

INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS-

IFMG- FORMIGA

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LEANDRO DE SOUZA LEMOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA ESTIMAR A VIDA ÚTIL DE
MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO**

FORMIGA - MG

2016

LEANDRO DE SOUZA LEMOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA ESTIMAR A VIDA ÚTIL DE
MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica do IFMG-
Formiga, como requisito parcial para obtenção
do título de bacharel em Engenharia Elétrica
Orientador: Prof. Dr. Renan Souza Moura.

FORMIGA - MG

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

LEANDRO DE SOUZA LEMOS

DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA ESTIMAR A VIDA ÚTIL DE
MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto Federal Campus Formiga, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: ____ de _____ de _____.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renan Souza Moura

RESUMO

O setor industrial apresenta diversas aplicações onde força mecânica é necessária, seja para laminação de metais, transporte de insumos, compressão ou diversas outras atividades. Tais atividades são, em maior parte, realizadas por motores trifásicos de indução, devido ao menor custo de instalação e manutenção dos mesmos. O planejamento de manutenção ou de compra dessas máquinas deve ser feito de forma precisa, visando evitar gastos com reparo ou paralizações para revisões desnecessárias. O cálculo da estimativa de vida útil desses motores é de grande importância para que tal planejamento seja possível. O presente trabalho apresenta, com base em referências bibliográficas, um equacionamento da durabilidade de máquinas assíncronas, tendo como base a vida útil dos enrolamentos das mesmas. As equações apresentadas usam parâmetros simples de serem calculados em um ambiente industrial, como carregamento, temperatura e condições do ambiente. É feita uma análise gráfica da forma como estes parâmetros afetam a estimativa, usando o software MATLAB, permitindo a avaliação de cada variável no resultado calculado. O trabalho retrata o desenvolvimento de um software em Java, com interface gráfica, possibilitando que o usuário calcule de forma automatizada o tempo de vida de um motor, assim como um exemplo da aplicação do software no setor industrial.

Palavras-chave: Motores trifásicos. Estimativa de vida útil. Análise computacional.

ABSTRACT

There are many applications in industry where mechanical strength is required, either for rolling metals, transporting supplies, compression or various other activities. Three-phase induction motors, due to lower cost of installation and maintenance, mainly carry out such activities. The maintenance or purchase planning of these machines must be done accurately in order to avoid expenses with unnecessary repairs or downtime for revisions. The calculation of the estimated useful lifetime of these motors is of great importance to make such planning possible. This paper presents, based on references, an asynchronous machines' durability equationing, based on its windings lifetime. The equations presented use simple parameters to be measured in an industrial environment, such as loading, temperature and environmental conditions. A graphical analysis of how these parameters affect the estimate is developed, using the MATLAB software, allowing the evaluation of each variable in the calculated result. The work depicts the development of a Java software with a graphical interface, allowing the user to calculate, in an automated manner, a motor's lifetime, as well as an example of the software application in the industrial sector.

Keywords: AC Motors. Lifetime estimation. Computational analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Vida media em função da potência.....	15
Figura 2A e 2B- Partes de um motor trifásico de indução	22
Figura 3- Conductor se movimentando em um campo magnético B, gerando tensão induzida	24
Figura 4- Rotor de um motor do tipo gaiola de esquilo	26
Figura 5- Circuito equivalente por fase de uma máquina assíncrona	28
Figura 6- Esquema representativo das perdas em um motor trifásico de indução	30
Figura 7- Motor de 600KW acoplado a um dinamômetro	34
Figura 8- Sistema de recuperação de energia para o método dinamômetro	34
Figura 9- Sistema de ensaio “back to back” com redutor de relação variável	35
Figura 10- Exemplo de cálculo de temperatura usando o método Gráfico	36
Figura 11- Circuito equivalente de um motor de indução	37
Figura 12- Circuito equivalente de um motor a vazio	38
Figura 13- Circuito equivalente de um motor com rotor bloqueado	38
Figura 14- Fator de Perda em função das condições de carga	40
Figura 15- Curva de aquecimento de um motor devido a partidas frequentes	41
Figura 16- Relação da variação de corrente em função do tempo de partida direta	44
Figura 17- Valores de I_p/I_n de acordo com a equação 15 para $I_{pmax}=6$	45
Figura 18- Relação de correntes de partida sobre corrente nominal em função do tempo pontual sobre o tempo total de partida	46
Figura 19- - Comparação da corrente de partida direta e da partida compensadora	47
Figura 20- Fator de perda de potência para fases desbalanceadas	48
Figura 21- Variação da vida de uma máquina em função da temperatura	50
Figura 22- Resultado da análise térmica para classes de isolamento A e F	51
Figura 23- Diagrama de blocos do funcionamento do algoritmo	60
Figura 24- Tela de entrada de dados do algoritmo de estimativa de vida útil no MATLAB... ..	61
Figura 25- Variação da vida útil em função da carga	62
Figura 26- Variação da vida útil em função da carga para diferentes temperaturas ambiente. ..	63
Figura 27- Variação da vida útil em função da carga para diferentes valores de desbalanceamento de fases.....	64

Figura 28- Variação da vida útil em função da carga para diferentes condições ambientais...	65
Figura 29- Variação da vida útil em função da carga para partida direta	66
Figura 30- Variação da vida útil em função da carga para partida com chave compensadora a 75%	66
Figura 31- Variação da vida útil em função da carga para partida estrela-triangulo	67
Figura 32- Aba de Características do Motor	69
Figura 33- Aba sobre as condições do ambiente	70
Figura 34- Aba sobre condições de partida	71
Figura 35- Exibição do resultado da estimativa de vida útil do motor	71
Figura 36- Caixa de entrada do valor da relação de transformação do autotransformador	72
Figura 37- Caixa de entrada do valor de corrente de partida médio	72
Figura 38- Motor A.....	73
Figura 39- Motor B	74
Figura 40- Motor C.....	74
Figura 41- Estimativa de vida para o Motor A.....	76
Figura 42- Estimativa de vida para o motor B	77
Figura 43- Estimativa de vida motor C.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Estimativa de vida para motores de indução	14
Tabela 2- Cronograma de atividades	19
Tabela 3- Classes de isolamento	32
Tabela 4- Materiais que constituem os enrolamentos de diferentes classes de isolamento.	33
Tabela 5- Fator de perda em função das condições de carga	40
Tabela 6- Valores de variação de temperatura para as classes de isolamento	41
Tabela 7- Valores de HIC para diferentes classes de isolamento	50
Tabela 8- Graus de proteção contra corpos sólidos em motores	53
Tabela 9- Graus de proteção contra a penetração de água em motores	54
Tabela 10- Fator M para diferentes condições de ambiente.....	55
Tabela 11- Valores de Φ para diferentes classes de isolamento.....	56
Tabela 12- Características construtivas dos motores	75
Tabela 13- Dados medidos dos motores	75

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1- VISÃO GERAL DO TRABALHO	13
1.1- Introdução	13
1.2- Tema e problema	16
1.3- Justificativa	16
1.4- Objetivos	16
1.4.1- Objetivo Geral	17
1.4.2- Objetivos Específicos	17
1.5- Metodologia	17
1.5.1- Tipos de pesquisa	18
1.5.2- Procedimentos	18
1.6- Cronograma de atividades	19
1.7- Conclusão do capítulo	19
CAPÍTULO 2- REVISÃO TEÓRICA SOBRE MOTORES	21
2.1- Introdução	21
2.2- O que são motores elétricos	21
2.3- Motores de indução	21
2.3.1- Aspectos construtivos	22
2.3.2- Principio de funcionamento	23
2.3.2.1- Lei de Faraday da indução eletromagnética	23
2.3.2.2- Lei de Lenz	24
2.3.2.3- Funcionamento do motor	25
2.3.3- Velocidade de rotação	26
2.3.4- Circuito equivalente	27
2.3.5- Perdas de potência	28
2.4- Conclusão do capítulo	29
CAPÍTULO 3- ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE MOTORES	31
3.1- Introdução	31
3.2- Enrolamento das bobinas	31
3.2.1- Classes de isolamento	32

3.3- Aquecimento	33
3.3.1- Métodos de medição de temperatura em motores	33
3.3.2- Modelagem do aquecimento de motores	39
3.3.2.1- Modelagem do aquecimento dos enrolamentos devido as condições de carga	39
3.3.2.2- Aquecimento devido a partida de motores	41
3.3.2.2.1- Modelagem matemática do aquecimento durante a partida	42
3.3.2.2.1.1- Comportamento da corrente em diferentes métodos de partida	43
3.3.2.3- Aquecimento devido ao desbalanceamento de fases	47
3.4- Modelagem da estimativa da vida útil de motores	48
3.4.1- Modelagem da estimativa da vida útil de motores devido ao aquecimento	49
3.4.2- Modelagem de atenuação de vida útil devido a partidas	52
3.4.3- Efeito devido as condições do ambiente	52
3.4.3.1- Condições do meio	52
3.4.3.2- Condições da temperatura ambiente	55
3.5- Conclusão do capítulo	56
CAPÍTULO 4- Análise computacional das variáveis de entrada	58
4.1- Introdução	58
4.2- Análise computacional	58
4.2.1- Análise das variáveis de entrada	60
4.3- Conclusão do capítulo	67
CAPÍTULO 5- O SOFTWARE EM JAVA	68
5.1- Introdução	68
5.2- O software	68
5.3- Estudo de caso	72
5.3.1- Dados coletados	74
5.3.2- Resultados	76
5.4- Análise dos resultados e conclusão do capítulo	78
CAPÍTULO 6- CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO	80
7- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

8- ANEXOS	85
8.1- Anexo A	85
8.2- Anexo B	86
8.3- Anexo C	89
8.4- Anexo D	90

CAPÍTULO 1- VISÃO GERAL DO TRABALHO

1.1- Introdução

Os princípios de funcionamento dos motores começaram com o dinamarquês Oersted em 1820 que realizou as primeiras experiências que comprovaram a interação entre campos magnéticos e correntes elétricas (TORRES et al, 2001). Após sua descoberta, diversos estudos foram conduzidos sobre o assunto.

Embora o surgimento de motores não seja da forma em que se conhece hoje, com a base do eletromagnetismo descoberto por Oersted, Faraday foi capaz de descobrir a indução eletromagnética em 1831. Ele foi capaz de usar um ímã em forma de ferradura e um gerador de corrente para fazer girar um disco de cobre, sendo essa a primeira máquina elétrica girante (TORRES, 2001).

Outros experimentos foram então realizados, aprimorando assim as máquinas elétricas. O primeiro motor elétrico, porém, foi feito pelo inventor alemão Siemens (CUNHA, 2009), que criou um dínamo que era capaz de produzir eletricidade, ou funcionar como um motor de corrente contínua.

A corrente contínua foi predominante na primeira metade do século XIX, porém devido a questões sobre a forma de se transmitir essa energia, disputas técnicas foram geradas, principalmente entre Thomas Edson, que defendia o uso da corrente contínua na transmissão e Nicola Tesla, que defendia o uso da corrente alternada. Na segunda metade do século XIX, Tesla foi contratado para construir uma linha de transmissão em Nova York. Ele realizou a transmissão de forma eficiente por corrente alternada (SANTOS, 2016), pois com ela era possível alterar o valor de tensão gerada por meio de transformadores. Após tal episódio, a corrente contínua defendida por Thomas Edson perdeu espaço e a corrente alternada foi adotada como principal forma de transmissão de eletricidade, o que incentivou a pesquisa de máquinas operando em corrente alternada.

Em 1889, o russo Dobrowolsky registrou a patente de um motor trifásico (CUNHA, 2009), este apresentava rendimento de 80% para gerar uma potência de 80W. Logo após a patente, motores trifásicos assíncronos foram produzidos em série, em potências que variavam de 400W até 7,5kW. A partir de então máquinas elétricas são amplamente utilizadas na indústria.

Os motores de corrente alternada podem ser classificados como síncronos ou assíncronos. Os síncronos usam eletroímãs como estator para fazer o rotor girar, o que

permite que sua velocidade seja constante (KOSOW, 2008). Se a frequência de alimentação da rede variar, a velocidade do motor síncrono variará de forma proporcional. Porém devido a maior complexidade construtiva, motores síncronos são mais comuns em sistemas que operem em grande potência, ou quando um rigor na velocidade de operação é necessário.

Maquinas assíncronas apresentam menor complexidade construtiva, o que faz com que sejam produzidas em alta escala e apresente um menor preço final. Dessa forma, Cunha (2009) estima que esse tipo de motor compõe mais de 90% do mercado.

Devido à importância das maquinas de indução nas indústrias, diversos estudos foram realizados, buscando estimar parâmetros para aumentar seu rendimento e longevidade. No trabalho realizado por Gray (1913), o autor já buscava equacionar o aquecimento nos enrolamentos dos motores, de forma a aumentar sua expectativa de vida.

A possibilidade de estimar a vida útil de um motor, permite com que se avalie investimentos financeiros na sua implementação, além de permitir uma programação de manutenção preditiva e preventiva.

O trabalho de mensurar a durabilidade de um motor começou de forma estatística, sendo feita por fabricantes e pesquisadores. Aníbal (2006) mostra em seu trabalho (tabela 1) o valor estatístico de estimativa de vida para algumas faixas de potência de motores. Para fazer tal levantamento ele considerou que foram feitas manutenções e trocas de componentes nas máquinas no tempo estipulado pelos fabricantes. Andreas (1982) também realiza uma análise estatística para estimar o tempo de vida de motores de diferentes potências, a figura 1 mostra um gráfico com os resultados obtidos.

Potencia (kW)	Media de Vida (anos)
1,0-7,5	12
7,5-75	15
75-250	20

Tabela 1- Estimativa de vida para motores de indução (ANIBAL, 2006)

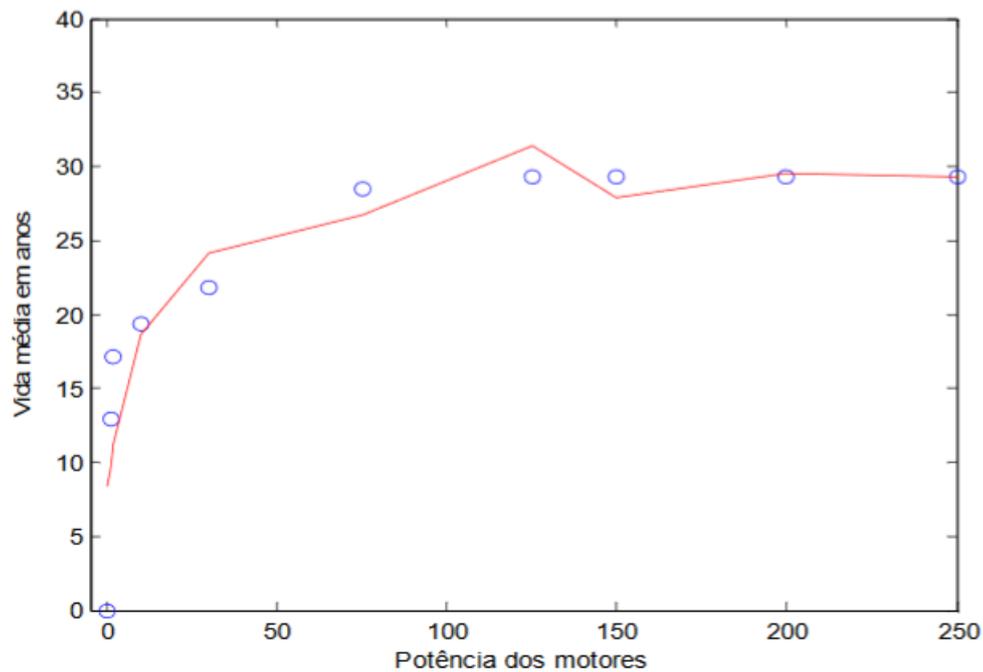


Figura 1- Vida media em função da potência (ANDREAS, 1982, apud SILVA et al, 2008)

A partir de dados estatísticos, alguns estudos foram conduzidos por pesquisadores, como o trabalho feito por Brancato (1992). Onde ele apresenta um equacionamento que visava estimar a vida útil de motores, considerando principalmente o aquecimento nos enrolamentos dos mesmos.

Alguns ensaios práticos foram desenvolvidos para medir o aquecimento dos enrolamentos de um motor, como o “back-to-back” e o dinamométrico, que são descritos nos capítulos seguintes do presente trabalho. Jocélio (1989) apresenta um modelamento e uma simulação computacional visando estimar o aquecimento de um motor do tipo gaiola de esquilo. O modelamento desenvolvido, porém, exige dados complexos de serem obtidos em um ambiente industrial.

O presente trabalho usa um equacionamento simplificado do aquecimento de um motor de indução, desenvolvido a partir da equação de Arrhenius, o qual é usado em alguns trabalhos, como o de Silva et al (2008) e o de Brancato (1992), para estimar a vida útil de um motor de indução trifásico.

Apesar de ser um modelo simplificado, o equacionamento da durabilidade de um motor, envolve diversas variáveis, portanto, será avaliada a forma como as variáveis influenciam a vida útil de um motor de forma computacional, usando o MATLAB. Ao se avaliar as variáveis de entrada, será desenvolvido um software utilizando a linguagem de

programação JAVA, que permitirá estimar a vida útil de motores a partir de parâmetros simples de serem medidos.

1.2 Tema e problema

Motores de indução são vastamente utilizados no setor industrial, além de compor grande parte da demanda energética, desempenhando assim papel fundamental na sociedade moderna. Tendo em vista a importância dessas máquinas, a estimativa de vida útil das mesmas se torna de extrema importância.

Os modelos matemáticos usados para fazer o cálculo que estimam a durabilidade de um motor dependem de diversas variáveis de entrada, fazendo com que tais modelos sejam inviáveis sem uma ferramenta computacional. A implementação de um modelo computacional de fácil uso, com uma interface gráfica detalhada, permitiria não somente a estimativa de vida útil de uma máquina que já se encontra em funcionamento na indústria, mas também - por permitir avaliar de forma simples a forma como as variáveis de entrada influenciam na vida útil- avaliar novas aquisições de maquinários para determinadas funções.

1.3- Justificativa

Existem na literatura estudos estatísticos para estimar a vida útil de motores. O levantamento de dados estatísticos, porém, é difícil de ser feito, além de se tornar inviável fazer o levantamento para diversas condições de operação e assim avaliar o comportamento da máquina.

O desenvolvimento de um software na linguagem JAVA para realizar a proposta intendida seria de fácil aplicação e de muita utilidade. Permitindo que indústrias possam, através do conhecimento das condições de operação das máquinas, estimar a durabilidade de seus motores, e também conhecer como diferentes variações em condições de operação podem influenciar no funcionamento do motor.

1.4- Objetivos

Apresenta-se aqui o objetivo geral do trabalho e os objetivos específicos, os quais informarão a finalidade deste trabalho.

1.4.1- Objetivo geral

Desenvolver um software em JAVA, de fácil utilização e com interface gráfica, capaz de estimar, através dos modelos matemáticos existentes, a vida útil de motores de indução trifásico.

1.4.2- Objetivos específicos

Apresentam-se aqui os objetivos específicos como meio se de alcançar o objetivo geral proposto:

- Estudar sobre o funcionamento de motores de indução trifásico
- Pesquisar sobre modelos matemáticos que estimam a vida útil de motores
- Analisar as variáveis consideradas fundamentais no equacionamento do tema proposto e avaliar a forma com que elas se relacionam com a estimativa intendida.
- Desenvolver um algoritmo em MATLAB para fazer a análise gráfica das variáveis de entrada
- Desenvolver um software em JAVA para estimar a vida útil de motores
- Avaliar, com o uso do software, a durabilidade dos motores de uma empresa de montagem industrial na cidade de Arcos-MG.

1.5- Metodologia

Apresenta-se aqui a Metodologia deste trabalho, a qual se deu início com pesquisas bibliográficas. Estas tendo como conteúdo trabalhos que foram realizados para estudar os fatores que influenciavam a variação da vida útil de um motor de indução trifásico e equacionar esses fatores.

Após a análise bibliográfica, foi feito um estudo computacional das variáveis que foram consideradas significativas no equacionamento da vida útil de motores. Através da análise gráfica feita no MATLAB foi avaliado como alterações nessas variáveis influenciavam a vida útil da máquina.

Com a análise feita, foi desenvolvido um software, com interface gráfica, usando a linguagem JAVA, capaz de realizar os cálculos necessários para estimar um valor aproximado da vida útil de um motor. Este foi testado em motores de uma empresa de montagem industrial da cidade de Arcos-MG. Os resultados obtidos são mostrados no presente trabalho.

1.5.1 Tipos de pesquisa

Neste subitem, será mostrado os tipos de pesquisa utilizados para se chegar ao resultado pretendido para o tema em estudo.

Todo trabalho se deu através das pesquisas qualitativas e quantitativas, pois são avaliadas as variáveis que influenciam o tempo de vida de uma máquina e a forma com que essas variáveis influenciam na estimativa. Essas pesquisas possuem métodos complementares que justificam suas características, sendo eles a pesquisa bibliográfica, exploratória e de campo.

1.5.2 Procedimentos

Cada tipo de pesquisa utilizada neste trabalho possui procedimentos, os quais são:

- Na pesquisa bibliográfica: análises de trabalhos anteriores sobre o modelamento matemático do tema proposto.
- Na exploratória: análise das variações das condições de operações da máquina e registro da forma como influenciam a vida útil de um motor.

- Na de campo: coleta de dados primários em uma empresa de montagem industrial e aplicação dos dados no software desenvolvido.

1.6- Cronograma de atividades

Apresenta-se aqui (tabela 2) o cronograma de atividades.

	Atividades	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
TCC – CRONOGRAMA	Pesquisa bibliográfica	X	X	X	X			
	Desenvolvimento do modelo matemático		X	X				
	Desenvolvimento de um algoritmo em MATLAB			X	X			
	Avaliação das variáveis de entrada			X	X			
	Desenvolvimento de um software em JAVA				X	X		
	Coleta de dados primários				X	X		
	Avaliação dos dados coletados					X	X	
	Revisão e Formatação						X	
	Defesa do projeto							X

Tabela 2- Cronograma de atividades

1.7- Conclusão do capítulo

O presente capítulo apresentou informações gerais quanto ao trabalho desenvolvido, como introdução, justificativa, tipo de pesquisa e cronograma de atividades. Essas informações foram necessárias para orientar o desenvolvimento dos demais capítulos do projeto.

O capítulo 2 apresentará uma visão geral sobre os motores que serão abordados no projeto. Essa visão ajudará a compreensão do leitor do capítulo 3, aonde serão apresentadas as equações que determinam a estimativa da vida útil de um motor.

O capítulo 4 apresenta uma análise das variáveis de entrada, com o objetivo de apresentar de que forma as características do motor, do ambiente e de partidas degradam a durabilidade da máquina.

O capítulo 5 apresenta o desenvolvimento do software na linguagem de programação JAVA, mostrando as janelas, os dados a serem inseridos e os resultados assim como a aplicação do software em uma empresa de montagem industrial. No capítulo 6 se verifica as conclusões obtidas com o desenvolvimento do projeto.

CAPÍTULO 2- REVISÃO TEÓRICA SOBRE MOTORES

2.1- Introdução

Neste capítulo será feito um levantamento bibliográfico de alguns aspectos teóricos sobre motores elétricos. O entendimento básico dos aspectos construtivos, princípios de funcionamento e dos tipos de máquinas elétricas existentes são necessários para que se possa compreender o capítulo 3, onde será tratado o equacionamento inerente a estimativa da vida útil de motores.

2.2 O que são motores elétricos

Segundo WEG (2003) motores elétricos são máquinas cuja função é transformar energia elétrica em energia mecânica. Estes são amplamente usados na indústria, pois apresentam: baixo custo, facilidade de transporte, grande versatilidade de adaptação as cargas e alto de alto rendimento. É considerado que cerca de 60% a 70% de toda a energia elétrica que é gerada no mundo é usada para acionar motores elétricos (MOTOR ELETRICO, 2009).

Os motores elétricos podem ser de corrente contínua ou alternada, sendo os de corrente alternada os síncronos ou assíncronos (também chamados de máquinas de indução). O presente trabalho é focado em motores assíncronos, portanto quando se refere a motores, está fazendo menção a motores trifásicos de indução.

2.3 Motores de Indução

Motores de indução são também considerados máquinas que possuem única excitação, isso acontece porque são aplicadas apenas tensões alternadas polifásicas em seu extrator. Contudo, uma tensão alternada de frequência variável é induzida em seu rotor, o que faz com que, tecnicamente, a máquina de indução seja uma máquina de dupla excitação (KOSOW 2008).

O motor de indução trifásico é uma máquina cuja velocidade depende da frequência que está alimentada e do número de polos do motor. Dos motores elétricos, o motor de indução é o mais usado, por sua simplicidade e robustez.

2.3.1- Aspectos construtivos

As peças constituintes de um motor de indução trifásico se dividem em duas partes fundamentais: as constituintes do estator e as do rotor. As figuras 2A e 2B mostram detalhadamente cada uma dessas partes.

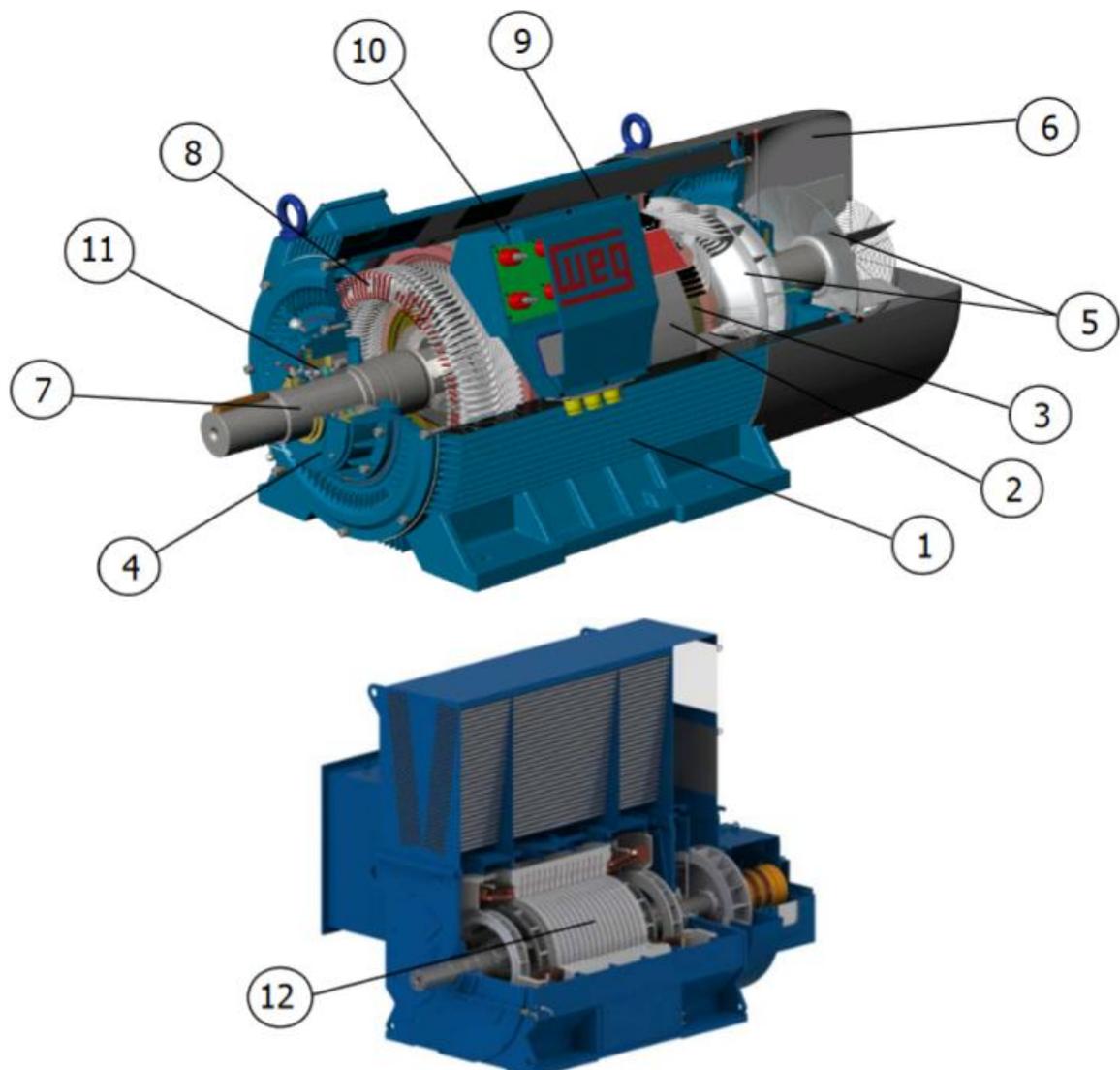


Figura 2A e 2B- Partes de um motor trifásico de indução (WEG, 2015)

De acordo com a figura 2A e 2B, podemos então classificar os itens que estão numerados (WEG, 2015):

Estator:

- Carcaça (1): Estrutura resistente a corrosão, feita de ferro fundido ou aço soldado, tem a função de ser a estrutura suporte do conjunto.
- Núcleo de chapas (2): São chapas feitas de aço magnético, sofrem tratamento térmico com a superfície isolada para reduzir as perdas no ferro.
- Enrolamento trifásico (8): São três conjuntos de bobinas iguais, uma para cada fase, esse sistema é ligado à rede trifásica de alimentação.

Rotor:

- Eixo (7): É responsável por transmitir a potência mecânica desenvolvida pelo motor, feito em aço, ele é tratado termicamente para que possa evitar problemas como empenamento e fadiga.
- Núcleo de chapas (3): Possuem mesmas características das chapas do estator.
- Gaiola ou enrolamento do rotor (12): Feita de cobre eletrolítico, latão ou de papel alumínio injetado, é composta de barras e anéis de curto circuito no motor tipo gaiola e de bobinas em motor no tipo de anéis.

Existem também outras algumas partes do motor, que são:

- Tampas do mancal (4).
- Ventilador interno e externo (5).
- Tampa defletora ou proteção do ventilador (6)
- Caixa de ligação de força (9)
- Placa de bornes com isolador e pino de ligação (10).
- Rolamento (11)

2.3.2- Princípio de funcionamento

O funcionamento de motores se baseia em princípios eletromagnéticos, para poder compreendê-lo então é necessário saber o que é a lei de Faraday e a lei de Lenz.

2.3.2.1- Lei de Faraday da indução eletromagnética

Em 1881, Faraday foi capaz de gerar tensão a partir do movimento relativo entre um campo magnético e um condutor de eletricidade. Foi denominado “induzida” essa tensão gerada, pois ocorria apenas quando existia movimento relativo entre um condutor e um campo magnético. A lei de Faraday pode ser enunciada por:

“ O valor da tensão induzida em uma simples espira de fio é proporcional a razão de variação das linhas de força que passam através daquela espira (ou se concatenam com ela). ” (KOSOW 2008).

A figura 3 ilustra a lei de Faraday, nela um condutor de comprimento l se move em um campo magnético B , de forma que uma fem (força eletromotriz) é induzida no condutor. A equação 1 descreve o enunciado da lei de Faraday.

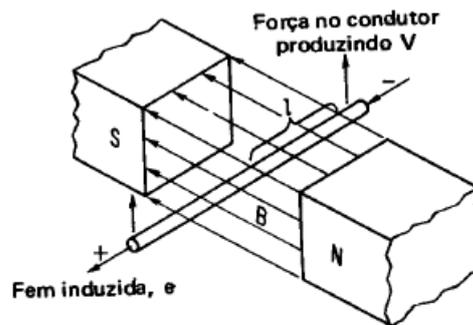


Figura 3- Condutor se movimentando em um campo magnético B , gerando tensão induzida (KOSOW 2008).

$$E_{med} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

Na equação 1 temos que:

E_{med} é a tensão media gerada em uma espira.

$\Delta\phi$ é a variação do número de linhas de força magnética concatenadas pelas espiras.

Δt é o intervalo de tempo de variações das linhas de força magnética.

2.3.2.2- Lei de Lenz

Conforme consta a lei de Faraday, para que seja gerado energia elétrica através da indução eletromagnética é necessário que se aplique uma força mecânica ao condutor. A energia gerada então não é proveniente do campo magnético, já que esse não se altera nem se destrói, mas sim devido ao trabalho mecânico, responsável por causar uma variação do fluxo magnético no condutor (KOSOW, 2008).

A lei de Lenz afirma que:

“Em todos os casos de indução eletromagnética, uma fem induzida fará com que a corrente circule em um circuito fechado, num sentido tal que seu efeito magnético se oponha aa variação que a produziu” (KOSOW, 2008).

O efeito da lei de Lenz é que a corrente induzida tem sentido oposto ao sentido da variação do campo magnético que a gera, de forma que (TORRES, 2001):

- Se houver diminuição do fluxo magnético, a corrente induzida irá gerar um campo magnético com o mesmo sentido.
- Se o fluxo magnético aumentar, a corrente induzida irá gerar um campo magnético com sentido oposto.

Podemos então escrever a equação 1 (lei de Faraday) conforme a equação 2.

$$E_{med} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2)$$

2.3.2.3- Funcionamento do motor

O enrolamento do rotor de um motor possui anéis metálicos em sua tampa e base, curto-circuitando as barras, o que permite a circulação de correntes pela mesma. O núcleo do rotor é feito de chapas com propriedades ferromagnéticas. Sobre elas são inseridas barras de cobre, paralelamente entre si e unidas em sua extremidade, conforme a figura 4.

O estator sendo também constituído de núcleo com propriedades ferromagnéticas, tem seus enrolamentos alimentados pela rede de corrente alternada trifásica.

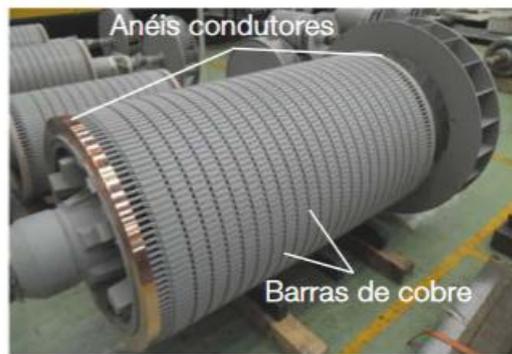


Figura 4- Rotor de um motor do tipo gaiola de esquilo (WEG, 2015)

As variações do fluxo magnético nas bobinas induzem uma tensão sob a mesma, e, portanto, uma corrente, de acordo com a lei de Faraday.

Conforme a lei de Lenz, o fluxo criado devido à corrente que foi induzida se opõe a variação do fluxo da corrente que o gerou. Existe então polaridade nas bobinas opostas ao fluxo.

Esse fluxo girante atravessa barras do rotor, induzindo correntes que se opõe ao seu movimento. Conseqüentemente o rotor gira no mesmo sente do fluxo, para reduzir a intensidade da indução, de forma que se gera um torque no rotor (WEG, 2015).

Uma das características dos motores de indução é que sua velocidade de rotação não é igual à velocidade do campo girante, um dos fatores que os diferenciam de maquinas síncronas.

2.3.3- Velocidade de rotação

Quando um motor opera a vazio, existem poucas forças de resistência que se opõe ao movimento, portanto o rotor funciona em uma velocidade elevada, próxima a velocidade síncrona (FITZGERALD, 2006). A velocidade síncrona é a velocidade de rotação do campo magnético girante, a qual é dependente do número de polos e da frequência em que o motor opera.

Podem haver mais de um par de polos nos enrolamentos, se distribuindo de forma alternada (um norte e um sul, como em um ímã). A velocidade síncrona é definida conforme mostra a equação 3. Onde n_s é a velocidade síncrona, f é a frequência da rede e p é o número de polos.

$$n_s = \frac{60 * f}{p} \quad (3)$$

Conforme se insere carga em um motor, sua velocidade diminui de intensidade. A diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade de operação de uma máquina é chamada de escorregamento do rotor (FITZGERALD, 2006). O escorregamento é comumente expresso como sendo uma fração da velocidade síncrona conforme mostra a equação 4. O escorregamento de uma máquina é comumente indicado no manual de cada motor para as condições de carregamento nominal.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4)$$

Onde:

s é o escorregamento da máquina

n_s é a velocidade síncrona

n é a velocidade de operação

O valor de escorregamento da máquina varia com a carga que é aplicada em seu eixo, portanto é um parâmetro usado no método das resistências, usado para estimar a temperatura de operação de um motor.

2.3.4- Circuito equivalente

Uma máquina de indução pode ser representada de forma equivalente por um circuito com parâmetros variáveis do primário para o secundário. A figura 5 mostra esse circuito equivalente. A partir do circuito equivalente é possível identificar como diversos parâmetros de um motor se relacionam.

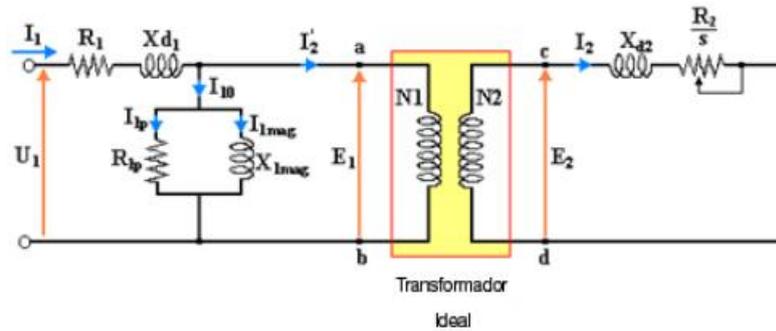


Figura 5- Circuito equivalente por fase de uma máquina assíncrona (WEG, 2015).

Na figura 4 temos que:

R_1 é a resistência estatorica

U_1 é a tensão estatorica

X_{d1} é a reatância estatorica

I_1 é a corrente estatorica

R_2 é a resistência retórica

I_{1p} é a corrente de perdas no ferro

X_{1mag} é a reatância de magnetização

I_2 é a corrente retórica

R_{1p} é a resistência de perdas no ferro

E_1 é a fem. estatorica

E_2 é a fem. retórica

Sabendo-se o circuito equivalente de um motor de indução, pode-se então estimar as perdas de potência nos mesmos, as quais são responsáveis pelo seu aquecimento e consequente atenuação de vida útil.

2.3.5- Perdas de potencia

Apesar de possuírem alta eficiência, máquinas elétricas não são capazes de converter 100% da potência consumida da rede em trabalho mecânico. A quantidade de energia elétrica que é convertida em energia mecânica pelo motor é chamado de rendimento da máquina (η) e pode ser calculado pela equação 5, onde P_{mec} é considerado a potência mecânica de saída da máquina e P_{el} a potência elétrica de entrada.

$$\eta(\%) = \frac{P_{mec}}{P_{el}} * 100 \quad (5)$$

A potência mecânica é proporcional à potência elétrica fornecida pela rede de alimentação e pode ser determinada se conhecendo as perdas que ocorrem na máquina. Segundo Werneck (2011), P_{mec} pode ser calculado pela equação 6, onde P_t são todas as perdas do motor. O valor de P_t é dado pela equação 7.

$$P_{mec} = P_{el} - P_t \quad (6)$$

$$P_t = P_{fw} + P_{fe} + P_s + P_r + P_{ll} \quad (7)$$

As perdas totais então dependem dos seguintes fatores:

- Atrito e ventilação (P_{fw}) - Ocorrem devido a fricção e as perdas aerodinâmicas causadas pelo atrito nas partes moveis da maquina
- Perdas no ferro (P_{fe}) - Ocorrem devido as correntes parasitas e histerese.
- Perdas ôhmicas (P_s e P_r) - São as perdas ôhmicas nos enrolamentos do estator e do rotor.
- Perdas adicionais (P_{ll}) - São causadas pelas correntes de carga nas demais partes de metal da máquina.

A figura 6 mostra um esquema que representa as perdas para um motor trifásico de indução.

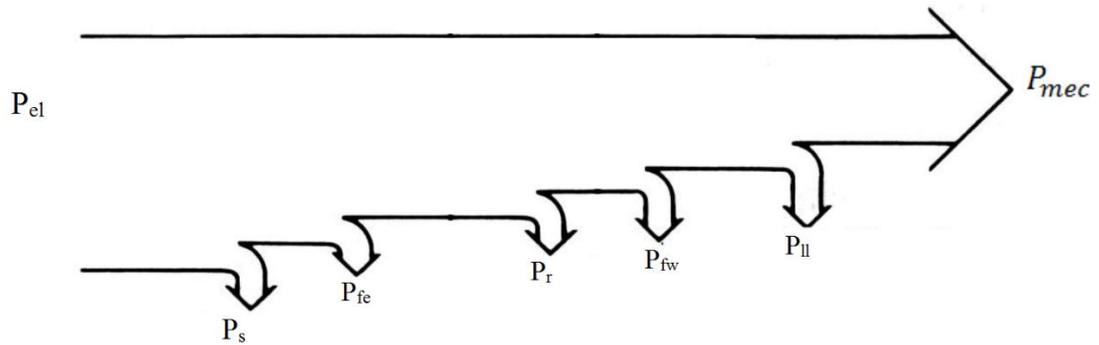


Figura 6- Esquema representativo das perdas em um motor trifásico de indução (FITZGERALD, 2008, modificado)

As perdas de potência no motor podem causar vibrações, ruído e provocar o aquecimento da máquina. Os efeitos das perdas de potência são indesejados e são os responsáveis por causar desgastes dos motores.

2.4- Conclusão do capítulo

O capítulo apresentou informações básicas sobre motores, necessárias para compreender os próximos capítulos do presente projeto. Deve-se compreender que as perdas de potência devido às resistências internas dos motores (conforme pode ser verificado na figura 5), provocam aquecimento dos mesmos. Essas perdas variam em função da corrente de funcionamento da máquina, que por sua vez é proporcional a carga aplicada. Maiores detalhes desta relação serão apresentados no capítulo 3.

CAPÍTULO 3- ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE MOTORES

3.1 Introdução

A vida útil de um componente é definida como o período de tempo desde o término de sua fabricação até o ponto onde ele não mais realiza a tarefa para a qual foi projetado (CHEBERLE, 2013). Esse período é variável de acordo com a aplicação do sistema e as condições nas quais ele está inserido.

Em motores, os materiais constituintes se deterioram com o tempo e com a aplicação contínua de carga. Os componentes que são mais susceptíveis a esse deterioramento são os rolamentos, as escovas e o isolamento das bobinas. Estes sofrem grande influência térmica, mecânica e química. Já aqueles têm como principais influências o ambiente (umidade, poeira), condições térmicas, elétricas e mecânicas (BRANCATO, 1992).

O presente capítulo faz um modelamento matemático do envelhecimento dos enrolamentos de um motor em função de parâmetros de fácil obtenção, como condição de carga, condições de partidas e do ambiente. O equacionamento aqui desenvolvido, leva em consideração que a manutenção foi feita conforme estipula o fabricante. Para que se possa avaliar se a manutenção está sendo feita com a periodicidade adequada, o Anexo A exibe alguns dados relativos ao tempo de manutenção, verificação e troca de alguns componentes de motores fornecidos pela fabricante WEG Motors. Para o caso de manutenção inadequada o anexo B apresenta algumas possíveis causas para falhas de motores.

3.2- Enrolamento das bobinas

Em um motor aberto, o isolamento está em direto contato com o meio e sua degradação é função da intensidade e duração de sua exposição. Em um motor fechado, o isolamento está parcialmente protegido do meio, portanto, tem os efeitos degradantes reduzidos.

Em um motor fechado, um dos principais fatores responsáveis pelo desgaste é o efeito térmico. Um aumento de temperatura é gerado quando se desenvolve um conjugado para acionar alguma carga mecânica que esteja acoplada ao eixo da máquina. Para conseguir encontrar a relação entre o aumento de carga e o aquecimento provocado, é necessário um modelo térmico.

Alguns isolamentos são mais resistentes ou mais sensíveis à variações de temperatura, portanto existe uma classificação dos materiais que os constituem, estas são chamadas classes de isolamento.

3.2.1- Classes de isolamento

A NBR-7094 classifica os materiais de isolamento em categorias, A, B, C, F e H. Essa classificação é dada pela temperatura de operação para a qual o isolamento tem vida útil de 20000h (SILVA e GONZALEZ, 2008). A tabela 3 mostra algumas características das classes de isolamento:

Classe de isolamento	Intervalo de Funcionamento (°C)	Temperatura nominal (°C)
A	105 – 129	105
B	130 – 154	130
F	155 – 179	155
H	180 – 220	180

Tabela 3- Classes de isolamento (WEG, 2015)

A terceira coluna da tabela indica outra nomenclatura comumente usada para designar as classes de isolamento, como por exemplo, classe A (105) ou classe B (130). Estes valores serão usados no cálculo de aquecimento dos enrolamentos.

Os tipos de isolamentos mais usados na fabricação de motores industriais são os de classe A, B e F (PAZZINI, 2012), cada tipo de isolamento é feito de diferentes tipos de materiais, conforme pode ser verificado na tabela 4. Dos materiais apresentados, verifica-se que a classe F suporta maior temperatura, pois é impregnado com verniz ou outra substância sintética.

Classes	Materiais que constituem os enrolamentos
Classe A	Tecidos de algodão, papel, fibras de celulose, seda e similares, todos eles impregnados com verniz.
Classe B	Mica, asbesto e fibras de vidro aglomeradas por substâncias orgânicas

Classe F	Os mesmos materiais da classe B impregnados com verniz ou outra substância sintética.
----------	---

Tabela 4- Materiais que constituem os enrolamentos de diferentes classes de isolamento.

3.3- Aquecimento

Segundo Pazzini (2012), WEG (2015) e Brancato (1992) o aquecimento dos enrolamentos de um motor é o fator primordial que determina sua vida útil. Pazzini (2012) ainda afirma que a vida de uma máquina termina quando ocorrem falhas em seu enrolamento pois o mesmo representa cerca de 50% do valor do custo do motor.

O aquecimento de um motor é consequência da perda de potência elétrica vinda da rede por meio do efeito Joule e devido a atritos, o motor também troca calor com o meio que está inserido, por métodos de radiação, condução e convecção. O aferimento da temperatura de funcionamento do motor para determinada carga é necessário para verificar se o motor está operando dentro da faixa de temperaturas permitidas pela sua classe de isolamento.

3.3.1- Métodos de medição de temperatura em motores

A NBR-7094 estabelece alguns métodos usados para medir a temperatura de enrolamento dos motores (PAZZINI, 2012), as maneiras mais comuns para determinar o aquecimento de uma máquina, de forma experimental, são pelos métodos dinamométrico, “back-to-back”, gráfico e método da variação de resistência (BAUER, 2008).

- **Método dinamométrico**

É um dos métodos mais usados (BAUER, 2008), principalmente por reproduzir as condições de trabalho da máquina durante a realização do ensaio. A figura 7 mostra um motor de 600kW acoplado a um dinamômetro em um laboratório da WEG.



Figura 7- Motor de 600KW acoplado a um dinamômetro (BAUER, 2008).

Neste método torque nominal é aplicado diretamente à ponta de eixo da máquina, sendo esta alimentada com tensões e frequências nominais. Um dinamômetro, como o visto na figura 8, realimenta as demais máquinas constituintes do sistema de teste, conforme a figura 8. As perdas do sistema são supridas por alimentação externa e constituem cerca de 20% da potência nominal da máquina (CISZ, 2008). O aquecimento das máquinas é estimado de forma proporcional as perdas de potência do sistema.

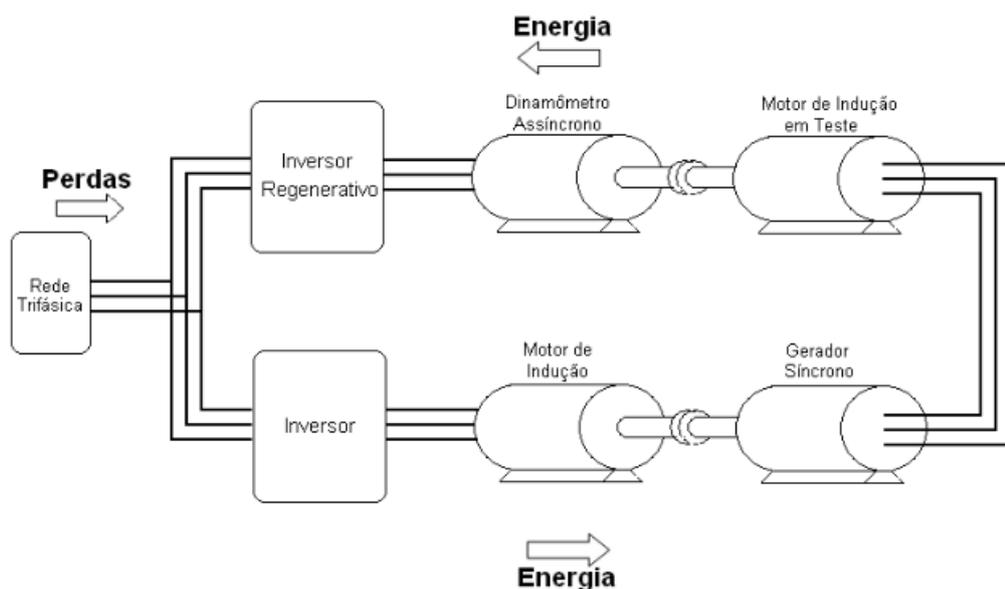


Figura 8- Sistema de recuperação de energia para o método dinamômetro (CISZ, 2008).

A medição por este método se torna custosa quando necessita de equipamentos superiores a 2MW (ÇOLAK et al, 1996) o que a torna inviável em algumas ocasiões.

- **Método “back to back”**

O método é conhecido por ser mais econômico que o dinamômetro e apresentar alta precisão (ÇOLAK et al, 1996). Para a realização do ensaio, duas máquinas de indução de características semelhantes são acopladas mecanicamente a uma mesma fonte de alimentação.

Usa-se um redutor de relação variável, conhecido como *epicycle gearbox*. Este possui relação de rotação entre os eixos singelamente diferenciada, de modo que a relação é ajustável. Tal característica permite que uma máquina opere na condição nominal de escorregamento, de forma que a outra trabalhe como gerador (CISZ, 2008). O balanço de energia permite determinar as perdas do sistema, as quais são proporcionais ao aquecimento gerado. A figura 9 ilustra o diagrama de montagem desse método de medição.

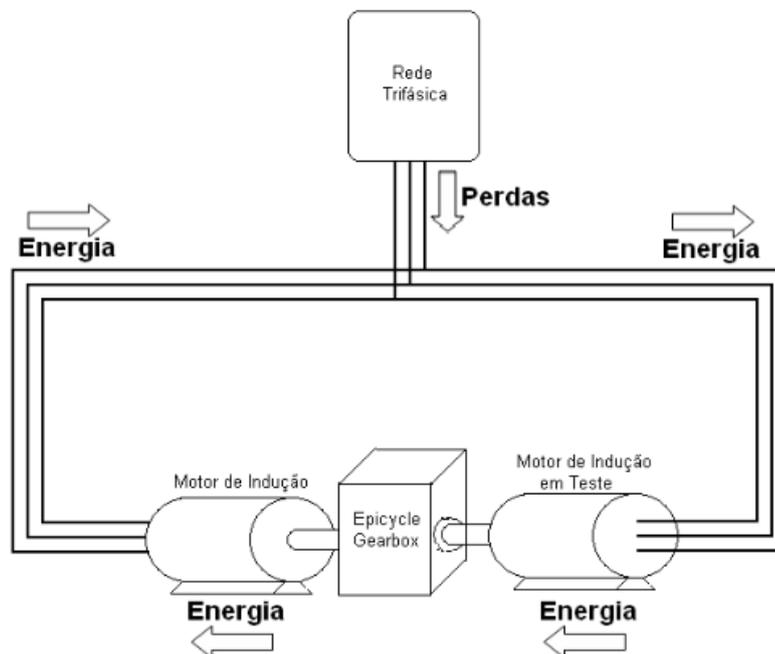


Figura 9- Sistema de ensaio “back to back” com redutor de relação variável (CISZ, 2008)

- **Método Gráfico**

Este método é empregado quando a máquina de teste não tem capacidade de carga nominal totalmente suprida por dinamômetro ou outra fonte de alimentação disponível para realização do ensaio (CISZ, 2008). Para o teste é feito um ensaio a vazio e a carga (mínimo de 70% da nominal). Com os valores de temperatura obtidos nessas situações é feito um cálculo de extrapolação para se calcular valores de temperatura em outras condições de carga, conforme se verifica na figura 10.

Para este cálculo admite-se que a elevação de temperatura é proporcional ao quadrado da corrente de ensaio, ou seja, é um método de cálculo que tem como principal parâmetro a elevação de corrente da máquina. Essa aproximação é feita pois assume-se que determinando o ângulo de crescimento da corrente não é dependente da tensão injetada (CISZ, 2008), mas cresce de acordo com o aumento da carga. Uma forma de verificar os resultados é através de um gráfico, o que justifica o nome do método.

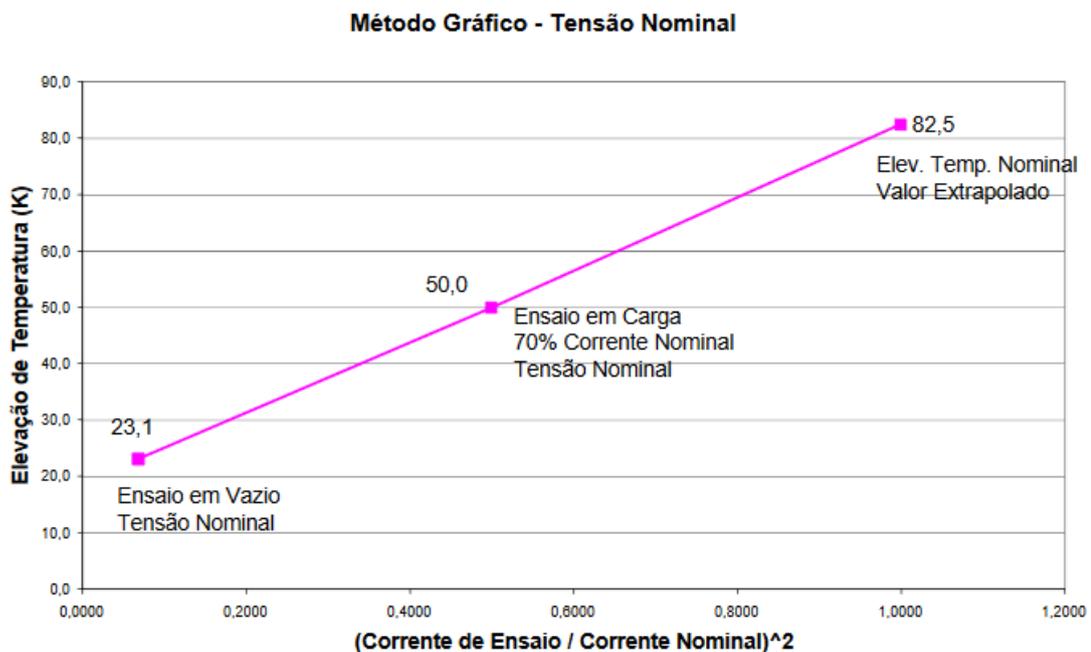


Figura 10- Exemplo de cálculo de temperatura usando o método Gráfico (CISZ, 2008).

- **Método da variação de resistência**

Este método de ensaio é baseado na teoria de circuitos elétricos. Um motor de indução pode ser representado por um circuito equivalente, conforme foi verificado na figura 5 do capítulo anterior. O circuito equivalente pode ser simplificado ao se converter as reatâncias e resistências após o transformador ideal considerado no circuito para antes do mesmo, adequando-as conforme as relações de transformação (KOSOW, 2008). O circuito

simplificado pode ser verificado na figura 11. Nota-se a ausência de um transformador nesse modelo de circuito.

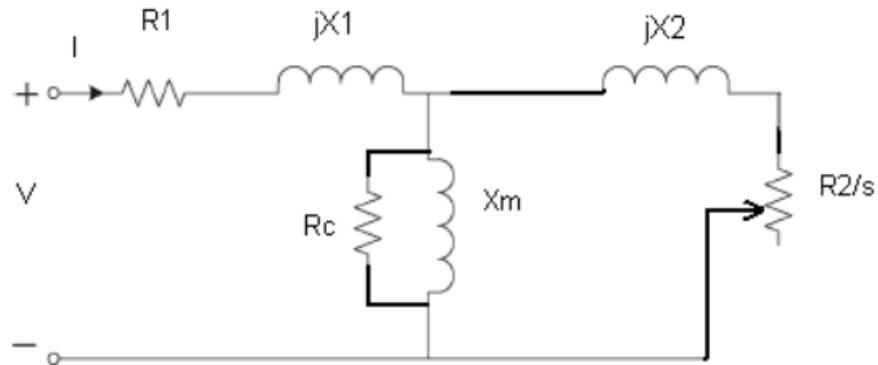


Figura 11- Circuito equivalente de um motor de indução (BAUER, 2008)

Para o circuito da figura 11, tem-se que:

R_1 é a resistência do estator;

X_1 é a reatância de dispersão do estator;

R_2 é a resistência do rotor referida ao estator;

X_2 é a reatância de dispersão do rotor referida ao estator;

X_m é a reatância de magnetização;

R_c é a resistência de perdas no ferro.

Com o circuito equivalente se avalia parâmetros como as perdas, corrente no estator, conjugado e desempenho.

Como a resistência do rotor é calculada por (R_2/s) , essa resistência assume valores elevados em situações nas quais o valor de s (escorregamento) se aproxima de zero, ou seja, condições em que a máquina opera a vazio. O valor de duas resistências elétricas na configuração em paralelo, onde uma possui valor elevado em relação a outra, é proporcional à uma resistência equivalente cujo valor de resistência é próximo ao valor da resistência mais baixa, logo para a condição a vazio toda corrente fluiria pelo ramo magnetizante (R_c e X_m). Com isso o circuito da figura 11 pode ser representado pelo circuito da figura 12.

Na condição de rotor bloqueado acontece o oposto, tem-se que $s=1$, portanto o valor da resistência do rotor se aproximaria de 0, e o circuito equivalente pode ser visto conforme a figura 13.

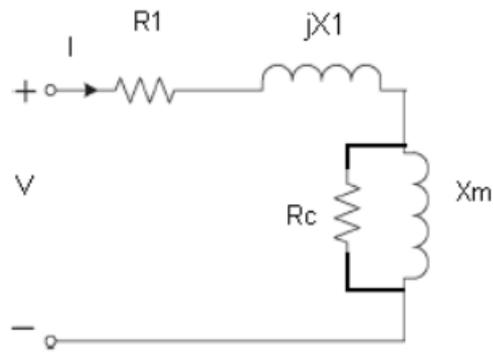


Figura 12- Circuito equivalente de um motor a vazio (BAUER, 2008)

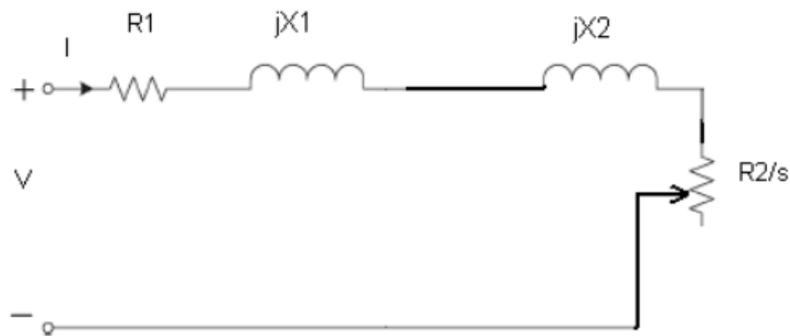


Figura 13- Circuito equivalente de um motor com rotor bloqueado (BAUER, 2008)

Conforme foi verificado, a resistência do rotor varia proporcionalmente ao valor de escorregamento da máquina, sendo esta proporcional à carga aplicada. O método de cálculo consiste em determinar a elevação de temperatura de acordo com a variação do valor de resistência do rotor, conforme mostra a equação 8 (BAUER, 2008).

$$\Delta T = \frac{R_q - R_f}{R_f} * T_f + (T_f - T_q) \quad (8)$$

Onde:

ΔT É a elevação de temperatura em K

R_m é o valor da resistência quente do enrolamento

R_f é o valor de resistência frio do enrolamento

T_q é a temperatura do ambiente no momento da medição de R_q em °C

T_f é a temperatura do ambiente no momento da medição de R_f em °C.

3.3.2 Modelagem do aquecimento de motores

Os métodos descritos até agora são todos experimentais; mas para se atingir o objetivo do presente trabalho, deve-se encontrar uma modelagem computacional para o aquecimento de motores de forma precisa e com parâmetros que sejam possíveis e fáceis de serem calculados pelos usuários do software proposto. Tal modelo será descrito nas próximas seções deste capítulo.

3.3.2.1- Modelagem do aquecimento dos enrolamentos devido às condições de carga

Jocélio (2008) realizou um trabalho de modelagem computacional da variação de temperatura em motores do tipo gaiola, e mostra que a análise do sistema de troca de calor do motor com o ambiente é complexa, pois existe troca de calor com o núcleo, com o ar e com os enrolamentos de cobre. Porém ele conclui que o principal responsável pelo aquecimento do isolamento de um motor é o aumento de corrente produzido proporcional a carga em seu eixo.

Brancato (1992) propõe um equacionamento simplificado do aquecimento de motores semelhante a equação 7, em que a temperatura de um motor pode ser calculada em função de sua carga e classe de isolamento, conforme mostra a equação 9.

$$T = F * \Delta T + 40 \quad (9)$$

Onde:

T é a temperatura dos enrolamentos.

F é um fator de perda associado a carga solicitada conforme a tabela 4.

ΔT é a variação de temperatura permitida.

Condições de cargas do motor (%)	Fator de perda
150	2.12
125	1.46
115	1.30
110	1.19
100	1.00

90	0.88
75	0.73
50	0.52

Tabela 5- Fator de perda em função das condições de carga (BRANCATO, 1992)

Para condições de carga que não se encontram na tabela 5, pode-se fazer uma interpolação com os fatores imediatamente superior e o inferior, de forma a encontrar o ponto desejado. Para valores fora do intervalo deve-se fazer uma extrapolação para se encontrar o valor do fator de perda.

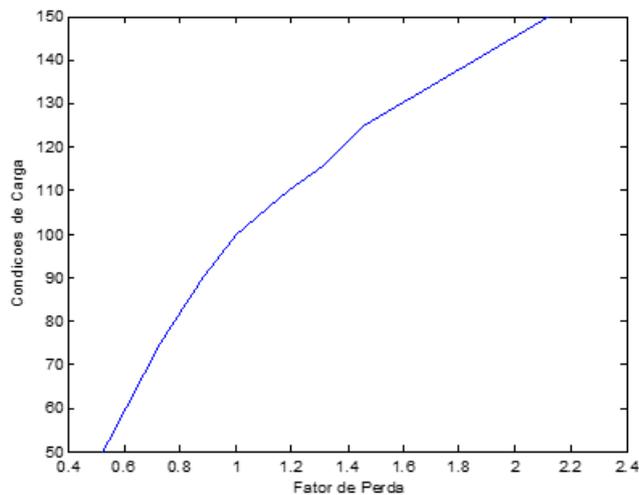


Figura 14- Fator de Perda em função das condições de carga

Com o uso do software MATLAB foi possível visualizar por meio de um gráfico a forma como o valor de F varia em função da carga aplicada (figura 14). Foi então calculado uma equação para modelar o valor de F (equação 10).

$$F = 0,0156C - 0,4739 \quad (10)$$

Os valores de ΔT da equação 9 são a variação de temperatura permitida para cada classe de isolamento. Essa variação é definida conforme mostra a tabela 6 (WEG, 2003). Nota-se que ΔT é dado pela temperatura da classe de isolamento menos 40°C , por exemplo: Classe A (105), $105-40$ é igual a 65.

Classe de isolamento	ΔT
A	65
B	90
F	115
H	140

Tabela 6- Valores de variação de temperatura para as classes de isolamento

As variações de temperatura aqui mostradas são para quando o motor se encontra em regime permanente, ou seja, sua temperatura não apresenta grandes variações. Uma análise diferenciada deve ser feita para períodos transitórios, como o de partida.

3.3.2.2 Aquecimento devido a partida de motores

O momento da partida de um motor é um período crítico a ser analisado quando se trata de degradação de motores, pois exige um valor de corrente elétrica muito grande para retirar um motor da sua inércia. O tempo de partida, período de existência da corrente de partida, deve ser o mínimo possível (WEG, 2003). Várias partidas em um pequeno intervalo de tempo podem fazer com que o motor se sobreaqueça e não tenha tempo de esfriar corretamente. A figura 15 mostra uma curva de aquecimento de um motor que foi acionado frequentemente, de modo que sua temperatura rapidamente ultrapassou o limite crítico.

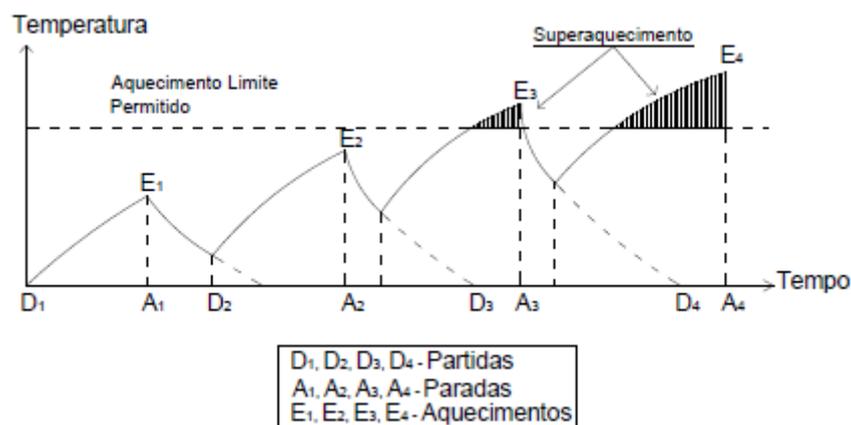


Figura 15- Curva de aquecimento de um motor devido a partidas frequentes (ARAUJO et al, 2010- modificado)

3.3.2.2.1- Modelagem matemática do aquecimento durante a partida

Durante uma partida, o motor aquece devido ao efeito de corrente de partida, porém ele troca temperatura com o ambiente em que está por meio de radiação térmica e convecção. Quando a taxa de energia dissipada para o meio se torna igual à absorvida pelo motor, ocorre o equilíbrio térmico e a máquina passa a apresentar temperatura com pouca variação (considerando que a carga seja constante) (BRANCATO, 1992).

Gray (1913) faz uma análise da forma em que uma máquina aumenta sua temperatura devido ao atrito e a corrente de partida até atingir regime constante, quando então passa a ser considerada como a temperatura de operação. Durante esse período transitório, o aquecimento do motor é calculado pela equação 11.

$$T = 2,3 * \frac{10^4}{(5,061 * 10^{-4} * D)^2} \quad (11)$$

Na equação 11:

T é o aumento de temperatura

D é a densidade de corrente por mm² de cobre nos enrolamentos.

Para se calcular o valor de aquecimento durante a partida de um motor, deve-se calcular o valor de D. Segundo o Manual de Bobinagem da WEG (2013), D assume o valor de 0,1429mm²/A para motores com potência inferior a 10CV; 0,200mm²/A para os de potência entre 10 e 50CV. Para os de potência superior é necessário consultar o fabricante, devido a peculiaridades de cada motor.

O valor de D obtido por WEG (2013) diz respeito a situação de regime permanente da máquina. Admitindo que a secção transversal dos enrolamentos da máquina seja constante, o valor de D é calculado em função da corrente. Como a relação de D é inversamente proporcional ao valor da corrente, pode-se calcular o valor da densidade de corrente para a situação de partida segundo a equação 12.

$$\frac{I_{pmedio}}{I_n} = \frac{D_{nominal}}{D_{partida}} \quad (12)$$

Como a corrente de partida varia até entrar em regime permanente, é necessário determinar um valor médio da mesma, para que se possa utilizar a equação 11 e determinar o

aquecimento. Segundo o teorema de integrais para valores médios (STEWART, 2005) o valor médio de uma função ($F(x)$) no intervalo $[a, b]$ pode ser dado pela equação 13.

$$F_{medio} = \frac{1}{b-a} \int_a^b F(x) * dx \quad (13)$$

Seja t_f e t_0 o intervalo de tempo necessário para partir uma máquina, o valor médio da corrente de partida será definido pela equação 14.

$$I_{pmedio} = \frac{1}{t_f-t_0} \int_{t_0}^{t_f} I(t) * dt \quad (14)$$

3.3.2.2.1.1 Comportamento da corrente em diferentes métodos de partida

Para determinar o valor de I_{pmedio} deve-se analisar como a corrente se comporta durante a partida da máquina. Portanto deve-se estudar como a corrente varia para cada forma de partida. Os métodos de partida são diversos, como partida direta, estrela-triângulo, partida compensadora ou os métodos de partida digitais, como a partida com uso de “soft-starter”.

- **Partida direta**

E o método de partida mais simples, ele consiste em acionar o motor diretamente a rede. E utilizado quando a corrente nominal da máquina não é tão elevada e não supere o máximo permitido pela concessionária local.

A corrente de partida direta possui valor de pico de 6 a 8 vezes o valor da corrente nominal (FRANCHI, 2008) e diminui sua intensidade a medida em que o motor ganha velocidade, seu comportamento pode ser visto na figura 16.

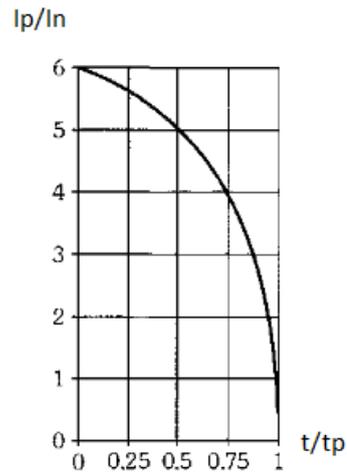


Figura 16- Relação da variação de corrente em função do tempo de partida direta (FRANCHI, 2008)

Na figura 16, I_p/I_n é a relação de corrente de partida pela nominal, e t/t_p é a relação do tempo pontual pelo tempo total de partida.

Usou-se o MATLAB, suas funções gráficas e de interpolação para determinar a corrente de partida direta descrita por Franchi (2008), essa função é dada pela equação 16. Para situação descrita na figura 12, onde I_p/I_n tem valor de pico igual a 6, a equação 16 gera um gráfico verificado na figura 13.

$$\frac{I_p}{I_n}(t) = I_{pmax} - \frac{I_{pmax} - I_n}{I_n} * \left(\frac{t}{t_{partida}} \right)^4 \quad (15)$$

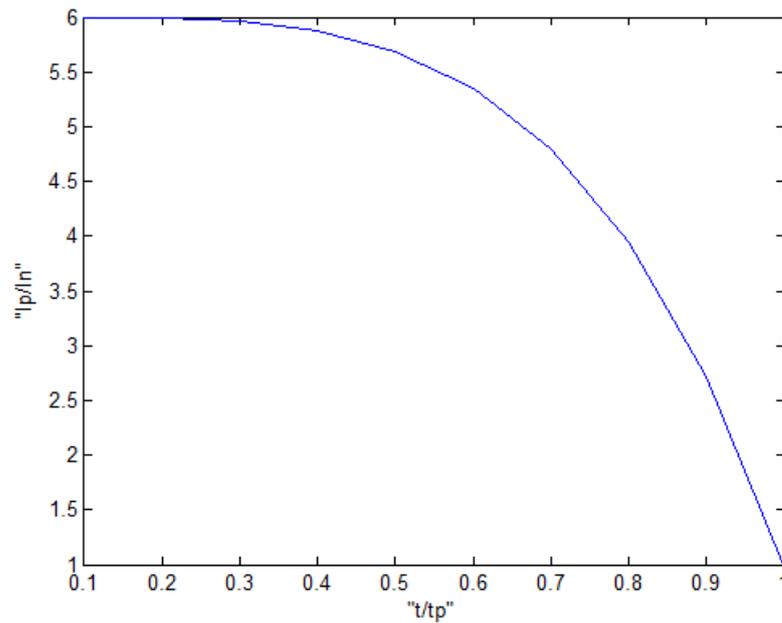


Figura 17- Valores de I_p/I_n de acordo com a equação 15 para $I_{pmax}=6$

A partir da equação 15, pode-se aplicar o teorema de integrais para valores médios e determinar o valor de corrente médio durante uma partida direta. O valor médio da corrente para partida direta é dado pela equação 16.

$$I_{pmedio} = I_{pmax} - 4 * \frac{I_{pmax} - I_n}{I_n} / t_{partida} \quad (16)$$

- **Partida estrela-triângulo**

Este é um método onde o motor é alimentado com uma redução na tensão durante sua partida. Ele parte com uma tensão igual a 58% do valor nominal. Após um intervalo a ligação que antes era em estrela é convertida para triângulo, assumindo tensão nominal.

Esse tipo de ligação permite uma redução na corrente de partida de aproximadamente 33% do valor da corrente em partida direta (FRANCHI, 2008). Em função dessa redução de corrente, o conjugado da máquina durante a partida também é reduzido, o que restringe esse tipo de ligação a situações onde o conjugado de carga durante a partida não seja elevado, como em situações de partidas a vazio.

A comparação da corrente durante a partida para ligação estrela triângulo e da corrente durante a partida direto pode ser visto na figura 18. Quando atingido cerca de 85% da

velocidade nominal, a ligação foi convertida para triângulo. Normalmente essa comutação é feita a partir de um temporizador.

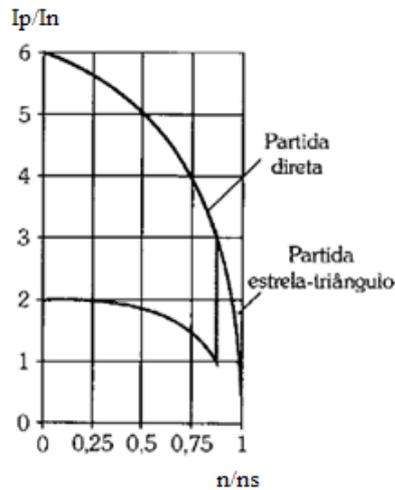


Figura 18- Relação de correntes de partida sobre corrente nominal em da velocidade de operação por nominal (FRANCHI, 2008).

Framchi (2008) estima que o valor de corrente média para essa forma de partida é de aproximadamente 33% do valor médio da corrente de partida direta. Esse valor será considerado no presente trabalho

- **Partida por chave compensadora**

Esse tipo de partida usa um autotransformador ligado em série com as bobinas do motor, de forma que o motor começa a partida com tensão reduzida e após a partida recebe tensão nominal.

O autotransformador usado para a partida do motor possui TAPs operacionais, nos valores geralmente de 50%, 65% e 80% o valor da tensão aplicada na fase (FRANCHI, 2008). Dessa forma, tanto o conjugado motor da máquina como a corrente de partida ficam reduzidos em função do TAP escolhido para a operação.

A corrente de partida é diretamente proporcional ao TAP utilizado, sendo que esta varia entre 140 a 400% do valor da corrente nominal (FRANCHI, 2008). A comparação do comportamento da corrente por partida direta e por partida compensada pode ser visto na figura 19.

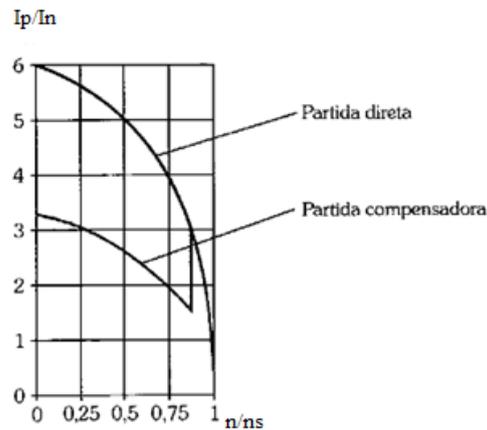


Figura 19- - Comparação da corrente de partida direta e da partida compensadora (FRANCHI, 2008)

Para esse tipo de partida, o valor médio de corrente será determinado pela equação 17. Sendo I_{pmedio} o valor de corrente de partida médio para a chave compensadora, $I_{pmediodireto}$ será o valor da corrente média para a partida direta e TAP o valor de TAP em porcentagem escolhido para a partida.

$$I_{pmedio} = I_{pmediodireto} * TAP \quad (17)$$

- **Partida por soft starter**

“Soft starters” são dispositivos eletrônicos que permitem a aceleração e desaceleração progressiva de motores, de modo que as condições de velocidade e conjugado são controladas de acordo com as condições de operação. Com o uso desses dispositivos é possível ter um controle de algumas variáveis durante a partida, como corrente, tensão e tempo.

Devido as condições de partida por “soft-starter” possuírem condições controladas pelo operador da máquina, para o software proposto, o valor de corrente de partida médio deverá ser inserido pelo usuário.

3.3.2.3 Aquecimento devido ao desbalanceamento de fases

Quando tensões de linha aplicadas a motores polifásicos estão desbalanceadas, correntes adicionais no enrolamento do estator são geradas. Dessa forma, o aquecimento proveniente do motor para operação com tensões desbalanceadas será maior que para as condições nominais. A figura 20 apresenta um gráfico que ilustra a perda de potência para determinado desbalanceamento de fases.

Segundo Bonnet (1999) desbalanceamentos superiores a 5% não são recomendados, pois reduzem consideravelmente a potência da máquina. Uma máquina de 10KW funcionaria com potência equivalente de 7,5KW, ou seja, teria 25% a menos de potência do que foi projetada, fazendo com que não operem corretamente, além de provocar sobreaquecimento.

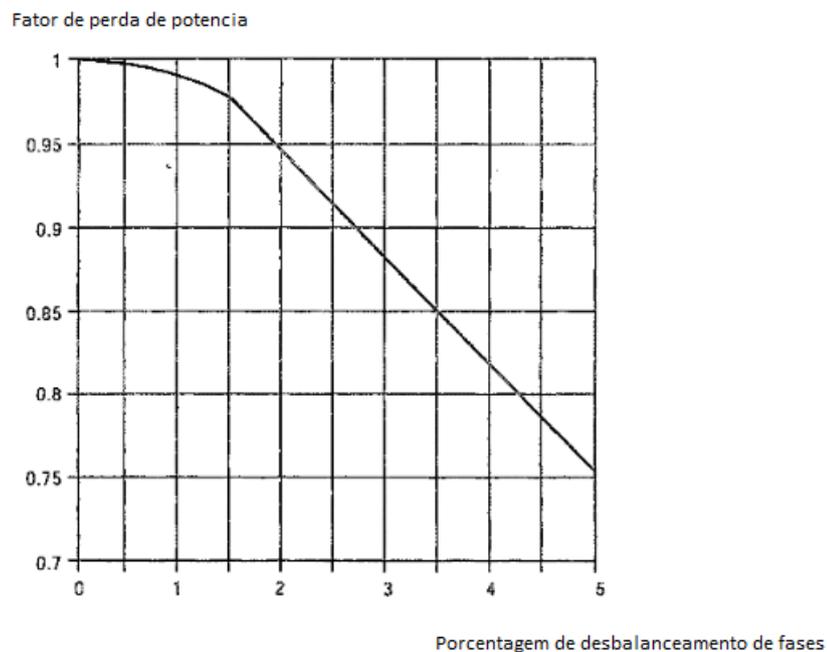


Figura 20- Fator de perda de potência para fases desbalanceadas (BONNETT, 1999)

Bonnett (1999) assume que a relação entre o desbalanceamento de fases e o aquecimento dos enrolamentos pode ser dado pela equação 18. Onde T é o aumento de temperatura e %V é a porcentagem de desbalanceamento das fases do motor.

$$T = 2 * \%V^2 \quad (18)$$

3.4 Modelagem da estimativa da vida útil de motores

Conforme visto nas seções anteriores, a temperatura é um fator importante na determinação da vida útil de um motor. Além do efeito causado pelo aquecimento, o presente trabalho também considera a atenuação da vida útil de motores devido às condições do meio e a temperatura ambiente em que o motor opera.

3.4.1- Modelagem da estimativa da vida útil de motores devido ao aquecimento

Uma análise específica que relacione a vida útil do material isolante com o efeito de tempo e temperatura começou a ser feita por Mottlinger em 1913 (BRANCATO, 1992 apud MOTTINGER, 1913), o qual observou que a vida do isolamento de uma máquina diminui pela metade a cada incremento de 10° C.

Brancato (1992) usa a análise da variação da vida útil conforme a equação da constante de velocidade de Arrhenius, essa análise será considerada no presente trabalho. A equação de Arrhenius é dada pela equação 19:

--

$$L = B * e^{\frac{\Phi}{k*T}} \quad (19)$$

Onde:

L é a vida em unidade de tempo (hora, minuto, segundos).

B é uma constante que geralmente é determinada experimentalmente.

Φ é a energia de ativação

T é a temperatura absoluta, em Kelvin

K tem valor numérico de 0.00008617 (eV/K) e é chamada de constante de Boltzmann.

Usando logaritmo na equação 19, obtém-se a equação 20.

$$\ln(L) = \ln(B) + \frac{\Phi}{k*T} \quad (20)$$

Pode-se então plotar a equação (19) em função da temperatura de operação, conforme se verifica na figura 21.

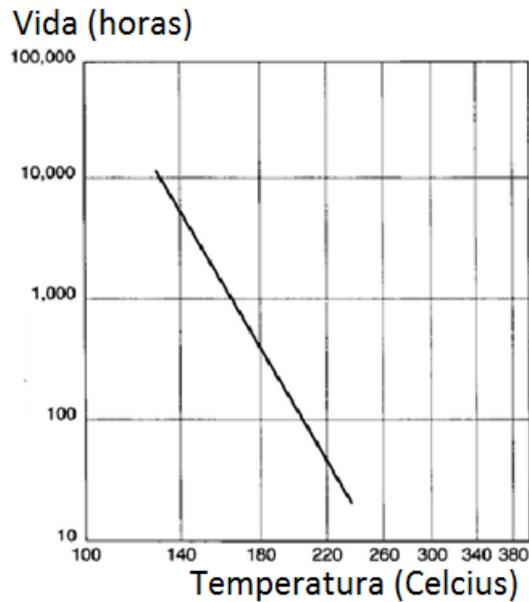


Figura 21- Variação da vida de uma máquina em função da temperatura (MAMEDE, 2007)

A vantagem de se usar a fórmula de Arrhenius é que ela possibilita a visualização do processo de desgaste da máquina em temperaturas superiores às nominais de operação, o que facilita um trabalho de simulação. A possibilidade de simular as condições de degradação da máquina permite com que, conforme BONNETT (2000) propõe, a variação da vida útil de uma máquina ganhe um indicador mais preciso, o HIC. Do inglês, HIC significa *halving interval* e corresponde à variação de temperatura que será necessária para alterar o tempo de vida de um isolamento a 50% do valor nominal. Esse indicador será usado em equacionamentos no presente trabalho e pode ser verificado na tabela 6.

Classe de isolamento	HIC
A	14
B	11
F	9,3
H	8

Tabela 7- Valores de HIC para diferentes classes de isolamento (BRANCATO, 1992)

Para validação da formulação de Arrhenius para modelagem do sistema de estimação de vida útil de um motor, diversos isolamentos devem ser submetidos a diferentes temperaturas e terem valores de vida útil medidos, o que torna necessário o uso de um grande

número de motores para o teste, o que foi confirmado pelo trabalho de (BRANCATO, 1992 apud CYPHER, 1952). A figura 22 mostra os dados obtidos experimentalmente quanto as classes de isolamento A e F.

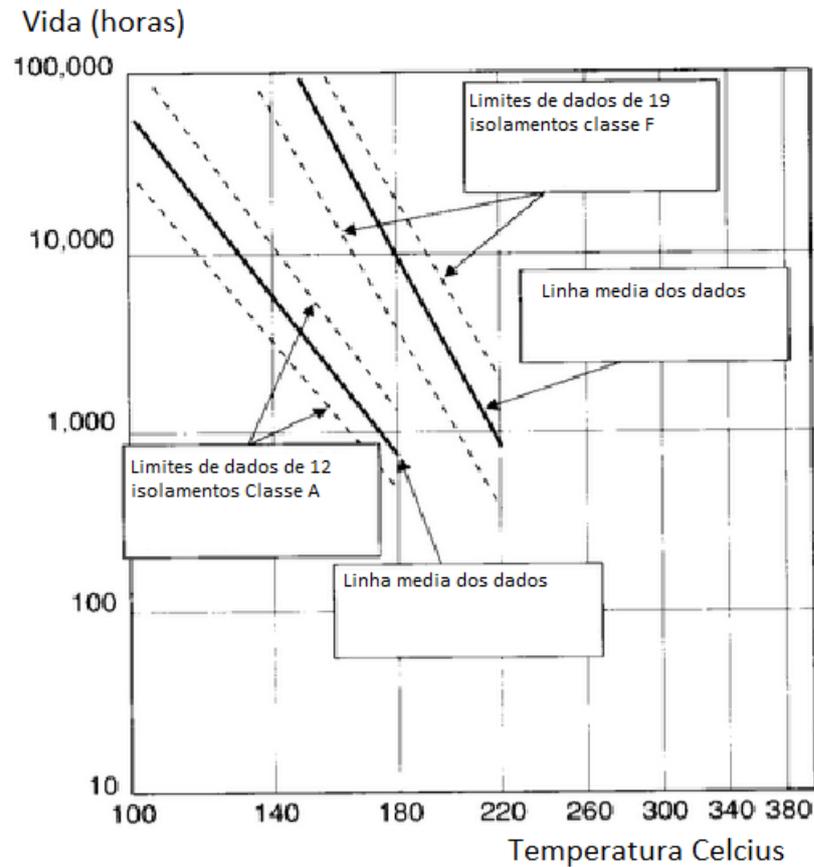


Figura 22- Resultado da análise térmica para classes de isolamento A e F (BRANCATO, 1992).

Pela equação de Arrhenius (equação 18), a variação a vida útil do isolamento pode ser dada pelas equações 21 e 22, onde a equação 21 estima o tempo de vida para cargas menores que a nominal, enquanto a 22 estima o tempo de vida para cargas maiores.

$$L = 20000 * e^{(T-T_c)/HIC} \quad (21)$$

$$L = \frac{20000}{e^{(T-T_c)/HIC}} \quad (22)$$

O valor de T é o valor de aquecimento do motor (pode ser calculado pela equação 8) e Tc é a temperatura da classe de isolamento. A constante 20000 foi usada pois a estimativa da vida do isolamento para carga nominal é de 20000h.

3.4.2- Modelagem de atenuação de vida útil devido a partidas

O aquecimento de uma máquina é mais acentuado durante sua partida, sendo necessário que se contabilize o efeito da atenuação de vida útil provocada por esta. Brancato (1992) propõe uma aproximação para calcular o efeito das partidas conforme se vê na equação 23.

$$A = e^{(T)/HIC} * tp \quad (23)$$

A variável A da equação 23 será chamada de atenuação de vida útil, T indica o aquecimento que é calculado pela equação 11 e tp é o tempo de partida. O valor de A vem a ser subtraído da estimativa total de vida útil de um motor.

Se uma máquina, por exemplo, tem o valor de aquecimento durante a partida igual a 50°C, HIC igual a 10 e gasta 30s para partir, o valor de A calculado é dado por:

$$A = e^{\frac{50}{10}} * 30 = 148 * 30 = 4440s$$

Para as condições analisadas, o valor de atenuação devido a partida será de 4440s, ou 1,23h. O que indica que para cada partida dessa máquina ela terá mais de uma hora de atenuação a ser subtraído do seu tempo total de vida útil.

3.4.3- Efeito devido as condições do ambiente

O ambiente em que o motor está inserido pode fazer com que sua vida útil varie de forma considerável (WEG, 2003). Para a modelagem da forma como o meio influencia a vida de um motor, o presente trabalho faz duas análises separadas. A que relaciona as condições físicas do meio (poeira, umidade, vibração, ambiente corrosivo) e a condição da temperatura do ambiente em que a máquina está.

3.4.3.1 Condições do meio

Durante o dimensionamento de uma máquina para um ambiente de trabalho, as condições do meio são analisadas. Fabricantes possuem motores produzidos com proteção para cada tipo de ambiente. Uma classificação para a proteção do motor para o ambiente no qual está inserido é o grau de proteção (IP). Esses valores são regulamentados pela norma NBR IEC 60529. Existem graus de proteção contra a penetração de objetos sólidos e contra a penetração de água, conforme mostram as tabelas 8 e 9 respectivamente (WEG, 2003).

Numeral	Grau de Proteção
0	Não protegido
1	Protegido contra objetos sólidos com diâmetros maiores de 50mm
2	Protegido contra objetos sólidos com diâmetro maior que 12mm
3	Protegido contra objetos sólidos com diâmetro maior que 2,5mm
4	Protegidos contra objetos sólidos com diâmetro maior que 1mm
5	Protegido contra poeira
6	Totalmente vedado contra poeira

Tabela 8- Graus de proteção contra corpos sólidos em motores

Numeral	Grau de Proteção
0	Não protegido
1	Protegido contra gotas de água caindo verticalmente
2	Protegido contra gotas de água caindo com inclinação de até 15°
3	Protegido contra aspersão em água
4	Protegido contra projeção de água

5	Protegido contra jatos de agua
6	Protegido contra jatos potentes de agua
7	Protegido contra imersão temporária em agua
8	Protegido contra imersão contínua em agua

Tabela 9- Graus de proteção contra a penetração de agua em motores

O grau de proteção de um motor é então definido pelos algarismos da primeira coluna da tabela 7 e 8, sendo que o primeiro algarismo se refere à proteção contra a penetração de corpos nos motores e o segundo contra a penetração de agua. Por exemplo, um motor com IP54, é um motor protegido contra poeira e contra projeção de agua.

O grau de proteção de um motor pode também influenciar a temperatura de seu enrolamento. Um motor totalmente aberto fica em contato direto com o meio, de forma que ocorre uma troca calor com o ambiente por radiação e convecção mais intensa. Já um motor com grau de proteção elevado, apesar de resistente a condições adversas do meio, troca menos calor com o ambiente, portanto aquece mais (BRANCATO, 1992).

Levando em consideração que o motor seja dimensionado corretamente. Em um ambiente agressivo, apresentara classe de isolamento elevada, portanto estará sujeito a redução de vida útil devido ao menor resfriamento. Em um ambiente limpo e seco, possuirá menor grau de proteção, portanto terá maior resfriamento. Sendo que a variação de sua vida útil está diretamente proporcional ao ambiente em que está inserido.

No trabalho de (SILVA et al, 2008), ele apresenta um equacionamento para as condições ambientais de acordo com a equação de Arrhenius (equação 19). De acordo com esta, a vida útil de um motor é determinada pelo expoente da equação. Este expoente foi chamado então de fator M.

As equações 24 e 25 calculam então o valor de M para as condições de temperatura.

$$M = (T - T_c)/HIC \quad (24)$$

$$M = -(T - T_c)/HIC \quad (25)$$

O valor negativo de M indica uma atenuação na vida útil do motor, enquanto um valor positivo mostra um aumento na mesma. A equação 19 pode, portanto, ser reescrita como a equação 26.

$$L = B * e^M \quad (26)$$

A classificação dos ambientes para valores de M feitos por Silva et al (2008) são mostrados na tabela 10. É possível observar que para ambientes muito agressivos e corrosivos o modulo do valor de M aumenta, o que permite que valores maiores de M sejam inferidos para condições extremas de degradação, como motores submersos e submetidos a poeira.

Fator M	Descrição do Ambiente
0	Limpo e seco
-0,5	Limpo, com ar condicionado
-0,75	Limpeza variável e umidade
-1,0	Ambiente agressivo

Tabela 10- Fator M para diferentes condições de ambiente

Para um motor submetido a um ambiente agressivo por exemplo, sua vida útil seria afetada por um valor de e^{-1} , ou seja, reduziria para 37% do valor de uma máquina em um ambiente limpo e seco.

3.4.3.2- Condições da temperatura ambiente

Segundo WEG (2003) a temperatura ambiente de trabalho para um motor deve ser de no mínimo -20°C e no máximo 40°C . Para valores fora desse intervalo o funcionamento da máquina pode ser comprometido, o que implica em um uso de regulação de temperatura caso seja necessário operar em um ambiente fora desse intervalo (ARAUJO et al 2010).

Brancato (1992) propõe uma análise matemática para calcular como a variação da temperatura ambiente pode afetar o tempo de vida de um motor. Segundo essa análise os dados de temperatura e tempo de vida útil a uma dada temperatura podem ser convertidos para um tempo de vida equivalente em temperatura diferente, conforme ilustra a equação 27, também derivada do método de Arrhenius.

$$\ln\left(\frac{t_r}{t_i}\right) = \frac{\Phi}{k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_i}\right) \quad (27)$$

Onde:

t_r é o tempo na temperatura T_r , em kelvin;

t_i é o tempo na temperatura T_i , em kelvin.

As temperaturas T_i e T_r são as temperaturas em que foi feita a análise e a temperatura que se deseja obter a análise, respectivamente. A equação 9 foi desenvolvida para um ambiente a 40°C, caso o motor esteja operando em temperatura inferior, sua vida será prolongada, caso esteja em temperatura superior, atenuada.

A constante de Boltzmann (k) não altera seu valor independentemente do tipo de classe de isolamento (0,00008617eV/K), já a energia de ativação (Φ) apresenta valores que variam conforme a classe de isolamento segundo (BRANCATO, 1992). Os valores de Φ estão representados na tabela 10.

Classe de isolamento	Φ
A	0,60
B	0,80
F	1,05
H	1,38

Tabela 11- Valores de Φ para diferentes classes de isolamento

Com os valores de k e Φ é possível, através da equação 26, converter o valor obtido pela equação 19 para um valor equivalente na temperatura onde o motor se encontra inserido.

3.5- Conclusão do Capítulo

Foi mostrado nesse capítulo a forma como será equacionado a vida útil de um motor tendo como parâmetro principal a durabilidade de seus enrolamentos, os quais podem ser constituídos de diferentes materiais, com temperaturas de operação diferentes. Para a temperatura de operação em acordo com as especificações do fabricante, os enrolamentos funcionam por 20000h.

Sabendo-se que a atenuação da vida útil de um motor ocorre de forma exponencial, sendo proporcional a temperatura de operação - de forma aproximada, se reduz ao meio para

cada incremento de 10°C- será utilizado a equação de Arrhenius para estimar a durabilidade de um motor, conforme foi feito por diversos autores aqui citados.

A análise matemática de como as variáveis de entrada aqui apresentadas influenciam na estimativa proposta pode ser verificada no capítulo 4 do trabalho.

CAPÍTULO 4- ANÁLISE COMPUTACIONAL DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA

4.1- Introdução

No capítulo 3 foi descrito uma série equações que descreviam parâmetros que afetavam a vida útil de um motor. Para que se compreenda a forma como essas variáveis influenciam nos cálculos, este capítulo tem como objetivo mostrar por meio de um algoritmo feito em MATLAB a representação gráfica da resposta do equacionamento para diferentes condições de operação da máquina.

Através da visualização gráfica desses parâmetros, será possível avaliar as condições de operação de um motor. Para que o mesmo seja colocado em condições necessárias para operar segundo a necessidade para a qual foi designado e ao mesmo tempo maximizar seu tempo de vida útil.

A escolha do uso do software MATLAB para realizar tal tarefa é justificada pelo fato dos comandos serem próximo da forma como expressões algébricas são escritas, além de possuir uma biblioteca eficiente para confeccionar gráficos, o que torna seu uso mais simples.

Apesar de apresentar expressões simplificadas, algoritmos criados em MATLAB exigem grande esforço computacional de uma máquina, e tem como principal barreira o fato de ser um software pago. A licença utilizada no presente trabalho pertence ao IFMG Campus Formiga. Para se adquirir uma licença estudantil individual do software deve-se pagar um valor de aproximadamente 29,00 dólares¹.

Será então realizado nesse capítulo uma análise preliminar das variáveis de entrada, para que no capítulo 5 seja apresentado o software desenvolvido na linguagem JAVA.

4.2- Análise computacional

Para se desenvolver o algoritmo proposto, foi feito primeiramente uma listagem das variáveis de entrada que apresentavam relevância no cálculo de vida útil de motores. Essas variáveis serão os parâmetros de entrada que o usuário do software deverá inserir para que os cálculos de estimativa sejam realizados.

¹ Valor obtido através da página oficial do software (<http://www.mathworks.com/pricing-licensing/index.html?intendeduse=edu>), a verificação do preço da licença foi feita no dia 27/04/2016. Na página do fabricante se observa que a licença tradicional (sem ser a versão de estudante) custa 2650,00 dólares.

As variáveis de entrada usadas para se realizar os cálculos são:

- Potencia nominal do motor (em CV)
- Classe de isolamento
- Carregamento (em %)
- Rendimento da máquina (em %)
- Temperatura na qual o motor está inserido (em graus Celsius)
- Condições do Ambiente
- Corrente nominal da máquina (em A)
- Relação de corrente de partida com a corrente nominal
- Tempo de partida (em segundos)
- Modo de partida
- Desbalanceamento entre as fases (em %)
- Número médio de horas que a máquina funciona semanalmente
- Número médio de partidas da máquina semanalmente

Após selecionar as variáveis que apresentam relevância para o software, foi desenvolvido um diagrama de blocos (figura 23), que apresenta a ordem em que os cálculos serão realizados pelo algoritmo, assim como a resposta que será exibida. A resposta do algoritmo mostra ao usuário a estimativa de vida útil de um motor de indução em número de horas.

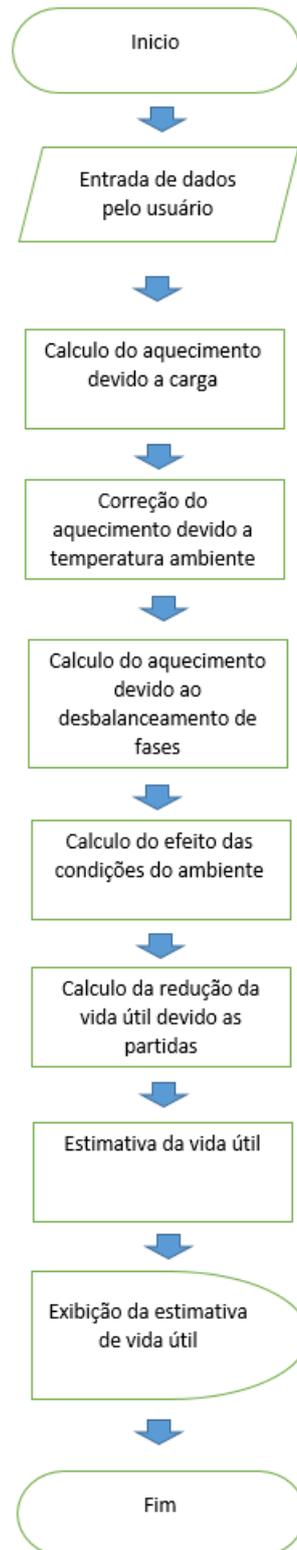
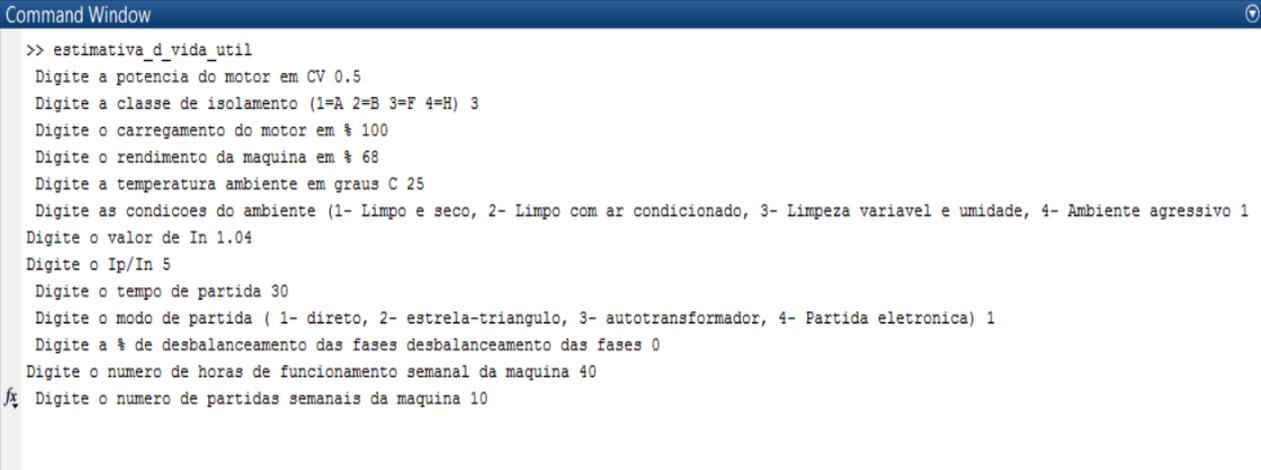


Figura 23- Diagrama de blocos do funcionamento do algoritmo

4.2.1- Análise das variáveis de entrada

Para se avaliar o modelo matemático de estimativa de vida útil, foi escolhido de forma aleatória um motor no catálogo da WEG Motors, e foi conduzida uma análise com os dados fornecidos pelo fabricante e variações nas condições de operação. O motor escolhido foi o W22IR4 e seus dados técnicos podem ser consultados no apêndice D do presente trabalho.

A tela de entradas de dados no programa feito em MATLAB é mostrado na figura 24. Serão apresentadas respostas do sistema para as condições de carga, a temperatura ambiente, o desbalanceamento de fases, as condições do ambiente e as condições de partida.



```

Command Window
>> estimativa_d_vida_util
Digite a potencia do motor em CV 0.5
Digite a classe de isolamento (1=A 2=B 3=F 4=H) 3
Digite o carregamento do motor em % 100
Digite o rendimento da maquina em % 68
Digite a temperatura ambiente em graus C 25
Digite as condicoes do ambiente (1- Limpo e seco, 2- Limpo com ar condicionado, 3- Limpeza variavel e umidade, 4- Ambiente agressivo) 1
Digite o valor de In 1.04
Digite o Ip/In 5
Digite o tempo de partida 30
Digite o modo de partida ( 1- direto, 2- estrela-triangulo, 3- autotransformador, 4- Partida eletrônica) 1
Digite a % de desbalanceamento das fases 0
Digite o numero de horas de funcionamento semanal da maquina 40
Digite o numero de partidas semanais da maquina 10
  
```

Figura 24- Tela de entrada de dados do algoritmo de estimativa de vida útil no MATLAB

- **Condições de carga:**

A primeira análise feita foi em função da forma que a vida útil variava conforme as condições de carga da máquina, para fazer essa análise foi desconsiderado os efeitos do desbalanceamento das fases, das condições de partida e das condições do ambiente, a temperatura adotada foi de 25°C, valor instantâneo no momento de realização dos cálculos (CLIMATEMPO, 2016). A figura 25 apresenta a relação obtida.

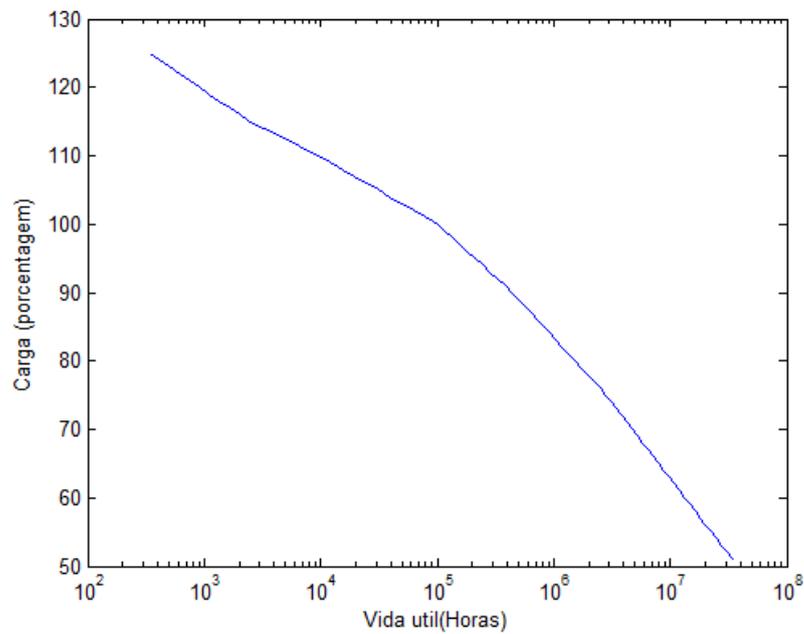


Figura 25- Variação da vida útil em função da carga

Por variar de forma exponencial, a função que descreve a variação da vida útil em função da carga foi plotada em uma escala logarítmica para ser melhor visualizada. É possível notar a semelhança da forma de gráfico obtido, com a que foi feita no trabalho de Brancato (1992), que está representada na figura 21. As demais variáveis iniciais serão avaliadas em função da condição de carga.

- **Temperatura Ambiente**

Para verificar a forma como a temperatura ambiente influencia a vida útil de um motor, foi escolhido os valores de temperatura de 0, 10, 25 e 40°C. As condições do ambiente, de desbalanceamento de fases e número de partidas foram desconsiderados nessa análise. O resultado obtido pode ser visto na figura 26.

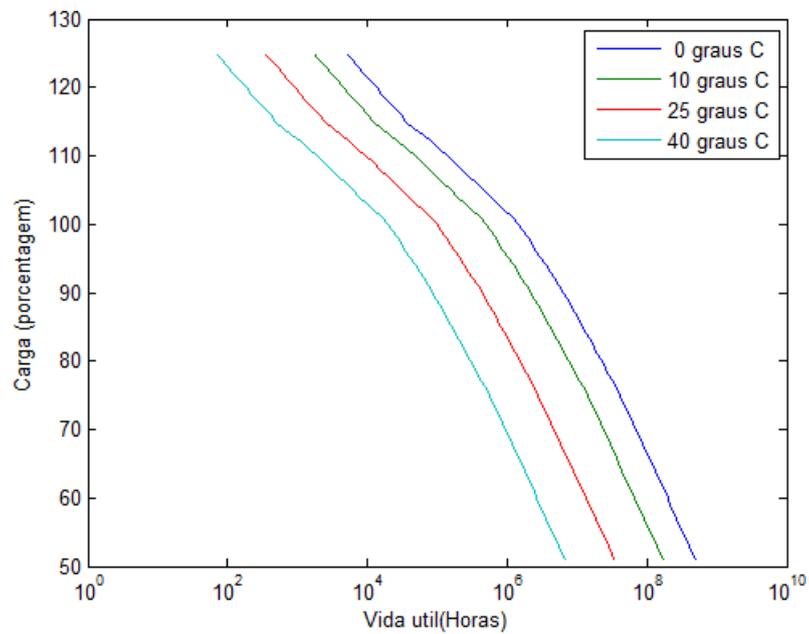


Figura 26- Variação da vida útil em função da carga para diferentes temperaturas ambiente

Se verifica que o aumento da temperatura ambiente afeta a vida útil de um motor, uma variação de temperatura de 40°C, pode atenuar o tempo de funcionamento de uma máquina em um fator de ordem quase igual a 10².

- **Desbalanceamento de fases**

Os valores escolhidos para analisar o desbalanceamento foram de 0; 0,5; 1 e 2% de entre as fases, a temperatura ambiente foi de 25°C e os demais fatores foram desconsiderados. Os resultados obtidos são verificados na figura 27.

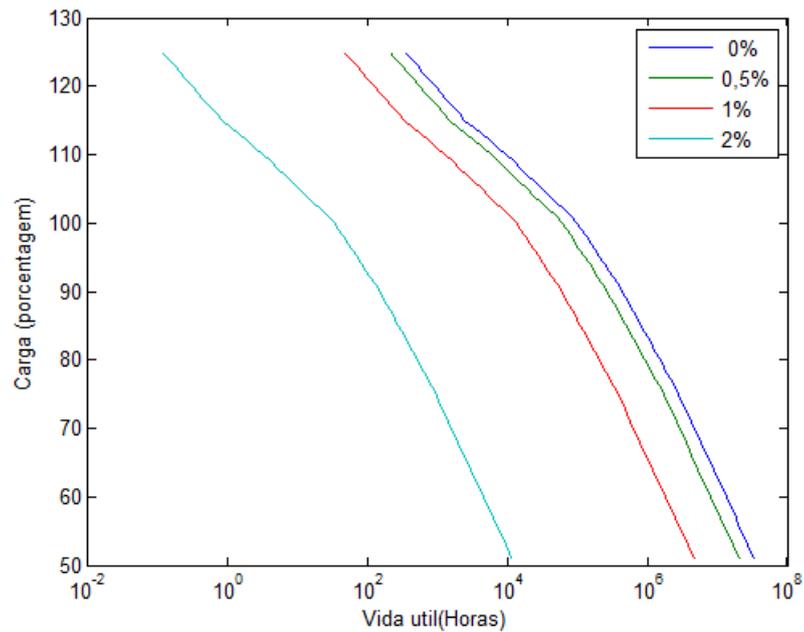


Figura 27- Variação da vida útil em função da carga para diferentes valores de desbalanceamento de fases

De acordo com os resultados obtidos, se verifica que um desbalanceamento de fases de ordem 2% provoca uma redução na vida útil superior a um fator de 10^3 . Evidenciando que a verificação das tensões de fase é essencial para manutenção de boas condições de operação de uma máquina.

- **Condições do ambiente**

As condições ambientais a serem analisadas são de ambientes: Limpo e seco, Limpo com ar-condicionado, limpeza variável e umidade, ambiente agressivo. A temperatura ambiente adotada foi de 25°C e todos os outros fatores foram desconsiderados. A figura 28 mostra a forma como a vida útil variou de acordo com as condições ambientais.

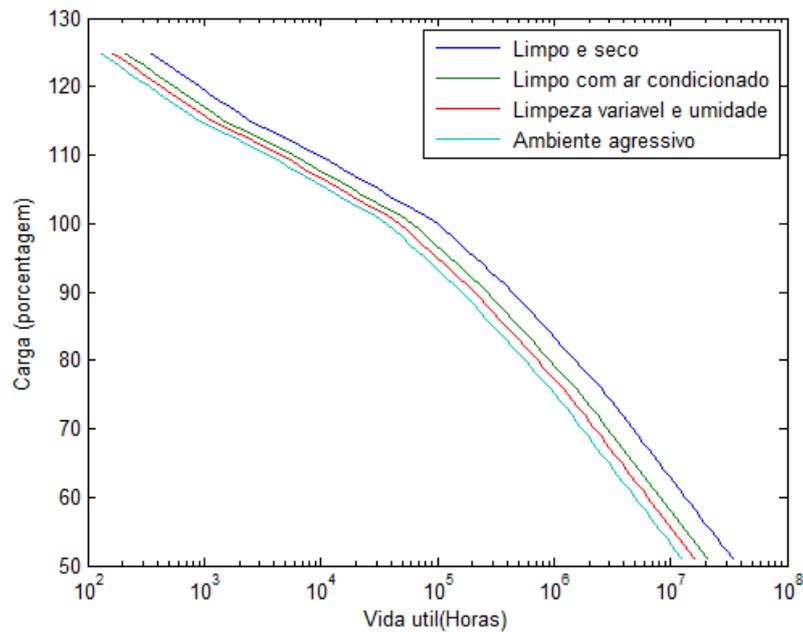


Figura 28- Variação da vida útil em função da carga para diferentes condições ambientais.

Na figura 28 é possível deduzir que quanto mais agressivo for o ambiente em que o motor está inserido, menor será sua vida útil.

- **Partidas**

Foram analisadas as variações de vida útil provocadas pelos métodos de partida direta, com chave compensadora a 75% e estrela-triângulo, conforme se verifica nas figuras de 29 a 31 respectivamente. Devido à variação de vida útil para as condições consideradas na partida direta e com chave compensadora não apresentar mudanças visualizáveis em um gráfico logarítmico para a partida estrela-triângulo, foi necessário considerar mais partidas para esse método. A temperatura ambiente considerada foi de 25°C e as demais condições foram desconsideradas na análise.

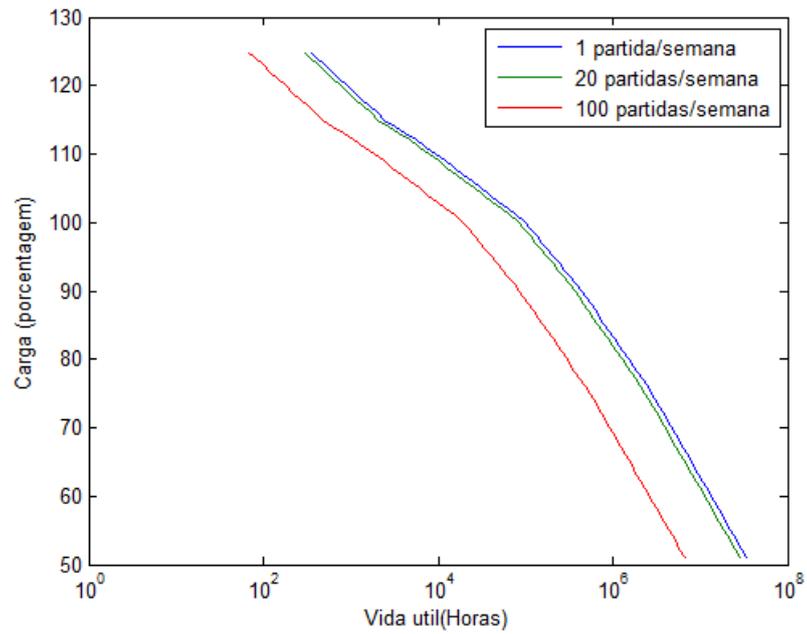


Figura 29- Variação da vida útil em função da carga para partida direta

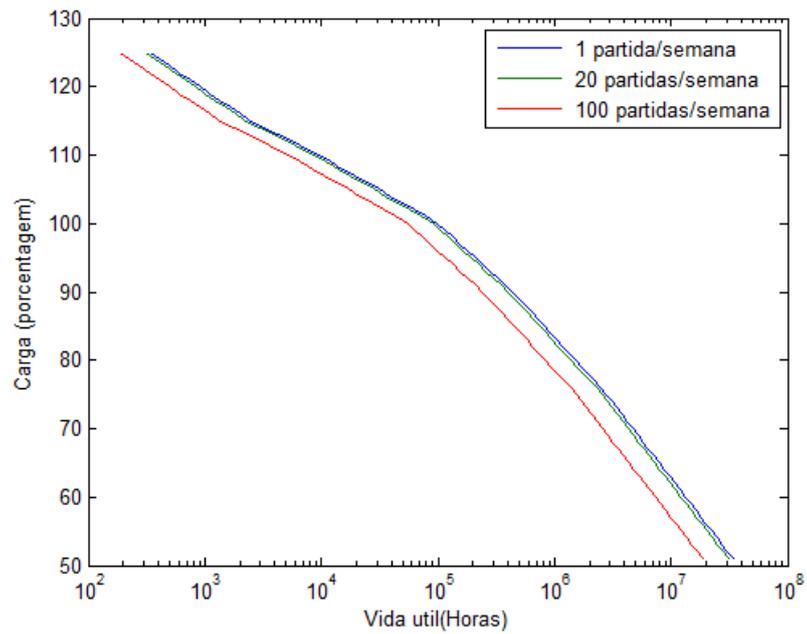


Figura 30- Variação da vida útil em função da carga para partida com chave compensadora a 75%

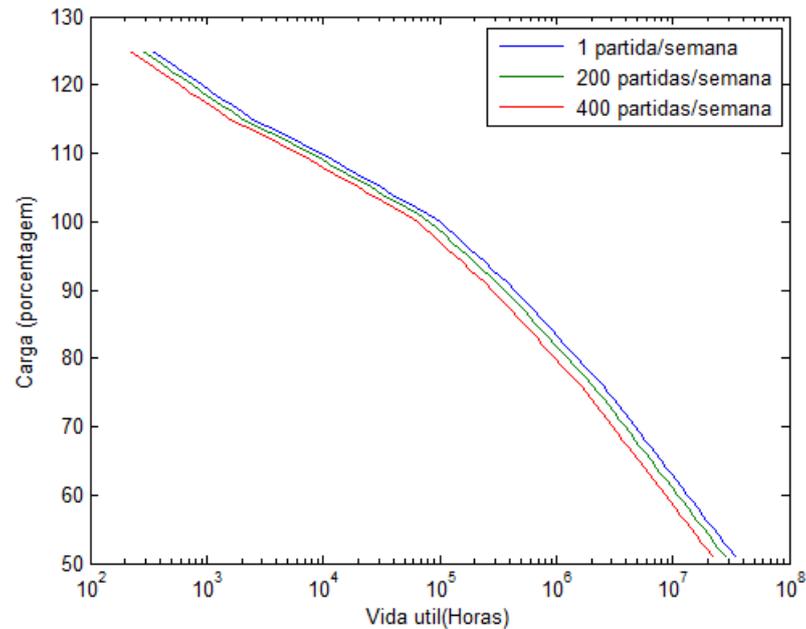


Figura 31- Variação da vida útil em função da carga para partida estrela-triângulo

Dos métodos de partida analisados, a estrela-triângulo foi o que apresentou menor redução da vida útil da máquina, mesmo considerado várias partidas a mais que os demais métodos. Caso fosse feita a partida com chave compensadora, porém com valor inferior ao 75%, seria obtido um valor maior de durabilidade da máquina.

4.3- Conclusão do capítulo

Neste capítulo foi apresentado a forma gráfica da variação de vida útil de uma carga para diferentes condições de funcionamento. Verificou-se que a vida da máquina é atenuada para maiores condições de carga, temperatura e desbalanceamento de fases. A forma de partida que mais desgasta o motor é a forma de partida direta, e quanto mais agressivo for o local de operação de uma máquina, menor será sua vida útil.

CAPÍTULO 5- O SOFTWARE EM JAVA

5.1- Introdução

A tecnologia Java foi criada por uma empresa denominada Sun Microsystems no ano de 1991 (SERSON, 2007). O objetivo da ferramenta computacional era permitir a convergência de computadores e dispositivos controlados de forma digital.

O primeiro projeto da equipe foi um controlador portátil para televisão digital, o que no período não era muito comum, nem economicamente viável, o que desfavoreceu o desenvolvimento da linguagem nos anos 90 (VINICIUS, 2016). Porém, com o avanço da tecnologia e desenvolvimento de diferentes sistemas operacionais, o uso de softwares criados a partir da linguagem Java se tornou popular. Isto ocorreu, principalmente, devido a facilidade de conversão do código para diferentes sistemas operacionais (SERSON, 2007), por exemplo, um código feito para a plataforma Windows pode ser transformado em um aplicativo para Android.

Devido a sua versatilidade, Serson (2007) afirma que mais de dois bilhões e meio de dispositivos fazem uso da tecnologia Java, sendo que esta passou por processo de refinamento, ampliação e diversos testes. Estima-se que a comunidade ativa de desenvolvedores do software ultrapasse 4 milhões de pessoas (VINICIUS, 2016).

O uso da linguagem Java para desenvolver o software proposto é justificado, principalmente, por ser uma plataforma gratuita e versátil, permitindo projetos futuros de expansão para o software para realizar outros cálculos pertinentes ao tema de estudo, ou operar em outro sistema operacional. Além de possuir diversos blocos de funções já prontas, devido a sua popularidade, o que facilita o trabalho do programador.

5.2- O Software

O Software proposto possui as variáveis de entrada analisadas no capítulo 4. Para facilitar a inserção de dados, estes foram divididos em três abas, sendo verificados nos dados de catalogo do fabricante do motor e medidos experimentalmente pelo usuário.

- Primeira Aba- Características do Motor

A figura 32 apresenta a primeira aba do programa, nesta são inseridos dados pertinentes ao motor. A maior parte dos dados aqui apresentados são preenchidos de acordo com o manual do fabricante, a figura 32 foi preenchida com os dados do motor apresentado no Anexo C.

Características do motor | Condições do ambiente | Condições de Partida

Estimativa de vida útil de motores

Potência do motor em CV

Classe de Isolação A B F H

Carregamento do motor em %

Rendimento da máquina em %

Corrente nominal(I_n) em A

Desbalanceamento de fases em %

Leandro Lemos llemos@outlook.com

Figura 32- Aba de Características do Motor

O valor de carregamento do motor pode ser aproximadamente calculado em função da corrente de operação da máquina pela corrente nominal. Nas condições da figura 32, o valor de corrente de operação medido seria de 2,03A.

- Segunda aba- Condições do ambiente

Na segunda aba do software (figura 33), o usuário deve inserir as informações sobre o ambiente em que o motor está operando. Estes dados devem ser avaliados pelo usuário, para o exemplo considerado, foi adotado uma temperatura de 25°C e que o motor estava inserido em um ambiente limpo e com ar condicionado.

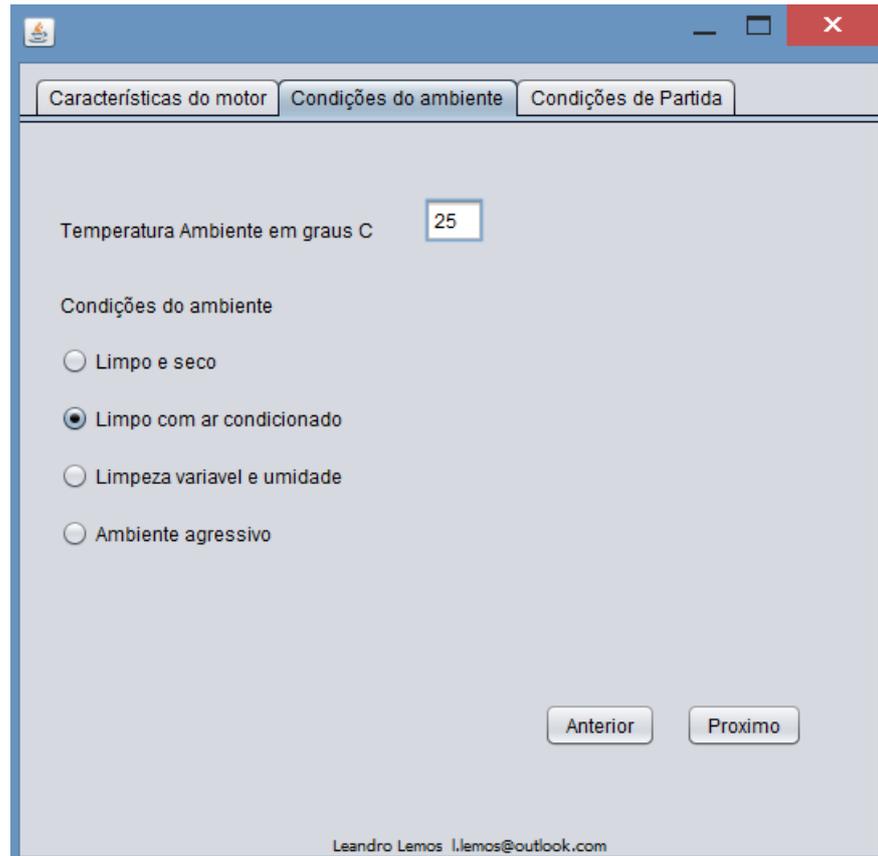


Figura 33- Aba sobre as condições do ambiente

- Terceira aba- Condições de partida

Na terceira aba, será necessário inserir dados que dizem respeito a partida dos motores, o valor de relação de corrente de partida nominal é obtido na folha de informações do fabricante (Anexo D), as demais condições devem ser medidas pelo usuário.

Ao clicar no botão “calcular” o software realizará as operações descritas no capítulo 3 do trabalho, e informará em uma caixa de diálogo o valor estimado de vida útil do motor, conforme mostra a figura 34.

Caso o usuário escolha o modo de partida com autotransformador, ele deve inserir o valor da relação de transformação do mesmo em uma caixa de diálogo adicional. Esse valor deve ser indicado em porcentagem, conforme mostra a figura 35. Para partida eletrônica, o usuário digitar deve inserir o valor médio de corrente de partida da máquina na caixa de diálogo indicada na figura 36.

Características do motor | Condições do ambiente | **Condições de Partida**

Relação corrente de partida/nominal (I_p/I_n)

Tempo de partida em segundos

Horas de funcionamento semanal

Número de partidas semanais

Modo de partida

Direta

Estrela triangulo

Autotransformador

Eletrônica

Leandro Lemos l.lemos@outlook.com

Figura 34- Aba sobre condições de partida

Características do motor | Condições do ambiente | **Condições de Partida**

Relação corrente de partida/nominal (I_p/I_n)

Tempo de partida em segundos

Horas de funcionamento semanal

Número de partidas semanais

Modo de partida

Direta

Estrela triangulo

Autotransformador

Eletrônica

Leandro Lemos l.lemos@outlook.com

Resultado

O valor valor da vida útil do motor e de aproximadamente 13.00 anos

Figura 35- Exibição do resultado da estimativa de vida útil do motor

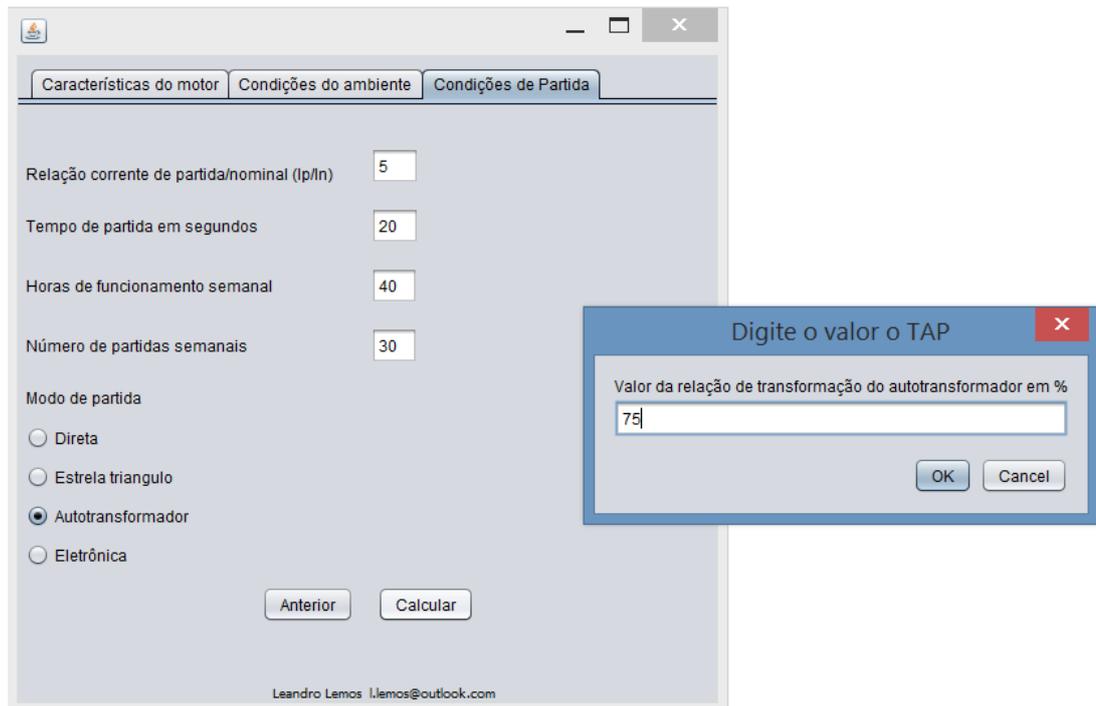


Figura 36- Caixa de entrada do valor da relação de transformação do autotransformador

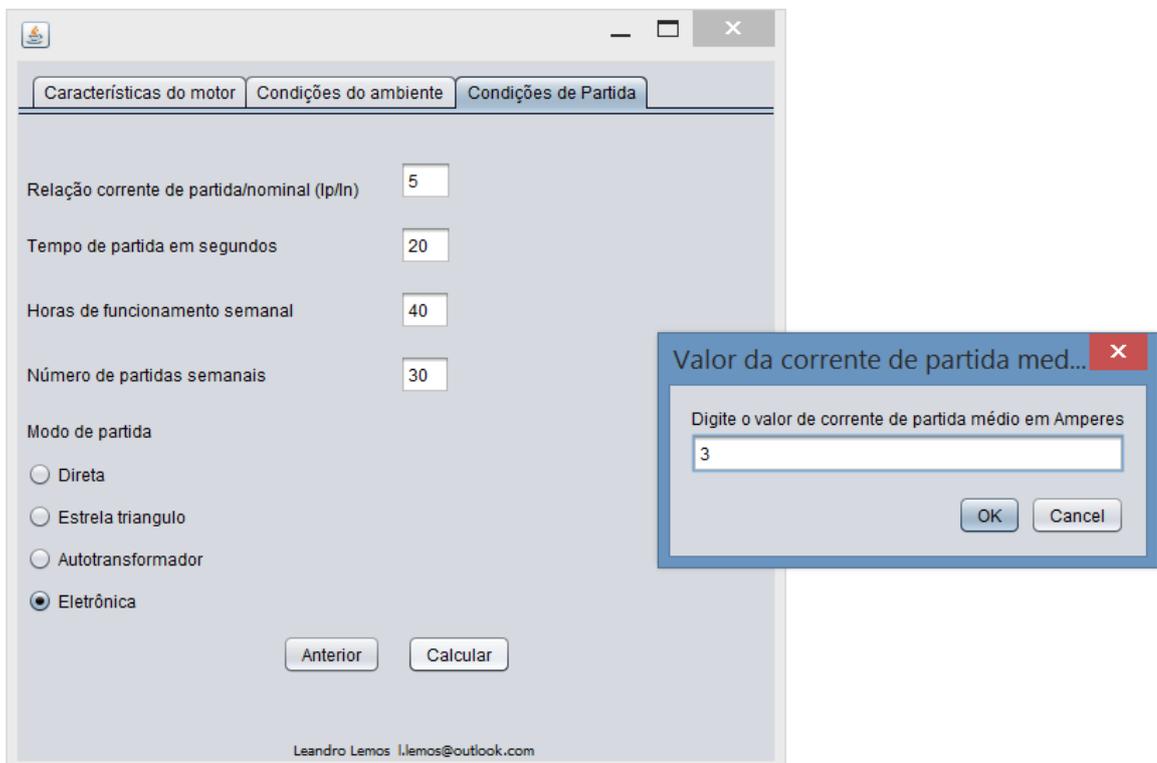


Figura 37- Caixa de entrada do valor de corrente de partida médio

5.3- Estudo de caso

Para exemplificar o uso do software desenvolvido, o mesmo foi aplicado para estimar a vida útil de motores em uma empresa de montagem industrial, localizada em Arcos-MG. A empresa possui diversos motores que são usados em calandras, compressores e pontes rolantes. Foi escolhido então 3 motores de calandras, os mesmos são mostrados nas figuras 38, 39 e 40.



Figura 38- Motor A



Figura 39- Motor B



Figura 40- Motor C

5.3.1- Dados coletados

Não foi possível identificar todos os dados necessários através da placa de identificação das máquinas, portanto, foi enviado um e-mail ao vendedor dos motores para se obter as informações sobre eles. As informações coletadas são mostradas na tabela 12.

	Motor A	Motor B	Motor C
Potência do motor	5CV	5CV	1CV
Classe de Isolação	B	B	F
Corrente nominal	14,2A	14,2A	11,1A
Relação Ip/In	7,5	7,5	6,6
Rendimento da máquina	75%	75%	80%

Tabela 12- Características construtivas dos motores

Após se coletar as informações da tabela 12, foi medido dados necessários para o cálculo de vida útil, estes são mostrados na tabela 13.

	Motor A	Motor B	Motor C
Carregamento médio	89%	84%	93%
Desbalanceamento de fases	0	0	0
Tempo de Partida	4s	4s	1s
Horas de funcionamento semanal	35	31	34
Número de partidas semanais	19	23	30

Tabela 13- Dados medidos dos motores

O ambiente em que os motores estudados estão inseridos apresenta elevada quantidade de poeira e é submetido a eventuais umidades devido a chuvas, portanto será selecionado a condição de “ambiente agressivo” no software. Para o cálculo do carregamento, foi considerado a corrente média de funcionamento das máquinas, pois esta variava conforme a aplicação de carga. Para medir as horas de funcionamento dos motores, foi solicitado aos

operadores dos mesmos que fizessem anotações do horário em que eram ligados e desligados, o que permitiu estimar o número de partidas e de horas de funcionamento semanal (Anexo D).

5.3.2- Resultados

Os dados medidos e indicados nas tabelas 12 e 13 foram inseridos no software desenvolvido. A seguir serão ilustrados as abas correspondentes com os dados de entrada e o valor estimado pelo software para os 3 motores estudados.

- Motor A

The figure displays three screenshots of a software application used for estimating motor life. The interface is divided into three tabs: 'Características do motor', 'Condições do ambiente', and 'Condições de Partida'.

Características do motor:

- Potência do motor em CV: 5
- Classe de Isolação: A, B, F, H
- Carregamento do motor em %: 89
- Rendimento da maquina em %: 75
- Corrente nominal(In) em A: 14.2
- Desbalanceamento de fases em %: 0

Condições do ambiente:

- Temperatura Ambiente em graus C: 28
- Condições do ambiente:
 - Limpo e seco
 - Limpo com ar condicionado
 - Limpeza variavel e umidade
 - Ambiente agressivo

Condições de Partida:

- Relação corrente de partida/nominal (I_p/I_n): 7.5
- Tempo de partida em segundos: 4
- Horas de funcionamento semanal: 35
- Número de partidas semanais: 19
- Modo de partida:
 - Direta
 - Estrela triangulo
 - Autotransformador
 - Eletrônica

A 'Resultado' dialog box is shown with the text: **O valor da vida util do motor e de aproximadamente 11.00 anos**.

Figura 41- Estimativa de vida para o motor A

- Motor B

Estimativa de vida útil de motores

Potência do motor em CV: 5

Classe de Isolação: A B F H

Carregamento do motor em %: 84

Rendimento da maquina em %: 75

Corrente nominal(In) em A: 14.2

Desbalanceamento de fases em %: 0

Proximo

Leandro Lemos, llemos@outlook.com

Temperatura Ambiente em graus C: 28

Condições do ambiente

Limpo e seco

Limpo com ar condicionado

Limpeza variavel e umidade

Ambiente agressivo

Anterior Proximo

Leandro Lemos, llemos@outlook.com

Relação corrente de partida/nominal (Ip/In): 7.5

Tempo de partida em segundos: 4

Horas de funcionamento semanal: 31

Número de partidas semanais: 23

Modo de partida

Direta

Estrela triangulo

Autotransformador

Eletrônica

Anterior Calcular

Leandro Lemos, llemos@outlook.com

Resultado

O valor da vida útil do motor e de aproximadamente 17.73 anos

OK

Figura 42- Estimativa de vida para o motor B

- Motor C

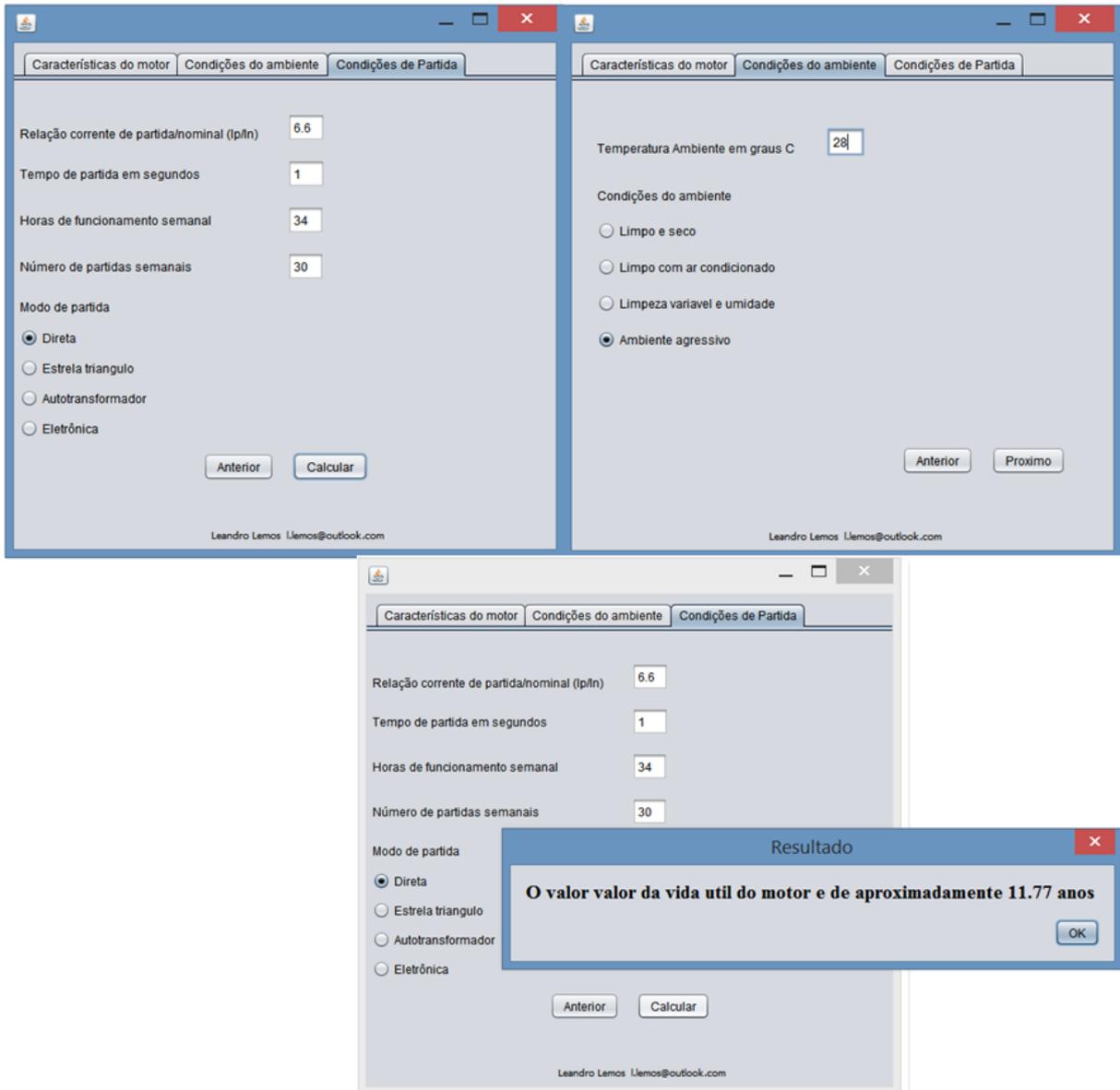


Figura 43- Estimativa de vida para o motor C

5.4- Análise dos resultados e conclusão do capítulo

Pode-se comparar os resultados obtidos com o uso do software com os dados estatísticos apresentados, observa-se que no trabalho de Anibal (2006) é esperado que motores de 1 a 5CV apresentem vida útil média de 12 anos. O valor calculado para os motores A e C ficaram bem próximos dos dados dessa estatística, 11 e 11,77 anos, apresentando um erro relativo de 8,33% para o motor A e 1,91% para o motor C. Os valores medidos por Andreas (1982) apresentados na figura 1, também ficam bem próximos desses valores.

Para o caso do motor B, verifica-se que a estimativa de vida foi de 17,73 anos, quantidade consideravelmente superior aos apresentados pelos dados estatísticos. Pode-se justificar esta diferença de valores ao se analisar o carregamento do motor, este é de 84%, valor inferior ao nominal, o que faz com que sua estimativa de vida aumente. Outro detalhe a ser observado é que a análise estatística trabalha com valores médios, então se for analisar o valor médio calculado com o software, seria obtido que a estimativa de vida média para os motores da empresa parceira seria de 13,5 anos, apresentando assim um erro de 12,5% de erro para os dados estatísticos.

O trabalho de Weneck (2011) apresenta um estudo do dimensionamento de motores de indução no Brasil, este indica que as máquinas são, na maioria das vezes, subdimensionadas. Tal indicação foi verificada nos dados medidos, todos os motores analisados no presente projeto se apresentaram subdimensionados. Os dados medidos por Anibal (2006) e Andreas (1982) estimam um aumento na vida útil das máquinas conforme o aumento de potência, para os dados medidos, verificou-se que o motor C, apresentava carregamento mais próximo ao nominal que os demais motores, sendo este o de menor potência. Uma possível justificativa da menor durabilidade de motores de menor potência, seria que motores maiores podem apresentar carregamento inferior ao nominal, o que prolonga sua vida útil.

CAPÍTULO 6- CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

No capítulo 1 do trabalho, foi apresentada a proposta de projeto, assim como definido objetivos e datas a serem cumpridas. Os objetivos esperados foram concretizados nos capítulos posteriores. O estudo do funcionamento de motores de indução trifásico foi realizado no capítulo 2, onde foi descrito o princípio de funcionamento desses motores assim como seus principais parâmetros para estimar suas condições de operação.

Os modelos matemáticos que estimam a vida útil de motores são apresentados no capítulo 3. Neste se apresenta equações para determinar o aumento ou atenuação da durabilidade dos enrolamentos em função do aquecimento devido a carga de operação e partidas, condições do ambiente e desbalanceamento de fases.

No capítulo 4 foi desenvolvido um algoritmo em MATLAB, o qual permitiu analisar, de forma gráfica, as variáveis consideradas fundamentais no equacionamento do tema proposto e avaliar a forma com que elas se relacionam com a estimativa intencida.

O desenvolvimento do software para estimar a vida útil de motores em JAVA foi descrito no capítulo 5, neste apresentou-se as abas do software e como inserir dados no mesmo. Através do software foi feita uma avaliação da durabilidade de 3 motores de uma empresa de montagem industrial na cidade de Arcos-MG. O objetivo geral foi alcançado conforme se observa no capítulo 5, o uso do software permite com que se calcule de forma automatizada a estimativa de vida útil de um motor de indução e para o estudo de caso feito, verificou-se que as máquinas apresentavam uma estimativa semelhante a que foi medida por dados estatísticos.

Apesar de 2 dos 3 motores vistos apresentarem estimativas próximas aos dados estatísticos, e se verifique que o valor médio de vida útil das 3 máquinas seja semelhante aos medidos, um dos motores estudados apresentou vida útil consideravelmente superior ao esperado. Conforme mostrado no trabalho, espera-se que os enrolamentos de uma máquina funcionando sob condições nominais, opere por 20000h. Porém, este valor se altera conforme as condições de carga e demais fatores atenuadores apresentados no capítulo 3. Para o caso em que a vida útil do motor se apresentou superior, verificou-se que este estava funcionando com 84% de carga, o que pode ser uma das justificativas de se encontrar um valor de vida útil maior que o esperado.

Uma das dificuldades encontradas no uso do software foi a medição das condições de carregamento dos motores, para motores submetidos a cargas constantes, basta medir a

corrente de funcionamento em regime permanente, porém, em casos onde a carga varia, é necessário o cálculo de carregamento médio.

Embora seja útil fazer uso do software para planejamentos de compra e manutenção, ainda podem existir variáveis que não foram levadas em consideração, como ruído e vibração das máquinas. Por isso, caso a indústria possua dados estatísticos de seus próprios motores para aplicações específicas, estes valores podem ser mais precisos que os estimados pelo software.

Para continuação do trabalho, pode se fazer uma análise da probabilidade de falha de um motor com o aumento de seu tempo de funcionamento, quanto mais próximo do valor esperado de vida útil, menor deve ser sua confiabilidade. A partir dessa análise, é possível que se desenvolva um intervalo no qual existe a maior probabilidade de falha da máquina. Com esses dados, é possível que se faça um software que com base nos custos de substituição dos motores e com os valores de confiabilidade dos mesmos, estime a época ótima para substituição das máquinas.

Ainda para trabalhos futuros, com base na redução do rendimento de máquinas devido ao subdimensionamento, existe uma tendência de fazer a compra de equipamentos próximos aos valores nominais de funcionamento, porém o subdimensionamento faz com que a vida útil dessas máquinas aumente de forma exponencial. Deve-se analisar os custos adicionais com a perda de rendimento e os ganhos com manutenção e de durabilidade que uma máquina subdimensionada pode oferecer.

Existem outras partes constituintes de um motor nas quais se verificam ocorrência de falhas que não foram medidas aqui, como os rolamentos, que embora não sejam tão caros quanto os enrolamentos das bobinas, apresentam alta frequência de ocorrência de defeitos. Uma atualização do software deve contemplar variáveis de entrada referentes a estimativa de vida útil dessas partes, permitindo com que se calcule a durabilidade de cada parte do motor individualmente.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, I.M.; CAMARA, J.M.; “**Manutenção em motores elétricos e defeitos mais frequentes**”. *O setor elétrico*. p. 50-53, ago. 2010.

BAUER, Clovis, “**Ensaio de Elevação de Temperatura Pelo Método “Forward Short Circuit” em motores de indução**”. Dissertação de Mestrado UNSC, Florianópolis, junho de 2008

BONNET A. H, “**Motor Performance and Life in Accordance with Nema Mg-1 Standards**” IEEE U.S.Electrical Motors, Division of Emerson Electric, St. Louis, Missouri 1999

BONNETT A.H. “**Operating temperature considerations and performance characteristics for IEEE 841 motors**”. Material IEEE Paper No. PCIC-2000-08, Nova York 2000.

BRANCATO E. L, “**Estimation of Lifetime Expectancies of Motors**”, IEEE Electrical Insulation Magazine Vo1.8, No.3. Maio/Junho 1992.

CHEBERLE, Luciano Augusto Duarte. **A Vida útil de instalações no setor elétrico e sua influência na definição das tarifas de distribuição de energia no Brasil**, 2013.126p

CISZ, Glauco André “**Ensaio de Elevação de Temperatura em Maquinas de Indução Utilizando o Método da Frequência Dupla**”, Dissertação de Mestrado UNSC, Florianópolis, junho de 2008

CLIMATEMPO. **Previsão do tempo Arcos-MG**. Disponível em: <<http://www.climatempo.com.br/previsao-do-tempo/cidade/1079/arcos-mg>>. Acesso em: 04 abr. 2016.

ÇOLAK,I.;BAL, G.;ELMAS,Ç. “**Review of the Testing Methods for Full-Load Temperature Rise Testing of Induction**”, Machines,EPE Journal, Vol.6, n°1, p. 37-43,May 1996

CUNHA, Livia. **MOTORES ELETRICOS: MOVENDO O MUNDO**. Santa Cecilia - São Paulo: O Setor Elétrico, 2009. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/132-radiografia-motores-eletricos-movendo-o-mundo.html>>. Acesso em: 25 abr. 2016.

ELETROBRÁS (Brasília). **Motor elétrico: Guia básico**. 2009. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/Motor_eletrico.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2016.

FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006

FRANCHI, C.M. “**Acionamentos Elétricos**”, Ed. Érica, 4a. Ed., SP, 2008.

GRAY, Alexander. **Electrical Machine Design; the Design and Specification of Direct and Alternating Current Machinery**. New York [etc.]: McGraw-Hill book company, Inc., 1913. Disponível em: <<https://archive.org/details/electricalmachi00graygoog>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

JOCELIO S.S., “**Contribuição à Análise do Comportamento Térmico de Motores de Indução Trifásicos com Rotor Tipo Gaiola**”, Tese de Doutorado Unicamp, Campinas, abril de 1989.

KOSOW, Irving. **Máquinas elétricas e transformadores**. 15. ed. São Paulo: Globo, 2008.

MAMEDE, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 7ª edição. Editora LTC. 2007.

MONTSINGER V.M., “**Loading Transformers by Temperature**”, AIEE Trans. Vol 32, 1913.

PAZZINI, Luiz Henrique Alves. **O processo de aquecimento dos motores**. Sao Paulo: Fisp, 2012. Disponível em: <http://www.joinville.ifsc.edu.br/~leo.schirmer/CONV44/MIT/CatálogosFabricantes/WEG/acionamentos_2002_8.pdf0>. Acesso em: 07 abr. 2016.

SERSON, Roberto Rubinstein. **Programação Orientada a Objetos com Java 6**. Rio de Janeiro: Brasport, 2007.

SILVA, Marcos Antônio da; GONZALEZ, Manuel Lozada y. **INFLUÊNCIA DE FATORES DA MANUTENÇÃO QUE AFETAM A VIDA ÚTIL DOS MOTORES DE INDUÇÃO**. VIII Conferência Internacional de Aplicações Industrial, Poços de Caldas, ago. 2008. Disponível em: <http://www.ppgee.ufmg.br/documentos/PublicacoesDefesas/875/artigo_viii_indusconfinal.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2016.

STEWART, James. “**Cálculo**”: Volume 1. 5. ed. São Paulo: Thomson, 2005.

TORRES, Carlos Magno; NICOLAU, Gilberto Ferraro; PENTEADO, Paulo César; SOARES, Paulo Toledo. **Física Ciência e Tecnologia**. Volume único. Editora Moderna (2001).

VINICIUS, Thiago. **Java: história e principais conceitos**. Disponível em: <<http://www.devmedia.com.br/java-historia-e-principais-conceitos/25178>>. Acesso em: 11 maio 2016.

WEG MOTORS (Jaraguá do Sul) (Org.). **Manual Geral de Motores Elétricos**. 2003. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-iom-general-manual-of-electric-motors-manual-general-de-iom-de-motores-electricos-manual-geral-de-iom-de-motores-electricos-50033244-manual-english.pdf>>. Acesso em: 01 mar. 2016.

WEG MOTORS (Jaraguá do Sul) (Org.). **Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção**. Jaraguá do Sul, 2015. 165 p. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-6-motores-eletricos-assincrono-de-alta-tensao-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2016.

WEG MOTORS. “**Manual de Bobinagem – Motores Elétricos de Indução**” Catálogo 54117/022003. Jaraguá do Sul, 2003

WEG MOTORS. “**Motores elétricos assíncronos e síncronos de media tensão-especificação, características e manutenção.**” Jacaragua do Sul, 2015.

WERNECK, Diogo Guedes. **Determinação de perdas e rendimento do motor de indução trifásico através do estudo da norma IEC 60034 - 2.** 2011. 39 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003910.pdf>>. Acesso em: 02 abr. 2016.

8 ANEXOS

Seguem os arquivos anexos do presente trabalho:

8.1- ANEXO A

Será aqui apresentada uma tabela fornecida pela WEG (2015), com um esquema de manutenção preventiva de motores elétricos:

	Mensal	A cada dois meses	A cada seis meses	A cada 2 anos	Antes de entrar em operação	Nota
Local de Armazenagem						
Inspeccionar as condições de limpeza		X			X	
Inspeccionar as condições de umidade e temperatura		X				
Verificar sinais de infestações de insetos		X				
Medir nível de vibração	X					
Embalagem						
Inspeccionar danos físicos			X			
Inspeccionar a umidade relativa no interior		X				
Trocar o desumidificador na embalagem (se houver)			X			Quando necessário
Resistência de aquecimento						
Verificar as condições de operação	X					
Máquina completa						
Realizar limpeza externa			X		X	
Verificar as condições da pintura			X			
Verificar o inibidor de oxidação nas partes expostas			X			
Repor o inibidor de oxidação			X			
Enrolamentos						
Medir resistência de isolamento		X			X	
Medir índice de polarização		X			X	
Caixa de ligação e terminais de aterramento						
Limpar o interior das caixas				X	X	
Inspeccionar os selos e vedações						
Mancais de rolamento a graxa ou a óleo						
Rotacionar o eixo		X				
Relubrificar o mancal			X		X	
Desmontar e limpar o mancal				X		
Mancais de bucha						
Rotacionar o eixo		X				
Aplicar anti-corrosivo e desumidificador			X			
Limpar os mancais e relubrificá-los					X	
Desmontar e armazenar as peças				X		
Escovas (se existirem)						
Levantar as escovas						Durante a armazenagem
Abaixar as escovas e verificar contato com os anéis coletores					X	

Tabela x- Programa de manutenção preventiva de motores (WEG, 2015)

8.2- ANEXO B

E aqui apresentado alguns defeitos comuns em motores e suas possíveis causas (WEG, 2003):

- Motor não consegue partir
 - Excessivo esforço axial ou radial da correia
 - Eixo torto
 - Conexão errada
 - Numeração dos cabos trocada
 - Carga excessiva
 - Platinado aberto
 - Capacitor danificado
 - Bobina auxiliar interrompida

- Baixo torque de partida
 - Ligação interna errada
 - Rotor falhado ou descentralizado
 - Tensão abaixo da nominal
 - Frequência abaixo ou acima da nominal
 - Capacitância abaixo da especificada
 - Capacitores ligados em serie ao invés de paralelo

- Conjugado máximo baixo
 - Rotor falhado ou descentralizado
 - Rotor com inclinação de barras acima do especificado
 - Tensão abaixo da nominal
 - Capacitor permanentemente abaixo do especificado

- Corrente alta a vazio

- Entreferro acima do especificado
 - Tensão acima do especificado
 - Frequência abaixo do especificado
 - Ligação interna errada
 - Rotor descentralizado ou arrastando
 - Rolamentos com defeito
 - Tampas com muita pressão ou mal encaixadas
 - Chapas magnéticas sem tratamento
 - Capacitor permanente fora do especificado
 - Platinado/ centrifugo não abrem
-
- Corrente alta em carga
 - Frequência fora da nominal
 - Correias muito esticadas
 - Rotor arrastando no estator
 - Isolantes de ranhura danificados
 - Cabos cortados
-
- Resistencia de Isolamento Baixa
 - Cabeça de bobina encostando na carcaça
 - Presença de umidade ou agentes químicos
 - Presença de pó sobre o bobinado
 - Excessivo esforço axial ou radial da correia
-
- Aquecimento dos mancais
 - Eixo torto
 - Tampas frouxas ou descentralizadas
 - Falta ou excesso de graxa
 - Matéria estranha na graxa
 - Ventilação obstruída
 - Ventilador menor

- Tensão ou frequência fora do especificado
- Rotor arrastando ou falhando

- Sobreaquecimento do motor
 - Estator sem impregnação
 - Sobrecarga
 - Rolamento com defeito
 - Partidas consecutivas
 - Entreferro abaixo do especificado
 - Capacitor permanente inadequado
 - Ligações erradas
 - Desbalanceamento
 - Eixo torto
 - Alinhamento incorreto
 - Rotor fora de centro

- Alto nível de ruído
 - Ligações erradas
 - Corpos estranhos no entreferro
 - Objetos presos entre o ventilador e a tampa defletora
 - Rolamentos gastos/danificados
 - Aerodinâmica inadequada
 - Rotor fora de centro, falhando, arrastando ou desbalanceado
 - Desbalanceamento na tensão da rede
 - Rolamentos desalinhados, gastos ou sem graxa

- Vibração excessiva
 - Mancais com folga
 - Eixo torto
 - Folga nas chapas do estator
 - Problemas com a base do motor

8.3- ANEXO C

Dados do motor W22IR4

		No.: w22IR4			
		Data: 23-MAR-2016			
FOLHA DE DADOS Motor trifásico de indução - Rotor de gaiola					
Cliente	: Leandro Lemos				
Linha do produto	: W22 WELL IR2				
Carcaça	: 90S				
Potência	: 0,5 HP				
Frequência	: 60 Hz				
Polos	: 6				
Rotação nominal	: 1150				
Escorregamento	: 4,17 %				
Tensão nominal	: 220/380 V				
Corrente nominal	: 2,26/1,31 A				
Corrente de partida	: 11,3/6,54 A				
Ip/In	: 5,0				
Corrente a vazio	: 1,80/1,04 A				
Conjugado nominal	: 3,07 Nm				
Conjugado de partida	: 180 %				
Conjugado máximo	: 270 %				
Categoria	: ---				
Classe de isolamento	: F				
Elevação de temperatura	: 80 K				
Tempo de rotor bloqueado	: 29 s (quente)				
Fator de serviço	: 1,15				
Regime de serviço	: S1				
Temperatura ambiente	: -20°C - +40°C				
Altitude	: 1000				
Proteção	: IPW66				
Massa aproximada	: 16 kg				
Momento de inércia	: 0,00329 kgm ²				
Nível de ruído	: 49 dB(A)				
	Dianteiro	Traseiro	Carga	Fator potência	Rendimento (%)
Rolamento	6205 C3	6204 C3	100%	0,63	68,0
Intervalo de lubrificação	20000 h	20000 h	75%	0,55	63,0
Quantidade de graxa	4 g	4 g	50%	0,43	58,5
Observações:					
Executor			Verificado		

8.4- ANEXO D

Dados de funcionamento dos motores coletados *in loco*

Motor A- Kcel 5CV							
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab	Total
Horas de funcionamento	8	8	6	7	4	2	35
Número de partidas	4	4	4	4	2	1	19
Motor B- Kcel 5CV							
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab	Total
Horas de funcionamento	6	8	6	6	5	0	31
Número de partidas	5	6	4	4	4	0	23
Motor C- WEG 5CV							
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab	Total
Horas de funcionamento	7	7	7	7	4	2	34
Número de partidas	6	6	6	6	4	2	19