e as perdas de ventilação são relativas ao acionamento dos ventiladores, geralmente acoplados ao eixo do motor, para a refrigeração do mesmo. Em geral, estas perdas representam 9% das perdas totais (ANDREAS, J.C.; 1982). Para efeito de simplificação, podem também ser consideradas constantes, pois as mesmas dependem da velocidade que é praticamente constante.

Há ainda uma pequena parcela de perdas não classificadas, conhecidas como perdas suplementares e representam cerca de 1% das perdas totais.

O comportamento do fluxo de potências e perdas no motor de indução trifásico, desde a alimentação elétrica até a saída no eixo, é mostrado na figura 2.4.

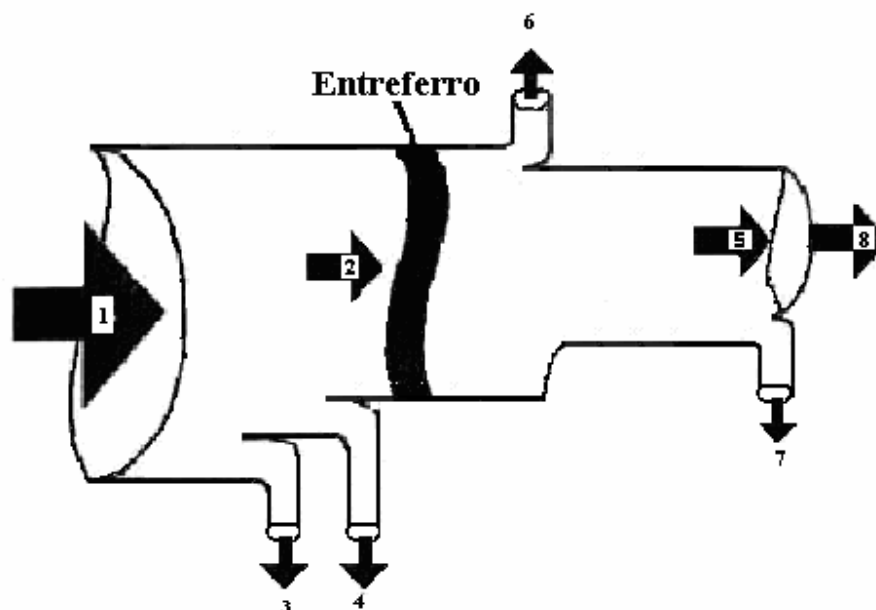


Fig. 2.4 Fluxo de potências e perdas no motor

onde:

- 1 – Potência elétrica de entrada [W];
- 2 – Potência transferida ao rotor [W];
- 3 – Perdas no ferro do estator [W];
- 4 – Perdas no cobre do estator [W];
- 5 – potência mecânica desenvolvida [W];
- 6 – perdas no rotor [W];
- 7 – perdas com atrito e ventilação [W];
- 8 – potência mecânica disponível no eixo [W].

O fluxograma mostra que uma parte da potência elétrica de entrada do motor é transformada em potência mecânica no eixo, sendo que o restante é transformado em calor devido às diversas parcelas de perdas, aumentando a temperatura de operação do motor.

A potência mecânica no eixo deve fornecer o conjugado exigido pela carga, enquanto que a temperatura não deve ultrapassar o valor admissível de sua classe de isolamento. Portanto, na especificação de um motor, o mesmo deve atender ao conjugado requisitado pela carga conjuntamente com a solicitação térmica.

A solicitação térmica, conforme definida pela equação 2.7, depende basicamente dos tipos de operação de acionamento e das características próprias do motor, como o comportamento das perdas e as constantes de tempo de aquecimento e de resfriamento.

2.6 Regimes de operação de um motor elétrico

Os tipos de regime de operação de um motor elétrico são classificados conforme NBR 7094 (2003), que os identifica pela letra S seguida de um algarismo de 1 a 10. Ao analisar um tipo de acionamento, deve-se procurar encaixá-lo em um tipo de operação que traduza o seu comportamento dentro do tipo específico de regime. O comportamento do motor em um regime S1 é mostrado figura 2.5. As demais figuras poderão ser vistas na respectiva norma.

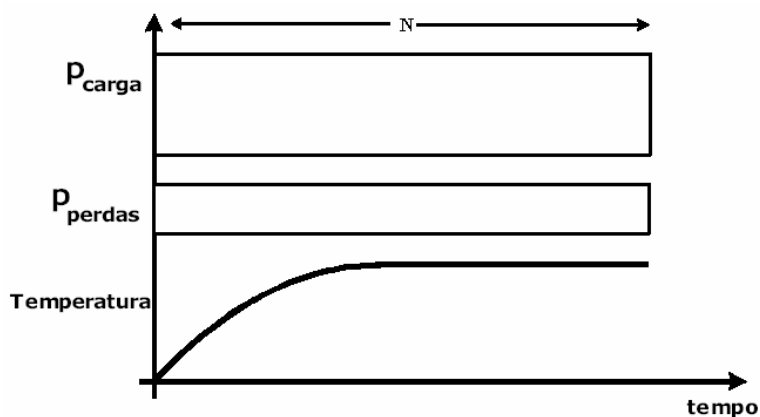


Fig. 2.5 Regime de operação S1

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

O regime S2 tem funcionamento à carga constante durante um tempo determinado, inferior ao necessário para atingir o equilíbrio térmico. Como exemplo, pode-se citar o acionamento de comporta de vertedouro de barragem, onde as operações são de curta duração e tão pouco freqüentes que certamente a temperatura do motor retornará à temperatura ambiente antes de uma operação subsequente.

O regime S3 é intermitente e periódico, sendo que em um período opera com carga constante no eixo e no período subsequente permanece em repouso. Neste regime, a corrente de partida não afeta significativamente a elevação de temperatura.

O regime S4 é intermitente e periódico, sendo que em um período opera com carga constante e no período subsequente permanece em repouso. Neste regime, o período de partida é significativo.

O regime S5 é intermitente e periódico com frenagem elétrica, sendo que opera inicialmente em um período com carga constante, no período subsequente com frenagem elétrica e posteriormente fica em repouso.

O regime S6 é contínuo periódico com carga intermitente, sendo um período com carga constante e um período subsequente a vazio, mas sem período de repouso.

O regime S7 é contínuo periódico com frenagem elétrica, sendo um período para efetuar a partida, um período subsequente com carga constante e, em seguida, um período de frenagem elétrica, mas sem período de repouso.

O regime S8 é contínuo periódico com mudanças de carga e de velocidade, sendo um período com carga constante e uma determinada velocidade, e, nos períodos subsequentes, com outras cargas constantes em diferentes velocidades.

O regime S9 possui variações não periódicas de carga e velocidade, incluindo freqüentemente sobrecargas superiores aos valores nominais.

O regime S10 opera com cargas constantes e distintas, sendo recomendado no máximo quatro valores de cargas distintas e que, em cada período de operação, o tempo seja suficiente para que o equilíbrio térmico seja atingido.

2.7 Altitude de operação e meio refrigerante

Para analisar a viabilidade do uso de um motor em uma determinada aplicação, deve-se levar em consideração a altitude em que o motor será instalado e a temperatura do meio refrigerante, conforme NBR 7094 (2003). As condições usuais de serviço, definidas em norma, são de altitude não superior a 1.000 m acima do nível do mar e meio refrigerante, na maioria dos casos, à temperatura ambiente do ar que deve ser inferior ou igual a 40 °C. Até estes valores de altitude e temperatura ambiente, considera-se condições normais e o motor deve fornecer, sem sobre aquecimento, sua potência nominal.

Segundo essa norma, quando motores são instalados em altitudes superiores a 1.000 m e inferior a 4.000 m, a uma temperatura ambiente de 40 °C, admite-se uma redução na temperatura ambiente de 1% dos limites de elevação de temperatura das classes de isolamentos, para cada aumento de 100 m na altitude acima de 1.000 metros do nível do mar. Para altitudes acima de 4.000 metros deve-se contatar o fabricante do motor.

2.8 Modelo térmico

A estimativa de vida de um motor de indução depende das condições térmicas, elétricas, mecânicas e ambientais, pois estas condições alteram a temperatura de operação do motor. Para estimar o valor dessa temperatura, é necessário desenvolver os modelos elétrico e térmico.

O modelo elétrico é usado para simular o desempenho das características do motor em condições de desequilíbrio de tensão, sobrecarga, carregamento de alta inércia, sobretensão e subtensão. A análise de tal modelo é amplamente abordada nos capítulos 3 e 4 desta dissertação.

De acordo com a referência (ZOCHOLL, S.T.; SCHWEITZER, E. O.; ZEGARRA, A. A.; 1984), modelos empregados para simular o comportamento térmico do motor considera um desacoplamento térmico entre o estator e o rotor, e supõe que o fluxo de calor que flui do rotor para o ambiente não passa pelo estator, mas sim pelo espaçamento do entreferro. As simulações apresentadas nessa referência mostraram resultados térmicos aceitáveis. O modelo térmico do rotor é mostrado na figura 2.6.

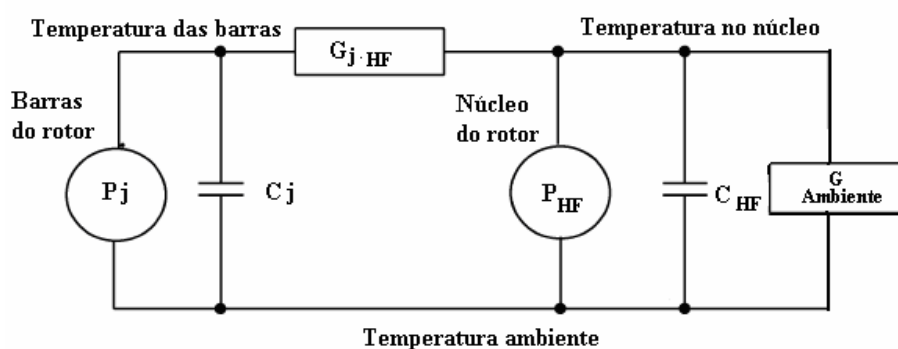


Fig. 2.6 Modelo térmico do circuito do rotor

onde:

P_J – fontes térmicas dos condutores do rotor [J];

P_{HF} – fonte térmica no núcleo de ferro do rotor [J];

G – condutâncias térmicas em watt por metro quadrado por kelvin [$W/(m^2.K)$];

C – Capacitâncias térmicas [J/K].

As fontes térmicas são provenientes das perdas elétricas do motor, onde as principais estão localizadas nos condutores do estator e rotor, no núcleo magnético e nos acionamentos mecânicos.

A condutância térmica é a facilidade ou não de transferência de calor através de duas superfícies distintas com temperaturas diferentes. Assim, um meio com pequena condutância térmica apresenta valores significativos de diferença de temperatura, devido a baixa taxa de transferência de energia térmica. Para determinar as condutâncias térmicas mostradas nos circuitos das figuras 2.6 e 2.7, faz-se necessário o conhecimento da classe de isolamento do motor.

Capacitância térmica é a capacidade de um corpo físico armazenar calor. O motivo de sua inclusão nos modelos térmicos é permitir avaliar o tempo necessário que o corpo leva para promover alteração na sua temperatura interna.

Como pode ser visto na figura 2.6, o modelo térmico do rotor consiste de duas fontes térmicas de calor, onde a primeira é produzida pelas perdas por efeito Joule devido à circulação de correntes nas barras de cobre ou alumínio, e a segunda produzida pelas perdas no núcleo por histerese e correntes de Foucault. Os outros principais componentes são duas capacitâncias térmicas e duas condutâncias térmicas.

A capacitância térmica pode ser obtida a partir da equação 2.11.

$$C = m \cdot c \quad (2.11)$$

onde:

C – capacitância térmica [J/K];

m – massa do enrolamento ou núcleo [kg];

c – calor específico do isolamento ou núcleo [J/kg.K].

O modelo térmico do estator é mais significativo que o do rotor, devido aos efeitos da temperatura na vida útil do isolamento das bobinas do estator e, conseqüentemente, na vida do motor. Esse modelo, conforme ilustra a figura 2.7, é composto de quatro fontes térmicas de calor, sete condutâncias e quatro capacitâncias térmicas.

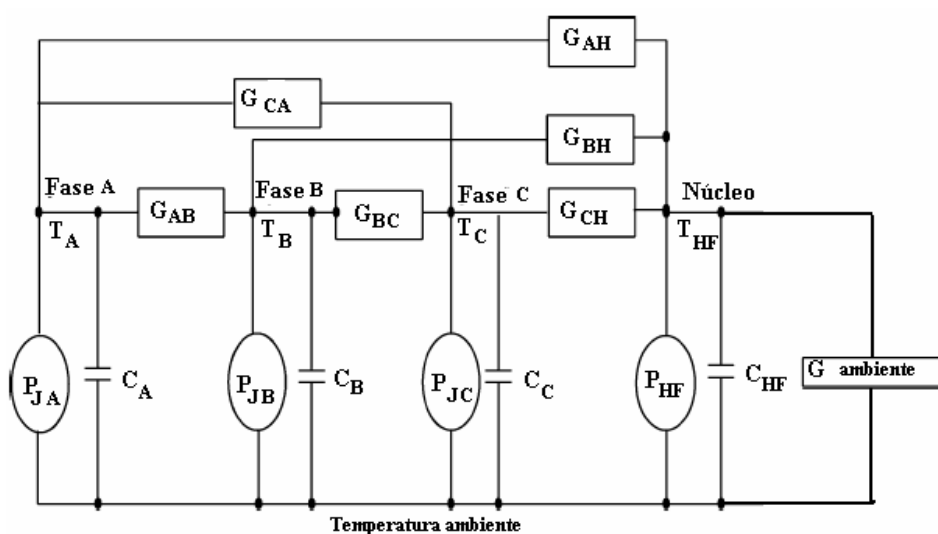


Fig. 2.7 Modelo térmico do estator

onde:

P_J – fontes térmicas dos condutores do estator em cada fase [J];

P_{HF} – fonte térmica do núcleo de ferro [J];

T – Temperatura média em cada nó [°C];

G – condutância térmica [W/(m².K)];

C – Capacitância térmica [J/K].

O modelo apresentado caracteriza-se pela simplicidade e eficiência na análise do comportamento térmico, sem que seja preciso o conhecimento detalhado dos fluxos de calor dentro do motor. Outra vantagem refere-se aos parâmetros térmicos empregados, os quais podem ser obtidos sem a necessidade do conhecimento dos dados de projetos do motor (OLIVIO, C.S.; OLIVEIRA, J.C.; 2000). Dessa forma, os parâmetros são determinados a partir de informações apresentadas pelo fabricante, tais como rendimento, perdas rotacionais, perdas a vazio, fator de potência etc.

Com base nestas informações, determinam-se os parâmetros térmicos do estator e do rotor. Pode-se, então, definir o ciclo de vida útil do estator e do rotor. Como o ciclo de vida do isolamento do estator é estatisticamente menor que do rotor, faz-se necessário determinar somente os parâmetros térmicos do estator (PRAGASEN, P.; MARUBINI, M.; 2005). Portanto, abaixo serão deduzidos somente os parâmetros do estator.

O modelo térmico do estator é analisado com o mesmo procedimento de um circuito elétrico. Aplicando a 2ª Lei de Kirchorff, pelo método de análise nodal, obtém-se, para o nó TA, a equação do circuito térmico (PRAGASEN, P.; MARUBINI, M.; 2005):

$$-P_{JA} + (T_A - T_B) \cdot G_{AB} + (T_A - T_C) \cdot G_{CA} + (T_A - T_{HF}) \cdot G_{AH} + C_A \cdot \frac{\partial T_A}{\partial t} = 0 \quad (2.12)$$

Reescrevendo a equação 2.12, tem-se:

$$\frac{\partial T_A}{\partial t} = \frac{P_{JA} - (T_A - T_B) \cdot G_{AB} - (T_A - T_C) \cdot G_{CA} - (T_A - T_{HF}) \cdot G_{AH}}{C_A} \quad (2.13)$$

Com procedimento análogo podem-se escrever as equações:

$$\frac{\partial T_B}{\partial t} = \frac{P_{JB} - (T_B - T_A) \cdot G_{AB} - (T_B - T_C) \cdot G_{BC} - (T_B - T_{HF}) \cdot G_{BH}}{C_B} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial T_C}{\partial t} = \frac{P_{JC} - (T_C - T_A) \cdot G_{AC} - (T_C - T_B) \cdot G_{CA} - (T_C - T_{HF}) \cdot G_{CH}}{C_C} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial T_{HF}}{\partial t} = \frac{(T_A - T_{HF}) \cdot G_{AH} + (T_B - T_{HF}) \cdot G_{BH} + (T_C - T_{HF}) \cdot G_{CH} - (T_{HF} - T_{ambiente}) \cdot G_{ambiente}}{C_{HF}} \quad (2.16)$$

As equações diferenciais 2.13 a 2.16 descrevem o comportamento térmico do motor de indução. A equação matricial 2.17 representa, de uma forma geral, a relação entre as fontes de calor e as elevações de temperatura nos diversos pontos da estrutura física do estator.

$$\frac{\partial [T]}{\partial t} = [C]^{-1} \cdot [P] - [G][\Delta T] \quad (2.17)$$

onde:

$[\Delta T]$ – vetor elevação de temperatura;

$[C]$ – matriz das capacitâncias térmicas;

$[P]$ – vetor de perdas no estator;

$[G]$ – matriz das condutâncias térmicas.

A matriz de capacitância $[C]$ é:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{HF} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

onde:

C_A – capacitância da fase A;

C_B – capacitância da fase B;

C_C – capacitância da fase C;

C_{HF} – capacitância do núcleo magnético.

De acordo com a referência (OLIVIO, C. S.; OLIVEIRA, J.C.; 2000), a matriz de condutância térmica é:

$$[G] = \begin{bmatrix} G_{AB} + G_{CA} + G_{AH} & -G_{BA} & -G_{CA} & -G_{HA} \\ -G_{AB} & G_{BA} + G_{BC} + G_{BH} & -G_{CB} & -G_{HB} \\ -G_{AC} & -G_{BC} & G_{CA} + G_{CB} + G_{CH} & -G_{HC} \\ -G_{AH} & -G_{BH} & -G_{CH} & G_{HA} + G_{HB} + G_{HC} + G_{Ha} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

onde:

G_{AB}, G_{BC}, G_{CA} – condutância entre as fases;

G_{HA}, G_{HB}, G_{HC} – condutância entre as fases e o núcleo magnético;

G_{Ha} – condutância entre o núcleo magnético e ambiente.

O modelo elétrico citado foi aplicado nos casos simulados no capítulo 6, enquanto que, o modelo térmico utilizado foi o convencional, aplicando-se a expressão matemática de Arrhenius. O presente modelo térmico será desenvolvido em trabalhos futuro.

2.9 Conclusão

Normalmente a vida útil de um motor é estimada para a sua condição nominal de operação, com a temperatura na faixa de valores da sua classe de isolamento. Porém, quando a temperatura do motor supera os valores de sua classe de isolamento, o mesmo tem uma redução da vida útil. Para evitar essa redução deve-se manter o motor com temperatura igual ou menor que a temperatura da classe de isolamento.

A vida útil do motor para potência inferior a 50 CV é definida pela vida útil do isolamento de seus enrolamentos. Para estimar a vida útil dos enrolamentos do estator, fez-se uso das equações de envelhecimento térmico, considerando as composições dos materiais utilizados em suas confecções. É também mostrado o processo para obter as curvas de Arrhenius e as curvas de degradação de vida de isolamento de uso comercial.

Além disso, uma análise do desempenho térmico dos motores trifásicos de indução foi mostrada, conceituando as perdas do motor para as diversas condições de carregamento e regimes de operação.

Por fim, mostrou-se que, para estimar o valor da temperatura, é necessário desenvolver os modelos elétrico e térmico:

- O modelo elétrico é usado para simular o desempenho das características do motor, em condições de desequilíbrio de tensão, de sobrecarga, carregamento, de sobretensão e subtensão.
- O modelo térmico considera um desacoplamento térmico entre o estator e o rotor, e supõe que o fluxo de calor que flui do rotor para o ambiente não passa pelo estator, mas sim pelo espaçamento do entreferro.

Os modelos confirmam que a vida útil do motor é praticamente a vida útil do isolamento das bobinas do estator.

3 EFEITOS DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO NÃO IDEAL NA VIDA ÚTIL DO MOTOR

3.1 Introdução

Teoricamente, em sistemas de potência trifásicos, as tensões de linhas são senoidais e têm os mesmos valores eficazes e são defasadas de 120° . Entretanto, na prática, sistemas de distribuição podem apresentar as seguintes deformidades: subtensão e sobretensão de longa duração, desequilíbrios, desvios de ângulos de fase, harmônicos, afundamentos e elevações de tensão, impulsos, transitórios e flutuações de tensão. Este capítulo dá ênfase a um sistema de potência, operando com tensão nominal, subtensões, sobretensões, sistema desequilibrado e com harmônicos, enquanto que, afundamentos e elevações de tensão, impulsos, transitórios e flutuação de tensão serão analisados em trabalhos futuros que versará sobre qualidade de energia aplicada aos motores.

3.2 Limites de tensão e frequência

De acordo com a norma NBR 7094 (2003), as regiões de tolerâncias de tensão e frequência em motores de indução são classificadas como zona “A” e zona “B”, conforme mostrado na figura 3.1.

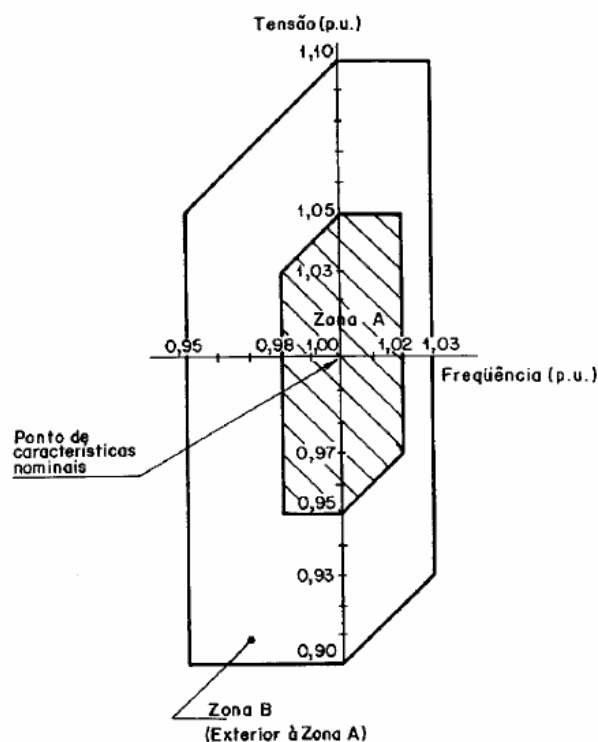


Fig. 3.1 Limites de tensão e frequência que motores podem operar em baixa tensão

A zona “A” permite variações de frequência e tensão aplicadas ao motor da ordem 2% e 5% respectivamente, acima e abaixo dos valores nominais, possibilitando a operação dos motores fora das condições nominais. Contudo, ao desenvolver o conjugado nominal solicitado pela carga, de forma contínua, podem ocorrer elevações de temperatura superiores à nominal.

A zona “B” permite variações de frequência da ordem de 5% abaixo e 3% acima da frequência nominal e variações de tensão da ordem de 10% acima e abaixo dos valores nominais, não sendo nesses casos recomendado o funcionamento prolongado dos motores nesta zona, devido ao aumento de temperatura, que é superior ao da zona A. Estas variações e seus efeitos devem ser analisados nas condições de operação e na vida útil dos motores.

Já a norma NBR 5410 (2005), que versa sobre instalações elétricas em baixa tensão, prescreve, em seu item 6.5, que os circuitos que alimentam motores de indução com rotor de gaiola em aplicações industriais e similares normais, com potência nominal igual ou superior a 0,736 kW e igual ou inferior a 150 kW, operando em regime contínuo S1, tenham queda de tensão inferior a 4%. Além disto, a resolução número 505 (ANEEL, 2001), em seu artigo 6º, prescreve que as unidades consumidoras atendidas em tensão igual ou inferior a 1 kV devem ser classificadas de acordo com as faixas de tensão, conforme mostra a tabela 3.1 (ANEEL, 2001). Estas faixas de tensão foram selecionadas devido ao fato dos motores de indução utilizados nesse trabalho serem alimentados com tensão inferior a 1 kV.

Tabela 3.1 Tensão nominal igual ou inferior a 1 kV

TENSÕES NOMINAIS PADRONIZADAS				
Tensão Nominal (TN)		Faixa de Valores Adequados das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN	Faixa de Valores Precários das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN	Faixa de Valores Críticos das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN
Ligação	Volts	0,91 TN ≤ TL ≤ 1,04 TN	0,86 TN ≤ TL < 0,91 TN ou 1,04 TN < TL ≤ 1,06 TN	TL < 0,86 TN ou TL > 1,06 TN
Trifásica	220 / 127			
	380 / 220			
Monofásica	254 / 127			
	440 / 220			

3.3 Circuito equivalente dos motores de indução

Os efeitos de tensão nominal, subtensão, sobretensão, sistema desequilibrado e harmônicos quando aplicados em motores de indução, são analisados com a utilização do circuito equivalente conforme a figura 3.2 (PANKAJ, K. S.; LANDA, H A.; 1990).

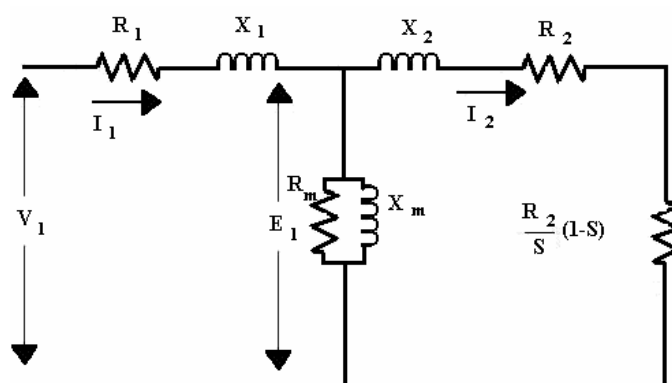


Fig. 3.2 Circuito equivalente de motor de indução trifásico

onde:

R_1 – Resistência por fase do estator [Ω];

X_1 – Reatância de dispersão do estator, por fase [Ω];

R_2 – Resistência do rotor refletida ao estator, por fase [Ω];

X_2 – Reatância de dispersão do rotor refletida ao estator, por fase [Ω];

R_m – Resistência correspondente às perdas do núcleo, por fase [Ω];

X_m – Reatância de magnetização, por fase [Ω];

V_1 – tensão nominal, por fase [V];

E_1 – tensão por fase nos terminais do rotor refletida ao estator [V].

Os parâmetros do circuito equivalente são determinados com o uso de dados do catálogo do fabricante, sendo utilizados os conjugados de partida nominal e máximo, as correntes de partida e nominal e os valores do fator de potência e rendimento disponíveis (WEG, 2007). Com os valores fornecidos, pode-se determinar os parâmetros equivalentes, necessários para avaliar o comportamento do motor quando submetido à tensão de alimentação fora das condições nominais. O modelo matemático desenvolvido para determinar esses parâmetros encontra-se no anexo A dessa dissertação.

3.4. Efeitos da subtensão e sobretensão em motores

Os motores de indução quando submetidos às variações de tensão, tais como subtensão e sobretensão, mudam suas características operacionais e também o tempo de vida útil. Os efeitos destas variações de tensão e procedimentos para minimizá-las são:

Subtensão - se o motor opera com uma tensão inferior a nominal, a corrente absorvida da rede aumentará para manter o conjugado necessário requisitado pela carga, resultando no aumento das perdas por efeito joule no estator e rotor, da temperatura de operação e da corrente de partida, afetando a vida útil do isolamento.

Certos procedimentos técnicos podem ser efetuados para minimizar os efeitos da subtensão, tais como: redimensionar os cabos alimentadores do motor; remanejar o motor para o centro de carga e ajustar a derivação do transformador.

Sobretensão - se a tensão aplicada ao motor é superior a nominal, a corrente de magnetização irá aumentar, elevando as perdas de magnetização, podendo saturar o núcleo do motor. A sobretensão também aumenta o ruído de origem magnética, a corrente de partida, a temperatura na partida, conjugado de partida e a velocidade do motor.

O procedimento técnico para minimizar o efeito da sobretensão é o ajuste da derivação de tensão no transformador de distribuição (CONSERVAÇÃO DE ENERGIA, 2006).

3.5 Desequilíbrio de tensão

Os sistemas elétricos trifásicos de potência e os equipamentos são afetados pelo desequilíbrio de tensão, pois um pequeno desequilíbrio da tensão de fase pode propiciar um grande desequilíbrio desproporcional de corrente de fase. Sob condições de desequilíbrio, o sistema elétrico de potência terá maiores perdas e aquecimento. O efeito de desequilíbrio de tensão pode também ser severo em equipamentos tais como motores de indução, conversores eletrônicos de potência, controladores eletrônicos de velocidade (ASD). Os desequilíbrios de tensão, em sua grande maioria, têm origem nos sistemas de transmissão e distribuição, nos consumidores comerciais, residenciais, rurais e industriais (ANNETTE J.; 2001).

A contribuição para o desequilíbrio devido aos sistemas de transmissão e distribuição deve-se aos fatores: impedâncias desiguais dos enrolamentos dos transformadores de transmissão

e distribuição, impedância assimétrica da linha de transmissão, operação de transformadores em delta aberto.

Os consumidores comerciais e residenciais, em grandes concentrações urbanas, contribuem para o desequilíbrio devido à utilização em grande escala de equipamentos monofásicos.

Os consumidores rurais contribuem para o desequilíbrio devido às extensas linhas de distribuição alimentando-os em sistemas monofásicos.

Os consumidores industriais contribuem para o desequilíbrio devido principalmente à operação de cargas monofásicas e fornos a arco.

Quando o desequilíbrio é constante no tempo, podem ser implementados procedimentos técnicos para minimizá-lo. Entretanto, quando o mesmo é variável no tempo, minimizá-lo torna-se particularmente difícil. Pode-se citar como exemplo de desequilíbrio variável no tempo os que são de origem de operação de fornos a arco e controladores monofásicos de velocidade de motores acionando cargas variáveis no tempo.

3.5.1 Métodos de cálculo

Os métodos utilizados para determinar os desequilíbrios de tensão são definidos pela NBR 7094 (2003). O sistema trifásico é considerado praticamente equilibrado, quando a componente de seqüência zero não exceder a 1% da componente de seqüência positiva e também a componente de seqüência negativa não exceder em 1% da componente de seqüência positiva por um período prolongado ou a 1,5% durante um período curto não superior a alguns minutos. Portanto, para o cálculo do desequilíbrio de tensão, utilizando componentes simétricas, faz-se uso das equações 3.1, 3.2 e 3.3.

$$K_{\%} = \frac{V_2}{V_1} * 100 \quad (3.1)$$

$$V_2 = \frac{V_{ab} + a^2 * V_{bc} + a * V_{ca}}{3} \quad (3.2)$$

$$V_1 = \frac{V_{ab} + a * V_{bc} + a^2 * V_{ca}}{3} \quad (3.3)$$

onde:

$K_{\%}$ – fator de desequilíbrio;

◦

V_1 – componente de seqüência positiva [V];

◦

V_2 – componente de seqüência negativa [V];

◦

V_{ab} – tensão entre as linhas (a) e (b) [V];

◦
 V_{bc} – tensão entre as linhas (b) e (c) [V];

◦
 V_{ca} – tensão entre as linhas (c) e (a) [V];

$a = -0,5+j0,866$.

Uma outra fórmula também aplicável no cálculo do desequilíbrio de tensão leva em conta somente as amplitudes das tensões de linha. A pouca utilização dessa fórmula deve-se ao fato do ângulo da tensão não ser considerado no desequilíbrio da tensão. Este cálculo, utilizando somente a amplitude da tensão, pode acobertar erros, e é efetuado conforme a equação 3.4.

$$V_{desq.\%} = \frac{V_{Max} - V_{Med}}{V_{Med}} \times 100 \quad (3.4)$$

onde:

$V_{desq.\%}$ – desequilíbrio de tensão [%];

V_{Max} – máxima tensão medida [V];

V_{Med} – média aritmética das tensões medidas [V].

3.5.2 Efeitos do desequilíbrio em motores de indução

Os efeitos adversos produzidos pelo desequilíbrio de tensão na operação dos motores afetam o rendimento e a vida útil dos motores, devido ao aumento de suas perdas e conseqüente sobreaquecimento. Estes efeitos têm sido documentados desde os anos cinqüenta, sendo que, em 1954, Williams mostrou, com dados experimentais, a redução do rendimento do motor de indução operando nas condições de desequilíbrio de tensão. Em 1959, Garfford mostrou que os efeitos do aquecimento devido ao desequilíbrio de tensão levam o motor a uma falha prematura. Em 1963, Berndt e Schmitz apresentaram o método de redução da potência para cada percentual de desequilíbrio de tensão, conforme mostra a figura 3.3 (CHING, Y. L.; 1999).

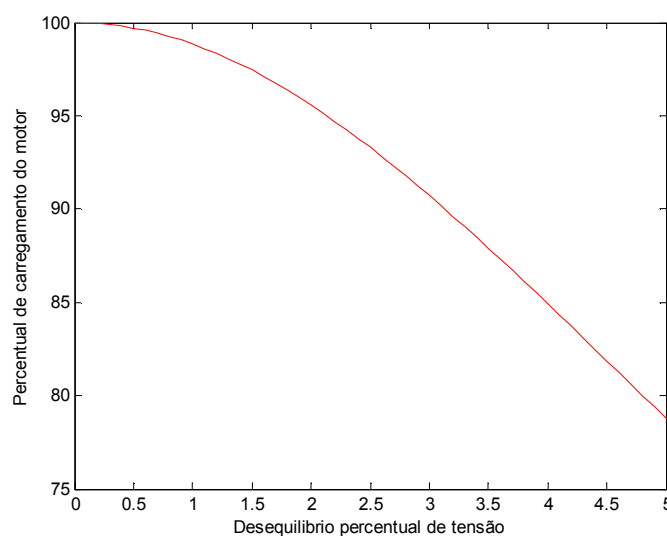


Fig. 3.3 Carregamento do motor em função do desequilíbrio de tensão

O valor percentual de redução da potência é determinado com o uso da equação 3.5 (PRAGASEN P.; PETER, H.; 2002). Essa equação empírica é citada pela norma NEMA, como um dos métodos usado para traçar o gráfico de redução da potência em função do desequilíbrio de tensão, após ser testada em vários motores.

$$I + \frac{2 \times (V_{desq\%})^2}{100} = \left(\frac{C\%}{100} \right)^{-1,7} \quad (3.5)$$

onde:

$V_{desq\%}$ – desequilíbrio de tensão [%];

$C\%$ – carregamento do motor [%].

Na curva obtida com o uso da equação 3.5 e mostrada na figura 3.3, verifica-se que a redução máxima de carregamento é de aproximadamente 21,2% para um desequilíbrio de tensão de 5%, enquanto que para 1% de desequilíbrio tem-se uma redução do carregamento de 1,1%. O limite de desequilíbrio de tensão que o motor pode ser submetido deve ser inferior a 5%, para evitar um sobreaquecimento e uma drástica redução de vida útil.

3.5.3 Perdas devido ao desequilíbrio de tensão em motores de indução

Não existe uma fórmula capaz de determinar o aumento das perdas para um valor percentual de desequilíbrio de tensão, pois valores percentuais iguais de desequilíbrio podem apresentar perdas desiguais, em face do grande número de combinações entre tensões e ângulos de fases. Contudo um cálculo aproximado pode ser praticado, onde as perdas são iguais a duas vezes o percentual do desequilíbrio elevado à segunda potência, conforme mostra a equação 3.6 (CONSERVAÇÃO DE ENERGIA, 2001).

$$P_{\%} = 2 \times (V_{desq\%})^2 \quad (3.6)$$

onde:

$P_{\%}$ – aumento das perdas [%];

$V_{desq\%}$ – desequilíbrio de tensão [%].

Utilizando esta equação, pode-se traçar a curva do aumento percentual das perdas em função do desequilíbrio de tensão tal como mostrado na figura 3.4.

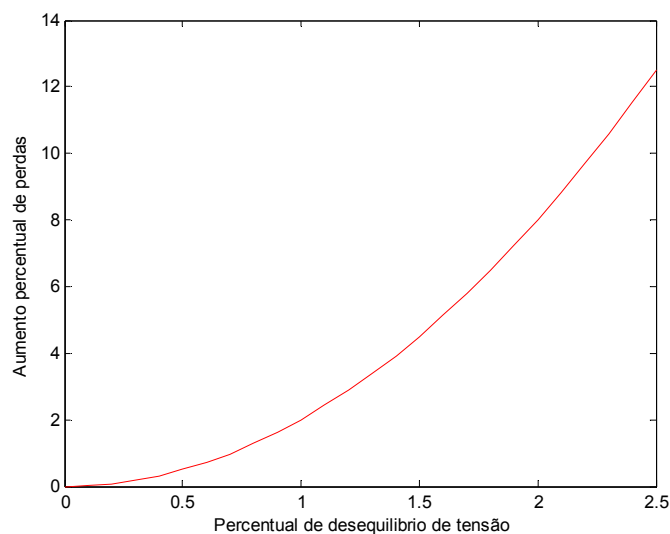


Fig. 3.4 Percentual de aumento de perdas em função do desequilíbrio de tensão

Na análise desta curva, pode-se verificar que um desequilíbrio de tensão de 2,5% acarreta um aumento aproximado de 12% das perdas internas do motor.

3.5.4 Temperatura em função do desequilíbrio de tensão em motores de indução

Com base no raciocínio apresentado anteriormente, pode-se efetuar um cálculo aproximado do aumento da temperatura em função do desequilíbrio de tensão, onde o aumento da temperatura no motor é igual a duas vezes o percentual do desequilíbrio elevado à segunda potência conforme a equação 3.7 (AUSTIN, H.B.; 1999).

$$\Delta T_{\%} = 2 \times \left(V_{desq\%} \right)^2 \quad (3.7)$$

onde:

$\Delta T_{\%}$ -Variação percentual de temperatura;

$V_{desq\%}$ -desequilíbrio de tensão [%].

3.5.5 Efeito do desequilíbrio de tensão no conjugado desenvolvido

Os motores de indução, quando alimentados por um sistema elétrico de potência que apresenta desequilíbrio de tensão, ficam submetidos a duas componentes de tensão de sentidos opostos. Estas, componentes podem ser analisadas com o uso de componentes simétricas, já que qualquer sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três componentes trifásicas equilibradas de seqüência positiva, negativa e zero. Entretanto, no caso de motores de indução, onde as conexões são em delta ou estrela não aterrado, tem-se somente a circulação de componentes de seqüência positiva e negativa, pois estes tipos de conexões impedem a passagem da componente de seqüência zero.

A componente de seqüência positiva é responsável pelo campo magnético girante no entreferro que, em conjunto com a corrente do rotor, desenvolve o conjugado eletromagnético do motor. A componente de seqüência negativa é responsável por um campo magnético girante no sentido oposto ao criado pela componente de seqüência positiva, e, como consequência, produz

um conjugado no sentido oposto à rotação do motor. Como o conjugado e velocidade resultante tendem a diminuir, o motor drena da rede de alimentação um adicional de potência para compensar as perdas provocadas pela componente de seqüência negativa, resultando em aumento de perdas, sobre aquecimento e aparecimento de conjugado pulsante devido ao sentido de giro oposto das componentes de seqüência positiva e negativa.

3.6 Harmônicos

Os harmônicos são conhecidos nos sistemas elétricos há décadas, quando os mesmos eram injetados no sistema devido à utilização de fornos a arco, lâmpadas de descargas, dispositivos saturáveis etc.

Com o uso crescente da eletrônica em equipamentos de consumidores residenciais, comerciais e industriais nas ultimas décadas, as cargas não lineares aumentaram significativamente o conteúdo harmônico no sistema elétrico, aumentando a distorção da forma de onda de tensão.

Considerando $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, podem ser observadas as seguintes características nos sinais distorcidos: 1) harmônicas de ordem $k = 3n + 1$ comportam-se como seqüências positivas; 2) harmônicas de ordem $k = 3n + 2$ comportam-se como seqüências negativas; e 3) harmônicas de ordem $k = 3n + 3$, chamadas harmônicas triplas, como seqüências zero.

Em geral, nos sistemas elétricos, as harmônicas de ordem par são nulas, devido aos equipamentos terem ondas de corrente com forma simétrica e periódica, e as harmônicas de ordem elevadas são desconsideradas, porque são atenuadas pelas impedâncias do próprio sistema (PASTÔRA, R. L.; MARZO, C. B.; 2002).

3.6.1 Distorção harmônica total

Como as harmônicas são consideradas poluidoras do sistema elétrico, afetando a vida útil dos motores, faz-se necessário a sua limitação dentro de um nível máximo tolerado pelo sistema elétrico. O método mais utilizado para quantificar o nível de distorção harmônica em sistema de elétrico de potência em baixa, media e alta tensão, adotado pelas principais normas mundiais, é o indicador de distorção harmônica total, DHT. Conforme recomendação do IEEE Std 519 (1992), a distorção harmônica de tensão DHT_V e de corrente DHT_I são calculadas pelas equações 3.8 e 3.9.

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{K=2}^{Kmax} V_K^2}}{V_1} \quad (3.8)$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{K=2}^{Kmax} I_K^2}}{I_1} \quad (3.9)$$

onde:

K – Ordem do harmônico;

V_K – valor eficaz da componente de tensão harmônica K [V];

V_1 – valor eficaz de tensão fundamental [V];

I_K – valor eficaz da componente de corrente harmônica K [A];

I_1 – valor eficaz da corrente fundamental [A].

A tabela 3.2 apresenta valores percentuais recomendados pelo operador nacional do sistema elétrico (ONS, 2009), para harmônicas de ordem par e ímpar para níveis de tensão em sistemas elétricos. Para tensão inferior a 69 kV, a recomendação do ONS, é que a DHT seja igual ou inferior a 6% e igual ou inferior a 3% para tensão superior a 69 kV.

Tabela 3.2 - Limites globais de tensão expressos em percentual da tensão fundamental

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
DTHT = 6%				DTHT = 3%			

3.6.2 Circuito equivalente de motores de indução para componentes harmônicas

Neste trabalho, apresenta-se a teoria de motores operando com a presença das componentes harmônicas, onde será usado um modelo matemático para a determinação das correntes, perdas e conjugados. O modelo é baseado no circuito equivalente convencional para motores de indução, incluindo modificações necessárias para contemplar os efeitos das componentes harmônicas.

O circuito equivalente utilizado para harmônicas é do tipo T, como mostrado na figura 3.5 (PANKAJ, K. S.; LANDA, H A.; 1990).

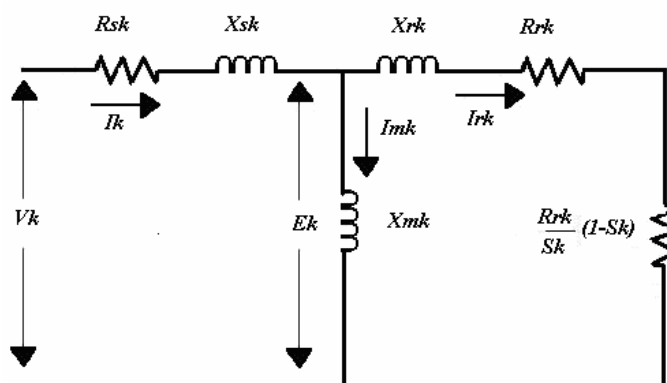


Fig. 3.5 Circuito equivalente do motor de indução para componentes harmônicas

onde:

V_k – tensão harmônica de ordem k aplicada ao estator [V];

E_k – tensão harmônica de ordem k aplicada ao rotor [V];

I_k – corrente harmônica de ordem k no estator [A];

I_{mk} – corrente harmônica de magnetização de ordem k [A];

I_{rk} – corrente harmônica de ordem k no rotor [A];

R_{sk} – resistência harmônica de ordem k do estator [Ω];

R_{rk} – resistência harmônica de ordem k do rotor [Ω];

X_{sk} – reatância harmônica de ordem k do estator [Ω];
 X_{rk} – reatância harmônica de ordem k do rotor [Ω];
 X_{mk} – reatância de magnetização harmônica de ordem k [Ω];
 S_k – escorregamento harmônico de ordem k.

As resistências do estator e do rotor são determinadas com utilização do modelo do circuito equivalente para condições nominais e frequência fundamental, sendo que as reatâncias do estator, do rotor e de magnetização também são obtidas pelo respectivo modelo e multiplicadas pela suas respectivas frequências harmônicas.

Cada componente de ordem harmônica pode ser analisada de forma individual com o uso do circuito equivalente, possibilitando obter o desempenho total do motor.

As diversas componentes harmônicas de tensão aplicadas ao motor fazem com que circule no estator e rotor, correntes com suas respectivas frequências harmônicas, sendo que a frequência no estator é a frequência fundamental f_1 vezes a ordem harmônica k, enquanto que a frequência no rotor é a frequência fundamental f_1 vezes a ordem harmônica k e o seu respectivo escorregamento S_k .

O escorregamento S_k pode ser determinado conforme sugere a equação 3.10. S_k é maior que a unidade quando o campo magnético de ordem harmônica k gira no sentido oposto ao sentido de giro do rotor e menor que a unidade quando gira no mesmo sentido. Desta forma, nas equações 3.10 e 3.12, o sinal positivo é aplicado para as harmônicas de seqüência negativa, enquanto que o sinal negativo deve ser empregado para as harmônicas de seqüência positiva.

$$S_k = \frac{kN_S \pm N_R}{kN_S} \quad (3.10)$$

onde:

S_k – escorregamento para componente harmônica de ordem “k”;

N_S – velocidade síncrona [rpm];

N_R – velocidade do rotor [rpm].

A velocidade do rotor N_R , devido somente à ação da componente fundamental, pode ser representada conforme equação 3.11.

$$N_R = N_S(1 - S) \quad (3.11)$$

Substituindo a equação 3.10 em 3.11 temos:

$$S_k = \frac{kN_S \pm N_S(1 - S)}{kN_S} = \frac{k \pm (1 - S)}{k} \quad (3.12)$$

Esta equação possibilita determinar o escorregamento de qualquer ordem harmônica, utilizando o escorregamento nominal do motor e a ordem harmônica.

Para o cálculo das indutâncias do circuito equivalente, quando o motor estiver operando com uma tensão não senoidal, deve-se levar em conta os efeitos das harmônicas de tensão e corrente sobre o grau de saturação do ferro. Testes experimentais sem carga indicam que a

componente de corrente fundamental de magnetização é maior na presença destas componentes harmônicas, indicando uma redução da reatância de magnetização. Além disto, os valores de correntes medidas evidenciam a redução da indutância de dispersão na presença de componentes harmônicas (EUGENE A. K.; HOWARD E. J.; 1968).

Para conhecer e quantificar os efeitos de saturação devido à ação de componentes harmônicas com o motor funcionando a vazio, deve-se calcular uma nova reatância de magnetização, conforme a equação 3.13.

$$X_{mk} = \frac{X_m}{M_f} \quad (3.13)$$

Onde:

X_{mk} – reatância de magnetização harmônica de ordem k [Ω];

X_m – reatância de magnetização [Ω];

M_f – fator de variação da reatância de magnetização.

O fator de variação da reatância de magnetização pode ser determinado pela razão entre o valor eficaz da corrente de magnetização na presença de componentes harmônicas e do valor eficaz da corrente de magnetização sem a presença de componentes harmônicas, conforme definido pela equação 3.14 (LANDA, H. A.; 1990).

$$M_f = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{n=0}^{n=T} i_{m_a}^2 (\Delta t)}}{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{n=0}^{n=T} i_{m_n}^2 (\Delta t)}} \quad (3.14)$$

onde:

i_{ma} – valor instantâneo n da corrente de magnetização com harmônicas [A];

i_{mn} – valor instantâneo n da corrente de magnetização sem harmônicas [A].

O circuito da figura 3.5 pode ser simplificado como mostrado na figura 3.6, e é válido para as condições nominais, em que o motor está operando perto da velocidade síncrona.

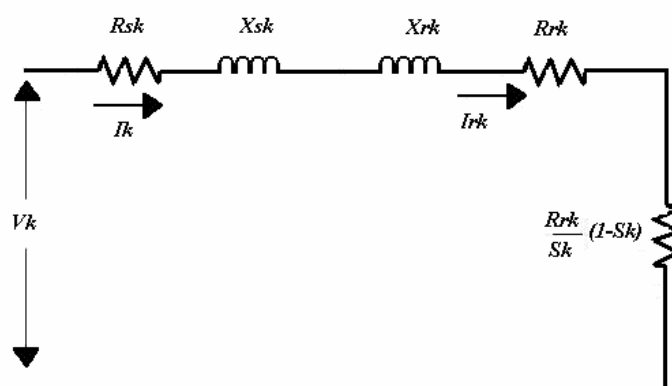


Fig. 3.6 Circuito equivalente simplificado para componentes harmônicas

Este circuito equivalente é bastante semelhante ao circuito equivalente de rotor travado, onde se negligencia o valor da reatância de magnetização X_{mk} , devido ao seu valor ser muito maior que a impedância de dispersão. Também são negligenciadas as perdas por atrito e ventilação devido às componentes de ordens harmônicas (PANKAJ, K. S.; LANDA, H A.; 1990). Com base neste circuito, pode-se determinar os valores das correntes harmônicas em suas respectivas ordens, a partir da equação 3.15.

$$I_k = \frac{V_k}{\sqrt{\left(R_{Sk} + \frac{R_{Rk}}{S_k}\right)^2 + (X_{Sk} + X_{Rk})^2}} \quad (3.15)$$

onde:

I_k – corrente harmônica de ordem k no estator [A];
 V_k – tensão harmônica de ordem k aplicada ao estator [V];
 R_{Sk} – resistência harmônica de ordem k do estator [Ω];
 R_{Rk} – resistência harmônica de ordem k do rotor [Ω];
 X_{Sk} – reatância harmônica de ordem k do estator [Ω];
 X_{Rk} – reatância harmônica de ordem k do rotor [Ω];
 S_k – escorregamento harmônico de ordem k.

O total de correntes harmônicas é o somatório das diversas componentes harmônicas conforme a equação 3.16.

$$I_h = \sqrt{\sum_{k=2}^n I_k^2} \quad (3.16)$$

Onde:

I_h – total de corrente harmônica [A].

3.6.3 Aumento das perdas no motor de indução devido as componentes harmônicas

As perdas, devido às componentes harmônicas nos motores de indução, devem ser calculadas de forma individualizada para cada ordem harmônica e, em seguida, adicioná-las.

-Perdas no ferro

A presença de componentes harmônicas pode resultar em alta saturação do circuito magnético, e, como consequência, tem-se um aumento das perdas do ferro.

Em condições nominais, as perdas no ferro podem ser determinadas conforme a equação 3.17, onde o primeiro termo representa as perdas por histerese e o segundo as perdas por correntes de Foucault (PANKAJ, K. S.; LANDA, H A.; 1990).

$$P_{fe} = B_m^2 k_h f + B_m^2 k_e f^2 \quad (3.17)$$

onde:

k_h – constante que depende da propriedade do material [W/Hz.T²];

f – frequência [Hz];

k_e – constante que depende da propriedade do material [$\text{W}/\text{Hz}^2 \cdot \text{T}^2$];

B_m – densidade máxima de fluxo [T].

Para uma dada densidade uniforme de fluxo na área transversal do núcleo, o seu valor pode ser determinado como se segue.

$$B_m = \frac{\varphi_m}{A} = \frac{E}{4.44fNA} = \frac{C_m E}{f} \quad (3.18)$$

Onde:

Φ_m – intensidade de fluxo [Wb];

A – área da secção transversal do núcleo [m^2];

N – número de espiras;

E – valor eficaz da tensão aplicada ao circuito de magnetização [V];

C_m – constante de magnetização do motor [Espiras/ m^2].

Substituindo a equação 3.18 em 3.17, obtém-se a equação 3.19.

$$P_{fe} = [k_h \left(\frac{1}{f}\right) + k_e] (EC_m)^2 \quad (3.19)$$

Esta equação pode ser usada para ao cálculo das perdas no ferro considerando a nova densidade de fluxo com as componentes harmônicas.

-Perdas no cobre

As perdas no cobre dos enrolamentos do estator, quando alimentado por uma tensão não senoidal, são proporcionais ao quadrado do valor eficaz da corrente do estator, se for desconsiderado o efeito pelicular da corrente, sendo que tal valor é a soma da fundamental com as respectivas componentes harmônicas, conforme mostra a equação 3.20 (PANKAJ, K. S.; LANDA, H A.; 1990).

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + \sum I_h^2} \quad (3.20)$$

Com o valor eficaz da corrente do estator pode-se calcular as perdas nos enrolamentos das do estator, tal como apresenta a equação 3.21.

$$P_{cul} = I_{rms}^2 R_s = R_s I_1^2 + \sum R_s I_h^2 \quad (3.21)$$

onde:

P_{cul} – perdas no cobre dos enrolamentos do estator [W];

R_s – resistência dos enrolamentos do estator [Ω],

sendo que a primeira parcela das perdas é devida à componente fundamental e a segunda associada as componentes harmônicas.

As perdas no rotor com presença de componentes harmônicas podem ser determinadas, somando as perdas devido à componente fundamental com as perdas de todas as componentes

harmônicas calculadas individualmente, conforme a equação 3.22; todavia deve-se ressaltar também que, quando o motor é de grande porte e as ranhuras do rotor forem profundas, deve-se levar em conta o efeito pelicular nos condutores do rotor (PANKAJ, K. S.; LANDA, H A.; 1990).

$$P_{cu2} = \left(\sum_{k=2}^n R_{Rk} I_{Rk}^2 \right) + R_R I_R^2 \quad (3.22)$$

onde o primeiro termo representa as perdas devido às componentes harmônicas e o segundo as perdas devido à componente fundamental.

3.6.4 Fator harmônico de tensão

As perdas harmônicas nos motores de indução devem ser determinadas para cada caso de forma de onda específica de corrente, pois a mesma depende dos parâmetros internos da máquina e da amplitude de cada componente. Contudo, um cálculo percentual aproximado pode ser praticado, utilizando o fator harmônico de tensão FHV. O FHV é definido pela equação 3.23, conforme NBR 7094 (2003).

$$FHV = \sqrt{\sum \frac{V_k^2}{k}} \quad (3.23)$$

onde:

FVH – fator harmônico de tensão [pu];

V_k – harmônico de tensão em relação à tensão nominal [pu];

k – Ordem do harmônico, não divisível por três em motores trifásicos.

De posse do FHV, determina-se as perdas totais aproximadas devido às componentes harmônicas com o uso da equação 3. 24 (CUMMINGS, P. G.; 1986).

$$P_H \cong 35 \sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{(V_n)^2}{n} \cong 35 \times (FHV)^2 \quad (3.24)$$

onde:

P_H – perdas harmônicas [pu];

V_n - harmônico de tensão [pu];

n – ordem do harmônico.

O valor máximo do fator FHV permitido para motores de indução deve ser menor ou igual a 2%, exceto para o motor categoria N, para o qual pode ser igual ou inferior a 3% conforme NBR 7094 (2003).

De posse do FHV, pode-se definir qual deve ser a redução de potência entregue à carga para que a temperatura do motor não ultrapasse a temperatura nominal, a qual é determinada com o uso da figura 3.7 (NEMA, 1998).

As equações derivadas nos subitens anteriores serão utilizadas no capítulo 6, para determinar o aumento da temperatura dos motores de indução quando alimentados por tensão não senoidal e seus efeitos na vida útil.

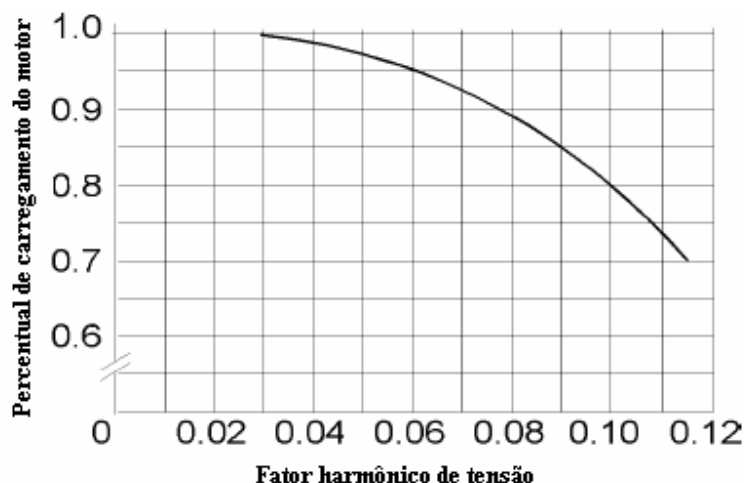


Fig. 3.7 Redução do carregamento do motor em função de FHV

3.6.5 Outros efeitos de harmônicos em motores de indução

Quando os motores de indução são alimentados por uma tensão senoidal pura, a componente fundamental produz um campo magnético girante uniforme no entreferro, induzindo uma tensão no rotor, fazendo circular no mesmo uma corrente. A ação da corrente do rotor e do campo magnético resultante no entreferro faz com que o rotor desenvolva um conjugado no eixo no mesmo sentido do campo magnético girante do estator. Quando a tensão de alimentação é distorcida, as harmônicas de seqüência positiva produzem campos magnéticos girantes no mesmo sentido da fundamental, aumentando o conjugado de partida, e propiciando o aparecimento do “cogging”-recusa de partida suave devido à redução de escorregamento, além de aumentar a velocidade. Por outro lado, harmônicas de seqüência negativa produzem campos magnéticos girantes no sentido oposto ao da fundamental, propiciando o aparecimento de “crawling”, aumento do escorregamento, reduzindo o conjugado de partida e a velocidade (IEEE Std 519,1992).

Outro fator relevante é a ação da 5ª e 7ª e da 11ª e 13ª, harmônicas, que resultam no rotor a indução de harmônicas pares, sendo que a 5ª e 7ª resultam em 6ª harmônica para o rotor e a 11ª e 13ª na 12ª harmônica, conforme tabela 3.3. As conseqüências são sobre aquecimento e o aparecimento de conjugado pulsante do motor.

Tabela 3.3 Harmônicos em motores trifásicos

Ordem harmônicas	Frequência (Hz)	Seqüência de fases	Harmônico no estator	Rotação harmônica	Harmônica no rotor
1	60	+	1	A favor	1
5	300	-	5	Contrária	6
7	420	+	7	A favor	6
11	660	-	11	Contrária	12
13	780	+	13	A favor	12

As frequências harmônicas superior a 13ª podem ser desconsideradas em estudo de motores de indução trifásicos, conforme prescreve a NBR 7094 (2003).

3.6.6 Conversores estáticos de frequência

O número de aplicações usando conversores estáticos de frequência suprindo motores de indução tem aumentado significativamente nas ultimas décadas, devido à facilidade de controlar a velocidade do motor e também reduzir o consumo de energia. Porém, os motores ficam submetidos a uma tensão não senoidal composta de componentes harmônicas, resultando nos problemas discutidos anteriormente.

A forma de onda aplicada pelos conversores estáticos de frequência ao motor de indução é constituída de uma série de sinais discretos de tensão, onde o número e a largura do pulso é variável para compor a onda fundamental. A largura do pulso de saída do modulador varia de acordo com a amplitude relativa da referência em comparação com a portadora, triangular, conforme mostrado na a figura 3.8. Tem-se, assim, uma Modulação por Largura de Pulso, denominada, em inglês, como Pulse Width Modulation – PWM, enquanto que a amplitude é igual à tensão do barramento C.C. do conversor.

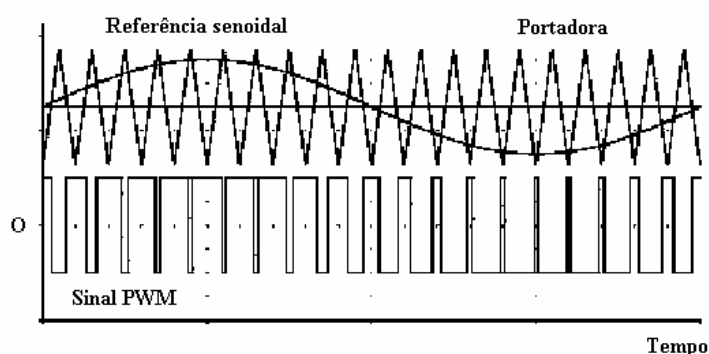


Fig. 3.8 Modulação por largura de pulso

Muitas outras formas de ondas de tensão são possíveis de serem desenvolvidas, dependendo da concepção particular de cada conversor estático a ser utilizado; contudo, certas características comuns são encontradas em todas: elas são periódicas e tem um número finito de máximos, mínimos, e descontinuidades dentro de um determinado período, que torna possível analisá-las utilizando a série de Fourier, sendo que o comportamento do motor pode ser analisado como se existisse varias fontes de tensão independentes conectadas em série, alimentando o motor, conforme a figura 3.9 (EUGENE, A. K.; HOWARD E. J., 1968).

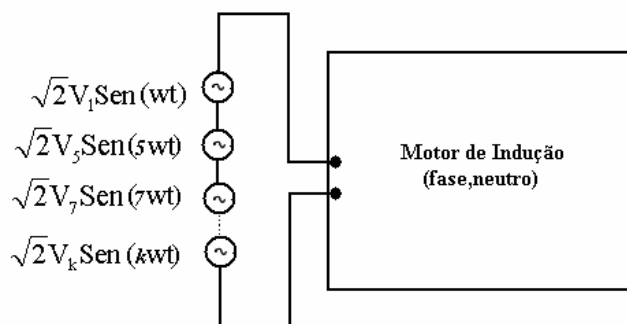


Fig. 3.9 Análise das componentes harmônicas

3.6.6.1 Componentes harmônicas nas correntes de linha

Em retificadores trifásicos, as componentes características de correntes harmônicas presentes são dadas pela fórmula: $nK \pm 1$ onde K é o número de pulsos do retificador e n é um número inteiro. Assim, para um retificador trifásico de seis pulsos, utilizado nos conversores industriais de baixa tensão com potências de até algumas centenas de kW, estarão presentes as harmônicas 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 17^a, 19^a, etc. (ISONI, M. S.; 2006).

3.6.6.2 Influência do conversor estático sobre as perdas do motor de indução

No que tange às perdas no motor de indução, um aspecto a ser destacado diz respeito à variação da amplitude da componente fundamental do conversor estático PWM. A característica V/f parametrizada nos inversores impõe a redução da tensão proporcional à redução da frequência fundamental, de modo que o fluxo no entreferro do motor seja mantido constante, preservando a característica do conjugado e reduzindo o consumo de energia elétrica. Esta redução da frequência de operação minimiza as perdas do motor, além de compensar possíveis aumentos da temperatura de operação devido à redução da velocidade de operação. Além disso, as perdas dos motores devido às componentes harmônicas, em modernos conversores estáticos PWM, são negligenciadas em face das elevadas frequências de chaveamento (WALDIBERTO, L. P.; HUGO G. M.; 2006).

3.7 Conclusão

Neste capítulo do trabalho, desenvolveram-se estudos das formas de tensões em que o motor de indução fica submetido e os efeitos das mesmas nas condições operacionais e no ciclo de vida útil dos motores. Apesar das normas vigentes fixarem faixas de variação de tensão, não se pode garantir que todos os consumidores sejam alimentados com o mesmo valor eficaz de tensão. Fatores como distância, derivação de tensão do transformador e carregamento do sistema de distribuição, pode fazer com que certos consumidores fiquem submetidos aos níveis acima ou abaixo dos valores nominais de tensão, além de distorções devido à presença de desequilíbrio de tensão e de componentes harmônicas.

Em seqüência, utilizou-se um modelo de circuito equivalente de motor de indução para analisar os efeitos de desequilíbrio de tensão e de componentes harmônicas, no seu desempenho sob as diversas condições de tensão aplicada. Com base nesta análise de desequilíbrio de tensão, foi feita uma avaliação dos seus efeitos no rendimento e na vida útil dos motores. Foram também apresentados os métodos utilizados para determinar os desequilíbrios de tensão definidos pela NBR 7094 (2003).

Os efeitos das componentes harmônicas foram avaliados sob diferentes condições de operação, tais como conjugado de partida, variação da velocidade. Em seguida, analisou-se os aumentos das perdas no ferro e do cobre, ocasionando uma redução da vida útil do motor. Foram, então, apresentados os métodos para a redução de potência entregue a carga, a fim de que a temperatura do motor não ultrapasse a temperatura nominal.

Finalmente, destacou-se as vantagens e desvantagens do conversor estático de frequência no controle de velocidade nos motores de indução, além de ressaltar que as perdas dos motores devido às componentes harmônicas, em modernos conversores estáticos PWM, não são significativas devido as elevadas frequências de chaveamento.

4 MANUTENÇÃO DE MOTORES

4.1 Introdução

A manutenção é uma complexa fonte de custos elevados e como tal precisa ser administrada criteriosamente. Sua atividade meio, dentro de um sistema produtivo, é de fundamental importância para a produção e a qualidade final do produto. Todo sistema operacional tem um tempo de vida estimado e a probabilidade de falha aumenta com a redução do seu tempo de vida. Deste modo, é essencial se ter uma manutenção confiável para atuar de forma simultânea com o processo, reduzindo a probabilidade de paralisação. Quando um sistema opera sem interrupção e perda da produção em um período de tempo definido, pode-se dizer que este sistema é confiável. Portanto, a confiabilidade de um sistema é definida como a probabilidade do sistema operar sem interrupção não programada em um período determinado de tempo. Um sistema 100% confiável é economicamente inviável. Efetuando-se a manutenção dentro de custos viáveis, sem impactar os custos do sistema produtivo, deve este equilíbrio ser adequado, dentro de suas respectivas particularidades. Em sistemas motrizes, estas particularidades definem o formato de manutenção que pode ser aplicado em um todo ou em setores específicos da empresa. Este capítulo apresentará os principais tipos de manutenção aplicada ao setor produtivo, bem como os efeitos resultantes na confiabilidade deste setor.

4.2 Tipos de manutenção

A corretiva e a preventiva são os principais tipos de manutenção existente nos setores produtivos, sendo então discutidas nos próximos sub-itens.

4.2.1 Manutenção corretiva

A manutenção corretiva deve ser efetuada quando instalações e equipamentos operam como unidades individuais, ou são separados por partes no processo de fabricação, com uma unidade suprindo a falha sem afetar imediatamente o processo de produção. Em uma instalação que opera com vários equipamentos com funções semelhantes, pode-se chegar à conclusão que é mais barato, fácil e rápido permitir que o motor pare e então substituí-lo por outro que já está recondicionado ou novo. O motor substituído é então recuperado e mantido à disposição para futuras utilizações, verificando seu rendimento para atender a política de conservação de energia. É importante ressaltar que deve ser efetuado um planejamento do método de reparo, bem como a preparação de ferramental necessário.

Um outro formato de manutenção corretiva, utilizada em setores de sistemas produtivos que usam grande quantidade de motores pequenos de baixo custo, é a substituição não planejada de um motor danificado por um motor novo. O setor de manutenção deve ter em estoque unidades capazes de substituir os motores danificados de forma eficiente. Este procedimento é indicado quando o custo de reparação é maior que o custo de aquisição e, em consequência disto, o motor danificado é substituído por outro motor novo com maior confiabilidade.

Esse tipo de manutenção não deve ser aplicado em motores que interrompam o processo produtivo devido ao elevado custo da perda de produção e da qualidade final dos produtos afetados por uma parada não programada (PENROSE H.W.; 2003).

4.2.2 Manutenção preventiva

Manutenção preventiva é dividida em duas formas básicas, sendo uma baseada em períodos de tempos pré-determinados e denominada de **manutenção sistêmica**, e a outra baseada, em acompanhamento de parâmetros, é chamada de **manutenção preditiva**. A manutenção sistêmica é utilizada quando o mecanismo de falha é típico de desgaste, como a troca dos mancais antes do travamento do rotor. Já a manutenção preditiva consiste do acompanhamento das condições e/ou desempenho, através da análise de testes periódicos em parâmetros representativos da situação do motor. Um exemplo de manutenção preditiva é a determinação da expectativa de vida útil do isolamento das bobinas do estator através da medição da resistência de isolamento.

A substituição planejada é um formato de manutenção preventiva que é freqüentemente utilizada com bons resultados em vários setores industriais, principalmente naqueles em que um determinado motor é responsável pela principal unidade operacional da empresa. Nestes casos, a mesma deve ser realizada dentro de critérios técnicos e administrativos, tendo como suporte o banco de dados do motor utilizado no sistema produtivo ou de informações de fabricantes ou fornecedores. Os procedimentos de manutenção devem ser planejados antecipadamente e efetuados em dia específico de paralisação do processo produtivo, sendo que o conjunto ou parte do conjunto que será substituído deve estar disponível no momento da manutenção, juntamente com todo ferramental necessário à manutenção, instrumentos de medição e aferição e corpo técnico da empresa. Isto para tornar o tempo de manutenção compatível com o tempo de paralisação sem haver custos adicionais de perda de produção que acabam aumentando o custo operacional do motor.

Em síntese, a manutenção de um motor implica no acompanhamento do estado de conservação/desgaste dos seus componentes, aquisição e manutenção em estoques desses componentes, definição do momento de substituição, definição de equipes de manutenção e tempo de manutenção.

Portanto, os tipos de manutenção devem se adequar a cada tipo específico do processo produtivo, de forma a manter a produção conforme a expectativa preestabelecida, propiciando maior confiabilidade ao sistema.

A manutenção não consiste somente em substituir componentes, mas também em procedimentos básicos, como manter o sistema motriz limpo, seco e bem conectado, evitar umidade, poeira etc. Além disto, efetuar medições da tensão de alimentação, temperatura ambiente e desgaste prematuro de componentes, possibilita uma manutenção eficiente com custo relativo baixo frente à confiabilidade do sistema.

4.3 Confiabilidade

A confiabilidade é a probabilidade de um sistema operar por um período de tempo definido sem ocorrência de falha. Para alcançar este objetivo, é necessário o desenvolvimento de um planejamento fundamentado nos conceitos de confiabilidade. Estes conceitos são: análise da confiabilidade com o uso de métodos probabilísticos, criação de um banco de dados dos motores, avaliar o custo benefício da manutenção, estimar o tempo ideal para o sistema motriz operar sem ocorrência de falhas e acompanhar e comprovar a expectativa de tempo ideal dos procedimentos de manutenção (GOLD BOOK, 1997).

Uma abordagem quantitativa da confiabilidade frente uma probabilidade de o sistema falhar no tempo é mostrada na equação 4.1 (BILLINTON, R.; 1976).

$$C = 1 - P(t) \quad (4.1)$$

onde:

C – confiabilidade [pu];

P(t) – probabilidade de o sistema falhar no tempo (t) [pu].

A confiabilidade pode também ser determinada pela equação 4.2, quando se tem a estimativa do tempo de ocorrência do evento (falha) e a expectativa do tempo de vida útil do equipamento (BILLINTON, R.; 1976).

$$R = e^{-T/t} \quad (4.2)$$

Onde:

R – confiabilidade [pu];

T – tempo de vida do equipamento [h];

t – tempo médio de falha do equipamento [h].

Uma das chaves para determinar a confiabilidade é conhecer o tempo médio entre falhas (t). Por exemplo, se um motor de indução tem uma falha em média a cada 16.000 horas de operação, o seu (t) será de 16.000 horas. Portanto, a probabilidade desse motor falhar será de 1/t, ou $6,25 \times 10^{-5}$, o que significa que a probabilidade desse motor operar 20.000 horas sem falha, (sua vida útil estimada) é de: $R = e^{-20.000 \times 0,0000625} = 0,287$ ou 27,8% (PENROSE, H.W.; 2002).

Quando existe a possibilidade de ocorrência de um ou mais tipos de eventos, os mesmos são divididos em:

-Série, quando o sistema produtivo deixa de operar devido à ocorrência de falha individual de qualquer motor. A equação 4.3 mostra que a confiabilidade resultante de um sistema série é o produto da confiabilidade de cada motor.

$$R = R_1 \times R_2 \times R_3 \dots R_n = (e^{-T/t_1}) \times (e^{-T/t_2}) \times (e^{-T/t_3}) \dots (e^{-T/t_n}) \quad (4.3)$$

Supondo que o exemplo anterior tenha dois motores operando em série com o sistema produtivo, a confiabilidade resultante de o sistema operar durante 20.000 horas é de:

$$R = (e^{-20.000 \times 0,0000625}) \times (e^{-20.000 \times 0,0000625}) = 0,0828 \text{ ou } 8,2\%$$

-Paralelo, quando a produção do sistema é mantida na ocorrência de falha de um motor, devido à existência de outro motor instalado em paralelo, pode-se nesse caso utilizar a equação 4.4 para determinar a confiabilidade do sistema. Este é um caso típico de dois eventos idênticos e exclusivos.

$$R = R_1 + R_2 - (R_1 \times R_2) \quad (4.4)$$

Para n eventos idênticos, usa-se a equação 4.5.

$$R = 1 - (1 - R_1)^n \quad (4.5)$$

Supondo também que o exemplo anterior tenha dois motores operando em paralelo com o sistema produtivo, a confiabilidade resultante de o sistema operar durante 20.000 horas é de:

$$R = (e^{-20.000 \times 0,0000625}) + (e^{-20.000 \times 0,0000625}) - (e^{-20.000 \times 0,0000625}) * (e^{-20.000 \times 0,0000625}) = 0,49 \text{ ou } 49,0\%$$

4.4 Vida útil de motores

Para determinar a confiabilidade de um motor dentro de um sistema produtivo é necessário ter uma estimativa de sua vida útil. Segundo ANDREAS, J.C. (1982), não existe projeto capaz de definir a vida útil de motores, devido à diversidade de fatores que influenciam a mesma. Entretanto, a tabela 4.1 apresenta uma estimativa de vida média de motores, com base em dados e estudos realizados pelo U. S. Department of Energy.

Tabela 4.1 Estimativa de vida de motores elétricos

Faixa de potência HP	Vida média	Faixa de vida média
Menor que 1	12,9	10 até 15
1 até 5	17,1	13 até 19
5.1 até 20	19,4	16 até 20
21 até 50	21,8	18 até 26
51 até 125	28,5	24 até 33
Maior que 125	29,3	25 até 38

Segundo ANÍBAL A.T. (2006), a estimativa de vida média de motores de baixa tensão, com potência na faixa de 1 a 250 kW, é apresentada na tabela 4.2.

Tabela 4.2 Estimativa de vida de motores de indução

Vida média dos motores de indução com manutenção e troca de componentes	
Potência em kW	Vida média em anos
1,0 – 7,5	12
7,5 – 75	15
75 – 250	20

A comparação entre as tabelas 4.1 e 4.2 apresenta uma discrepância de vida útil de até 65% quando se trata de motores com potência superior a 50 HP. Essas tabelas são fundamentadas em dados estatísticos de uma determinada empresa.

Como as estimativas das tabelas apresentam discrepâncias em seus valores, e a vida dos motores é praticamente definida pela vida útil do isolamento das bobinas do estator (ANDREAS, J.C.; 1982), então, a vida dos motores será definida, neste trabalho, como a vida útil do isolamento das bobinas do estator e pode ser determinada com a equação:

$$V_u = e^{-\alpha(T_I - T_n)} \quad (4.6)$$

onde:

V_u – vida útil do isolamento [pu];

α – constante do material isolante [$1/^\circ\text{C}$];

T_I – temperatura de operação em condições diversas [$^\circ\text{C}$];

T_n – temperatura de operação em condições nominais [$^\circ\text{C}$].

Como uma variação de 10 °C provoca uma alteração pelo fator dois na vida útil do isolamento das bobinas do estator, como mostrado no capítulo 2 dessa dissertação, a constante do material isolante é dada pela equação (AUSTIN, H.B.; 2000):

$$\alpha = \frac{0,07}{V_u} \quad (4.7)$$

Após obter o valor de α , pode-se determinar como os fatores ambientais afetam a vida útil do isolamento das bobinas do estator.

4.5 Influência dos fatores ambientais na vida útil do isolamento

Os fatores que afetam a vida útil do isolamento são mostrados na NBR 7094 (2003) e apresentados na tabela 4.3, porém a NBR 7094 não os quantifica. Os efeitos desses fatores podem ser associados a parâmetros técnicos, que podem ser usados para definir a temperatura de operação, confiabilidade e vida útil do motor, como apresentado no anexo B dessa dissertação.

Tabela 4.3 Fatores que afetam a vida útil do isolamento

NBR7094	Exposição
4.4.2.1-a	Poeiras combustíveis, explosivas, abrasivas ou condutoras.
4.4.2.1-b	Fibras ou partículas em suspensão
4.4.2.1-c	Emanações químicas
4.4.2.1-e	Vapor d'água, ar salino ou vapor de óleo
4.4.2.1-f	Atmosferas úmidas ou muito secas
4.4.2.1-h	Empuxo axial ou radial imposto ao eixo do motor
4.4.2.2-a	Tensão de alimentação desequilibrada em mais que 1%

4.6. Quantificação dos fatores ambientais

Na tabela 4.4, os efeitos de diversos agentes ambientais são associados a um fator de vida útil M. Tal fator é usado na quantificação da vida útil do isolamento (PENROSE, H.W.; 2004).

Tabela 4.4 Fator M para as condições ambientais

Condição	Descrição do ambiente	Fator M
1.1	Limpo e seco com temperatura menor que 25°C.	0,0
1.2	Limpo com ar condicionado e temperatura menor que 25°C.	0,5
1.4	Ambiente agressivo, temperatura variável, umidade.	1,0
1.5	Ambiente agressivo, temperatura variável e elevada umidade, ácido/base, motor em torres de refrigeração.	Não quantificado

A referência (PENROSE, H.W.; 2004) quantifica a vida útil do isolamento por:

$$V_u = e^{-M}$$

Comparando esta equação com a equação 4.6, pode-se verificar que

$$M = \alpha(T_l - T_n) \quad (4.8)$$

Deve-se ressaltar que este fator, quando se trata de umidade, agentes químicos, poeira ou abrasivos, significa o equivalente térmico de degradação do isolamento. Portanto, pode-se associar esta degradação a um ΔT equivalente.

4.7 Vida útil dos mancais

O fator mecânico mais significativo para a vida útil do motor são os mancais de rolamentos. Nesse trabalho, os mancais de rolamento utilizados nos motores elétricos são do tipo ZZ, que vão da numeração 6201 a 6308, com carcaça do tipo 63 até 132M e não necessitam ser relubrificadas, conforme citado no item 2.2.4.

A previsão da vida útil de um mancal de rolamento com uma fadiga nominal devida ao desgaste é normalmente definida como o fator “L10”, o qual permite estimar que 10% de uma grande população de mancais falham no tempo. Supondo que este tempo seja de um ano, então 50% dos mancais falham em um tempo de cinco anos, sendo esse percentual de falha denominado fator “L50”. A outra metade falha no tempo restante de vida útil, conforme figura 4.1 (AUSTIN, H.B.; 1992).

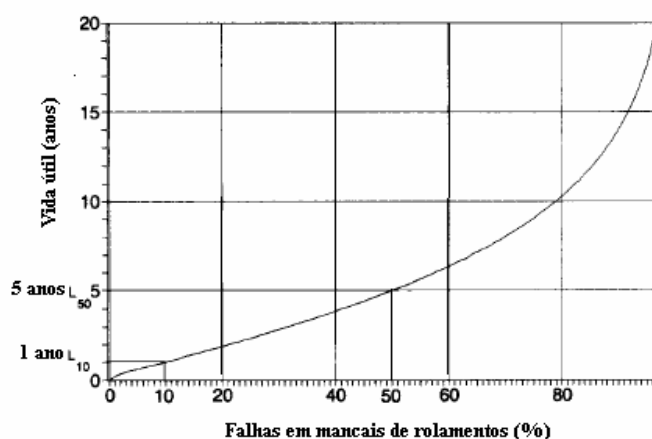


Fig. 4.1 Relação entre falhas e vida útil de mancais de rolamentos

Os principais fatores que afetam o tempo de vida útil dos mancais de rolamentos de um motor são o carregamento, o desbalanceamento e o desalinhamento. Em geral, o desgaste dos mancais de rolamento é definido, conforme a equação 4.9 (WILLIAM, R.F.; HODOWANEC; M.; 2002).

$$L_{10} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^a \quad (4.9)$$

onde:

L_{10} – tempo percentual em que 10% dos rolamentos falham;

C – carga dinâmica nominal do rolamento [N];

P – carga no rolamento [N];

n – velocidade [rpm];

a – constante igual a três para rolamentos de esfera.

Especificamente para mancais de rolamentos de esfera, o tempo de vida em horas, quando o motor opera dentro das condições nominais, é definido pelas equações (NSK, 2008) a seguir:

$$L_{util} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^a = 500 \times (F_L)^3 \quad (4.10)$$

$$F_L = 10 \times 3 \sqrt[3]{\frac{I}{30n}} \times \left(\frac{C}{P}\right)$$

onde:

L_{util} – vida nominal [h];

F_L – fator de vida útil [h].

4.7.1 Efeito do carregamento na vida útil dos mancais

Nos motores de indução sem utilização de inversores, a velocidade é praticamente constante, e, supondo que o motor esteja montado na posição horizontal, onde o esforço mecânico no rolamento é praticamente radial, pode-se então admitir que o fator de vida seja inversamente proporcional ao seu carregamento. Com base nessas condições, pode-se estimar a influência da carga na vida útil dos rolamentos através da equação 4.11. Quando o carregamento dos motores está abaixo do nominal, os mancais têm aumento de vida útil. Já um carregamento acima do nominal tem uma redução, conforme mostrado na tabela 4.5.

Tabela 4.5 Efeito do carregamento na vida útil dos mancais de rolamentos

Motor 1 CV		Motor 5 CV		Motor 10 CV	
Carcaça – 80		Carcaça - 100L		Carcaça - 132S	
Rolamentos		rolamentos		rolamentos	
6204 ZZ e 6203 ZZ		6206 ZZ e 6205 ZZ		6206 ZZ e 6206 ZZ	
Carga	Vida útil	Carga	Vida útil	Carga	Vida útil
50	160.000	50	160.000	50	160.000
75	47.407	75	47.407	75	47.407
100	20.000	100	20.000	100	20.000
125	10.240	125	10.240	125	10.240

4.7.2 Efeito do desbalanceamento na vida útil dos mancais

O desbalanceamento do rotor pode ocorrer principalmente devido a erro de fabricação, desgaste de mancais, carregamento fora da especificação nominal, rompimento de barras do rotor e/ou tensão desequilibrada aplicada no estator. A precisão do balanceamento do rotor de um motor tem um custo elevado, em virtude da alta tecnologia que é utilizada. Durante o ciclo de vida do motor, o programa de manutenção deve verificar as condições de desbalanceamento e tomar medidas para minimizar esta ação, pois a mesma afeta significativamente a vida útil dos mancais. A força centrípeta, devido ao desequilíbrio de massa, pode ser determinada por (NASA, 2000):

$$F = mrw^2 \quad (4.11)$$

onde:

F – força centrípeta [N];

m – massa [kg];

r – raio [m];

w – velocidade angular [rad/s].

De posse desta força centrípeta, pode-se então determinar este efeito na vida útil dos mancais, da forma como se segue:

$$L_{util} = L_N \left(\frac{C_M}{C_M + F} \right)^3 \quad (4.12)$$

onde:

L_{util} – vida útil [h];

L_N – vida nominal [h];

C_M – carga máxima radial admissível [N];

F – força resultante do desbalanceamento [N].

A tabela 4.6 apresenta a redução de vida útil devido a um desbalanceamento de 2% da massa dos rotores, onde J é o momento de inércia em kg.m^2 e, $veloc.$ é a velocidade em rpm. Os valores dos momentos de inércia e das velocidades dos motores foram retirados do catálogo de fabricante (WEG, 2007).

Tabela 4.6 Efeito do desbalanceamento na vida útil dos mancais de rolamentos

Motor 1 CV Carcaça – 80		Motor 5 CV Carcaça – 100L		Motor 10 CV Carcaça – 132S	
J	0,00328	J	0,01072	J	0,05427
Veloc.	1730	Veloc.	1720	Veloc.	1760
F	32,04	F	82,8	F	327,19
C_M	392,54	C_M	784,00	C_M	1568,00
L_N	20.000	L_N	20.000	L_N	20.000
L_{util}	15.805	L_{util}	14.818	L_{util}	16.547
$L_{util}\%$	79,02	$L_{util}\%$	74,09	$L_{util}\%$	82,7

Essa tabela mostra que um desequilíbrio tão pequeno como de 2% da massa rotórica reduz a vida útil dos mancais de rolamentos para 79,02%, 74,09% e 82,7% no caso dos motores de 1, 5 e 10 CV, respectivamente.

4.7.3 Efeito do desalinhamento na vida útil dos mancais

A vibração produzida pelo desalinhamento do acoplamento motor carga, afeta a vida útil dos acoplamentos mecânicos, causando deterioração progressiva também nos selos de vedação dos mancais de rolamentos, no balanceamento do rotor, no isolamento das bobinas do estator e ruptura do eixo. O alinhamento deve ser efetuado dentro de pequenas faixas de tolerância e com alto nível de precisão. O sistema de alinhamento a laser e o de dois relógios comparadores, estando um apontado radialmente e outro axialmente, são indicados para alcançar estes níveis, possibilitando verificar o desvio de paralelismo e concentricidade. A tabela 4.7 apresenta os limites de tolerância recomendado para acoplamentos da General Motors (NASA, 2000).

Tabela 4.7 Tolerância recomendada para acoplamento

Tipo de acoplamento	Velocidade máxima em rpm	Tolerância vertical, horizontal e paralelismo em mm
Acoplamento direto	600	0,127
	900	0,134
	1200	0,0635
	1800	0,0508
	3600	0,0254

Dados práticos, fornecidos pela indústria petroquímica, indicam que um bom alinhamento pode aumentar em oito vezes a vida do mancal de rolamento, reduzindo o custo de manutenção em sete por cento e ainda aumentar em doze por cento a disponibilidade do motor (NASA, 2000).

4.8 Custos de manutenção em motores

É importante entender que usualmente os motores falham em seu ciclo de vida, devido à degradação de seus componentes elétricos e mecânicos, sendo que sua eficiência decresce e as perdas aumentam com o tempo, resultando em uma probabilidade maior de o sistema acionado ter uma paralisação não programada. As conseqüências de uma paralisação são: a redução da produtividade, perdas de vendas, perdas de insumos, aumento dos custos com pessoal, pagamento de horas extras, redução da qualidade do produto e custo final aviltado do produto.

A utilização de um programa de manutenção preventiva tem como conseqüência o aumento da produtividade, cumprimento de prazo de entrega com os clientes, redução do custo do produto final, menor consumo de energia, maior qualidade e grande competitividade no mercado. A tabela 4.8, apresenta uma estimativa de custos de paralisação de algumas modalidades industriais (PENROSE H.W.; 2003).

Tabela 4.8 Estimativa de custos de paralisação

Modalidade industrial	Custo médio de paralisação por hora em dólar
Produtos agrícolas	7.000,00
Indústria de alimentos	30.000,00
Indústria química e de petróleo	87.000,00
Indústria de fundição	100.000,00
Automotiva	200.000,00

4.8.1 Calendário de manutenção

O uso de um programa de manutenção, associado a um calendário de atividades de manutenção preventiva, possibilita o rastreamento do histórico dos motores, como: tempo de troca dos mancais, valores da rigidez dielétrica do isolamento, data da última limpeza, condições de tensão de alimentação, custos de substituição de componentes, custos com homem/hora gasto com a manutenção etc. Esses dados têm um papel de suma importância na dinâmica do sistema operacional da manutenção e são necessários para manter a confiabilidade do sistema. A tabela 4.9 apresenta um exemplo de calendário de manutenção.

Tabela 4.9 Calendário de manutenção de motores

Programa de manutenção	Tipos de Procedimentos de manutenção	Frequência da manutenção			
		Diária	semanal	mensal	Anual
Inspeção visual	Completa inspeção visual para assegurar que todos os equipamentos de cada sistema operacional estão operando dentro da normalidade	X			
Condições de operação	Verificar temperatura e vibração e comparar com os valores base		X		
Lubrificação	Verificar se os mancais de rolamentos estão lubrificados conforme orientação dos fabricantes			X	
Alinhamento	Verificar alinhamento e acoplamento mecânico para uma transferência eficiente de potência para carga			X	
Fixações	Verificar e garantir todas as fixações do motor			X	
Conexões	Apertar as conexões e terminais, conforme necessário			X	
Limpeza	Remover poeira e sujeira de motor para facilitar a refrigeração			X	
Mancais de rolamentos	Inspecionar o desgaste de rolamentos e correias. Ajustar, reparar ou substituir, sempre que necessário				X
Envelhecimento e desgaste	Verificar temperatura e vibração e comparar com os valores durante seu ciclo de vida				X
Tensão de alimentação	Tensão desequilibrada e harmônicas podem reduzir a vida do isolamento devido ao aumento de temperatura				X
	Sobretensão e subtensão podem provocar curto-circuito ou sobre aquecimento				X

Com base nesta tabela, pode-se estimar o tempo e o custo anual com manutenção de motores (SULLIVAN, G. P.; PUGH, R.; MELENDEZ, A. P.; HUNT, W. D.; 2002).

4.8.2 Estudo de caso do custo de manutenção

A eficiência da manutenção em um sistema industrial é relatada em um estudo de caso cujo conteúdo é uma tese da “Kennedy-Western University” (PENROSE H.W.; 1999).

Uma empresa americana selecionada por um programa de conservação de energia, denominado “Uma nova abordagem de manutenção e gestão do sistema motriz para redução dos custos de energia no sistema industrial e comercial” apresentou a seguinte situação:

A referida empresa operava 24 horas nos 365 dias do ano, o que significa potencialmente 8760 horas de produção anual; porém o tempo real de produção foi de 6482,4 horas e um período de inatividade de 2277,6 horas, o que corresponde a 26% de perda de produção. Instituiu-se na empresa e seus fornecedores um programa de manutenção preventiva preditiva em períodos trimestrais com duração de 3 dias durante 3 anos. Após a implementação do programa de manutenção, o tempo de paralisação reduziu de 26% para 6%, perfazendo um total de 796 horas, sendo que 288 horas ou 4 x 72 horas eram programadas e 508 horas imprevistas. A redução obtida de inatividade foi de 1482 horas. Estimando-se um custo médio de interrupção da produção de US\$ 10000 por hora, a empresa teve um ganho de US\$ 14,82 milhões por ano. Vale ressaltar que o custo médio de paralisação nas indústrias americanas é de US\$ 75000 por hora. Os custos para implementação do programa relatados foram de US\$ 12000 com capacitação de pessoal, US\$ 20000 para equipamentos de manutenção, US\$ 25000 para bancos de dados, US\$ 10000 com contratação de pessoal, US\$ 132000 com manutenção preditiva, US\$ 60000

com manutenção corretiva em rebobinamento de motor e outros pequenos reparos, perfazendo um gasto total com manutenção de US\$ 359000.

Após três anos esta empresa foi vendida, e o novo proprietário considerou desnecessária a manutenção preventiva, pois teria um ganho de US\$ 250000 com redução de pessoal e com empresas terceirizadas. Dois anos depois da venda da empresa, o índice de paralisação retornou aos 24%.

Este novo proprietário não considerou a manutenção como investimento para viabilizar o sistema produtivo, mas sim como uma despesa que deveria ser eliminada.

4.9 Conclusão

Este capítulo apresentou a influência da manutenção na vida útil do motor, mostrando que os efeitos de carregamento, desequilíbrio da tensão aplicada, poeira, umidade, acidez, abrasivos e temperatura alteram a vida útil nominal do motor, e que um procedimento de manutenção preventiva ou corretiva, programado e em conformidade com seu processo produtivo, deve ser aplicado para minimizar estes fatores, aumentando a produtividade e a confiabilidade do sistema.

A degradação do isolamento pela umidade, poeira, abrasivos e acidez foi parametrizada através de uma equivalência com a degradação térmica, possibilitando a análise simultânea destes fatores.

Além disso, foram descritos os fatores que afetam a vida útil dos mancais de rolamentos, tais como carregamento, balanceamento e alinhamento, apresentando também os efeitos desses fatores na vida útil dos mancais de rolamento, conforme valores apresentados nas tabelas 4.6 a 4.8.

Um calendário com os diversos itens de uma manutenção programada foi mostrado, com objetivo de determinar os custos com manutenção e reduzir a probabilidade de uma parada não programada.

Encerrando o capítulo, foi relatado um estudo de caso versando sobre a eficiência da manutenção em um sistema industrial, apresentado em uma tese da “Kennedy-Western University”.

5 ANÁLISE ECONÔMICA

5.1 Introdução

A análise econômica preocupa-se com o valor do dinheiro no tempo. Pode-se iniciar o estudo sobre a aquisição de um motor com a seguinte frase: “*não se soma ou subtrai quantias em dinheiro que não estejam na mesma data*” (PAMPLONA, E.O.; BARRA J.A.; 2005). A decisão de investimento, visando o uso eficiente da energia em motores de indução, passa necessariamente por uma análise de viabilidade econômica, que é mostrada no presente capítulo, e uma análise técnica, que foi mostrada nos capítulos 2, 3 e 4 dessa dissertação. A análise de viabilidade econômica consiste em quantificar os custos dos investimentos na aquisição, instalação e operação do motor e também avaliar o tempo gasto para obter o retorno desses investimentos ao adquirir um motor de maior rendimento. A análise técnica consiste em avaliar os fatores que afetam a vida útil do motor, tais como carregamento, desequilíbrio de tensão, subtensão, sobretensão, tensão com componentes harmônicas, temperatura ambiente. De posse da estimativa do tempo de retorno de investimento e do tempo de vida útil do motor, efetua-se finalmente a opção de aquisição ou não do motor.

5.2 Ciclo de vida de um motor de indução

Para viabilizar um modelo econômico de um motor é essencial ter conhecimento de sua estimativa de vida. Os projetistas não estabelecem o tempo de vida de um motor, devido à diversidade de fatores que o afeta. Contudo, alguns pesquisadores como ANDREAS, J.C. (1982) e ANÍBAL, A.T. (2006) apresentaram, baseados em dados estatísticos, o tempo de vida média de motores em determinadas faixas de potência, conforme descrito no capítulo 4 dessa dissertação.

No capítulo 6, o tempo de utilização do motor não será definido por um único valor, como a estimativa de vida citada no parágrafo anterior. Ele será definido comparando o tempo de vida útil determinado por parâmetros técnicos e o tempo de retorno de investimento determinado por parâmetros econômicos. Fundamentado nestes parâmetros, pode-se então estimar os custos do motor durante sua utilização.

5.3 Custos do motor durante seu ciclo de vida

Um motor, durante todo seu tempo de vida útil, tem seus custos divididos em projeto de instalação, aquisição, instalação, manutenção e operação. A figura 5.1 mostra a composição dos custos de um motor durante o seu ciclo de vida.

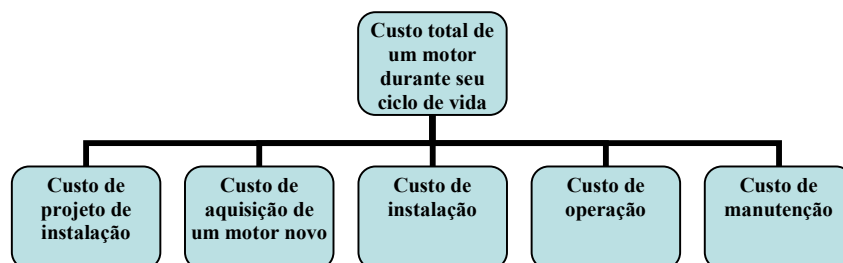


Fig. 5.1 Custos de um motor durante seu ciclo de vida

Os custos com projeto de instalação, aquisição e instalação, correspondem a um investimento com valor definido e fixo, enquanto que os custos com operação e manutenção podem ser variáveis no tempo.

5.3.1 Custos de projeto de instalação e instalação

A quantificação dos custos de projeto e instalação depende das atividades peculiares de cada empresa, principalmente em termos do tipo e qualidade do produto final, tornando muito diverso estes custos. Contudo, de acordo com a referência (PENROSE, H.W.; 1999), uma quantificação aproximada praticada é que o custo de projeto e instalação é a metade do custo de aquisição do motor. Todavia, esta referência não especificou se este custo é válido para pequenos ou para grandes motores.

5.3.2 Custos de aquisição

A quantificação do custo de aquisição de motores novos é facilmente obtida junto aos fabricantes de motores. Os fabricantes disponibilizam tabelas de custo com os valores dos motores padrão e de alto rendimento, já incluso o preço de transporte sem o imposto de circulação de mercadoria e serviço ICMS. Nos projetos já implantados e com unidades existentes a serem substituídas, é conveniente contabilizar os custos adicionais inerentes à substituição, tais como os custos de adaptação da instalação para a nova unidade e do número de horas paralisadas.

A tabela 5.1 mostra o custo de motores de indução trifásicos para aplicação geral, rotores em gaiola, série IP-55, carcaça em ferro fundido, 4 pólos, tipo alto rendimento.

Tabela 5.1 Preços de motores de alto rendimento

4 Pólos - 60 Hz		
Potência CV	Carcaça	R\$
1	80 a4	417,59
1.5	80 b4	472,47
2	90 S4	577,76
3	90 L4	701,42
4	100 La4	914,8
5	100 L4	980,94
6	112 Ma4	1.172,07
7,5	112 M4	1.270,37
10	132 S4	1.605,73
12,5	132 Ma4	1.898,20
15	132 M4	2.133,78
20	160 M4	2.547,40
25	160 L4	3.434,90
30	180 M4	4.537,71
40	200 M4	5.778,76
50	200 L4	6.355,57
60	225 S/M4	10.338,64
75	225 S/M4	11.755,26
100	250 S/M4	13.926,53
125	280 S/M4	19.875,53
150	280 S/M4	23.551,33
175	315 S/M4	28.331,07
200	315 S/M4	28.632,38

A tabela 5.2 mostra o custo de motores de indução trifásicos para aplicação geral, rotores em gaiola, série IP-55, carcaça em ferro fundido, 4 pólos, tipo padrão, fornecida pelo fabricante METALCORTE MOTORES (2008).

Tabela 5.2 Preços de motores padrão

4 Pólos - 60 Hz		
Potência CV	Carcaça	R\$
* 1/8	56 a4	302,05
* 1/6	56 b4	305,75
* 1/4	63 a4	306,89
* 1/3	63 b4	316,54
0,5	71 a4	294,12
0,75	71 b4	325,1
1	80 a4	338,55
1.5	80 b4	372,45
2	90 S4	443,79
3	90 L4	512,71
4	100 La4	657,86
5	100 L4	696,22
6	112 Ma4	980,55
7.5	112 M4	1.006,15
10	132 S4	1.236,37
12.5	132 Ma4	1.433,52
15	132 M4	1.508,03
20	132 L4	1.946,84
20	160 M4	2.163,98
25	160 L4	2.482,07
30	180 M4	3.774,62
--	180 L4	4.598,85
40	200 M4	5.045,75
50	200 L4	5.594,09
60	225 S/M4	8.100,30
75	225 S/M4	9.136,39
100	250 S/M4	10.552,45
125	280 S/M4	15.633,18
150	280 S/M4	17.042,34
175	315 S/M4	21.201,00
200	315 S/M4	22.316,93
250	315 S/M4	25.701,27
300	355 M/L4	46.960,23
350	355 M/L4	51.338,86
400	355 M/L4	53.991,02
450	355 M/L4	59.132,51
500	355 M/L4	60.702,92

O símbolo (*) no corpo da tabela 5.2 significa que a carcaça do motor é fundida em alumínio.

Os fabricantes nacionais que ofertam motores de alto rendimento e padrão no mercado mantêm as características mecânicas semelhantes, para atender as duas possíveis opções entre as

linhas ofertadas. As tabelas 5.1 e 5.2 mostram essas semelhanças ao apresentar carcaças iguais para uma mesma potência, independentemente do tipo do motor.

Uma análise de custos apresentados nessas tabelas, em função da potência dos motores de 1 a 10 CV, é apresentada pela figura 5.2, onde os preços de aquisição dos motores de alto rendimento são da ordem de 20 a 40% mais elevados que os motores padrão. A diferença de preço mais acentuada entre as duas linhas é encontrada para o motor de 5 CV, enquanto que a diferença de preço menos acentuada é encontrada para o motor de 6 CV.

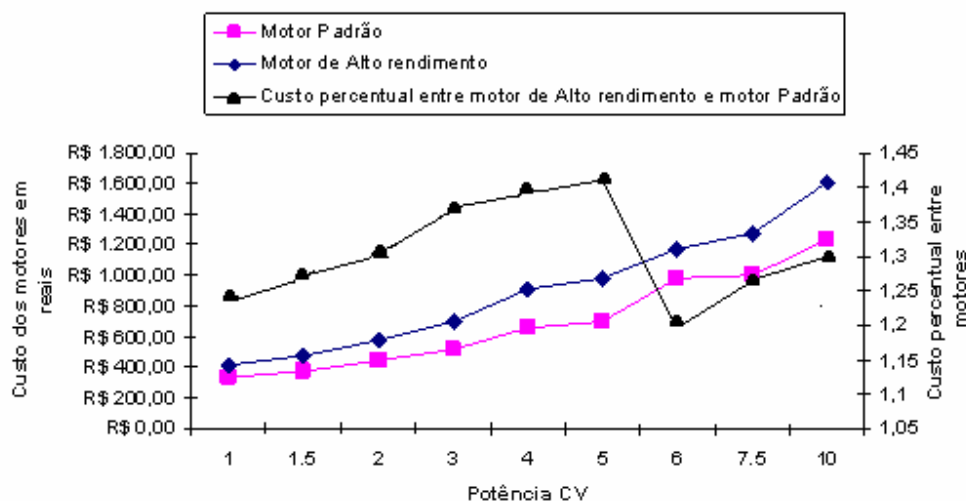


Fig. 5.2 Análise de custos

5.3.3 Custos de manutenção

Os mancais de rolamentos e as bobinas do estator são responsáveis por aproximadamente 80% das causas de falhas do motor, conforme mostra a figura 5.3. Com base nesta informação, o correto, a princípio, seria focar a manutenção nos mancais de rolamentos e nas bobinas do estator. Porém, para os motores selecionados para esse trabalho, devido à faixa de potência dos mesmos, a troca das bobinas do estator é inviável por motivos técnicos como a perda de rendimento e por motivos econômicos devido ao custo elevado do rebobinamento e aumento do consumo de energia (PENROSE, H.W. 1999).

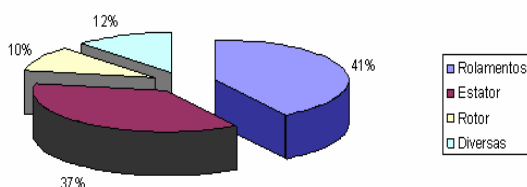


Fig. 5.3. Percentuais de falhas nas partes constituintes de um motor

A tabela 5.3 apresenta os custos de rebobinamento em dólares em relação aos custos de um motor novo, com valores percentuais para motores de 3 a 200 Hp. Ao analisar essa tabela,

verifica-se, que somente quando o custo de rebobinamento for menor que 60% do custo do motor novo, é sugerido a reforma do motor. Isto acontece para motores com potências iguais e superiores a 60 Hp (CLAYTON, T.; 2003).

Tabela 5.3 Custo de rebobinamento em relação a um motor novo

Custos de Rebobinamento de Motor, 4 polos				
Motor Hp	Custo de rebobinamento	% do novo	Custo do novo	conclusão
200	\$ 2,985.00	49,0%	\$ 6,087.55	rebobinar
150	\$ 2,420.00	49,9%	\$ 4,950.00	rebobinar
125	\$ 2,028.00	48,0%	\$ 4,224.98	rebobinar
100	\$ 1,716.00	56,5%	\$ 3,037.54	rebobinar
75	\$1,365.00	54,1%	\$ 2,525.29	rebobinar
60	\$ 1,171.00	57,3%	\$ 2,043.73	rebobinar
50	\$ 1,033.00	83,9%	\$ 1,231.65	trocar
40	\$ 858.00	73,1%	\$ 1,173.00	trocar
30	\$ 722.00	80,5%	\$ 896.75	trocar
25	\$ 614.00	81,3%	\$ 775.23	trocar
20	\$ 536.00	87,4%	\$613.28	trocar
15	\$ 463.00	92,6%	\$ 499.80	trocar
10	\$ 858.00	110,4%	\$ 341.60	trocar
7,5	\$ 319.00	106,4%	\$ 300.00	trocar
5	\$ 271.00	120,1%	\$ 225.60	trocar
3	\$ 249.00	133,3%	\$ 186.80	trocar

Na referência BORTONI, E.C. HADDAD, J.; AFONSO H.M. (1999), os autores também sugerem que o custo de rebobinamento não deve exceder a 60% do custo do motor novo, pois na grande maioria das reformas das bobinas, o motor diminui seu rendimento e, em conseqüência, consome mais energia, além da vida útil da bobina reformada ser menor que a bobina de um motor novo.

A manutenção para os mancais de rolamentos dos motores selecionados para esse trabalho consiste somente no procedimento de troca dos mesmos, sendo que o procedimento de relubrificação não se faz necessário, pois sua vida útil estimada é de 20.000 horas, tempo este estimado para a troca dos mancais de rolamento.

O procedimento de troca dos mancais de rolamentos é viável tecnicamente por não afetar o rendimento do motor e economicamente devido ao baixo custo dos mancais. Os custos dos mancais de rolamento dos motores selecionados para esse trabalho são mostrados na tabela 5.4 (ABECOM ROLAMENTOS, 2005).

Tabela 5.4 Custos dos mancais de rolamento

Motor 1 CV Carcaça – 80		Motor 5 CV Carcaça – 100L		Motor 10 CV Carcaça – 132S	
Custo unitário		Custo unitário		Custo unitário	
6204 ZZ	6203 ZZ	6206 ZZ	6205 ZZ	6203 ZZ	6206 ZZ
R\$9,91	R\$9,12	R\$14,98	R\$13,95	R\$9,12	R\$14,98

Ao analisar essa tabela, observa-se que os custos dos mancais de rolamentos representam entorno de 1,5% a 2% dos custos dos motores mostrados nas tabelas 5.1 e 5.2, viabilizando a troca dos mancais ao término das suas vidas úteis.

Os demais custos de manutenção consistem nos custos de homem/hora e equipamentos para análise da tensão de alimentação, da rigidez dielétrica do isolamento das bobinas do estator, do desgaste dos mancais de rolamentos, da limpeza, da vibração e dos ruídos dos motores.

As ponderações no capítulo 4 mostram que a vida útil do motor está intrinsecamente ligada à vida útil do isolamento. Assim, mesmo que a troca dos mancais de rolamento seja viável econômica e tecnicamente, o motor permanece vulnerável em relação à vida útil do enrolamento.

5.3.4 Custo de operação

O custo de operação tem como principal fator o consumo de energia, cujo valor anual pode representar da ordem de 5 a 10 vezes o custo do motor novo, conforme citado no capítulo 1.

Este custo de operação é composto de fatores técnicos e econômicos, onde os principais são: rendimento do motor, carregamento, subtensão, sobretensão, desequilíbrio de tensão, tensão com componentes harmônicas e custo da energia contratada.

5.3.4.1 Custo com rendimento

Ao adquirir um motor novo, nos seus dados de placa vem especificado o seu rendimento. Quanto maior for o mesmo, menor será o custo com o consumo de energia. O consumidor pode pesquisar no mercado o fabricante que ofertar o motor com maior rendimento para motores do tipo padrão. Com relação aos motores de alto rendimento, os fabricantes limitam-se a atender a legislação vigente, o que faz com que todos os fabricantes comercializem motores com o mesmo rendimento. Espera-se que, em um futuro recente, o livre mercado ofereça motores de alto rendimento com valores superiores aos previsto pela legislação, como já ocorre nos EUA.

Para os motores padrão, não há valores de rendimento normalizados nem métodos de ensaio estabelecidos, cabendo ao fabricante marcar o rendimento na placa de identificação e indicar o método de ensaio nas propostas e catálogos, conforme citado na NBR 7094 (2003).

5.3.4.2 Custo com carregamento

Esse custo refere-se ao consumo de energia que o motor necessita para movimentar uma carga, de modo que, quanto maior for o carregamento, maior será o consumo de energia, assim como o custo. A figura 5.4 mostra o aumento da corrente em função do carregamento, para um valor constante de tensão, o que comprova o aumento do consumo de energia. Pode-se também verificar um aumento do rendimento com o aumento do carregamento, sendo que o maior rendimento ocorre na faixa de 75 a 100 % do carregamento nominal, sendo praticamente constante nesta região (WEG, 2007).

5.3.4.3 Custo com o desequilíbrio de tensão

O motor, ao ser alimentado com uma tensão trifásica com desequilíbrio, apresenta um aumento de suas perdas conforme citado no capítulo 3 dessa dissertação. Como consequência, ocorre uma redução do rendimento, maior consumo de energia e um aumento do custo.

5.3.4.4 Custo com subtensão

Quando submetido a uma subtensão, a máquina solicita da fonte de alimentação um acréscimo de corrente para manter o conjugado requisitado pela carga conforme citado no capítulo 3 dessa dissertação. Como consequência, ocorre uma redução do rendimento, um aumento do consumo de energia e, finalmente, um aumento do custo.

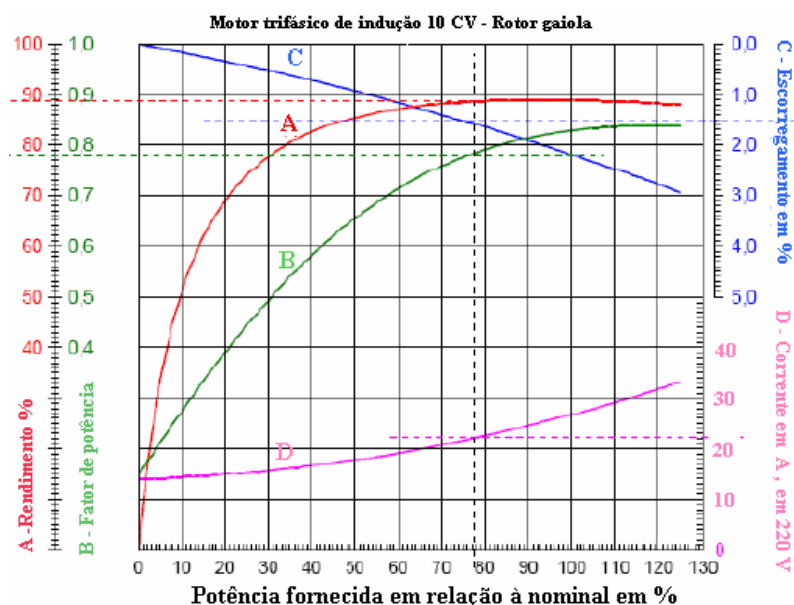


Fig. 5.4 Curvas características em função da potência

5.3.4.5 Custo com sobretensão

Um motor, estando sujeito a uma sobretensão, reduz a solicitação de corrente da fonte para manter o conjugado exigido pela carga, conforme citado no capítulo 3. Isso resulta no aumento do rendimento, redução do consumo de energia e do custo (CONSERVAÇÃO DE ENERGIA, 2006).

5.3.4.6 Custo devido às componentes harmônicas de tensão

As harmônicas de tensão não contribuem para alterar a componente de corrente fundamental dos motores. A corrente de alimentação do motor aumenta unicamente devido ao acréscimo de suas componentes harmônicas. A corrente fundamental permanece praticamente inalterada, enquanto as suas componentes harmônicas sofrem um aumento linear, de acordo com a relação obtida entre as componentes harmônicas de tensão e as impedâncias harmônicas determinadas a partir das componentes de seqüência positiva e negativa do motor para cada harmônica especificada. Esse aumento linear das componentes harmônicas de corrente eleva as perdas por efeito Joule nos condutores do estator e rotor, reduzindo o rendimento e aumentando o consumo de energia e custo. Os efeitos das harmônicas de ordem superior a 13^o, para os motores de indução, são desprezíveis.

5.3.4.7 Custo da energia contratada

Atualmente, o custo de energia varia com o nível da tensão de alimentação, o horário e o período anual de consumo e o tipo de tarifa contratada junto à concessionária de energia. A tabela 5.5 apresenta os consumidores dos grupos A e B divididos pelo nível de tensão de alimentação.

O grupo A é composto de unidades consumidoras com atendimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão inferior 2,3 kV a partir do sistema subterrâneo de distribuição. Esse grupo é caracterizado pela estrutura tarifária binômica e subdividido nos subgrupos A1, A2, A3, A4 e AS, de acordo com a tensão de atendimento.

O grupo B é composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão superior 2,3 kV, nos termos definidos na resolução 456

(ANEEL, 2000). Esse grupo é caracterizado pela estrutura tarifária monômnia e subdividido nos subgrupos B1, B2, B3 e B4.

Tabela 5.5 grupos de consumidores

GRUPO A	
Subgrupo	Tensão Fornecimento
A1	≥ 230 kV
A2	88 a 138 kV
A3	69 kV
A3a	30 a 44 kV
A4	2,3 a 25 kV
AS	Subterrâneo
GRUPO B	
Subgrupo	Tensão Fornecimento
B1	Residencial
B1	Residencial Baixa Renda
B2	Rural
B2	Cooperativa de Eletrificação Rural
B2	Serviço Público de Irrigação
B3	Demais Classes
B4	Iluminação Pública

O horário diário de consumo é dividido em horário de ponta e fora de ponta. O horário de ponta é definido pela concessionária que atende ao consumidor como um intervalo consecutivo de 3 horas de segunda a sexta feira, excluindo os feriados nacionais. O horário fora de ponta é o intervalo consecutivo de 21 horas complementares às 3 horas do horário de ponta, de segunda a sexta feira, acrescido das 24 horas diárias de sábado, domingo e feriados.

O período de consumo é dividido em período seco e úmido. O período seco corresponde ao período de sete meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos de maio a novembro, e o período úmido corresponde ao período de cinco meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos de dezembro a abril do ano seguinte (ANEEL, 2000), conforme mostra a figura 5.5.

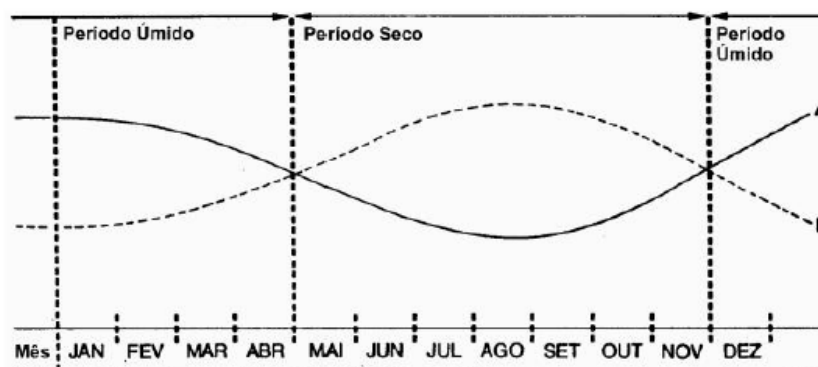


Fig. 5.5 Períodos úmido e seco

A curva A representa a disponibilidade média de armazenamento de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas do sistema nacional interligado, e a curva B o comportamento do mercado consumidor de energia elétrica (RAMOS, 2002).

A estrutura tarifária é dividida em tarifa convencional, horo-sazonal azul e horo-sazonal verde, cuja respectiva regulamentação encontra-se também na resolução 456 (ANEEL, 2000).

A estrutura tarifária convencional é caracterizada por um custo único de tarifa, independente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano. Essa estrutura tarifária é

aplicada a consumidores com atendimento em tensão inferior a 69 kV e demanda contratada inferior a 300 kW. O cálculo do custo de energia elétrica para um usuário de tarifa convencional é feito conforme a equação 5.1 (CONSERVAÇÃO DE ENERGIA, 2006).

$$VPF = (CF.TC + DF.TD) \cdot \left(\frac{I}{I - ICMS} \right) \quad (5.1)$$

onde:

VPF – valor parcial de fatura de energia elétrica [reais];

CF – consumo de energia elétrica ativa faturada [kWh];

TC – tarifa de consumo [reais];

DF – demanda faturada [reais];

TD – tarifa de demanda [reais];

$ICMS$ – imposto de circulação de mercadoria e serviços [%].

A estrutura tarifária horo-sazonal azul é a aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, e tarifa de demanda de potência diferenciada. Essa estrutura tarifária é aplicada de forma compulsória a consumidores com atendimento em tensão igual ou superior a 69 kV ou, para atendimento, em tensão inferior a 69 kV e demanda contratada superior a 300 kW. Essa estrutura tarifária é também aplicada de forma opcional aos consumidores com atendimento em tensão inferior a 69 kV e demanda contratada inferior a 300 kW. O cálculo do custo de energia elétrica para um usuário de tarifa azul é efetuado conforme as equações:

-Período seco:

$$VPF = (CF_{fs} \cdot TC_{fs} + CF_{ps} \cdot TC_{ps} + DF_f \cdot TD_f + DF_p \cdot TD_p) \cdot \left(\frac{I}{I - ICMS} \right) \quad (5.2)$$

-Período úmido:

$$VPF = (CF_{fu} \cdot TC_{fu} + CF_{pu} \cdot TC_{pu} + DF_f \cdot TD_f + DF_p \cdot TD_p) \cdot \left(\frac{I}{I - ICMS} \right) \quad (5.3)$$

onde:

f – índice que indica o horário fora de ponta;

p – índice associado ao horário de ponta;

s – índice referente ao período seco;

u – índice relativo ao período úmido.

A estrutura tarifária horo-sazonal verde consiste na aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, e tarifa única de demanda de potência. Essa estrutura tarifária é aplicada de forma compulsória aos consumidores com atendimento em tensão inferior a 69 kV e demanda contratada superior a 300 kW. Tal estrutura tarifária é também aplicada de forma opcional aos consumidores com atendimento em tensão inferior a 69 kV e demanda contratada inferior a 300 kW. O cálculo do custo de energia para um usuário de tarifa verde é efetuado conforme as equações apresentadas na seqüência:

-Período seco:

$$VPF = (CF_{fs} \cdot TC_{fs} + CF_{ps} \cdot TC_{ps} + DF \cdot TD) \cdot \left(\frac{1}{1 - ICMS} \right) \quad (5.4)$$

-Período úmido:

$$VPF = (CF_{fu} \cdot TC_{fu} + CF_{pu} \cdot TC_{pu} + DF \cdot TD) \cdot \left(\frac{1}{1 - ICMS} \right) \quad (5.5)$$

5.4 Análise econômica

Existem vários tipos de análise econômica que podem ser feitas, as quais envolvem diferentes pontos de vista e têm diferentes objetivos. As conclusões e decisões tomadas são baseadas em um determinado tipo de análise. Cada tipo de análise objetiva determinar parâmetros que são usados para uma tomada de decisão.

A análise econômica para a aquisição de um motor novo de alto rendimento ou do tipo padrão, para implementar um projeto ou para substituição de um motor usado, passa primeiramente pelo estabelecimento de um fluxo de caixa. Esse fluxo de caixa, que é uma representação gráfica dos investimentos e receitas distribuídos uniformemente ao longo do tempo de vida útil estimada para o motor, possibilita uma avaliação econômica para uma tomada de decisão, conforme mostrado na figura 5.6.

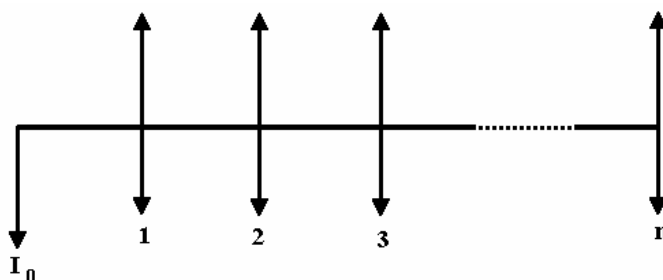


Fig. 5.6 Fluxo de caixa

As setas para baixo representam os investimentos efetuados (despesas) e as setas para cima representam as receitas distribuídas ao longo da vida útil do motor, onde I_0 representa o investimento inicial e os períodos entre os fluxos de caixa podem ser mensais ou anuais.

As despesas podem ser valores constantes e invariáveis no tempo, como o custo de aquisição e instalação, ou distribuídos ao longo da vida útil do motor como os custos com operação e manutenção preventiva.

As receitas de um motor, ao longo de sua vida útil, referem-se às parcelas dos fluxos de caixa proveniente das receitas do sistema produtivo. Estas receitas nem sempre são uniformes, pois vários fatores internos e externos às empresas afetam a produção, e, como consequência, o fluxo de caixa. Contudo, pode-se transformar a não uniformidade em séries uniformes, distribuindo os fluxos de caixa de maneira uniforme, conforme figura 5.7, onde as linhas pontilhadas representam os fluxos não uniformes, e as linhas cheias as séries uniformes.

Esse fluxo uniforme, associado a um modelo econômico, possibilita levar para um dado momento de tempo todos os custos e benefícios que ocorrem em cada período de tempo, para que as alternativas sejam analisadas neste momento e, de posse dos resultados, escolha-se então a melhor opção.

Como algumas das alternativas desse trabalho consistem na opção entre o motor de alto rendimento e o motor padrão, deve-se então efetuar o fluxo uniforme de caixa para cada tipo de motor e, em seguida, analisar qual será a melhor opção econômica.

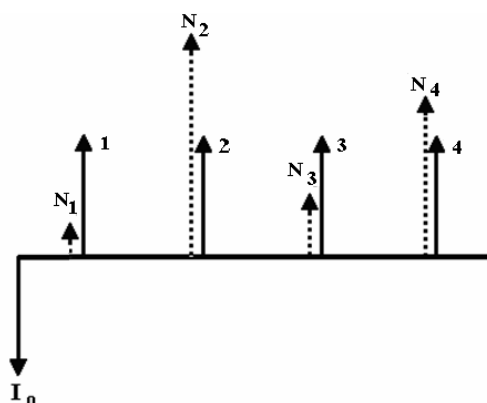


Fig. 5.7 Distribuição de fluxo não uniforme em parcelas uniforme

O motor padrão tem um investimento inicial menor, pois seu custo é menor que o custo do motor de alto rendimento (aproximadamente 20 a 40% como mostrado na figura 5.2); porém, apresenta menor rendimento durante sua vida útil estimada, o que acarreta um maior consumo de energia e, como consequência, um maior fluxo de despesas.

O motor de alto rendimento tem um investimento inicial maior, porém apresenta maior rendimento durante sua vida útil estimada, e, assim sendo, tem um menor fluxo de despesas com energia elétrica. Um exemplo genérico de fluxo de caixa para motor padrão e de alto rendimento é apresentado na figura 5.8.

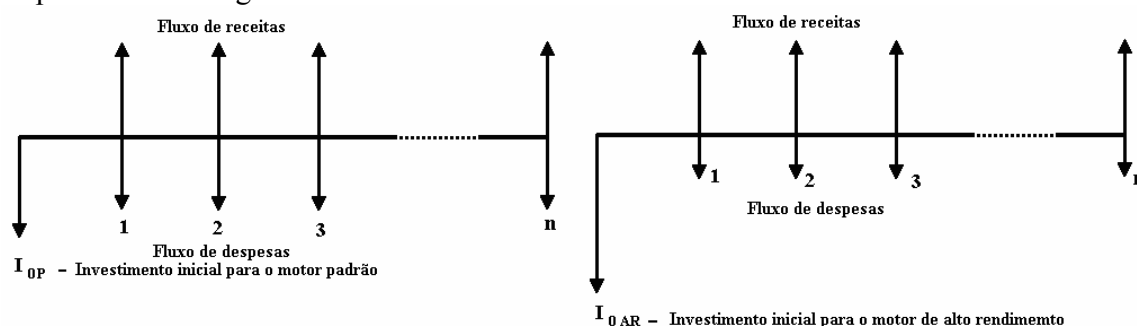


Fig. 5.8 Fluxos de caixa para motores padrão e alto rendimento

A análise econômica desses fluxos de caixa deve ser efetuada dentro de métodos econômicos, que buscam estabelecer parâmetros para viabilizar o melhor investimento. Dentro dos diversos métodos econômicos, três destacam-se por serem exatos e equivalentes quando utilizados adequadamente. Esses métodos são: o valor presente líquido VPL, a taxa interna de retorno TIR e o tempo de retorno de investimento TRI.

5.4.1 Valor presente líquido

O valor presente líquido (VPL), também conhecido como método do valor atual, é um método econômico que possibilita determinar a diferença entre os fluxos de caixa de uma série futura de receitas e despesas trazidas para um valor presente, e os investimentos iniciais de um determinado projeto. A quantificação do VPL pode ser efetuada conforme a equação 5.6.

$$VPL = A \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} - I \quad (5.6)$$

onde:

A – diferença entre receitas e despesas mensais [reais];

i – taxa de juros [anual];

I – investimento inicial [reais];

n – período [anos].

Ao analisar o VPL, conclui-se que:

- Para o VPL maior do que zero: significa que o investimento é economicamente atrativo, pois o valor presente das receitas é maior do que o valor presente das despesas.
- Para o VPL igual à zero: o investimento é indiferente, pois o valor presente das receitas é igual ao valor presente das despesas.
- Para o VPL menor que zero: indica que o investimento não é economicamente atrativo porque o valor presente das receitas é menor do que o valor presente das despesas.
- Entre dois ou mais projetos de investimento, o de maior atratividade é aquele que tem maior VPL.

As principais vantagens do uso do VPL são:

- Mostra que o projeto de investimento resultará em lucro ou prejuízo para empresa;
- Considera o valor do dinheiro no tempo;
- Inclui todas as receitas e despesas na avaliação.

As principais desvantagens do uso do VPL são:

- É preciso conhecer a taxa juros de mínima atratividade;
- É necessário estimar a vida útil do projeto de investimento;
- A resposta é um valor monetário.

Mesmo com essas limitações, o método VPL ainda é um dos mais utilizados na análise de investimentos (CRISTIANE, F. E.; GUSTAVO, M.; 2004).

5.4.2 Taxa interna de retorno

A taxa interna de retorno (TIR) é um método econômico que define em um único número o poder de decisão sobre determinado projeto. Este número é a taxa de juros intrínseca e implícita do projeto. Ele não depende da taxa de juros vigente no mercado de capitais, daí o nome taxa interna de retorno. Portanto, a TIR não depende de nenhuns parâmetros que não sejam os fluxos de caixa esperados desse projeto. Ele faz com que o VPL seja igual à zero, tornando equivalente o investimento inicial ao fluxo de caixa subsequente em um período de tempo estipulado. Isto significa que o valor do fluxo de receitas se iguala ao valor do fluxo de despesas somado ao investimento inicial, conforme a equação 5.7.

$$A \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} - I = 0 \quad (5.7)$$

onde:

A – fluxo de receitas menos o fluxo de despesas [reais];
 i – taxa interna de retorno [%];
 n – período [anos];
 I – investimentos iniciais [reais].

Como ferramenta de decisão, a TIR é utilizada para avaliar investimentos alternativos, apesar de a preferência ser maior pelo VPL, e que pesquisas indicarem que alguns executivos preferem a TIR ao invés do VPL. Aparentemente, esses executivos a consideram intuitivamente mais atraente para avaliar investimentos em taxas percentuais ao invés dos valores monetários do VPL (BRUNI, A. L.; FAMÁ, R.; SIQUEIRA, J.O.; 2008).

Até o presente momento, a TIR parece ser um modelo de análise de investimento eficaz, pois se utiliza apenas de um único número para a análise de um determinado projeto. Contudo, se for realizado uma análise mais apurada, dessa equação, perceber-se-á uma dificuldade matemática para seu cálculo caso o número de períodos seja maior que 2. Não se consegue determinar algebricamente o valor de i que anule o VPL, uma vez que esta é uma equação transcendental. A sua solução exige a aplicação de métodos numéricos como o de Newton-Raphson ou outro processo iterativo. Um procedimento fácil para determinar a TIR é calcular o VPL para crescentes taxas de juros, marcando esses valores em um gráfico de VPL em função da taxa de juros. Com alguns pontos da curva é possível estimar um valor da TIR, conforme mostra a figura 5.9.

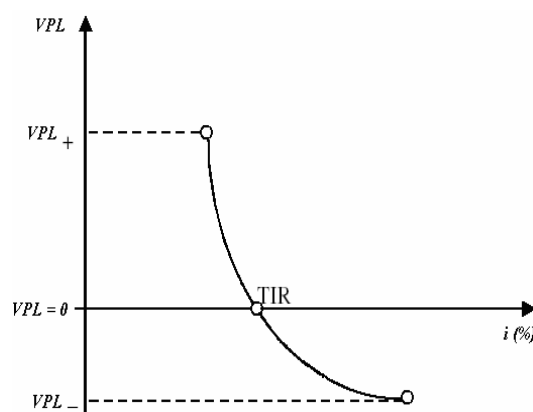


Fig. 5.9 Processo gráfico para o cálculo da TIR

Ao analisar essa curva conclui-se:

- Para uma TRI maior que a taxa de juros do mercado, o investimento é rentável;
- Para uma TRI menor que a taxa de juros do mercado, o investimento não é rentável;
- Quando a TRI equivale à taxa de juros do mercado, o investimento é indiferente, pois a rentabilidade é nula.

5.4.3 Tempo de retorno de investimento

O tempo de retorno de investimento (TRI) é o período de recuperação de um investimento e consiste na determinação do prazo em que o montante e capital investido será recuperado por meio de fluxos de caixa gerados pelo investimento. Esse método é um dos mais difundidos no meio técnico para a análise de viabilidade econômica, principalmente devido à sua facilidade de aplicação.

Existem duas formas de calcular o TRI: a primeira, denominada TRI simples, cujo procedimento de cálculo não leva em conta a valorização do dinheiro no tempo, sendo o prazo de recuperação do investimento encontrado dividindo-se o custo de implantação do empreendimento pelo benefício auferido. Na outra forma, denominada TRI descontado, leva-se em conta a valorização do dinheiro no tempo, e utiliza-se uma taxa de desconto para determinar o prazo da recuperação do capital investido. O TRI descontado é determinado conforme a equação 5.8 (STEPHEN, A. R.; RANDOLPH, W. W.; 1993).

$$TRI = - \frac{\ln\left(1 - \frac{I}{A}i\right)}{\ln(I + i)} = \frac{\ln\left(\frac{A}{A - Ii}\right)}{\ln(I + i)} \quad (5.8)$$

onde

TRI – tempo [anos];

I – investimento [reais];

A – diferença entre receitas e investimentos mensais [reais];

i – taxa de juros [%].

A grande vantagem apresentada por esse método econômico é que sua resposta é um período de tempo, o que permite comparar os tempos que alternativas mutuamente excludentes, levam para recuperar um determinado investimento. Como exemplo de aplicação, pode-se avaliar o tempo do retorno de investimento na aquisição de motores de alto rendimento e do tipo padrão de uma mesma potência com mesma capacidade de produção, de forma que aquele que apresentar menor tempo de retorno, será o mais viável economicamente.

Devido a essa particularidade, tal método é o que mais contempla o objetivo desse trabalho no que tange a viabilidade econômica, apesar das vantagens do VPL e do TIR. Portanto, esse é o método utilizado nas simulações do capítulo 6, para definir o TRI entres os motores de alto rendimento e do tipo padrão. Finalmente, efetua-se uma comparação entre o TRI com o tempo de vida útil dos motores. Dessa comparação, chega-se a decisão de aquisição ou não do motor de alto rendimento.

5.5. Conclusão

Esse capítulo teve como objetivo mostrar os fatores econômicos que acarretarão em custos durante o ciclo de vida do motor. O motor durante todo ciclo de vida útil tem seus custos divididos em projeto de instalação, aquisição, instalação, manutenção e operação. Os custos com projeto de instalação, aquisição e instalação, correspondem a um investimento com valor definido e fixo, enquanto que os custos com operação e manutenção podem ser variáveis no tempo. Os custos com projeto de instalação e instalação dependem das atividades peculiares de cada empresa, principalmente em termos de tipo e qualidade do produto final. Esses custos estão detalhados dentro da explanação do capítulo.

Posteriormente, uma análise de fluxo de caixa e de métodos de matemática econômica foi efetuada, com o objetivo de mostrar o método mais adequado para definir o melhor investimento na aquisição de motor de alto rendimento ou do tipo padrão.

Finalmente, é definido que o TRI é o método que melhor atende a proposta desse trabalho, pois permite efetuar uma comparação entre o tempo de retorno de investimento com tempo de vida útil de um motor. Com essa comparação é possível definir a viabilidade da aquisição do motor.

6 ESTIMATIVAS DE VIDA ÚTIL DO MOTOR

6.1 Introdução à simulação

O presente capítulo tem como objetivo efetuar simulações computacionais dos motores mostrados na tabela 6.1 e analisar os resultados obtidos, com intuito de definir a melhor opção de motor a ser utilizado e o momento ideal de substituí-lo quando este está em uso.

Os valores dessa tabela foram coletados junto ao banco de dados do DB motores, versão 4.2 (PROCEL, 2006), que possui informações de dados de placa de motores do tipo padrão e de alto rendimento, e os respectivos anos de fabricação e custos de motores novos e usados. Esse banco de dados é composto de 2640 motores de baixa tensão, utilizados no mercado brasileiro, servindo de base de pesquisa e informações para os sistemas industrial e de ensino. Os dados dessa tabela possibilitam um estudo comparativo fundamentado em análises técnica e econômica.

A análise técnica consiste em verificar as condições de operação do motor, conforme discutido nos capítulos 2, 3 e 4, quando um motor opera fora de suas condições nominais, devido aos parâmetros técnicos tais como: carregamento, desequilíbrio de tensão, sobretensão, subtensão, harmônicas, temperatura de operação e fatores ambientais. Esses parâmetros alteram as perdas internas dos motores, variando suas temperaturas de operação e alterando as vidas úteis.

A análise econômica, com o uso de matemática financeira, permite determinar o tempo de retorno de investimento (TRI), para motores de alto rendimento novos e do tipo padrão, novos e usados, onde são considerados: custos dos motores e com energia, rendimentos, taxa de juros e tempo de operação em horas/ano.

Posteriormente, o TRI é comparado com o tempo de vida útil, identificando-se a melhor opção de motor a ser utilizado e verificando-se a viabilidade da substituição.

Esse estudo foi simulado em ambiente Matlab.

Tabela 6.1 - Dados dos motores selecionados

pot.CV	Weg	veloc. (rpm)	Preço (R\$)	Ano	$\eta=100\%$	$\eta=75\%$	$\eta=50\%$	IP	Ident.	carcaça
10	Alto- η	1760	1700,15 (N)	2006	91,00	90,00	88,00	IP55	2516	132S
10	Padrão	1760	1218,13 (N)	2006	89,00	88,00	86,00	IP55	2297	132S
10	Padrão	1760	487,83 (U)	2001	89,00	88,00	86,00	IP55	978	132S
5	Alto- η	1720	1024,38 (N)	2006	88,00	87,50	85,00	IP55	2511	100L
5	Padrão	1715	696,95 (N)	2006	85,50	84,30	82,50	IP55	2291	100L
5	Padrão	1715	282,98 (U)	2001	84,80	84,30	82,50	IP55	975	100L
1	Alto- η	1730	436,07 (N)	2006	82,60	80,00	77,50	IP55	2501	80
1	Padrão	1720	325,76 (N)	2006	79,50	77,50	72,00	IP55	2281	80
1	Padrão	1720	132,27 (U)	2001	78,00	75,00	73,00	IP55	970	80

-(N) Motor novo- (U) Motor usado - Ident = Identidade do motor no DB

6.2 Análise de parâmetros técnicos

6.2.1 Considerações iniciais

A análise técnica da vida útil dos motores de indução está condicionada à vida dos enrolamentos do estator, conforme mostrado no sub-item 5.3.3 dessa dissertação. Como os

enrolamentos dos estatores dos motores de 1, 5 e 10 CV do tipo padrão e de alto rendimento possuem uma expectativa de vida média de 20.000 horas, operando em condições nominais, pode-se então levantar a curva de expectativa de vida útil desses motores em anos em função das horas de operação por ano. Essa expectativa de vida é inversamente proporcional às horas de operação anual do motor, conforme mostrado na figura 6.1. Essa figura mostra que a vida útil dos motores é de aproximadamente dois anos e quatro meses quando operando 8.760 horas/ano, e pode superar a trinta anos, para valores inferiores a 1.000 horas/ano. Para efeito de análise foram assumidos tempos de 1.000, 3.000, 4.000 e 8.760 horas, definidos com base nos seguintes fatores:

- 1.000 horas: é o tempo mínimo assumido para viabilizar uma análise econômica.
- 3.000 horas: corresponde aproximadamente à média anual de um motor operando em uma empresa cujo regime de trabalho é de um turno de 8 horas/dia.
- 4.000 horas: é a estimativa de tempo de operação médio citado no capítulo 4.
- 8.760 horas: corresponde ao funcionamento por vinte e quatro horas/dia nos trezentos e sessenta e cinco dias/ano.

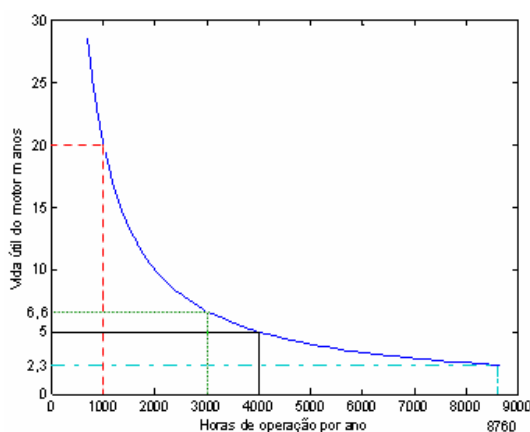


Fig. 6.1 Expectativa de vida útil em função das horas de operação por ano

Os efeitos dos parâmetros técnicos sobre as vidas úteis dos motores ocorrem de forma cumulativa, gerando um grande número de combinações possíveis. Entretanto, serão analisados os seguintes valores de parâmetros que são permitidos na norma NBR 7094 (2003):

- Tensão nominal; subtensão de 10%; sobretensão de 10%;
- Desequilíbrio de tensão de 0,0% e 1,5% da tensão nominal;
- Harmônica de tensão com fator FHV de 0,03;
- Temperatura ambiente de 40 °C.

Além disto, serão considerados carregamentos de 50%, 75%, 100% e 125% do carregamento nominal e temperatura ambiente de 30 °C.

6.2.2 Casos simulados

As simulações foram efetuadas para os motores de 1, 5 e 10 CV considerados novos. A tabela 6.2 apresenta os casos simulados para cada potência de motor.

Tabela 6.2 - Casos e parâmetros técnicos simulados

Caso simulado	Carregamentos 50%, 75%, 100%, 125%	Tensão			Desequilíbrio de tensão		Harmônicas de tensão		Temperatura ambiente	
		Nominal	Sub	Sob	Sem	Com	Sem	Com	30°C	40°C
1	X	X			X		X			X
2	X	X				X	X			X
3	X		X			X	X			X
4	X			X		X	X			X
5	X	X				X		X		X
6	X	X				X	X		X	

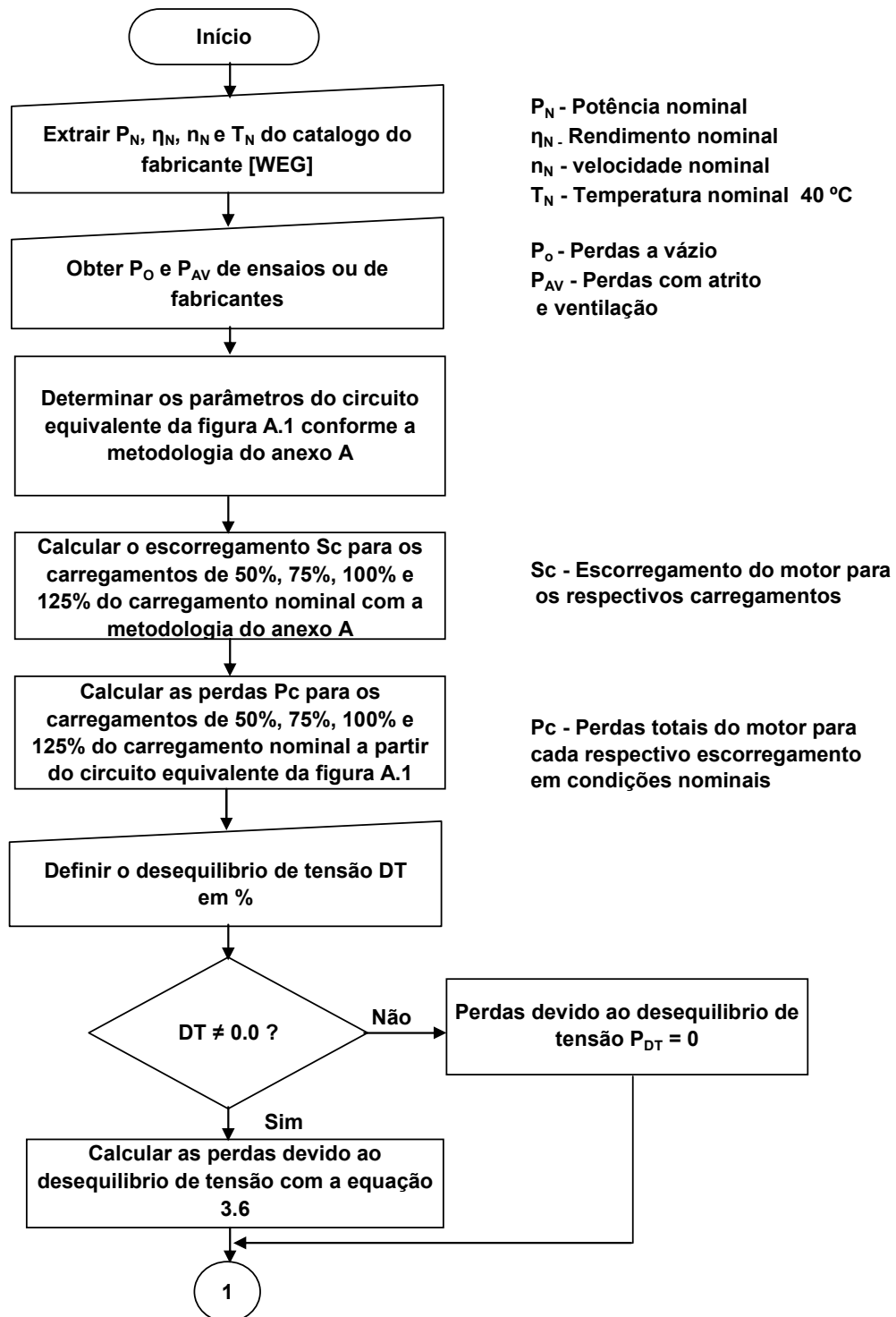
Onde: Sub – subtensão Sob – sobretensão

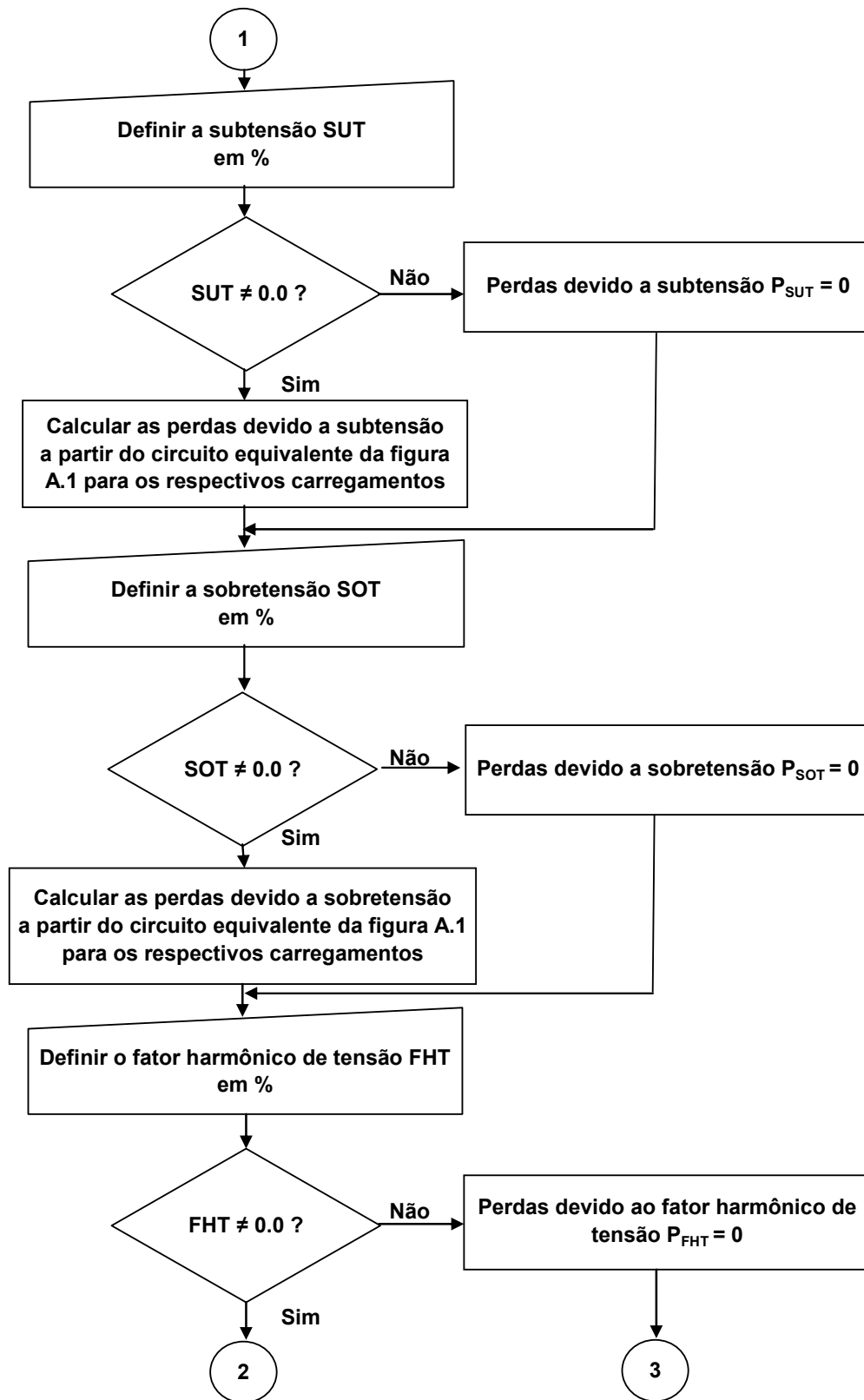
6.2.3 Simulações

O primeiro caso de simulação foi realizado para os quatros tipos de carregamentos, tensão nominal, sem desequilíbrio e harmônicas e temperatura ambiente de 40 °C. Ele representa o efeito do carregamento na vida útil do motor em condições nominais. O segundo caso simulado considera o efeito do desequilíbrio de tensão, enquanto o terceiro caso considera os efeitos de subtensão e desequilíbrio de tensão simultaneamente. O quarto caso leva em consideração os efeitos de sobretensão e desequilíbrio de tensão também simultâneos, ao passo que o quinto caso considera os efeitos simultâneos de harmônicas e desequilíbrio de tensão. Finalmente o sexto caso considera os efeitos simultâneos da temperatura ambiente e desequilíbrio de tensão. Nos procedimentos de cálculo considerou-se que as perdas a vázio são constantes, para os diversos carregamentos.

6.2.4 Metodologia para a determinação da vida útil do motor

A metodologia usada nas simulações para determinar a vida útil é mostrada pelo fluxograma da figura 6.2.





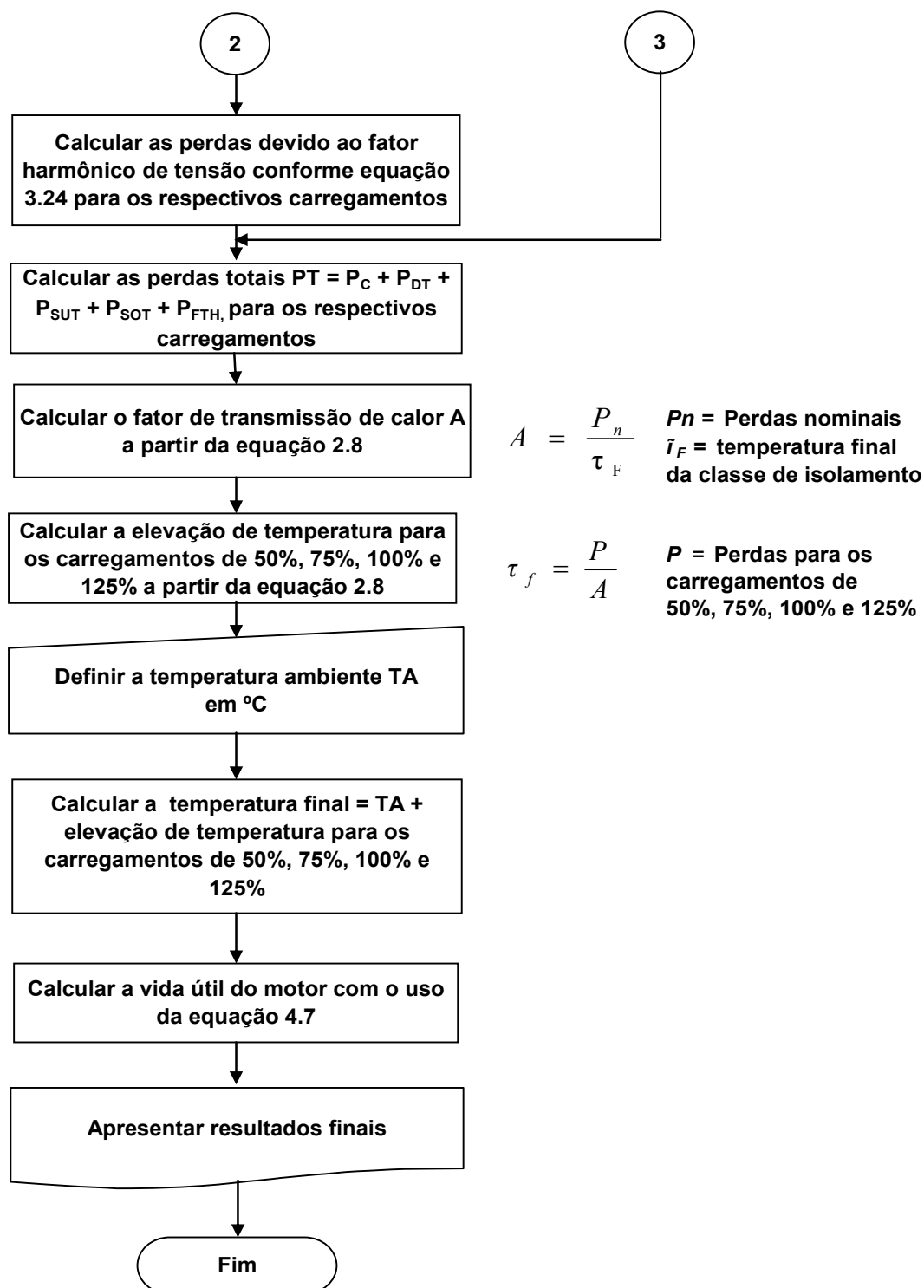


Fig. 6.2 Fluxograma da metodologia de parâmetros técnicos

6.2.4.1 Caso 1 - Efeito do carregamento na vida útil do motor

Os resultados deste caso são apresentados nas figuras 6.3, 6.4 e 6.5, enquanto que valores pontuais dessas curvas são mostrados nas tabelas 6.3, 6.4 e 6.5.

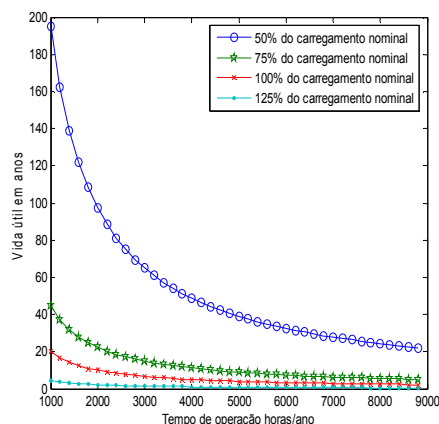


Fig. 6.3 Caso 1 - Estimativa de vida útil de motor de 1 CV

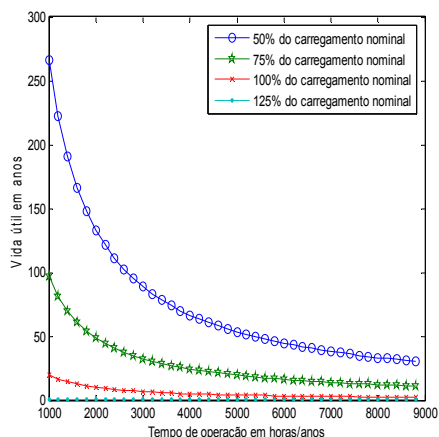


Fig. 6.4 Caso 1 - Estimativa de vida útil de motor de 5 CV

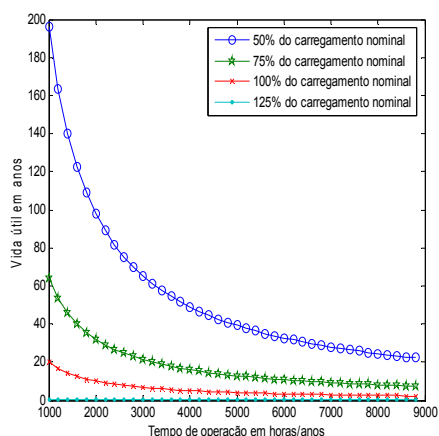


Fig. 6.5 Caso 1 - Estimativa de vida útil de motor de 10 CV

Tabela 6.3 - Caso 1: Valores pontuais de vida útil em função das horas de operação em um motor de 1 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	194,82	44,79	20,00	4,45
3000	64,94	14,93	6,66	1,48
4000	48,07	11,19	5,00	1,11
8760	22,40	5,11	2,30	0,50

Tabela 6.4 - Caso 1: Valores pontuais da vida útil em função das horas de operação em um motor de 5 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	266,59	97,29	20,00	0,22
3000	88,86	32,43	6,66	0,07
4000	66,64	24,32	5,00	0,05
8760	30,43	11,10	2,30	0,02

Tabela 6.5 - Caso 1: Valores pontuais da vida útil em função das horas de operação em um motor de 10 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	195,92	63,88	20,00	0,32
3000	65,30	21,29	6,66	0,10
4000	48,98	15,97	5,00	0,08
8760	22,36	7,29	2,30	0,03

Ao analisar essas figuras e tabelas, pode-se concluir que o tempo de vida útil dos motores com 50% de carregamento é superior a 20 anos operando 8.760 horas/ano, sendo que para o tempo de operação de 1.000 horas/ano sua vida útil pode ultrapassar os 200 anos no motor de 5 CV, ficando abaixo de 200 anos para motores de 1 e 10 CV. Para os motores operando com 75% do carregamento, pode-se verificar que as suas vidas úteis, na maioria dos casos, são significativamente maiores que dos motores operando com 100% do carregamento. Isto ocorre devido à redução das perdas internas, ocasionando uma redução da temperatura de operação e gerando um aumento de sua vida útil. Para os carregamentos de 125%, a vida útil dos motores é extremamente pequena em relação aos outros carregamentos. Esse fato deve ser avaliado tecnicamente na utilização de motores acima do carregamento nominal.

6.2.4.2 Caso 2 - Efeito do desequilíbrio de tensão

Os resultados deste caso são apresentados nas figuras 6.6, 6.7 e 6.8, enquanto que valores pontuais dessas curvas são mostrados nas tabelas 6.6, 6.7 e 6.8.

O desequilíbrio de tensão produziu uma elevação da temperatura de operação de 4,5 °C, ocasionando uma redução da vida útil dos motores, conforme mostram os capítulos 2 e 4 dessa dissertação.

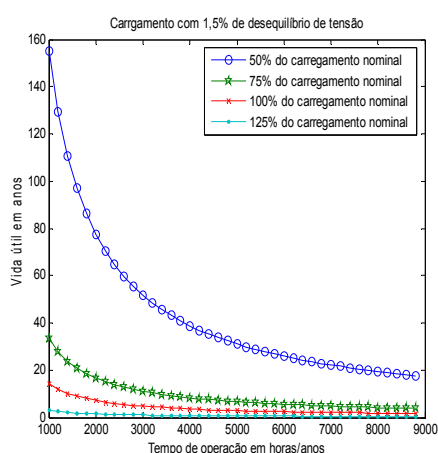


Fig. 6.6 Caso 2 - Estimativa de vida útil de motor de 1 CV

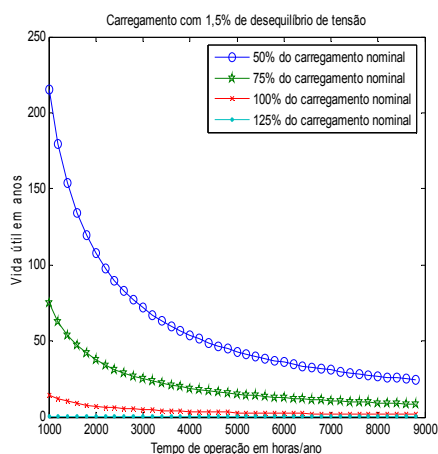


Fig. 6.7 Caso 2 - Estimativa de vida útil de motor de 5 CV

Tabela 6.6 - Caso 2: Valores pontuais da vida útil com desequilíbrio de tensão em um motor de 1 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	155,07	33,38	14,37	2,92
3000	51,69	11,12	4,79	0,97
4000	38,76	8,34	3,59	0,73
8760	17,70	3,81	1,64	0,33

Tabela 6.7 - Caso 2: Valores pontuais da vida útil com desequilíbrio de tensão em um motor de 5 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	215,19	75,09	14,37	0,13
3000	71,73	25,03	4,79	0,04
4000	53,79	18,77	3,59	0,03
8760	24,56	8,57	1,64	0,02

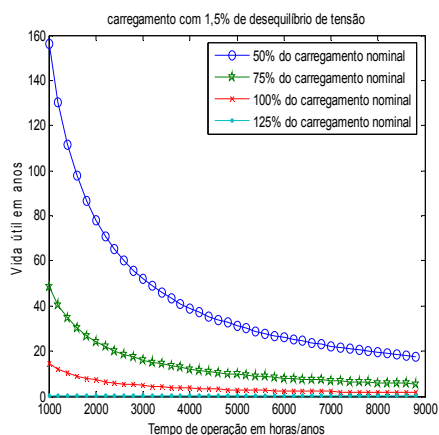


Fig. 6.8 Caso 2 - Estimativa de vida útil de motor de 10 CV

Tabela 6.8 - Caso 2: Valores pontuais da vida útil com desequilíbrio de tensão em um motor de 10 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	156,05	48,38	14,37	0,19
3000	52,01	16,12	4,79	0,06
4000	39,01	12,09	3,59	0,05
8760	17,81	5,52	1,64	0,02

6.2.4.3 Caso 3 - Efeitos da subtensão e do desequilíbrio de tensão

Os resultados deste caso são apresentados nas figuras 6.9, 6.10 e 6.11, enquanto que valores pontuais dessas curvas são mostrados nas tabelas 6.9, 6.10 e 6.11.

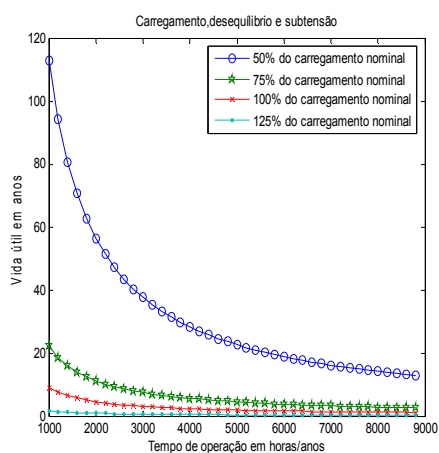


Fig. 6.9 Caso 3 - Estimativa de vida útil de motor de 1 CV

Tabela 6.9 - Caso 3: Valores pontuais da vida útil com desequilíbrio de tensão e subtensão em um motor de 1 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	112,85	22,15	9,06	1,68
3000	37,61	7,38	3,02	0,56
4000	28,21	5,53	2,26	0,42
8760	12,88	2,52	1,03	0,19

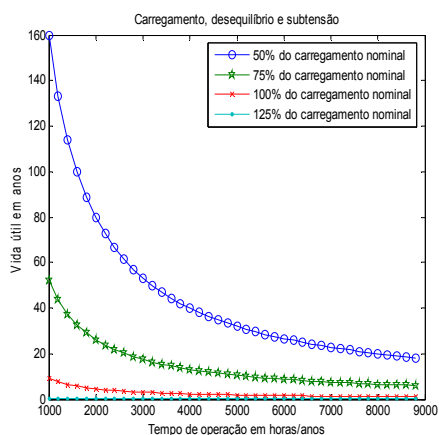


Fig. 6.10 Caso 3 - Estimativa de vida útil de motor de 5 CV

Tabela 6.10 - Caso 3: Valores pontuais da vida útil com desequilíbrio de tensão e subtensão em um motor de 5 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	159,70	52,32	9,06	0,06
3000	53,23	17,44	3,02	0,02
4000	39,92	13,08	2,26	0,02
8760	18,23	5,97	1,03	0,01

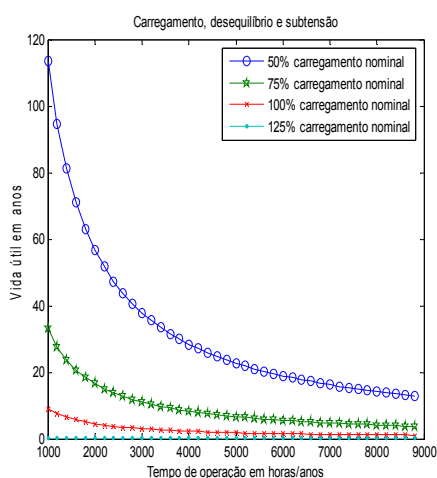


Fig. 6.11 Caso 3 - Estimativa de vida útil de motor de 10 CV

O desequilíbrio de tensão produziu uma elevação da temperatura de operação de 4,5 °C, como mostrado no caso anterior, enquanto que a subtensão elevou a temperatura de operação em 6 °C, resultando em uma elevação total de temperatura de 10,5 °C, e ocasionando uma redução da vida útil dos motores, conforme capítulos 2 e 4 dessa dissertação.

6.2.4.4 Caso 4 - Efeitos da sobretensão e do desequilíbrio de tensão

Os resultados deste caso são apresentados nas figuras 6.12, 6.13 e 6.14, enquanto que valores pontuais dessas curvas são mostrados nas tabelas 6.12, 6.13 e 6.14.

O desequilíbrio de tensão produziu uma elevação da temperatura de operação de 4,5 °C, enquanto que a sobretensão reduziu a temperatura de operação em 3 °C, ocasionando uma pequena redução da vida útil dos motores, devido aos efeitos opostos do desequilíbrio e da sobretensão.

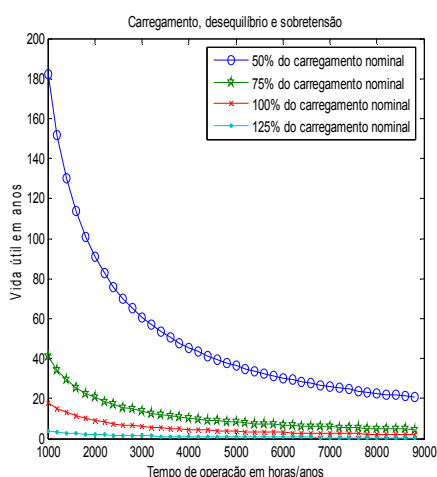


Fig. 6.12 Caso 4 - Estimativa de vida útil de motor de 1 CV

Tabela 6.11 - Caso 3: Valores pontuais da vida útil com desequilíbrio de tensão e subtensão em um motor de 10 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	113,65	32,99	9,06	0,09
3000	37,88	10,99	3,02	0,03
4000	28,41	8,24	2,26	0,02
8760	12,97	3,76	1,03	0,01

Tabela 6.12 – Caso 4: Valores pontuais da vida útil com desequilíbrio de tensão e sobretensão em um motor de 1 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	181,91	41,01	18,10	3,67
3000	60,63	13,67	6,03	1,29
4000	45,47	10,25	4,52	0,96
8760	20,76	4,68	2,06	0,44

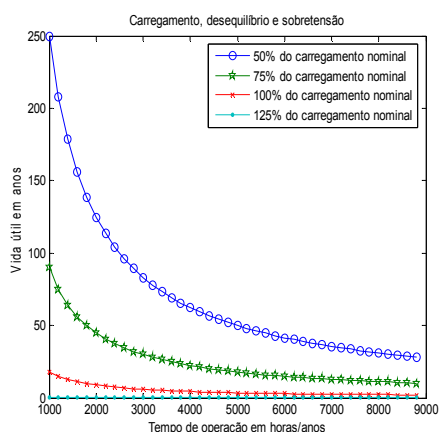


Fig. 6.13 Caso 4 - Estimativa de vida útil de motor de 5 CV

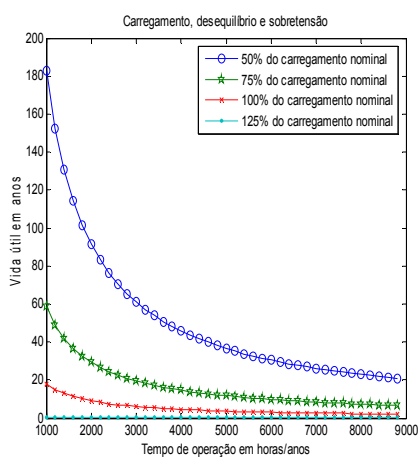


Fig. 6.14 Caso 4 - Estimativa de vida útil de motor e 10 CV

Tabela 6.13 - Caso 4: Valores pontuais da vida útil com desequilíbrio de tensão sobre tensão em um motor de 5 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	249,96	90,02	18,10	0,18
3000	83,32	30,00	6,03	0,06
4000	62,49	22,50	4,52	0,04
8760	28,53	10,27	2,06	0,02

Tabela 6.14 - Caso 4: Valores pontuais da vida útil com desequilíbrio de tensão e sobre tensão em um motor de 10 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	182,93	58,77	18,10	0,27
3000	60,97	19,59	6,03	0,09
4000	45,73	14,69	4,52	0,06
8760	20,88	6,70	2,06	0,02

6.2.4.5 Caso 5 - Efeitos de harmônicas e desequilíbrio de tensão

Os resultados deste caso são apresentados nas figuras 6.15, 6.16 e 6.17, enquanto que valores pontuais dessas curvas são mostrados nas tabelas 6.15, 6.16 e 6.17.

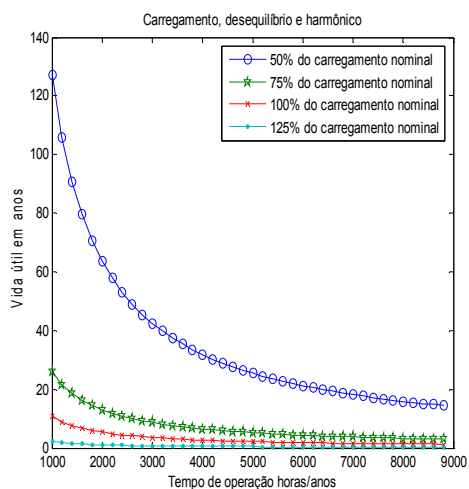


Fig. 6.15 Caso 5 - Estimativa de vida útil de motor de 1 CV

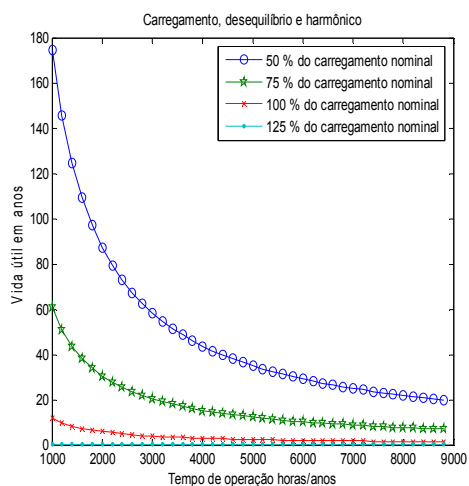


Fig. 6.16 Caso 5 - Estimativa de vida útil de motor de 5 CV

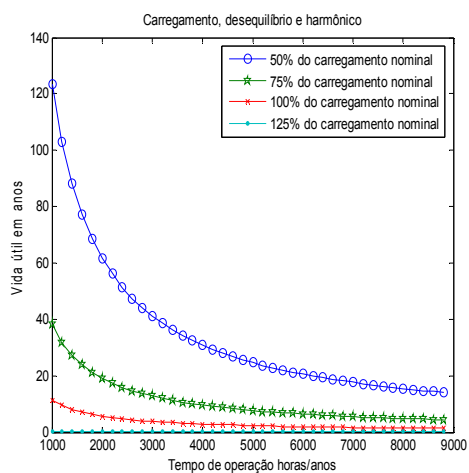


Fig. 6.17 Caso 5 - Estimativa de vida útil de motor de 10 CV

Tabela 6.15 - Caso 5: Valores pontuais da vida útil de tensão e harmônico de tensão em um motor de 1 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	127,12	25,82	10,77	2,06
3000	42,37	8,60	3,59	0,68
4000	31,78	6,45	2,69	0,51
8760	14,51	2,94	1,22	0,23

Tabela 6.16 - Caso 5: valores pontuais da vida útil de tensão e harmônico de tensão em um motor de 5 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	174,43	60,86	11,65	0,11
3000	58,14	20,28	3,88	0,04
4000	43,60	15,21	2,91	0,03
8760	19,91	6,94	1,33	0,01

Tabela 6.17 - Caso 5: Valores pontuais da vida útil de tensão e harmônico de tensão em um motor de 10 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	123,43	38,26	11,36	0,15
3000	41,14	12,75	3,78	0,05
4000	30,85	9,56	2,84	0,04
8760	14,09	4,36	1,29	0,02

O desequilíbrio de tensão produziu uma elevação da temperatura de operação de 4,5 °C, enquanto que o fator harmônico elevou a temperatura de operação em 3,37%, 3,00% e 3,35% para os motores de 1, 5 e 10 CV, respectivamente, de acordo com a perda individual de cada motor. A ação conjunta ocasiona uma grande redução da vida útil dos motores.

6.2.4.6 Caso 6 - Efeitos da temperatura ambiente e desequilíbrio de tensão

Os resultados deste caso são apresentados nas figuras 6.18, 6.19 e 6.20, enquanto que valores pontuais dessas curvas são mostrados nas tabelas 6.18, 6.19 e 6.20.

O desequilíbrio de tensão produziu uma elevação da temperatura de operação de 4,5 °C, enquanto que a temperatura ambiente de 30 °C atenua a temperatura de operação em 10 °C. A ação conjunta ocasiona um aumento de vida útil dos motores.

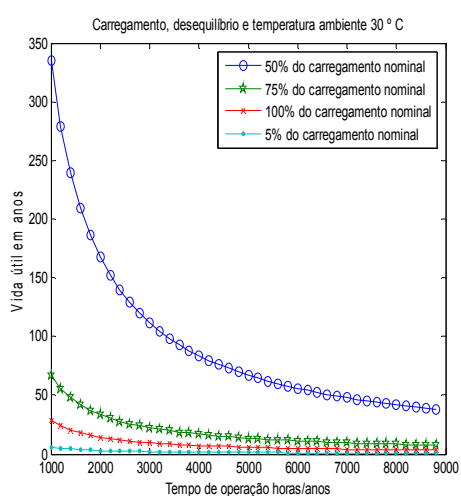


Fig. 6.18 Caso 6 - Estimativa de vida útil de motor de 1 CV

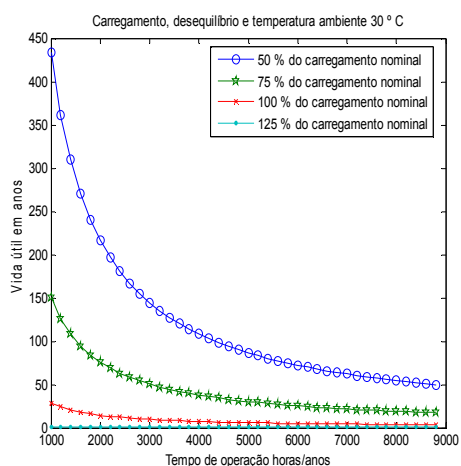


Fig. 6.19 Caso 6 - Estimativa de vida útil de motor de 5 CV

Tabela 6.18 - Caso 6: valores pontuais da vida útil com desequilíbrio de tensão e temperatura ambiente de 30 °C em um motor de 1 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	334,93	67,30	28,94	5,89
3000	111,64	22,41	9,64	1,96
4000	83,73	16,80	7,23	1,47
8760	38,23	7,67	3,30	0,67

Tabela 6.19 - Caso 6: Valores pontuais da vida útil com desequilíbrio de tensão e temperatura ambiente de 30 °C em um motor de 5 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	433,34	151,21	28,94	0,26
3000	144,44	50,40	9,64	0,08
4000	108,33	37,80	7,23	0,06
8760	49,46	17,26	3,30	0,03

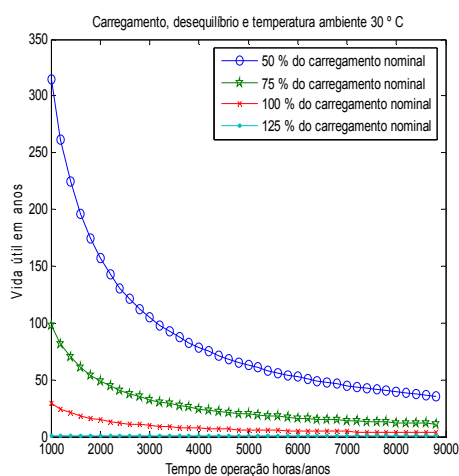


Fig. 6.20 Caso 6 - Estimativa de vida útil de motor de 10 CV

Tabela 6.20 - Caso 6: Valores pontuais da vida útil com desequilíbrio de tensão e temperatura ambiente de 30 °C em um motor de 10 CV

Horas de operação por ano	Vida útil em anos			
	Carregamentos em %			
	C = 50	C = 75	C = 100	C = 125
1000	314,26	97,42	28,94	0,38
3000	104,75	32,47	9,64	0,12
4000	78,56	24,35	7,23	0,09
8760	35,87	11,12	3,30	0,04

6.3 Análise de parâmetros econômicos

A análise econômica é apresentada em cenário econômico com taxas de juros, comparação entre os custos totais dos motores das linhas padrão e alto rendimento, horas de operação, potência do motor, tipo e custo da tarifa de energia, custo de demanda e carregamento do motor. Esta análise é feita individualmente para os motores de 1, 5 e 10 CV, nos seguintes casos:

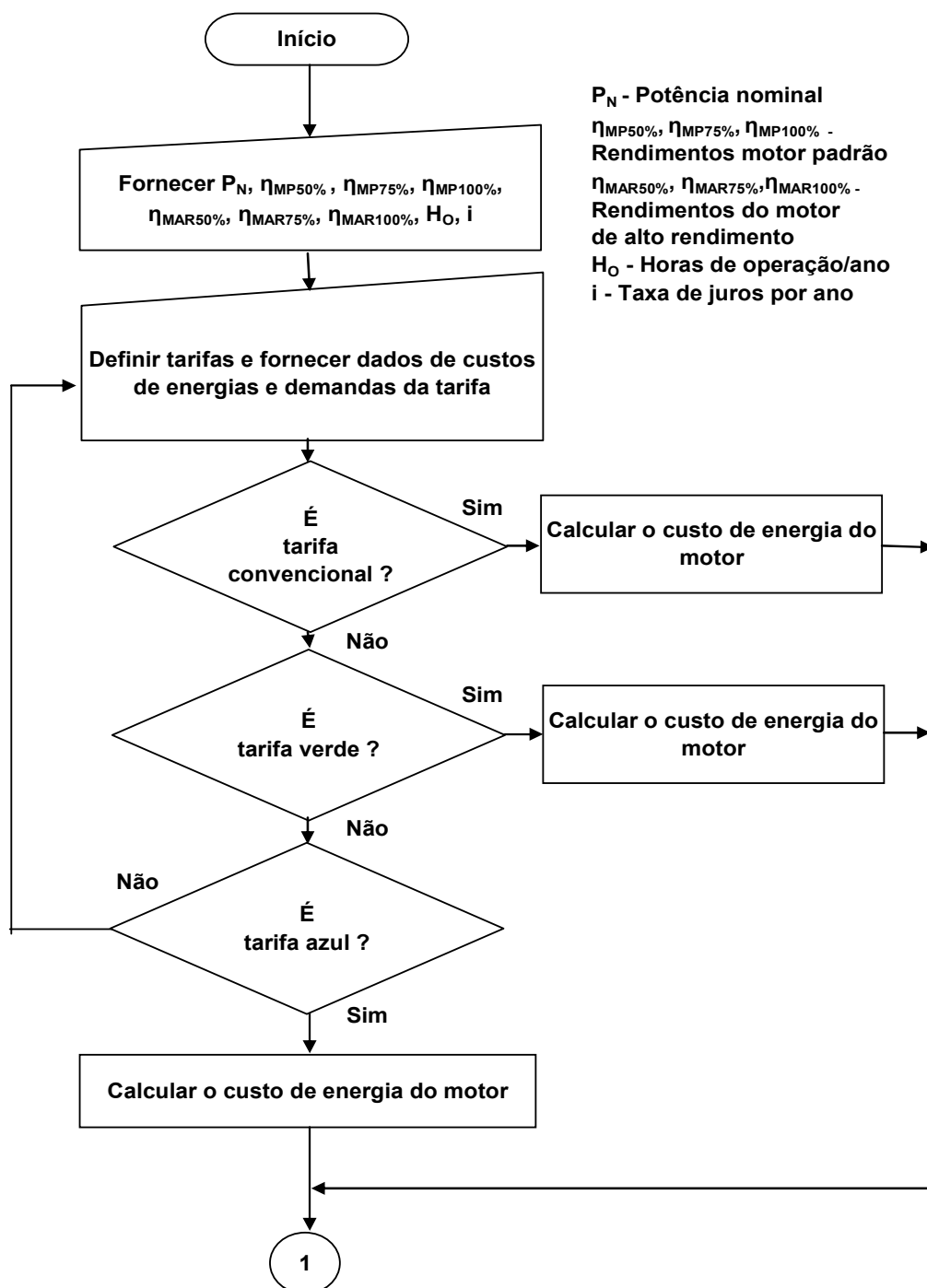
- 1- Aquisição de um motor novo de alto rendimento ou um motor novo tipo padrão, para uso inicial de motor.
- 2- Aquisição de um motor novo de alto rendimento, enquanto que o motor tipo padrão a ser substituído está depreciado (5 anos de funcionamento).
- 3- Aquisição de um motor novo de alto rendimento, enquanto que o motor tipo padrão a ser substituído é considerado uma sucata (o motor funciona, mas não tem valor econômico).

Para esses 3 casos, as tarifas verde e azul serão simuladas para os motores de 1, 5 e 10 CV devido ao maior número de consumidores do setor industrial que utilizam essas tarifas, sendo que os mesmos consomem cerca de 60% da energia gerada. A tarifa convencional será simulada somente para o motor de 1 CV, devido ao fato de que os consumidores dessa tarifa, são pequenos consumidores e utilizam maior número de motores de menor potência (CEMIG, 2009).

O TRI foi determinado para os carregamentos de 50%, 75% e 100%. O carregamento de 125% não foi avaliado, pois o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos mostrou-se extremamente baixo para esta condição, conforme observado na análise técnica mostrada no item 6.2, o que não justifica sua análise.

6.3.1 Metodologia para a determinação de parâmetros econômicos

A metodologia usada nas simulações para determinar parâmetros econômicos, é mostrada pelo fluxograma da figura 6.21. Em seguida efetuou-se a comparação do TRI e do tempo de vida útil do motor definido por parâmetros técnicos.



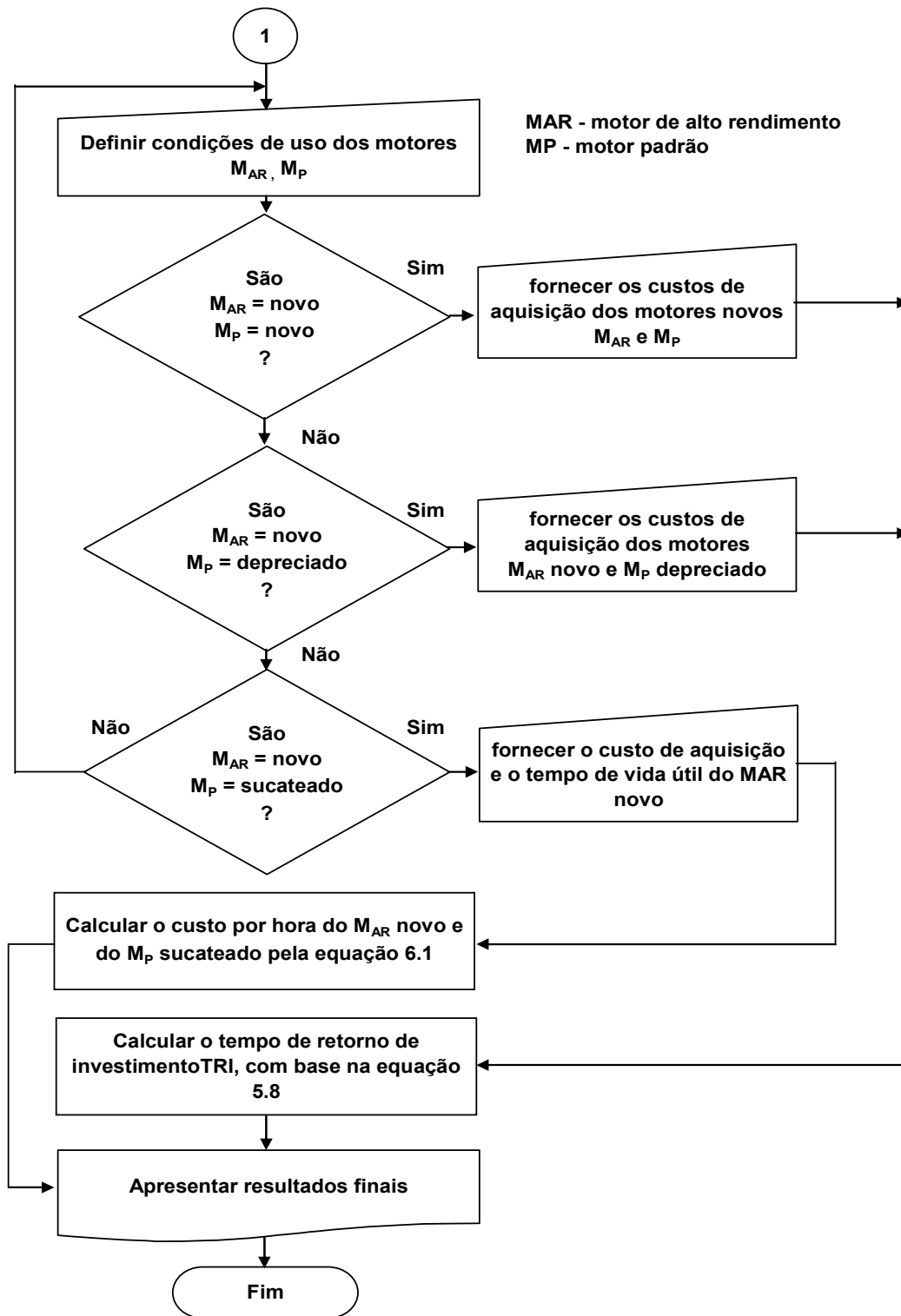


Fig. 6.21 Fluxograma de simulação de parâmetros econômicos

6.3.2 Simulações

As primeiras simulações foram realizadas em um motor de 1 CV, para os carregamentos 50%, 75% e 100%, com uso de tarifa verde, rendimentos do motor padrão e de alto rendimento, taxa de juros, custos dos motores padrão novo, padrão depreciado e de alto rendimento novo. Procedimentos análogos foram efetuados para os motores de 5 e 10 CV, sendo que, posteriormente, este processo foi repetido com o uso de tarifa azul e convencional.

Nas simulações para motor sucateado, foi considerado que o motor não tem valor comercial, mas adotou-se o procedimento de calcular o custo por hora de sua operação, para avaliá-lo.

É ressaltado que, em uma primeira aproximação, foram usados os rendimentos fornecidos pelo catálogo do fabricante, e que a variação do valor de TRI devido à alteração do rendimento com origem nos parâmetros técnicos será considerada em um trabalho futuro.

O TRI foi limitado a um valor máximo de 30 anos nas tabelas, sendo preenchido com (*) quando superior a 30 anos. Valores superiores a esse não têm validade econômica para se obter o TRI, pois a maioria das empresas renova seu sistema produtivo em tempo menor que 30 anos, devido à necessidade de manter a qualidade e a competitividade no mercado.

6.3.2.1 TRI com tarifa verde - motor de 1 CV

Caso 1: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

A figura 6.22 mostra o TRI em função das horas de operação. As tabelas 6.21 a 6.26 comparam o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos mostrado no subitem 6.2.2.

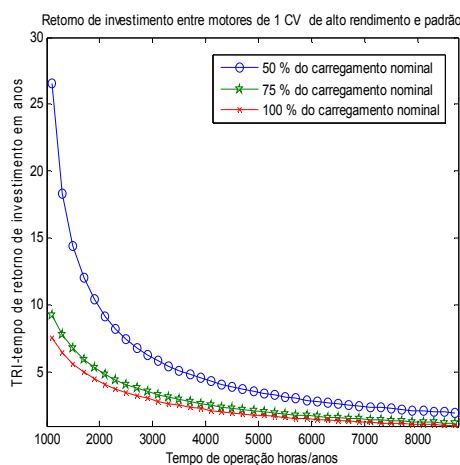


Fig. 6.22 – Caso 1: TRI para motor de 1 CV

Tabela 6.21 Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V. útil	TRI	V. útil	TRI	V. útil
1000	*	194,80	10,00	44,79	8,20	20,00
3000	6,10	64,94	3,40	14,93	2,90	6,66
4000	4,40	48,07	2,60	11,19	2,20	5,00
8760	2,00	22,40	1,20	5,11	1,00	2,33

Tabela 6.22 Motor de 1 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V. útil	TRI	V. útil	TRI	V. útil
1000	*	155,10	10,00	33,38	8,20	14,37
3000	6,10	51,69	3,40	11,12	2,90	4,79
4000	4,40	38,76	2,60	8,34	2,20	3,59
8760	2,00	17,70	1,20	3,81	1,00	1,64

Tabela 6.23 Motor de 1 CV e tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V. útil	TRI	V. útil	TRI	V. útil
1000	*	112,90	10,00	22,15	8,20	9,06
3000	6,10	37,61	3,40	7,38	2,90	3,02
4000	4,40	28,21	2,60	5,53	2,20	2,26
8760	2,00	12,88	1,20	2,52	1,00	1,03

Tabela 6.24 Motor de 1 CV e tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V. útil	TRI	V. útil	TRI	V. útil
1000	*	181,90	10,00	41,01	8,20	18,10
3000	6,10	60,63	3,40	13,67	2,90	6,03
4000	4,40	45,47	2,60	10,25	2,20	4,52
8760	2,00	20,76	1,20	4,68	1,00	2,06

Tabela 6.25 Motor de 1 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V. útil	TRI	V. útil	TRI	V. útil
1000	*	127,10	10,00	25,82	8,20	10,77
3000	6,10	42,37	3,40	8,60	2,90	3,59
4000	4,40	31,78	2,60	6,45	2,20	2,69
8760	2,00	14,51	1,20	2,94	1,00	1,22

Tabela 6.26 Motor de 1 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente de 30 °C

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V. útil	TRI	V. útil	TRI	V. útil
1000	*	334,90	10,00	67,30	8,20	28,94
3000	6,10	111,60	3,40	22,41	2,90	9,64
4000	4,40	83,73	2,60	16,80	2,20	7,23
8760	2,00	38,23	1,20	7,67	1,00	3,30

As análises das tabelas 6.21 a 6.26 mostram a viabilidade econômica da opção pelo motor de alto rendimento para todas as condições de carregamento e tempo de operação em horas/ano, permitindo concluir que esta opção é viável economicamente, exceto para tempo de operação igual ou inferior a 1000 horas, considerando como limite de 30 anos para o TRI.

Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

O motor novo de alto rendimento deverá substituir um motor tipo padrão depreciado em operação. Na literatura consultada não foram encontradas informações sobre este motor depreciado, com exceção do DB motores do PROCEL que diz que um motor depreciado pode ser vendido com 5 anos de uso por um preço indicado anteriormente na tabela 6.1, sem contudo apresentar detalhes de operação de vida útil do motor.

Para analisar a viabilidade técnica-econômica a seguir, é necessário que se tenha uma estimativa de vida do motor depreciado para as suas condições de operação durante os seus cinco anos de uso. Considerando que o DB motores atribua o preço do motor depreciado levando em consideração a vida útil do mesmo, pode-se estimá-la, em uma primeira tentativa, pela equação abaixo:

$$\text{Vida útil}_{\text{motor depreciado}} = \frac{\text{Preço do motor depreciado}}{\text{Preço do motor novo}} \times \text{Vida útil}_{\text{motor novo}} \quad (6.1)$$

A figura 6.23 mostra o TRI em função das horas de operação para a aquisição de um motor de 1 CV de alto rendimento novo. A vida útil do motor depreciado é apresentada nas tabelas 6.27 a 6.32, assim como o TRI estimado.

O símbolo (**) nos campos do TRI das tabelas significa que o fluxo de receitas não foi suficiente para cobrir os investimentos durante a vida útil. Este investimento somente seria viável, para tempo de operação do motor superior a 8760 horas/ano, o que é impossível fisicamente.

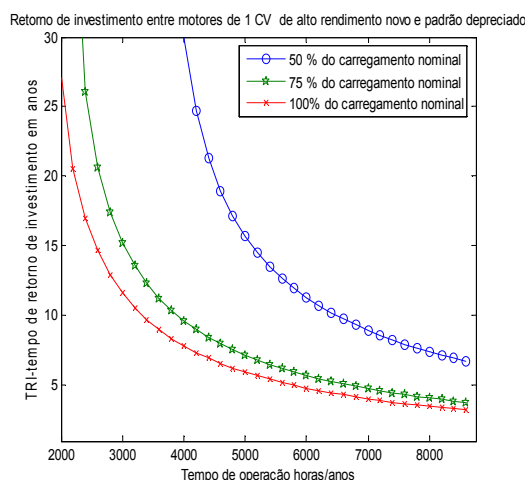


Fig. 6.23 - Caso 2: TRI para motor de 1 CV

Tabela 6.27 Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	79,09	**	18,19	**	8,12
3000	**	26,36	15,00	6,06	12,00	2,70
4000	30,00	19,42	9,60	4,54	7,80	2,03
8760	6,60	9,09	3,70	2,07	3,20	2,07

Tabela 6.28 Motor de 1 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	62,98	**	13,55	**	5,83
3000	**	20,99	15,00	4,52	12,00	1,94
4000	30,00	15,74	9,60	3,39	7,80	1,46
8760	6,60	7,19	3,70	1,55	3,20	0,67

Tabela 6.29 Motor de 1 CV e tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	45,84	**	8,99	**	3,68
3000	**	15,27	15,00	3,00	12,00	1,23
4000	30,00	11,45	9,60	2,25	7,80	0,92
8760	6,60	5,23	3,70	1,02	3,20	0,42

Tabela 6.30 Motor de 1 CV e tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	73,86	**	16,65	**	7,35
3000	**	24,62	15,00	5,55	12,00	2,45
4000	30,00	18,46	9,60	4,16	7,80	1,84
8760	6,60	8,43	3,70	1,90	3,20	0,84

Tabela 6.31 Motor de 1 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	51,61	**	10,48	**	4,37
3000	**	17,20	15,00	3,49	12,00	1,46
4000	30,00	12,90	9,60	2,62	7,80	1,09
8760	6,60	5,89	3,70	1,19	3,20	0,50

Tabela 6.32 Motor de 1 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente de 30 °C

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	135,98	**	27,33	**	11,75
3000	**	45,31	15,00	9,10	12,00	3,91
4000	30,00	34,00	9,60	6,82	7,80	2,94
8760	6,60	15,52	3,70	3,11	3,20	1,34

Ao comparar o TRI com o tempo de vida útil nas tabelas 6.27, 6.28 e 6.30, verifica-se que, na maioria dos campos analisados, o TRI é maior que o tempo de vida útil, tornando esta substituição inviável economicamente. A viabilidade ocorre somente para o motor operando com 50% da carga nominal em operação de 8.760 horas/ano.

Ao se fazer a mesma comparação nas tabelas 6.29 e 6.31, verifica-se que, em todos os campos, o TRI é maior que o tempo de vida útil.

Na tabela 6.32, parte do TRI é maior que o tempo de vida útil, tornando também esta substituição inviável economicamente. A viabilidade ocorre para o motor operando com 50% da carga nominal e tempo igual ou superior a 4.000 horas/ano.

Caso 3: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

A composição de custo do motor novo, por hora, considerou os seguintes fatores: consumo de energia, tarifa de energia, custo de desinstalação do motor sucateado e instalação do motor novo, custo de aquisição e estimativa de vida útil. O custo, por hora, para o motor sucateado considerou somente o consumo de energia e demanda de energia.

A tabela 6.33 compara os custos entre o motor novo e motor sucateado de potência igual a 1 CV, com carregamentos de 50%, 75% e 100%, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo.

Tabela 6.33 - Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado de 1 CV em função do carregamento

Parâmetros técnicos de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca
Tensão de alimentação sem distorção	0,2284	0,2389	sim	0,2329	0,2326	não	0,2439	0,2236	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio	0,2293	0,2389	sim	0,2376	0,2326	não	0,2567	0,2236	não
Tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio	0,2309	0,2389	sim	0,2476	0,2326	não	0,2834	0,2236	não
Tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio	0,2287	0,2389	sim	0,2339	0,2326	não	0,2473	0,2236	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico	0,2302	0,2389	sim	0,2433	0,2326	não	0,2719	0,2236	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente	0,2270	0,2389	sim	0,2277	0,2326	sim	0,2338	0,2236	não

Ao analisar essa tabela, verifica-se que na maioria dos casos analisados, o custo do motor usado é menor que o custo do motor novo, o que torna esta substituição inviável economicamente. A viabilidade ocorre somente para o motor operando com 50% da carga nominal.

6.3.2.2. TRI com tarifa verde - motor de 5 CV

Caso 1: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

A figura 6.24 mostra o TRI em função das horas de operação. As tabelas 6.34 a 6.49 comparam o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos.

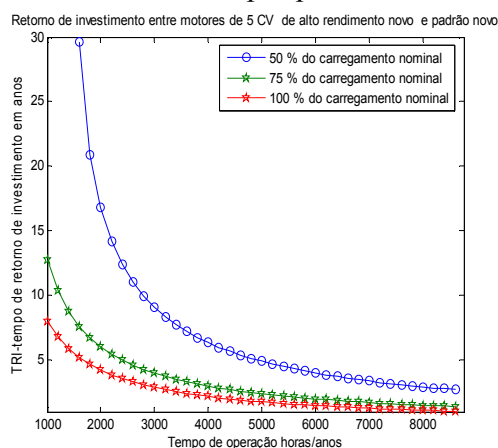


Fig. 6.24 - Caso 1: TRI para motor de 5 CV

Tabela 6.34 Motor de 5 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	266,60	13,00	97,29	8,00	20,00
3000	9,10	88,86	4,00	32,43	2,90	6,66
4000	6,30	66,64	3,00	24,32	2,20	5,00
8760	2,70	30,43	1,40	11,10	1,00	2,33

Tabela 6.35 Motor de 5 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	215,20	13,00	75,09	8,00	14,37
3000	9,10	71,73	4,00	25,03	2,90	4,79
4000	6,30	53,79	3,00	18,77	2,20	3,59
8760	2,70	24,56	1,40	8,57	1,00	1,64

Tabela 6.36 Motor de 5 CV e tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	159,70	13,00	52,32	8,00	9,06
3000	9,10	53,23	4,00	17,44	2,90	3,02
4000	6,30	39,92	3,00	13,08	2,20	2,26
8760	2,70	18,23	1,40	5,97	1,00	1,03

Tabela 6.37 Motor de 5 CV e tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	250,00	13,00	90,02	8,00	18,10
3000	9,10	83,32	4,00	30,00	2,90	6,03
4000	6,30	62,49	3,00	22,50	2,20	4,52
8760	2,70	28,53	1,40	10,27	1,00	2,06

Tabela 6.38 Motor de 5 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	174,40	13,00	60,86	8,00	11,65
3000	9,10	58,14	4,00	20,28	2,90	3,88
4000	6,30	43,60	3,00	15,21	2,20	2,91
8760	2,70	19,91	1,40	6,94	1,00	1,33

Tabela 6.39 Motor de 5 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente de 30 °C

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	433,30	13,00	151,20	8,00	28,94
3000	9,10	144,40	4,00	50,40	2,90	9,64
4000	6,30	108,30	3,00	37,80	2,20	7,23
8760	2,70	49,46	1,40	17,26	1,00	3,30

A apreciação das tabelas 6.34 a 6.39 mostra a viabilidade econômica da opção pelo motor de alto rendimento em todas as condições de carregamento e tempo de operação em horas/ano, exceto para operação com 50% da carga nominal e tempo igual ou inferior a 1.000 horas/ano de operação, permitindo concluir que esta opção é viável economicamente.

Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

A figura 6.25 mostra o TRI em função do carregamento. As tabelas 6.40 a 6.45 comparam o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos.

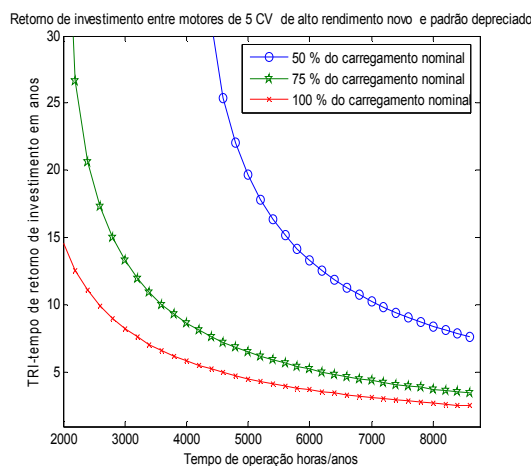


Fig. 6.25 Caso 2: TRI para motor de 5 CV

Tabela 6.40 Motor de 5 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	108,25	**	39,50	**	8,12
3000	**	36,08	13,00	13,17	8,30	2,70
4000	**	27,06	8,70	9,87	5,80	2,03
8760	7,20	12,36	3,40	4,51	2,50	0,95

Tabela 6.41 Motor de 5 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	87,38	**	30,49	**	5,83
3000	**	29,12	13,00	10,16	8,30	1,94
4000	**	21,84	8,70	7,62	5,80	1,46
8760	7,20	9,97	3,40	3,48	2,50	0,67

Tabela 6.42 Motor de 5 CV e tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	64,84	**	21,24	**	3,68
3000	**	21,61	13,00	7,08	8,30	1,23
4000	**	16,21	8,70	5,31	5,80	0,92
8760	7,20	7,40	3,40	2,42	2,50	0,42

Tabela 6.43 Motor de 5 CV e tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	101,51	**	36,55	**	7,35
3000	**	33,83	13,00	12,18	8,30	2,45
4000	**	25,37	8,70	9,14	5,80	1,84
8760	7,20	11,58	3,40	4,17	2,50	0,84

Tabela 6.44 Motor de 5 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	70,81	**	24,71	**	4,73
3000	**	23,61	13,00	8,23	8,30	1,58
4000	**	17,70	8,70	6,18	5,80	1,18
8760	7,20	8,08	3,40	2,82	2,50	0,54

Tabela 6.45 Motor de 5 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente de 30 °C

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	175,93	**	61,39	**	11,75
3000	**	58,63	13,00	20,46	8,30	3,91
4000	**	43,97	8,70	15,35	5,80	2,94
8760	7,20	20,08	3,40	7,01	2,50	1,34

Ao avaliar os resultados das tabelas 6.40 e 6.45, verifica-se que a viabilidade da substituição ocorre para o motor operando com 50% da carga nominal em 8.760 horas/ano, e para 75% da carga nominal, com tempo superior a 3.000 horas/ano.

Já as tabelas 6.41 e 6.42 mostram que a viabilidade da substituição ocorre para o motor operando com 50% da carga nominal com 8.760 horas/ano.

Na tabela 6.43 é mostrado que a viabilidade da substituição ocorre para o motor com 50% da carga nominal em 8.760 horas/ano e com 75% da carga nominal em tempo superior a 4.000 horas/ano.

Finalmente, na tabela 6.44 verifica-se que a viabilidade da substituição ocorre para o motor com 50% da carga nominal em 8.760 horas/ano.

Caso 3: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

A tabela 6.46 compara os custos entre o motor novo e motor sucateado de potência igual a 5 CV, com carregamentos de 50%, 75% e 100%, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo.

Tabela 6.46 - Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado de 5 CV em função do carregamento

Parâmetros de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca
Tensão de alimentação sem distorção	1,0318	1,0572	sim	1,0125	1,0346	sim	1,0679	1,0285	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio	1,0332	1,0572	sim	1,0172	1,0346	sim	1,0980	1,0383	não
Tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio	1,0357	1,0572	sim	1,0849	1,0346	não	1,1607	1,0383	não
Tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio	1,0322	1,0572	sim	1,0138	1,0346	sim	1,0760	1,0383	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico	1,0349	1,0572	sim	1,0220	1,0346	sim	1,1230	1,0383	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente	1,0296	1,0572	sim	1,0069	1,0346	sim	1,0442	1,0383	não

Ao analisar essa tabela, verifica-se que, na maioria dos casos, o custo por hora do motor novo é menor que do motor usado.

6.3.2.3 TRI com tarifa verde - motor de 10 CV

Caso 1: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

A figura 6.26 mostra o TRI em função das horas de operação. As tabelas 6.47 a 6.52 comparam o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos.

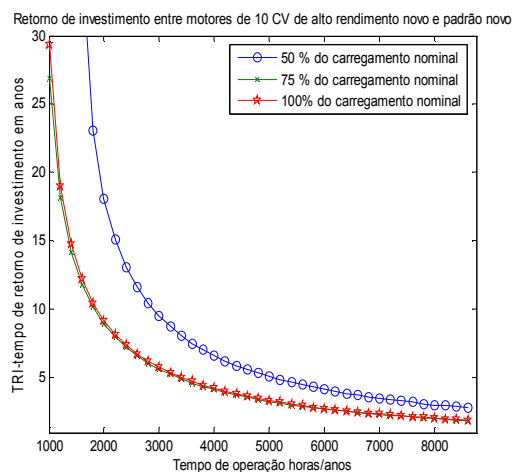


Fig. 6.26 Caso 1: TRI para motor de 10 CV

Tabela 6.47 Motor de 10 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V. útil	TRI	V. útil	TRI	V. útil
1000	**	195,90	27,00	63,88	29,00	20,00
3000	9,50	65,3	5,60	21,29	5,80	6,66
4000	6,60	48,98	4,10	15,97	4,20	5,00
8760	2,80	22,36	1,80	7,29	1,90	2,30

Tabela 6.48 Motor de 10 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V. útil	TRI	V. útil	TRI	V. útil
1000	**	156,10	27,00	48,38	29,00	14,37
3000	9,50	52,01	5,60	16,12	5,80	4,79
4000	6,60	39,01	4,10	12,09	4,20	3,59
8760	2,80	17,81	1,80	5,52	1,90	1,64

Tabela 6.49 Motor de 10 CV e tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V. útil	TRI	V. útil	TRI	V. útil
1000	**	113,70	27,00	32,99	29,00	9,06
3000	9,50	37,88	5,60	10,99	5,80	3,02
4000	6,60	28,41	4,10	8,24	4,20	2,26
8760	2,80	12,97	1,80	3,76	1,90	1,03

Tabela 6.50 Motor de 10 CV e tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V. útil	TRI	V. útil	TRI	V. útil
1000	**	182,90	27,00	58,77	29,00	18,1
3000	9,50	60,97	5,60	19,59	5,80	6,03
4000	6,60	45,73	4,10	14,69	4,20	4,52
8760	2,80	20,88	1,80	6,70	1,90	2,06

Tabela 6.51 Motor de 10 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V. útil	TRI	V. útil	TRI	V. útil
1000	**	123,40	27,00	38,26	29,00	11,36
3000	9,50	41,14	5,60	12,75	5,80	3,78
4000	6,60	30,85	4,10	9,56	4,20	2,84
8760	2,80	14,09	1,80	4,36	1,90	1,29

Tabela 6.52 Motor de 10 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V. útil	TRI	V. útil	TRI	V. útil
1000	**	314,30	27,00	97,42	29,00	28,94
3000	9,50	104,80	5,60	32,47	5,80	9,64
4000	6,60	78,56	4,10	24,35	4,20	7,23
8760	2,80	35,87	1,80	11,12	1,90	3,30

A análise das tabelas 6.47, 6.50 e 6.52 mostram viabilidade econômica da opção pelo motor de alto rendimento em todas as condições de carregamento e tempo de operação em horas/ano, exceto para operação com 50% e 100% da carga nominal e tempo igual ou inferior a 1.000 horas/ano de operação, e permite concluir que esta opção é viável economicamente.

As tabelas 6.48, 6.49 e 6.51 mostram viabilidade econômica da opção pelo motor de alto rendimento em todas as condições de carregamento, exceto para operação com 50% da carga nominal e tempo igual e inferior a 1.000 horas/ano de operação, e para todas as condições de 100% da carga nominal, permitindo concluir que esta opção é inviável economicamente.

Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

A figura 6.27 mostra TRI em função do carregamento. As tabelas 6.53 a 6.58 comparam o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos.

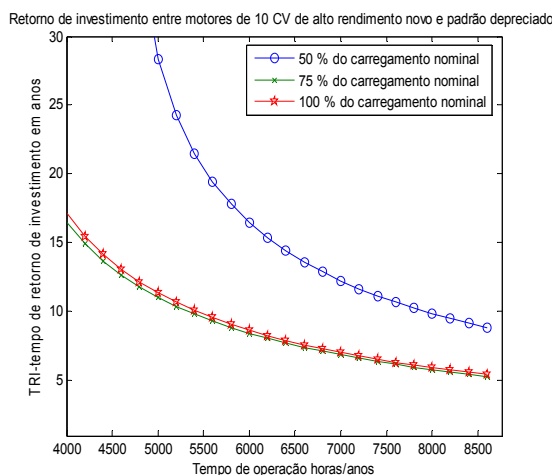


Fig. 6.27 Caso 2: TRI para motor de 10 CV

Tabela 6.53 Motor de 10 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	79,54	**	25,94	**	3,68
3000	**	26,51	**	8,64	**	1,23
4000	**	19,89	16,00	6,48	17,00	0,92
8760	8,60	9,08	5,20	2,96	5,30	0,42

Tabela 6.54 Motor de 10 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	63,38	**	19,64	**	5,83
3000	**	21,12	**	6,55	**	1,94
4000	**	15,84	16,00	4,91	17,00	1,46
8760	8,60	7,23	5,20	2,24	5,30	0,67

Tabela 6.55 Motor de 10 CV e tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	46,17	**	13,39	**	9,06
3000	**	15,38	**	4,46	**	3,02
4000	**	11,54	16,00	3,35	17,00	2,26
8760	8,60	5,27	5,20	1,53	5,30	1,03

Tabela 6.56 Motor de 10 CV e tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	74,26	**	23,86	**	7,35
3000	**	24,76	**	7,95	**	2,45
4000	**	18,57	16,00	5,96	17,00	1,84
8760	8,60	8,48	5,20	2,72	5,30	0,84

Tabela 6.57 Motor de 10 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	50,10	**	15,53	**	4,61
3000	**	16,70	**	5,18	**	1,53
4000	**	12,53	16,00	3,88	17,00	1,15
8760	8,60	5,72	5,20	1,77	5,30	0,52

Tabela 6.58 Motor de 10 CV e tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	127,62	**	39,56	**	11,75
3000	**	42,55	**	13,18	**	3,91
4000	**	31,90	16,00	9,89	17,00	2,94
8760	8,60	14,56	5,20	4,52	5,30	1,34

Ao comparar o TRI versus o tempo de vida útil nas tabelas, verifica-se que na maioria dos campos analisados, o TRI é maior que o tempo de vida útil, tornando esta substituição inviável economicamente.

Caso 3: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

A tabela 6.59 compara os custos entre o motor novo e motor sucateado de potência igual a 10 CV, com carregamentos de 50%, 75% e 100%, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo.

Tabela 6.59 - Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado de 10 CV em função do carregamento

Parâmetros de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca
Tensão de alimentação sem distorção	1,9952	2,0283	sim	1,9622	1,9822	sim	1,9937	1,9599	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio	1,9976	2,0283	sim	1,9699	1,9822	sim	2,0238	1,9599	não
Tensão de alimentação com subtensão e desequilíbrio	2,0046	2,0283	sim	1,9847	1,9822	sim	2,0864	1,9599	não
Tensão de alimentação com sobretensão e desequilíbrio	1,9961	2,0283	sim	1,9643	1,9822	sim	2,0017	1,9599	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio e harmônico	2,0028	2,0283	sim	1,9783	1,9822	sim	2,0521	1,9599	não
Tensão de alimentação com desequilíbrio e temperatura ambiente	1,9903	2,0283	sim	1,9539	1,9822	sim	1,9699	1,9599	não

Ao analisar essa tabela, verifica-se que o custo por hora do motor novo é maior que do motor usado somente para operação com 100% da carga nominal.

6.3.2.4 TRI com tarifa azul - motor de 1 CV

A tarifa azul será simulada somente para motor alimentado por uma tensão nominal sem distorção, devido a um menor número de usuários dessa tarifa em relação aos consumidores de tarifa verde (CEMIG, 2009).

Caso 1: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

A figura 6.28 mostra o TRI em função das horas de operação. A tabela 6.60 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos.

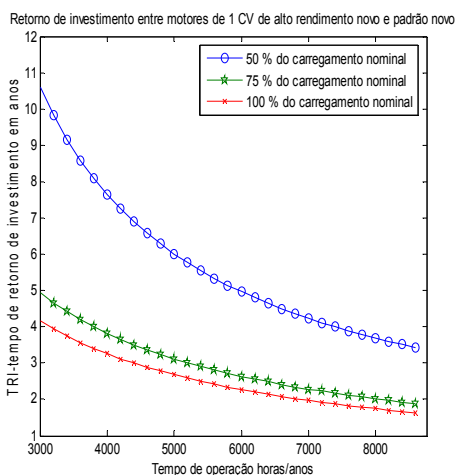


Fig. 6.28 - Caso 1: TRI para motor de 1 CV

A análise dessa tabela mostra a viabilidade econômica do motor de alto rendimento em todas as condições de carregamento e tempo de operação em horas/ano, exceto com 50% carga nominal e tempo igual e inferior a 1.000 horas/ano.

Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

A figura 6.29 mostra o TRI em função do carregamento. A tabela 6.61 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos.

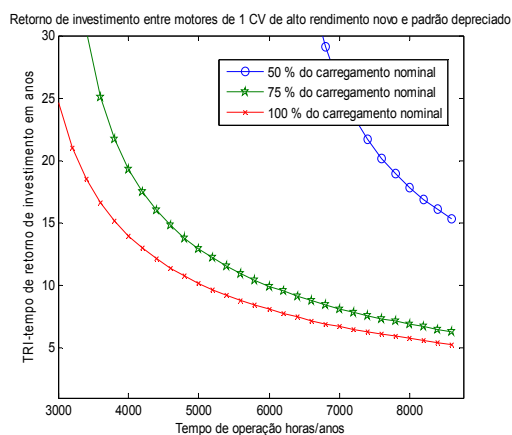


Fig. 6.29 - Caso 2: TRI para motor de 1 CV

Tabela 6.60 Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	194,82	12,30	44,79	9,72	20,00
3000	10,59	64,94	4,92	14,93	4,17	6,66
4000	7,64	48,07	3,81	11,19	3,25	5,00
8760	3,36	22,40	1,85	5,11	1,60	2,30

Tabela 6.61 Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	32,12	**	7,39	**	3,30
3000	**	10,71	**	2,46	24,59	1,10
4000	**	7,93	19,26	1,84	13,96	0,82
8760	14,80	3,69	6,19	0,84	5,18	0,39

Ao comparar o TRI com o tempo de vida útil dessa tabela, verifica-se que, em todos os campos analisados, o TRI é maior que o tempo de vida útil, tornando a substituição inviável economicamente.

Caso 3: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

A tabela 6.62 compara os custos entre o motor novo e motor sucateado de potência igual a 1 CV, com carregamentos de 50%, 75% e 100%, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo.

Esta tabela mostra que, para carregamentos de 75% e 100%, o custo de operação por hora do motor novo é maior que do motor usado. Este fato mostra a inviabilidade da substituição.

Tabela 6.62 - Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado em função do carregamento

Parâmetros de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca
Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção	0,1423	0,1475	sim	0,1492	0,1440	não	0,1630	0,1380	não

6.3.2.5 TRI com tarifa azul - motor de 5 CV

Caso 1: motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

A figura 6.30 mostra o TRI em função das horas de operação. A tabela 6.63 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos.

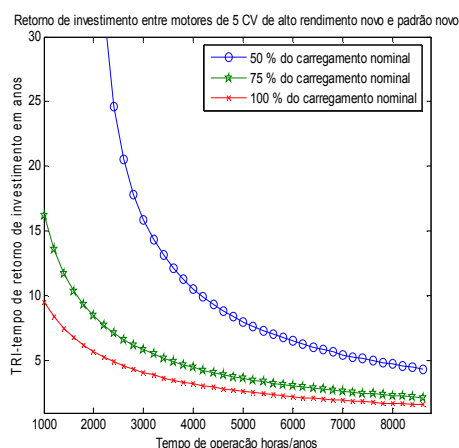


Fig. 6.30 - Caso 1: TRI para motor de 5 CV

O exame dessa tabela mostra a viabilidade econômica do motor de alto rendimento em todas as condições de carregamento e tempo de operação em horas/ano, exceto com 50% carga nominal e tempo igual e inferior a 1.000 horas/ano.

Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

A figura 6.31 mostra o TRI em função do carregamento. A tabela 6.64 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos.

Tabela 6.63 Motor de 5 CV e tensão de alimentação sem distorção

Horas de operação	TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento					
	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	266,59	16,24	97,29	9,54	20,00
3000	15,88	88,86	5,84	32,43	4,11	6,66
4000	10,56	66,64	4,48	24,32	3,21	5,00
8760	4,30	30,43	2,13	11,10	1,58	2,33

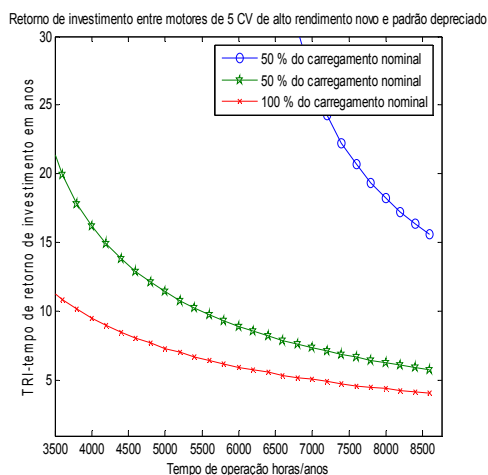


Fig. 6.31 - Caso 2: TRI para motor de 5 CV

Ao comparar o TRI com o tempo de vida útil dessa tabela, verifica-se que, em todos os campos analisados, o TRI é maior que o tempo de vida útil, tornando esta substituição inviável economicamente. Deve-se manter o motor usado em operação.

Caso 3: motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

A tabela 6.65 compara os custos do motor novo e motor sucateado de potência igual a 5 CV, com carregamentos de 50%, 75% e 100%, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo.

Tabela 6.65 - Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado em função do carregamento

Parâmetros de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca
Motor de 5 CV e tensão de alimentação sem distorção	0,6392	0,6526	sim	0,6310	0,6390	sim	0,6890	0,6350	não

Esta tabela mostra, que, para carregamentos de 50% e 75%, o custo de operação do motor novo é menor que o motor usado, enquanto que para 100% o custo do motor novo é maior que o motor usado. Portanto, para efetuar a substituição, deve-se avaliar o carregamento do motor a ser substituído.

6.3.2.6 TRI com tarifa azul - motor de 10 CV

Caso 1: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

A figura 6.32 mostra o TRI em função das horas de operação. A tabela 6.66 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos.

Tabela 6.64 Motor de 5 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	43,95	**	16,04	**	3,30
3000	**	14,65	35,94	5,35	13,89	1,10
4000	**	10,99	16,24	4,01	9,54	0,82
8760	15,06	5,02	5,67	1,83	3,99	0,39

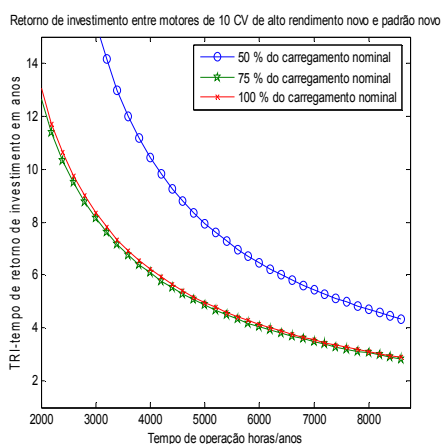


Fig. 6.32 - Caso1: TRI para motor de 10 CV

A apreciação dessa tabela mostra que a viabilidade da substituição ocorre somente para o motor com 50% da carga nominal e tempo igual ou superior a 3.000 horas, e para 75% da carga nominal em todas as condições.

Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

A figura 6.33 mostra o TRI em função do carregamento. A tabela 6.67 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos.

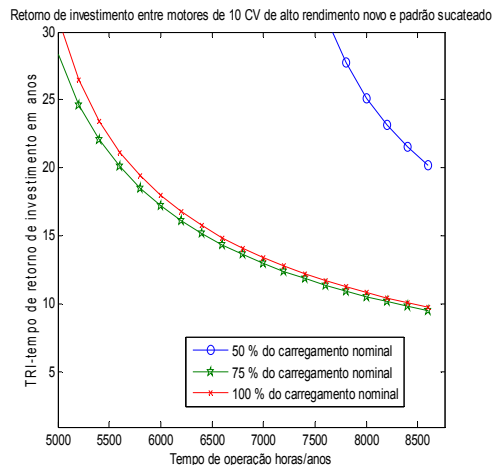


Fig. 6.33 – Caso 2: TRI para motor de 10 CV

Essa tabela compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos, e mostra que em todos os campos analisados o TRI é maior que o tempo de vida útil. Portanto, esta substituição é inviável economicamente.

Caso 3: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

A tabela 6.68 compara os custos entre o motor novo e motor sucateado de potência igual a 10 CV, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo.

Tabela 6.66 Motor de 10 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	195,92	56,90	63,88	**	20,00
3000	15,62	65,30	8,15	21,29	8,36	6,66
4000	10,44	48,98	6,07	15,97	6,21	5,00
8760	4,26	22,36	2,78	7,29	2,84	2,33

Tabela 6.67 Motor de 10 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	32,30	**	10,53	**	3,30
3000	**	10,76	**	3,51	**	1,10
4000	**	8,08	**	2,63	**	0,82
8760	19,29	3,69	9,27	1,20	9,52	0,39

Tabela 6.68 - Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado em função do carregamento

Parâmetros de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca
Motor de 10 CV e tensão de alimentação sem distorção	1,2360	1,2520	sim	1,2200	1,2240	sim	1,2600	1,2100	não

Esta tabela mostra que, para carregamentos de 50% e 75%, o custo de operação do motor novo é menor que o motor usado, enquanto que para 100% o custo do motor novo é maior que o motor usado. Portanto, para efetuar a substituição, deve-se avaliar o carregamento do motor a ser substituído.

6.3.2.7 TRI com tarifa convencional - motor de 1 CV

Caso 1: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão novo

A figura 6.34 mostra o TRI em função das horas de operação. A tabela 6.69 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetro técnico.

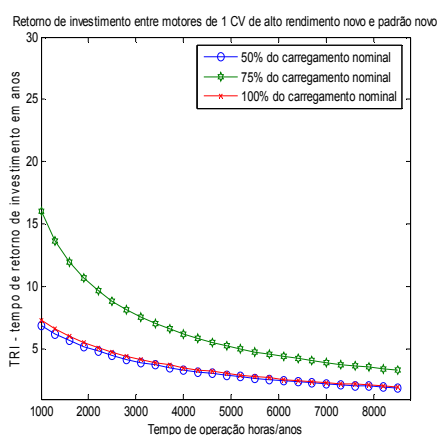


Fig. 6.34 - Caso1: TRI para motor de 1 CV

A análise dessa tabela mostra que a viabilidade da substituição ocorre para todas as condições e permite concluir que é viável economicamente. Há de se ressaltar que o menor TRI ocorre para o motor com 50% do carregamento. Deve-se esse resultado à diferença maior de rendimento do motor padrão para o motor de alto rendimento com esse carregamento, conforme dados da tabela 6.1.

Caso 2: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão depreciado

A figura 6.35 mostra o TRI em função do carregamento. A tabela 6.70 compara o TRI e o tempo de vida útil definido por parâmetros técnicos.

**Tabela 6.69 - Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção
TRI (anos) e vida útil (anos)
em função do carregamento**

Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	6,87	266,59	16,05	97,29	7,31	20,00
3000	4,04	88,86	7,73	32,43	4,26	6,66
4000	3,36	66,64	6,21	24,32	3,53	5,00
8760	1,86	30,43	3,24	11,10	1,95	2,33

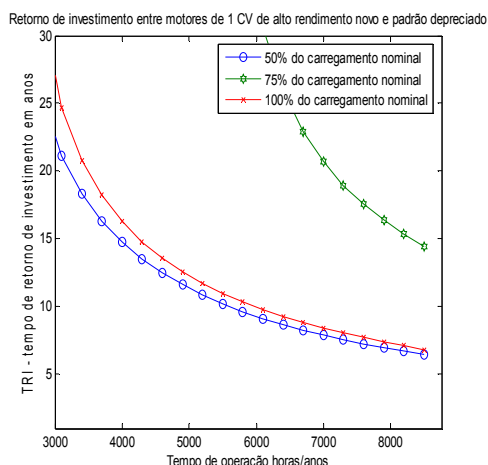


Fig. 6.35 – Caso2: TRI para motor de 1 CV

Essa tabela mostra que, na maioria dos campos analisados, o TRI é maior que o tempo de vida útil, sendo esta substituição inviável economicamente. A viabilidade da substituição ocorre para o motor operando com 50% da carga nominal com tempo superior a 3.000 horas/ano.

Caso 3: Motor novo de alto rendimento no lugar de um motor padrão sucateado

A tabela 6.71 compara os custos entre o motor novo e motor sucateado de potência igual a 1 CV, e sugere o procedimento de substituir ou não o motor usado, levando em conta o menor custo.

Tabela 6.71 - Comparação do custo por hora entre motor novo e motor usado em função do carregamento

Parâmetros de alimentação	C = 50 %			C = 75 %			C = 100 %		
	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca	Motor novo	Motor usado	troca
Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção	0,1542	0,1601	sim	0,1610	0,1558	não	0,1742	0,1498	não

Esta tabela mostra que para carregamentos de 75% e 100% o custo de operação do motor novo é maior que do motor usado. Este fato mostra a inviabilidade da substituição.

6.4 Conclusão

Esse capítulo teve como objetivo efetuar simulações computacionais dos motores, em ambiente Matlab, e analisar os resultados obtidos com o intuito de definir o melhor motor a ser adquirido ou o momento ideal da substituição de um motor. Os dados dos motores foram coletados junto ao banco de dados do DB motores versão 4.2, que possui informações de dados de placa de motores do tipo padrão e de alto rendimento, e os respectivos anos de fabricação e custos dos motores novos e usados. Estes dados associados aos parâmetros técnicos definidos nos capítulos 2, 3 e 4, possibilitam efetuar a simulação da vida útil do motor fundamentada em parâmetros técnicos. Posteriormente, foram efetuadas simulações fundamentadas em parâmetros econômicos, conforme definido no capítulo 5, onde o critério básico para determinar a viabilidade econômica é o tempo do retorno do investimento TRI e o custo por hora de sua

Tabela 6.70 Motor de 1 CV e tensão de alimentação sem distorção

TRI (anos) e vida útil (anos) em função do carregamento						
Horas de operação	C = 50 %		C = 75 %		C = 100 %	
	TRI	V.útil	TRI	V.útil	TRI	V.útil
1000	**	108,24	**	39,50	**	8,12
3000	22,37	36,08	**	13,17	26,53	2,70
4000	14,76	27,06	**	9,87	16,29	2,03
8760	6,25	12,36	13,81	4,51	6,63	0,95

operação. De posse das simulações do tempo de vida útil, do TRI e do custo por hora de sua operação, pôde-se concluir que:

- Na maioria dos casos analisados para a situações de aquisição de motor novo ou substituição de um motor usado, o TRI é maior que o tempo de vida útil e que somente na opção de escolha entre motor novo de alto rendimento ou motor novo tipo padrão, o TRI é menor que o tempo de vida útil. Portanto não é aconselhável a substituição de motores em operação, com finalidade de obter retorno financeiro.
- Com relação ao custo por hora de operação na situação de um motor sucateado, verificou-se que, normalmente, para motores de 1 CV não é aconselhável a substituição de motores em operação, enquanto que para os motores de 5 e 10 CV, a opção é viável economicamente.

CONCLUSÕES FINAIS

Esta dissertação apresentou uma metodologia fundamentada em parâmetros técnicos e econômicos, com o objetivo de definir o melhor motor novo a ser adquirido ou o momento ideal da substituição de um motor usado ou sucateado, em consumidores industriais. Os motores analisados têm potências de 1, 5 e 10 CV, pois a faixa de 0 a 10 CV representa aproximadamente 86% dos motores vendidos no mercado brasileiro nos últimos vinte anos.

Na introdução desta dissertação é apresentada a evolução histórica dos motores elétricos, justificando a importância do motor de indução na eficiência energética para o país. Os capítulos 2, 3 e 4 mostram que parâmetros técnicos, tais como temperatura de operação, tensão de alimentação, harmônicas, altitude de operação, agentes químicos e ações de manutenção, podem afetar a vida útil de um motor de indução. No capítulo 5, com o uso de matemática financeira, é feita uma análise econômica dos custos do motor durante sua vida útil. Já o capítulo 6 apresenta resultados de simulação onde é confrontada a vida útil do motor e o tempo de retorno de investimento (TRI), mostrando inúmeras possibilidades, fundamentadas em parâmetros técnicos e econômicos, que definem o momento correto de substituição de um motor de indução trifásico.

O procedimento de simulação com parâmetros técnicos foi, inicialmente, realizado para definir o tempo de vida útil dos motores selecionados para esse trabalho, o qual foi determinado em função do carregamento e do tempo de operação em horas/ano, dentro da faixa permitida por normas vigentes.

A primeira simulação considerou que os motores foram alimentados por uma tensão senoidal ideal; ao passo que nas demais foram incluídos distúrbios da seguinte forma na mesma: presença do desequilíbrio de tensão na segunda simulação; ocorrência de subtensão e desequilíbrio de tensão na terceira; influência de sobretensão e desequilíbrio de tensão na quarta; presença de harmônicos e desequilíbrio de tensão na quinta. Todas elas com temperatura ambiente de 40 °C. A sexta considerou temperatura ambiente de 30 °C e desequilíbrio de tensão. Os resultados dessas simulações indicaram que:

- Os parâmetros técnicos desequilíbrio de tensão, subtensão e harmônicas provocam uma redução da vida útil do motor, pois os efeitos desses distúrbios é o de produzir uma elevação na temperatura de operação, na situação de temperatura ambiente de 40 °C. A sobretensão e temperatura ambiente de 30 °C provocam um aumento de vida útil devido à redução da temperatura de operação, quando comparado com a temperatura ambiente de 40 °C. Os valores percentuais obtidos de aumento e redução de vida útil dos motores encontram-se no capítulo 6 dessa dissertação.

O procedimento de simulação com parâmetros econômicos foi realizado em uma segunda etapa, onde são considerados os seguintes fatores para determinar o tempo de retorno de investimento: custo do motor padrão e de alto rendimento, rendimento do motor padrão e de alto rendimento, custo do motor padrão depreciado, taxa de juros praticada pelo mercado financeiro, custo das tarifas verde, azul e convencional, custo das tarifas de demanda, horas de operação por ano e potência do motor.

De posse desses dados, efetuou-se a simulação para três condições. A primeira condição consiste na instalação de um motor padrão novo ou um motor de alto rendimento novo. A segunda condição foi a substituição do motor padrão com 5 anos de uso por um motor de alto rendimento novo, sendo que o motor substituído seria vendido por um valor depreciado. A terceira condição envolveu a substituição do motor padrão por um motor de alto rendimento novo, sendo que o motor substituído seria sucateado.

A comparação entre a vida útil e o TRI para as diversas condições citadas é apresentada no capítulo 6, e possibilitam obter as seguintes conclusões:

- Na situação de aquisição de motor novo de alto rendimento ou padrão, verificou-se que a maior viabilidade ocorre para o caso de instalação de motor de alto rendimento sobre o motor padrão novo.
- Na situação de substituição de motor usado por motor novo, em tempos de operação iguais ou inferiores a 1.000 horas/ano, verifica-se a inviabilidade econômica da substituição de quase todos os casos simulados.
- As simulações com tarifa verde mostram a inviabilidade em quase todos os casos em que o motor substituído é depreciado ou sucateado, e somente apresenta viabilidade econômica nos casos de instalação de motores novos de alto rendimento em relação ao motor tipo padrão.
- As simulações com tarifa azul e convencional mostraram a inviabilidade da substituição do motor nos casos em que o motor substituído é depreciado ou sucateado. A viabilidade econômica só foi verificada nos casos de instalação de motores novos de alto rendimento em relação ao motor tipo padrão.
- Os motores operando na faixa de 75% do carregamento nominal apresentaram os maiores índices de viabilidade de substituição dentro de parâmetros técnicos e econômicos.
- Com relação ao custo por hora de operação na situação de motor sucateado, a opção de substituição é viável economicamente para os motores de 5 e 10 CV.

Dessa forma, conclui-se que consumidores industriais usuários de motores trifásicos de indução com potência igual ou inferior a 10 CV, sejam orientados a verificar a viabilidade de substituir seus motores em uso, com objetivo de obter ganhos financeiros com a troca.

Portanto, procedimentos técnicos de manutenção, tais como melhoria de equilíbrio e ajuste do nível da tensão de alimentação, instalações de filtros harmônicos bem projetados para minimizar a ação das componentes harmônicas, redução do nível de poeira, umidade e ajuste do carregamento dos motores, são soluções recomendadas para obter retorno financeiro e principalmente reduzir o consumo de energia e aumentar a vida útil dos motores.

Propostas de trabalhos futuros

Entre os assuntos futuros possíveis para complementar esse trabalho estão:

- Análise de efeitos de desequilíbrios de tensão e componentes harmônicas com valores superiores aos previstos em normas técnicas na vida útil dos motores de indução.
- Análise de efeitos das altas frequências de chaveamento dos inversores estáticos na vida útil dos motores de indução.
- Desenvolver análises técnicas-econômicas em motores com potência superior a 10 CV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABECOM ROLAMENTOS; (2005) “Custos de Mancais de Rolamentos”, *Diário Oficial da Prefeitura de Campinas*, p. 21, 13 de Dezembro, Campinas.

ABINEE; (2007) “Motores Trifásicos Vendidos no Mercado Interno”, *Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica*, DECON/ABINEE, 31 de Janeiro, São Paulo.

ANDREAS, J.C.; (1982) “Energy Efficient Electric Motors Selection and Applications”, *Marcel Dekker Inc*, New York.

ANEEL; (2000) “Legislação Básica do Setor Elétrico Brasileiro” *Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL*, Resolução 456, de 29 de Novembro, volume II, Brasília.

ANEEL; (2001) “Níveis de Tensão de Energia Elétrica em Regime Permanente” *Resolução 505/2001*, de 26 de Novembro, Brasília.

ANNETTE V.; (2001) “Assessment of Voltage Unbalance” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, No. 4, October.

ANÍBAL, A.T.; (2006) “Analysis of Existing Technical and Market Information First Stakeholder Meeting”, *University of Coimbra*, June 29, Brussels.

AUSTIN, H.B.; (2000) “Operating Temperature Considerations and Performance Characteristics” *Material IEEE Paper No. PCIC-2000-08*, IEEE 841 Motors, Nova York.

AUSTIN, H.B.; (1999) “Motor Performance and Life in Accordance with NEMA MG-1 Standards” *IEEE U.S. electrical motors, Division of Emerson Electric*, St. Louis, Missouri.

AUSTIN, H.B.; (1992) “Cause and Analysis of Bearing Failures in Electrical Motors” *IEEE Division of Emerson Electric*, Paper No. PCIC-92-23.

AUSTIN, H. B.; GEORGE, C. S.; (1992) “Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-phase Squirrel-Cage Induction Motors” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 28, No. 4, July / August.

BILLINTON, R.; (1976) “Power System Reliability Evolution”, *Gordon and Breach science publishers*, New York.

BRANCATO, E.L.; (1992) “Estimation of Lifetime Expectancies of Motors”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vo1.8 No.3, May/June.

BRUNI, A. L.; FAMÁ, R.; SIQUEIRA, J.O.; (2008) “Análise do Risco na Avaliação de Projetos de Investimentos” *Caderno de Pesquisas em Administração*, nº 6, São Paulo.

BORTONI, E.C.; HADDAD, J.; AFONSO H.M.; (1999) “Análise do Reparo De Motores de Indução Trifásicos” *Eletróbrás - procel*, 7 à 22 de outubro, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.

CLAYTON, T.; (2003) “Practical Perspectives on Motor Management” *Kaman Industrial Technologies*, Glen Falls, 12801, Nova York.

CEMIG (2009) “Consumidores Industriais”, www.cemig.com.br/pesquisa, acessado em junho de 2009.

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA; (2001) “Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos”, *segunda edição, Eletróbrás/Procel*, Editora da EFEI, p. 356, Itajubá.

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA; (2006) “Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos”, *terceira edição, Eletróbrás/Procel*, Editora da EFEI, p. 169, Itajubá.

CHING, Y. L.; (1999) “Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-phase Induction” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 2, June.

CRISTIANE, F. E.; GUSTAVO, M.; (2004) “Avaliação dos Métodos da Taxa Interna de Retorno Modificada” *Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção*, UFRGS, Porto Alegre.

CUMMINGS, P. G.; (1986) “Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-22, nº 6, November/December.

EPE; (2008) “Consumo de Energia no Brasil” *Empresa de Pesquisa Energética*, Boletim Janeiro.

EUGENE A. K.; HOWARD E. J.;(1968) “Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, March.

GEAQUINTO, H. D.; ASSUNÇÃO, J. T.; (2006) “Desenvolvimento de Um Algoritmo para a Simulação do Motor de Indução Trifásico” *Anais do 12º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XII ENCITA*.

GOLD BOOK; (1997) “IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems” *IEEE Std 493*, 16 December.

HADDAD, J.; SANTOS A.H.; (2008) “Eficiência Energética Teoria e Prática”, *Eletróbrás /Procel, Escola Federal de Engenharia de Itajubá*, p. 87, Itajubá.

HOLMQUIST, J.; MALINOWSKI, J., (2006) “IEEE 841-1994 versus IEEE 841-2001”, *IEEE Industry Applications Magazine*.

IEEE Std 519; (1992) “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems” *Recognized as an American National Standard*, ANSI.

ISONI, M.S.; (2006) “Avaliação das Tendências de Comportamento do Rendimento e das Harmônicas de Corrente em um Acionamento C.A. de Baixa Potência” *Curso de Especialização Em Sistemas de Energia Elétrica: Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica*, UFMG.

DECRETO NO. 4508, BRASIL; (2002), “Presidência da República”, *Casa Civil, Subchefia para assuntos Jurídicos*. 11 de Dezembro.

JOCÉLIO, S.S.; (1981) “Influência do Tipo de Operação na Especificação de Motores de Indução Trifásicos”, *Dissertação de Mestrado da Escola Federal de Engenharia de Itajubá*, Minas Gerais.

JOCÉLIO, S.S.; (1989) “Contribuição à Análise do Comportamento Térmico de Motores de Indução Trifásicos com Rotor Tipo Gaiola”, *Tese de Doutorado Unicamp*, Campinas.

LANDA, H. A.; (1990) “Derating of Induction Motors Due to Harmonics and Voltage Unbalance”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 26, No. 6, November.

LOBOSCO, O. S.; (1988) “Seleção e aplicação de motores elétricos” *McGraw-Hill-Siemens*, p. 244, São Paulo.

MAMEDE, J.; (1997) “Instalações Elétricas Industriais” *Editora LTC*, p 284 Rio de Janeiro.

METALCORTE MOTORES, (2008), “Lista de preços” *Catalogo de Fabricante*, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul.

MOTOR MASTER, (2008) “Version 4.0”, *U S Department of Energy’s, Office of Energy Efficiency and Renewable*, www.1.eere.energy.gov/industry/best-practices, Acessado 29 de Abril.

NASA; (2000) “Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment” *National Aeronautics and Space Administration*, February.

NBR 5410; (2005) “Instalações Elétricas de Baixa Tensão” *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Março.

NEMA; (1998) “Motor-Generator Standard” *National Electrical Manufactures Association* MG-1.

NBR 7094; (2003) “Máquinas elétricas girantes – Motores de indução – Especificação” *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Fevereiro.

NSK; (2008) “Manuais de Rolamentos” *Catálogo técnico do fabricante*. www.nsk.com.br, acessado em 23 Abril.

OLIVIO, C. S.; OLIVEIRA, J.C.; (2000) “Induction Motors Thermal Behavior and Life Expectancy under Non-Ideal Supply Conditions” *Federal University of Uberlandia, III SBQEE*, Uberlandia.

ONS, (2009) “Requisitos Mínimos para a Conexão à Rede Básica” *Operador Nacional do Sistema Elétrico*, Submódulo 3.8, Brasília.

PAMPLONA, E. O.; BARRA J. A.; (2005) “Engenharia Econômica Avançada” <http://www.iem.efei.br/edson>, <http://www.iem.efei.br/arnaldo>.

PANKAJ K. S.; LANDA H A.; (1990) “Derating of Induction Motors Due to Waveform Distortion” *IEEE Transactions on Industry Applications*, 26, N° 6. November/December.

PASTÔRA, R. L.; MARZO C. B.; (2002) “Desempenho de um Motor de Indução Trifásico Submetido a Distorções Harmônicas na Tensão de Alimentação” *Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, VI SBQEE, UFC*.

PENROSE, H.W.:(1999), “A Novel Approach to Industrial Assessments for Improved Energy, Waste Stream, Process and Reliability”, *Connecticut*.

PENROSE, H.W., (2002) “Electric Motor Energy and Reliability Analysis” *BJM Corp, All- test Division* , US Department of Energy’s MotorMaster, Howard.

PENROSE, H.W.; (2003), “ Financial Impact of Electric Motor System Reliability Programs” *BJM Corp, All- test Division*, ITC August.

PENROSE, H.W.; (2004), “Estimating Motor Life Using Motor Circuit Analysis Predictive Measurements” *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Indianapolis19-22 September.

PENROSE, H.W.:(2005) “Electric Motor Energy and Reliability Analysis” *BJM Corp, All- test Division* , US Department of Energy’s MotorMaster, Howard.

PORTARIA INTERMINISTERIAL No. 553, (2005) “Consultoria Jurídica” *Ministério de Minas e Energia*, 8 de Dezembro.

PRAGASEN, P.; PETER, H.; (2002) “Derating of Induction Motors Operating With a Combination of Unbalanced Voltages and Over or Undervoltages”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 17, No. 4, December.

PRAGASEN, P.; MARUBINI, M.; (2005) “Loss of Life in Induction Machines Operating With Unbalanced Supplies” *IEEE Transactions on Energy Conversion*.

RAMOS, M. G.; PENTEADO, A. P.; (2002) “Methodology for the Resizing the Spinning Machine Motor at Textile Industry” *Conferência de Aplicações Industriais*, Salvador.

SENS, M. (2001) “Avanços Tecnológicos dos Motores Elétricos” *WEG em Revista*, Janeiro/Fevereiro.

STEPHEN, A. R.; RANDOLPH, W. W. (1993) “Corporate Finance” *Editora Atlas S. A.*, São Paulo.

STROKER, J. J.; (2003) "Higher Efficiency - What is the Real Cost?" *State of the EASA Industry, Indian River Consulting Group*, IEEE Paper 0-7803-7254.

SULLIVAN, G. P.; PUGH, R. ;MELENDEZ, A. P.; HUNT, W. D.; (2002) "Operations & Maintenance Best Practices" *U.S. Department of Energy*, Prepared by Pacific Northwest National Laboratory, December.

WALDIBERTO, L. P.; HUGO G. M.; (2006) "Minimização de Perdas em Motores de Indução Alimentados por Conversores de Frequência" *WEG Equipamentos Elétricos*, Julho.

WEG, (2007) "Manual WEG de Motores Trifásicos", *Alto rendimento Plus*, Mod. 050. Abril.

WILLIAM, R.F.; HODOWANEC, M.; (2002) "Sleeve versus Antifriction Bearings: Selection of the Optimal Bearing for Induction" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 38, No. 4, July/August.

ZOCHOLL, S. T.;SCHWEITZER, E. O. ; ZEGARRA, A. A.; (1984) "Thermal Protection of Induction Motor Enhanced by Interactive and Thermal Models," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-103, no. 7, pp. 1749–1755, July.

ANEXO A

Determinação dos parâmetros internos de um motor de indução utilizando dados de catálogos

A.1 Circuito equivalente dos motores de indução

Os parâmetros internos dos motores de indução, conforme mostra a figura A.1 do circuito equivalente, são determinados usando os dados fornecidos por catálogos de fabricantes. Os dados utilizados são conjugados de partida nominal e máximo, as correntes de partida e nominal e os valores do fator de potência e rendimento disponíveis.

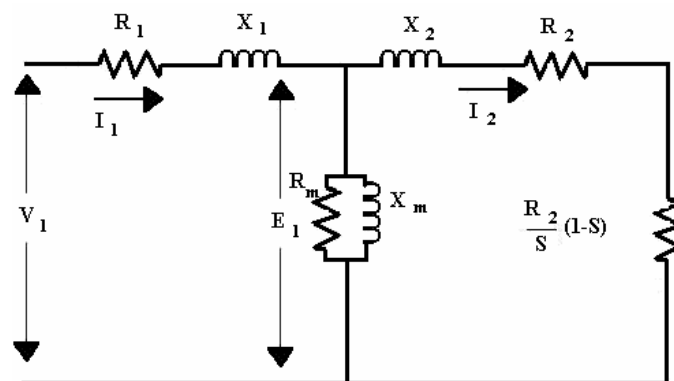


Fig. A.1 Circuito equivalente de motor de indução trifásico

onde:

R_1 – Resistência do estator [Ω];

X_1 – Reatância de dispersão do estator [Ω];

R_2 – Resistência do rotor refletida ao estator [Ω];

X_2 – Reatância de dispersão do rotor refletida ao estator [Ω];

R_m – Resistência correspondente às perdas do núcleo [Ω];

X_m – Reatância de magnetização [Ω];

V_1 – tensão nominal por fase [V];

E_1 – tensão por fase dos terminais do rotor vista do estator [V].

Considerando que os parâmetros do circuito equivalente do motor podem ser constantes e iguais aos valores nominais na faixa normal de escorregamento, $S_{\max} < S \leq S_n$, e ainda que a curva característica típica do conjugado do motor em função do escorregamento seja linear, conclui-se então que o conjugado disponível no eixo varia linearmente com o escorregamento, o que nos permite escrever a equação A.1 (GEAQUINTO, H. D.; ASSUNÇÃO, J. T.; 2006).

$$T = \frac{S}{S_n} T_n \quad (\text{A.1})$$

onde:

T – conjugado disponível no eixo do motor para uma determinada condição de carga [N.m];

T_n – conjugado nominal disponível no eixo do motor [N.m];

S – escorregamento para uma determinada condição de carga [%];

S_n – escorregamento para a condição nominal [%].

Utilizando o mesmo raciocínio escreve-se também a equação A.2.

$$T_{2n} = \frac{n_s}{n_n} T_n \quad (\text{A.2})$$

Onde:

T_{2n} – conjugado nominal disponível no entreferro do motor [N.m];

T_n – conjugado nominal disponível no eixo do motor [N.m];

n_s – velocidade síncrona [rpm];

n_n – velocidade mecânica para condição nominal do motor [rpm].

Como a potência é definida pelo produto do conjugado e a velocidade angular, pode-se então definir a potência disponível no entreferro do motor, conforme a equação A.3.

$$P_{2n} = \frac{2\pi n_s^2}{60 n_n} T_n = n_s * \frac{2\pi T_n}{60 (1 - S_n)} = \frac{P_{En} + P_{AV}}{1 - S_n} \quad (\text{A.3})$$

onde:

P_{2n} – potência disponível no entre ferro [W];

P_{En} – potência nominal no eixo [W];

P_{AV} – perdas com atrito e ventilação [W].

As perdas por atrito e ventilação podem ser determinadas conforme a equação A.4 desenvolvida a partir da equação A.3.

$$P_{AV} = P_{2n}(1 - S_n) - P_{En} \quad (\text{A.4})$$

O carregamento do motor com 50% e 75% da carga nominal, fornecido pelo catálogo do fabricante, corresponde na realidade a um percentual do conjugado nominal, portanto, utilizando as equações A₃ e A₄, pode-se obter a potência transferida no entreferro do motor a 50% e 75% da carga nominal conforme as equações A.5 e A.6.

$$P_{2n-50\%} = n_s * \frac{2\pi * 0,50 * T_n}{60 (1 - S_n)} \quad (\text{A.5})$$

$$P_{2n-75\%} = n_s * \frac{2\pi * 0,75 * T_n}{60 (1 - S_n)} \quad (\text{A.6})$$

As perdas mecânicas, atrito e ventilação, variam com a velocidade do motor. No entanto, quando comparadas com as perdas totais são pequenas e podem ser consideradas constantes e iguais ao valor nominal. Portanto as potências disponíveis no eixo do motor para as condições de 50% e 75% da carga nominal, podem ser determinadas utilizando as equações A.7 e A.8 (GEAQUINTO, H. D.; ASSUNÇÃO, J. T.; 2006).

$$P_{E50\%} = P_{2n-50\%}(1 - S_n) - P_{AV} \quad (\text{A.7})$$

$$P_{E75\%} = P_{2n-75\%}(1 - S_n) - P_{AV} \quad (\text{A.8})$$

Com os valores dos rendimentos, dados de catálogo (WEG, 2007), e a potência mecânica no eixo determinadas nas equações A.7 e A.8, obtém-se as potências ativas demandada para 100%, 75% e 50% da carga nominal, substituindo os valores correspondentes na equação A.9.

$$P_I = \frac{P_E}{\eta} \quad (\text{A.9})$$

onde:

P_I – potência ativa demandada pelo motor [W];

P_E – potência mecânica entregue ao eixo do motor [W];

η – rendimento do motor [%].

A partir dos valores da potência ativa demandada, do fator de potência e da tensão nominal, pode-se determinar a corrente no enrolamento do estator para cada condição de carga e em seguida determinar a potência reativa conforme as equações A.10 e A.11.

$$I_I = \frac{P_I}{\sqrt{3}V_L \text{Cos}\varphi} \quad (\text{A.10})$$

$$Q = \sqrt{3}V_L I_I \text{Sen}\varphi \quad (\text{A.11})$$

onde:

I_I – corrente de linha para as diversas condições de carga [A];

V_L – tensão nominal aplicada no estator [V];

$\text{Cos}\varphi$ – fator de potência para as diversas condições de carga [pu];

Q – potência reativa para as diversas condições de carga [VAR].

Analisando o fluxo de potência ativa no motor, pode-se verificar que a soma das potências de perdas no cobre do estator, das perdas no núcleo com histerese e correntes de Foucault e a potência entregue ao rotor equivale à potência nominal ativa absorvida da rede pelo motor, conforme a equação A.12.

$$P_{1n} = P_{C1n} + P_{HF} + P_{2n} \quad (\text{A.12})$$

onde:

P_{1n} – potência ativa nominal absorvida da rede pelo motor [W];

P_{C1n} – perdas no cobre do estator na condição nominal [W];

P_{HF} – perdas no núcleo com histerese e correntes de Foucault [W];

P_{2n} – potência disponível no entreferro [W].

A equação A.12 pode ser reescrita para o motor entregando 50% da potência nominal no eixo, conforme a equação A.13.

$$P_{1.50\%} = P_{C1n} \left[\frac{I_{50\%}}{I_{100\%}} \right]^2 + P_{HF} + P_{2.50\%} \quad (\text{A.13})$$

onde:

$P_{1.50\%}$ – potência ativa absorvida da rede a 50% da carga nominal [W];

$I_{50\%}$ – corrente no estator a 50% da carga nominal [A];

$I_{100\%}$ – corrente no estator a 100% da carga nominal [A];

$P_{2.50\%}$ – potência disponível no entreferro a 50% da carga nominal [W].

Com as equações A.12 e A.13 pode-se determinar as perdas no cobre do estator e as perdas no núcleo com histerese e correntes de Foucault. De posse das perdas no cobre determina-se a resistência do enrolamento do estator conforme a equação A.14.

$$R_1 = \frac{P_{C1n}}{3(I_n)^2} \quad (\text{A.14})$$

Para o cálculo dos outros parâmetros, é necessário determinar a tensão do circuito secundário, usando-se o modelo de circuito equivalente de motor de indução trifásico, conforme a equação A.15 e figura A.1

$$\overset{\circ}{E}_1 = \overset{\circ}{V}_1 - \overset{\circ}{I}_1 * \overset{\circ}{Z}_{C1} \quad (\text{A.15})$$

onde:

$\overset{\circ}{E}_1$ – tensão no circuito secundário vista do estator [V];

$\overset{\circ}{V}_1$ – tensão aplicada no estator [V];

$\overset{\circ}{I}_1$ – corrente no estator em [A];

$\overset{\circ}{Z}_{C1}$ – impedância do enrolamento do estator [Ω].

A impedância $\overset{\circ}{Z}_{M2}$ é a resultante do circuito equivalente de magnetização em paralelo com a impedância do circuito do rotor, conforme a equação A.16.

$$\overset{\circ}{Z}_{M2} = \overset{\circ}{Z}_M // \overset{\circ}{Z}_2 \quad (\text{A.16})$$

Tomando a parte real de $\overset{\circ}{Z}_{M2}$, temos:

$$R_{M2} = \Re(\overset{\circ}{Z}_{M2}) \quad (\text{A.17})$$

Com base no fluxo de potência ativa no circuito secundário do motor, pode definir que:

$$P_{M2} = P_{2n} + P_{HF} = 3R_{M2} * I_{1n}^2 = \sqrt{3}E_{1n}I_{1n}\cos\theta \quad (\text{A.18})$$

$$\cos\theta = \frac{R_{M2}}{Z_{M2}} \quad (\text{A.19})$$

onde:

P_{M2} – potência ativa entregue ao circuito secundário [W];

R_{M2} – resistência equivalente do circuito secundário [Ω].

Como:

$$\overset{\circ}{E}_1 = \overset{\circ}{Z}_{M2} * \overset{\circ}{I}_1 = E_1 \angle \delta = Z_{M2} * I_1 \angle (\theta - \varphi) \quad (\text{A.20})$$

Considerando que $\delta = 0^\circ$, então pode-se afirmar que $\theta = \varphi$ ou seja, o fator de potência do circuito secundário é aproximadamente igual ao fator de potência nominal. Logo pode-se determinar o valor da tensão secundária nominal E_1 , conforme equação A.21.

$$E_1 = \frac{P_{M2}}{\sqrt{3}I_1\cos\varphi} \quad (\text{A.21})$$

Com o valor da tensão secundária nominal E_1 , pode-se determinar a potência reativa entregue ao circuito secundário, conforme a equação A.22.

$$Q_{M2} = \sqrt{3}E_1I_1\text{Sen}\varphi \quad (\text{A.22})$$

O valor da potência reativa entregue ao enrolamento do estator é a diferença entre a potência reativa entregue ao motor, conforme a equação A.10, e a potência reativa entregue ao circuito secundário, e de posse deste valor pode-se determinar a reatância de dispersão do enrolamento do estator.

$$Q_{C1} = Q_1 - Q_{M2} \quad (\text{A.23})$$

As reatâncias nominais de dispersão do estator, do rotor e a reatância de magnetização, podem ser consideradas constantes e iguais aos valores nominais, na região normal de escorregamento do motor ($0 < S \leq S_n$), conforme equações A.24 e A.25.

$$X_M = \frac{E_{1n}^2}{Q_{Mn}} = \frac{E_{1.50\%}^2}{Q_{M.50\%}} \Leftrightarrow Q_{M.50\%} = \frac{E_{1.50\%}^2}{E_{1n}^2} * Q_{Mn} \quad (\text{A.24})$$

onde:

X_M – reatância de magnetização [Ω];

Q_{Mn} – potência reativa de magnetização na condição nominal [VAR];

$Q_{M.50\%}$ – potência reativa de magnetização a 50% da carga nominal [VAR].

$$X_2 = \frac{Q_{2n}}{I_{2n}^2} = \frac{Q_{2.50\%}}{I_{2.50\%}^2} \Leftrightarrow Q_{2.50\%} = \frac{I_{2.50\%}^2}{I_{2n}^2} * Q_{2n} \quad (\text{A.25})$$

onde:

X_2 – reatância do rotor [Ω];

Q_{2n} – potência reativa do rotor na condição nominal [VAR];

$Q_{2.50\%}$ – potência reativa do rotor a 50% da carga nominal [VAR].

A potência de entrada do rotor vezes o escorregamento resulta nas perdas do cobre do rotor e como a resistência do rotor pode ser considerada constante, então pode-se comprovar a igualdade da equação A.26.

$$\frac{I_{2.50\%}^2}{I_{2n}^2} = \frac{S_{50\%} * P_{2.50\%}}{S_n * P_{2n}} \quad (\text{A.26})$$

Analisando o fluxo de potência reativa do motor para as condições nominais e a 50% da mesma, podem-se determinar as potências reativas entregue ao rotor (Q_{2n}) e ao circuito de magnetização (Q_{Mn}) para as condições nominais de carga, conforme as equações A.27 e A.28.

$$Q_{2n} = \frac{Q_{1.50\%} - Q_{C1.50\%} - \left[\frac{E_{1.50\%}^2}{E_{1n}^2} \right] * (Q_{1n} - Q_{C1n})}{\left[\frac{I_{2.50\%}^2}{I_{2n}^2} \right] - \left[\frac{E_{1.50\%}^2}{E_{1n}^2} \right]} \quad (\text{A.27})$$

$$Q_{Mn} = Q_{1n} - Q_{C1n} - Q_{2n} \quad (\text{A.28})$$

Com os valores obtidos de Q_{Mn} pode-se determinar a reatância e resistência do circuito de magnetização, conforme as equações A.29 e A.30.

$$X_M = \frac{3E_{1n}^2}{Q_{Mn}} \quad (\text{A.29})$$

$$R_M = \frac{3E_{1n}^2}{P_{HF}} \quad (\text{A.30})$$

Com os valores obtidos de Q_{2n} pode-se determinar a potência aparente, a corrente, a resistência e a reatância do circuito do rotor nas condições nominais, conforme as equações A.31, A.32, A.33 e A.34.

$$S_{2n} = \sqrt{P_{2n}^2 + Q_{2n}^2} \quad (\text{A.31})$$

$$I_{2n} = \frac{S_{2n}}{\sqrt{3}E_{1n}} \quad (\text{A.32})$$

$$R_{2n} = \frac{S_{2n}P_{2n}}{3I_{2n}^2} \quad (\text{A.33})$$

$$X_{2n} = \frac{Q_{2n}}{3I_{2n}^2} \quad (\text{A.34})$$

Conclusão

Após a definição dos parâmetros necessários para implementar o circuito equivalente, deve-se efetuar uma análise para validação do modelo com os dados retirados do catálogo do fabricante. Esta análise é desenvolvida com os motores 1, 5 e 10 CV, conforme justificativa apresentada no capítulo I.

ANEXO B

B.1 Simulações de temperatura de operação para as diversas condições de carga

Esse anexo tem como objetivo analisar os motores mostrados na tabela B.1 quanto as temperaturas de operação para as diversas condições de carga, fatores ambientais e desequilíbrio de tensão, tomando como base a elevação da temperatura da classe F de isolamento.

Tabela B.1 Motores utilizados

Motores trifásicos IP55 - alto rendimento – classe F de isolamento					
Pot. CV	I_n	Veloc. (rpm)	$\eta=100\%$	$\eta=75\%$	$\eta=50\%$
1	2,98	1730	82,60	80,00	77,50
5	13,80	1720	88,00	87,50	85,00
10	26,40	1760	91,00	90,00	88,00

Utilizando a equação 4.6, pode-se determinar o comportamento da elevação de temperatura de operação dos motores de 1, 5 e 10 CV, variando com os respectivos carregamentos de 50%, 75%, 100% e 125%. Essas variações devem-se as perdas internas de cada motor, e são mostradas nas figuras B.1, B.2 e B3.

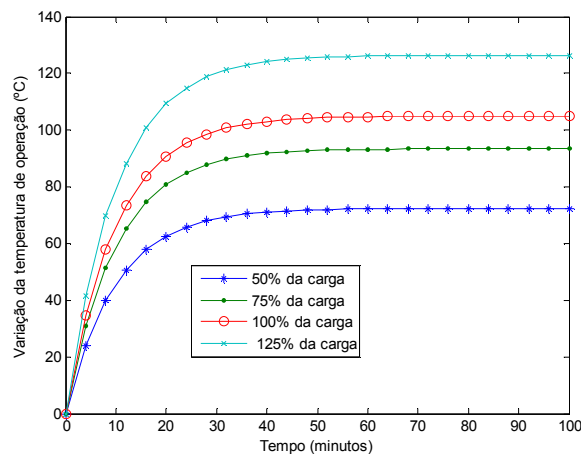


Fig. B.1 Temperaturas de operação do motor 1 CV

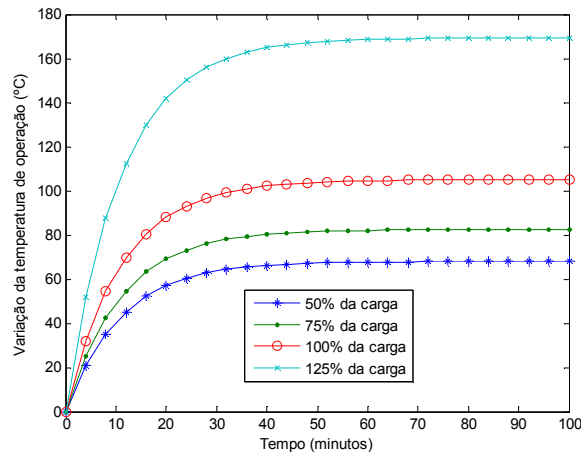


Fig. B.2 – Temperaturas de operação do motor 5 CV

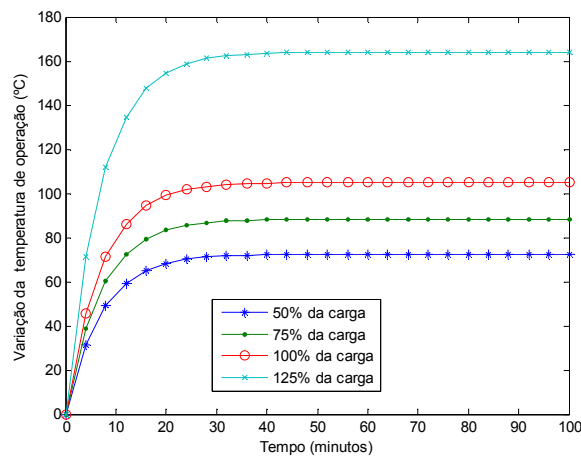


Fig. B.3 – Temperaturas de operação do motor 10 CV

B.2 Efeitos do carregamento

As tabelas B.2, B.3 e B.4 mostram como o carregamento afeta a temperatura de operação do motor, devido à variação das suas perdas internas. O fator M define o nível de degradação do isolamento para fatores ambientais químicos e térmicos como mostrado no capítulo 4.

Deve-se ressaltar que o fator M, quando tratar de umidade, agentes químicos, poeira, abrasivo, significa o equivalente térmico de degradação do isolamento. Portanto, pode-se associar esta degradação a um ΔT equivalente.

Tabela B.2 Fator M para o Carregamento do motor de 1 CV

Condição	Carregamento	Elevação da temperatura de operação	Fator M
1.1	50% da carga nominal	72,48 °C	-2,27
1.2	75% da carga nominal	93,48 °C	-0,80
1.3	100% da carga nominal	105,00 °C	0,00
1.4	125% da carga nominal	126,47 °C	1,50

Tabela B.3 Fator M para o Carregamento do motor de 5 CV

Condição	Carregamento	Elevação da temperatura de operação	Fator M
2.1	50% da carga nominal	68,00 °C	-2,60
2.2	75% da carga nominal	82,04 °C	-1,58
2.3	100% da carga nominal	105,00 °C	0,00
2.4	125% da carga nominal	169,20 °C	4,50

Tabela B.4 Fator M para o Carregamento do motor de 10 CV

Condição	Carregamento	Elevação da temperatura de operação	Fator M
3.1	50% da carga nominal	72,40 °C	-2,28
3.2	75% da carga nominal	88,41 °C	-1,16
3.3	100% da carga nominal	105,00 °C	0,00
3.4	125% da carga nominal	164,06 °C	4,13

Ao analisar essas tabelas, conclui-se que quando o fator M é negativo tem-se uma temperatura abaixo do valor especificado para sua classe de isolamento, mas quando positivo tem-se um aumento.

B.3 Efeitos dos fatores ambientais e desequilíbrio de tensão na temperatura do motor

As condições da tensão de alimentação, condições mecânicas de operação, condições ambientais como poeira, abrasivos, térmicas etc., alteram a temperatura de operação do motor. As tabelas B.5 e B6 apresentam as variações de temperatura devido a esses fatores considerando a classe F de isolamento.

Tabela B.5 - ΔT e fator M para as condições ambientais

Condição	Descrição do ambiente	ΔT	Fator M
4.1	Limpo e seco com temperatura menor que 25 °C.	0,00 °C	0,00
4.2	Limpo, c/ar condicionado temp. menor que 25 °C.	7,14 °C	0,50
4.3	Limpeza média, temperatura variável e umidade	10,71 °C	0,75
4.4	Ambiente agressivo temperatura variável umidade.	14,28 °C	1,00
4.4	Ambiente agressivo temperatura variável e elevada umidade, ácido/base, motor em torres de refrigeração.	X	Não quantificado

Tabela B.6 – ΔT e Fator M para o desequilíbrio de tensão

Condição	Desequilíbrio de tensão	ΔT	Fator M
5.1	Tensão equilibrada	0,00 °C	0,00
5.2	Tensão desequilibrada de 2%	8,00 °C	0,56
5.3	Tensão desequilibrada de 3%	18,00 °C	1,26
5.4	Tensão desequilibrada de 4%	32,00 °C	2,43

Ao analisar essas tabelas, conclui-se que as condições listadas anteriormente confirmam a alteração das temperaturas de operação, e, como consequência, aumentam a vida útil do motor.

B 4 Ação simultânea de fatores M na degradação do isolamento

Os efeitos da ação simultânea de fatores M na degradação e na definição da vida útil do isolamento são mostrados na tabela B.7.

Tabela B.7 Determinação da temperatura equivalente com fatores simultâneos

Condições	Fator M	Temperatura	
a	1.2, 4.2, 5.2	$(-0,8) + (0,50) + (0,56) = 0,26$	108,71 °C
b	2.4, 4.4, 5.1	$(4,5) + (1,00) + (0,0) = 5,50$	183,57 °C
c	3.1, 4.3, 5.2	$(-2,28) + (0,75) + (0,56) = -0,26$	101,28 °C
d	3.3, 4.1, 5.1,	$(0,0) + (0,0) + (0,0) = 0$	105,00 °C

Utilizando também o fator M equivalente das condições simultâneas **a**, **b**, **c** e **d** podem-se traçar os gráficos da temperatura equivalente e temperatura nominal de operação dos motores em função do tempo, conforme as figuras B.4, B.5 e B.6.

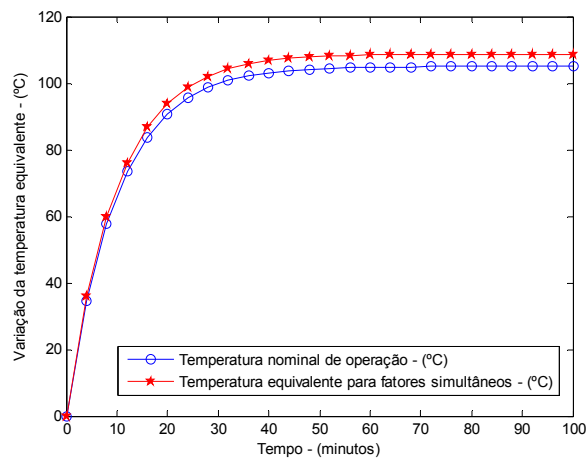


Fig. B.4 Temperatura equivalente de operação do motor de 1 CV para condição (a)

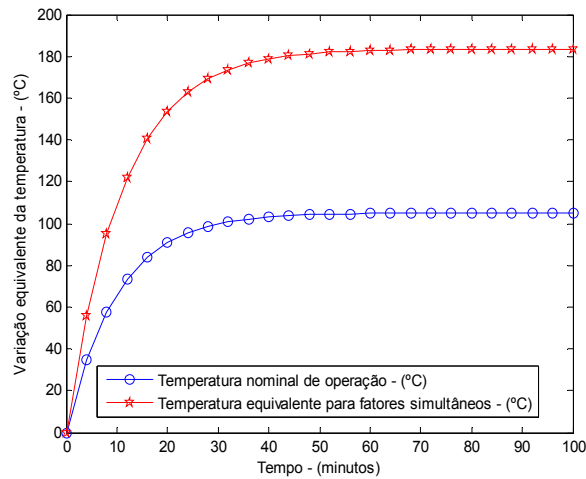


Fig. B.5 Temperatura equivalente de operação do motor de 5 CV para condição (b)

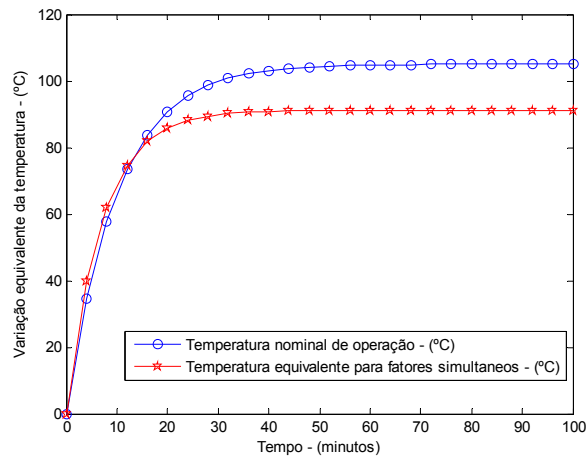


Fig. B.6 Temperatura equivalente de operação do motor de 10 CV para condição ©

As análises dessas figuras mostram que:

O fator $M = 0,26$ para a condição **a**, figura B.4, tem pouca influência na elevação da temperatura final do isolamento, apresentando um aumento $3,71\text{ }^{\circ}\text{C}$, passando do valor nominal de $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $108,71\text{ }^{\circ}\text{C}$.

O fator $M = 5,5$ para a condição **b**, figura B.5, degrada significativamente a vida útil do isolamento, devido à elevação da temperatura equivalente que passou do valor nominal de $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $180,57\text{ }^{\circ}\text{C}$.

O fator $M = -0,26$ para a condição **c**, figura B.6, tem influência positiva na vida útil do isolamento, com a temperatura final reduzindo de $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $91,14\text{ }^{\circ}\text{C}$.

B 5 Ação simultânea de fatores M na confiabilidade do isolamento

Após determinar o fator M equivalente para as condições simultâneas **a**, **b**, **c** e **d**, pode-se traçar o gráfico de confiabilidade do isolamento dos motores em função da sua vida útil que é mostrada na figura B.7, de acordo com a equação 4.2. Analisando essas curvas levantadas, perceber-se que a condição **b** tem uma vida útil bastante reduzida e que a condição **c** apresenta os maiores índices de confiabilidade.

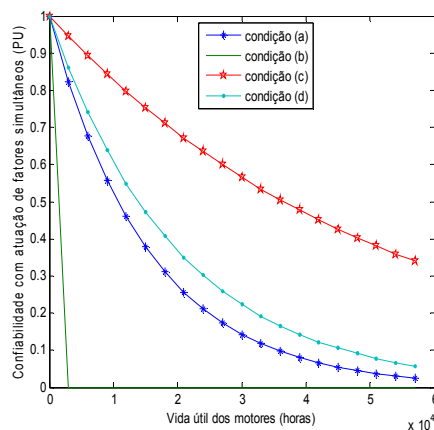


Fig. B.7 Confiabilidade do isolamento dos motores quando submetidos a efeitos simultâneos

Conclusão

Este anexo apresentou a influência de fatores técnicos na vida útil do motor, mostrando que os efeitos de carregamento, desequilíbrio de tensão, poeira, umidade, acidez, abrasivos e temperatura alteram a vida útil do motor e sua confiabilidade.

Quando se torna necessário aumentar a confiabilidade do motor, um procedimento de manutenção preventiva ou corretiva deve ser aplicado para minimizar os efeitos negativos destes fatores.

ANEXO C

C.1 Tarifas de energia fornecida pela Cemig

TUSD – Tarifa única de serviços e demanda

TE – Tarifa de energia

ANEXO I-B						
TARIFA CONVENCIONAL	(7,9%) QUADRO A					
	TUSD + TE		TUSD		TE	
	DEMANDA	ENERGIA	DEMANDA	ENERGIA	DEMANDA	ENERGIA
SUBGRUPO	(R\$/kW)	(R\$/MWh)	(R\$/kW)	(R\$/MWh)	(R\$/kW)	(R\$/MWh)
A3a (30 kV a 44 kV)	39,36	158,12	39,36	33,80	-	124,32
A4 (2,3 kV a 25 kV)	39,48	158,82	39,48	34,50	-	124,32
AS (Subterrâneo)	58,37	166,24	58,37	36,11	-	130,13
B3-DEMAIS CLASSES		351,49		235,42		116,07

TARIFA HORO-SAZONAL AZUL	(7,9%) QUADRO B					
	TUSD + TE		TUSD		TE	
	DEMANDA (R\$/kW)	DEMANDA (R\$/kW)	DEMANDA (R\$/kW)	DEMANDA (R\$/kW)	DEMANDA (R\$/kW)	DEMANDA (R\$/kW)
SUBGRUPO	PONTA	F. PONTA	PONTA	F. PONTA	PONTA	F. PONTA
A1 (230 kV ou mais)	6,92	-	6,92	-	-	-
A2 (88 a 138 kV)	28,66	4,89	28,66	4,89	-	-
A3 (69 kV)	40,56	9,03	40,56	9,03	-	-
A3a (30 a 44 kV)	45,49	12,61	45,49	12,61	-	-
A4 (2,3 a 25 kV)	45,65	12,62	45,65	12,62	-	-
AS (Subterrâneo)	47,80	19,36	72,75	13,15	(24,95)	6,21

TARIFA HORO-SAZONAL AZUL	(7,9%) QUADRO C											
	TUSD + TE				TUSD				TE			
	ENERGIA (R\$/MWh)				ENERGIA (R\$/MWh)				ENERGIA (R\$/MWh)			
	PONTA		F. PONTA		PONTA		F. PONTA		PONTA		F. PONTA	
SUBGRUPO	SECA	ÚMIDA	SECA	ÚMIDA	SECA	ÚMIDA	SECA	ÚMIDA	SECA	ÚMIDA	SECA	ÚMIDA
A1 (230 kV ou mais)	232,92	210,48	144,54	131,52	22,38	22,38	22,38	22,38	210,54	188,10	122,16	109,14
A2 (88 a 138 kV)	232,92	210,48	144,54	131,52	22,38	22,38	22,38	22,38	210,54	188,10	122,16	109,14
A3 (69 kV)	232,92	210,48	144,54	131,52	22,38	22,38	22,38	22,38	210,54	188,10	122,16	109,14
A3a (30 a 44 kV)	232,92	210,48	144,54	131,52	22,38	22,38	22,38	22,38	210,54	188,10	122,16	109,14
A4 (2,3 a 25 kV)	232,92	210,48	144,54	131,52	22,38	22,38	22,38	22,38	210,54	188,10	122,16	109,14
AS (Subterrâneo)	243,80	220,25	151,26	137,67	22,38	22,38	22,38	22,38	221,42	197,87	128,88	115,29

TARIFA HORO-SAZONAL AZUL	(7,9%) QUADRO B					
	TUSD + TE		TUSD		TE	
	DEMANDA (R\$/kW)	DEMANDA (R\$/kW)	DEMANDA (R\$/kW)	DEMANDA (R\$/kW)	DEMANDA (R\$/kW)	DEMANDA (R\$/kW)
SUBGRUPO	PONTA	F. PONTA	PONTA	F. PONTA	PONTA	F. PONTA
A1 (230 kV ou mais)	6,92	-	6,92	-	-	-
A2 (88 a 138 kV)	28,66	4,89	28,66	4,89	-	-
A3 (69 kV)	40,56	9,03	40,56	9,03	-	-
A3a (30 a 44 kV)	45,49	12,61	45,49	12,61	-	-
A4 (2,3 a 25 kV)	45,65	12,62	45,65	12,62	-	-
AS (Subterrâneo)	47,80	19,36	72,75	13,15	(24,95)	6,21

TARIFA HORO-SAZONAL VERDE	(7,9%) QUADRO E		
	TUSD + TE	TUSD	TE
SUBGRUPO	(R\$/kW)	(R\$/kW)	(R\$/kW)
A3a (30 a 44 kV)	12,61	12,61	-
A4 (2,3 a 25 kV)	12,62	12,62	-
AS (Subterrâneo)	19,36	13,15	6,21

TARIFA HORO-SAZONAL VERDE	(7,9%) QUADRO F											
	TUSD + TE				TUSD				TE			
	ENERGIA (R\$/MWh)				ENERGIA (R\$/MWh)				ENERGIA (R\$/MWh)			
	PONTA		F. PONTA		PONTA		F. PONTA		PONTA		F. PONTA	
SUBGRUPO	SECA	UMIDA	SECA	ÚMIDA	SECA	ÚMIDA	SECA	ÚMIDA	SECA	ÚMIDA	SECA	ÚMIDA
A3a (30 a 44 kV)	1.289,33	1.266,89	144,54	131,52	1.078,78	1.078,78	22,38	22,38	210,55	188,11	122,16	109,14
A4 (2,3 a 25 kV)	1.292,85	1.270,41	144,54	131,52	1.082,31	1.082,31	22,38	22,38	210,54	188,10	122,16	109,14
AS (Subterrâneo)	1.352,95	1.329,54	151,26	137,67	1.082,31	1.082,31	22,38	22,38	270,64	247,23	128,88	115,29