

LUIZ OTÁVIO MORAES REGO BENTES

**ESTIMANDO A CONFIABILIDADE DE UM MOTOR
DE INDUÇÃO MONOFÁSICO A PARTIR DOS
ENSAIOS DE VIDA ACELERADOS DE SEUS
COMPONENTES CRÍTICOS**

FLORIANÓPOLIS

2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTIMANDO A CONFIABILIDADE DE UM MOTOR
DE INDUÇÃO MONOFÁSICO A PARTIR DOS
ENSAIOS DE VIDA ACELERADOS DE SEUS
COMPONENTES CRÍTICOS**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

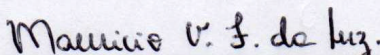
LUIZ OTÁVIO MORAES REGO BENTES

Florianópolis, Julho de 2008.

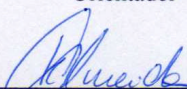
ESTIMANDO A CONFIABILIDADE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO A PARTIR DOS ENSAIOS DE VIDA ACELERADOS DE SEUS COMPONENTES CRÍTICOS

Luiz Otávio Moraes Rego Bentes

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

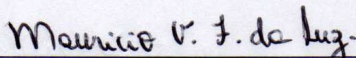


Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.
Orientador

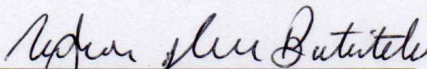


Profª. Kátia Campos de Almeida, Drª.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

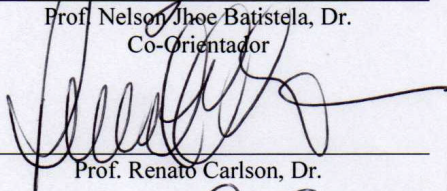
Banca Examinadora:



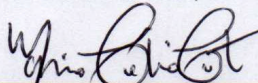
Prof. Maurício Valencia Ferreira da Luz, Dr.
Presidente



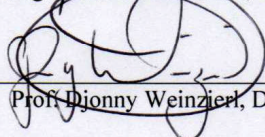
Prof. Nelson Jhoé Batistela, Dr.
Co-Orientador



Prof. Renato Carlson, Dr.



Eng. Mário Cólho Contin, Dr.



Prof. Dionny Weinzierl, Dr.

Dedico este trabalho à minha esposa,
Viviane, e aos meus pais, João Guilherme
e Izabel.

AGRADECIMENTOS

À minha amada esposa, Viviane, pelo apoio, compreensão e, acima de tudo, amor dedicados.

Aos meus pais, João Guilherme e Izabel, pelo apoio incondicional, incentivo incansável e por nunca terem medido esforços por uma excelente educação para mim e para meus irmãos.

Ao meu orientador, Mauricio, que dedicou sua paciência e conhecimento e transformou-os em palavras sábias de incentivo à finalização deste trabalho.

A todos os meus amigos e familiares, que de certa forma me ajudaram e incentivaram a terminar mais esta etapa de minha vida.

À WEG Equipamentos Elétricos S/A, por ter me proporcionado a possibilidade de realizar este mestrado, e aos colegas colaboradores que de forma direta ou indireta me ajudaram terminar este trabalho.

A todos, meus sinceros sentimentos de gratidão.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ESTIMANDO A CONFIABILIDADE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO A PARTIR DOS ENSAIOS DE VIDA ACELERADOS DE SEUS COMPONENTES CRÍTICOS

Luiz Otávio Moraes Rego Bentes

Julho/2008

Orientador: Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

Co-Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras-chave: Confiabilidade, testes de vida acelerados, motor de indução monofásico.

Número de Páginas: 75.

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um método de estimação da confiabilidade de um motor de indução monofásico, cuja obtenção de resultados seja no menor tempo possível. O método é baseado na teoria de confiabilidade de sistemas, na qual, realiza-se ensaios de vida acelerados em componentes chaves pertencentes ao sistema. Os resultados destes ensaios são analisados separadamente com ferramentas que estimam seus parâmetros de confiabilidade, considerando sua parte determinística, utilizando-se ferramentas de regressão, e sua parte variável, utilizando-se distribuições de probabilidade. Os parâmetros de confiabilidade encontrados para cada componente são então incluídos em um diagrama de blocos de confiabilidade do sistema, do qual, de acordo com a importância e disponibilidade de cada componente, calculam-se os parâmetros de confiabilidade do sistema como um todo. Para validação do método, foram feitos ensaios em componentes de um determinado motor de indução, com aplicação em máquinas de lavar roupas, e foram determinados seus parâmetros de confiabilidade. Os resultados obtidos demonstraram um alto ganho no tempo de realização dos ensaios, além de se tornar uma ferramenta muito poderosa para definição de metas de qualidade do produto em campo.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

ESTIMATING A SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR RELIABILITY USING QUANTITATIVE ACCELERATED LIFE TESTS IN ITS CRITICAL COMPONENTS

Luiz Otávio Moraes Rego Bentes

July/2008

Advisor: Maurício Valência Ferreira da Luz, Dr.

Co-Advisor: Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Área of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices.

Keywords: Reliability, accelerated life test, single phase induction motor.

Number of Pages: 75.

This work tackles the development of a reliability estimation method for a single phase induction motor, whose attainment of results lasts as minimum time as possible. The method is based in the systems reliability theory, which, accelerated life tests are done in key parts pertaining this system. The tests results are separately analyzed using reliability estimation tools which consider the deterministic part, using regression tools, and the variable part, using probability distributions. The reliability parameters encountered, for each part tested, are then filled up in a reliability functional diagram of the system, which, according to the relevance and availability of each part tested, calculates reliability parameters for the system at all. To evaluate the method, parts of single phase induction motors, washing machines motors, were submitted to accelerated life tests and their reliability parameters calculated, both of them, parts reliability and then system reliability. The results obtained demonstrate a big improve in tests timing, besides the method can become a powerful tool to improve quality marks of this product in field.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS	xi
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. A importância da confiabilidade:	1
1.2. Definindo a confiabilidade de um produto:	2
1.2.1. Definir as funções para as quais o produto foi projetado:	2
1.2.2. Definir o que se entende por um desempenho satisfatório:	2
1.2.3. Definir as condições de operação:	2
1.2.4. Definir o período de tempo durante o qual o produto deve funcionar bem (Tempo de missão):	2
1.3. Técnicas de confiabilidade:	3
1.3.1. FMEA (Análise do modo e efeito de falhas):	3
1.3.2. FTA (Análise da árvore de falhas):	3
1.3.3. Análise de tempo de falha:	3
1.3.4. Testes de vida acelerados:	3
1.4. Técnicas utilizadas para estimar a vida de motores de indução:	4
1.5. Histórico de ensaios de vida em motores de indução na WEG:	4
1.6. O objetivo deste trabalho:	5
1.7. Organização do trabalho:	6
CAPÍTULO 2.....	7
2. TESTES DE VIDA ACELERADOS	7
2.1. Tipos de Testes Acelerados:	8
2.1.1. Testes de vida acelerados:	8
2.1.2. Testes de degradação acelerados:	8
2.2. Variáveis de Estresse:	8
2.3. Tipos de Censura:	8
2.3.1. Censura Tipo 1:	9
2.3.2. Censura Tipo 2:	9
2.3.3. Censura Tipo 3:	9
2.3.4. Censura Aleatória:	10
2.4. Formas de Aceleração de Testes:	10
2.4.1. Aceleração por alta taxa de uso:	10
2.4.2. Aceleração por altos níveis de estresse:	10
2.5. Formas de Aplicação da Carga de Estresse:	11
2.5.1. Constante:	11
2.5.2. Escada (“step stress”):	11
2.5.3. Progressivo:	12
2.5.4. Cíclico:	13
2.5.5. Aleatório:	13
2.6. Relação Estresse-Resposta:	13
2.6.1. Relação de Arrhenius:	15
2.6.2. Relação de Potência Inversa:	16
2.7. Estimativas de confiabilidade	17
2.7.1. Tempo até a falha:	17
2.7.2. A Função de Confiabilidade:	18
2.7.3. A Função de Taxa de Falha (Função de Risco):	19
2.7.4. Relações entre as funções:	19
2.7.5. Tempo médio até a falha:	21
2.8. Modelo Probabilístico de Weibull:	22
2.8.1. Estimando os parâmetros do modelo probabilístico de Weibull:	23
2.8.2. O Método de Máxima Verossimilhança:	24
2.9. Modelo de regressão para dados de testes de vida acelerados:	26

2.9.1.	A forma geral do modelo:	27
2.9.2.	Os modelos Arrhenius-Weibull e Potência Inversa-Weibull:	28
CAPÍTULO 3.....		30
3.	CONFIABILIDADE DOS COMPONENTES CRÍTICOS DE UM MOTOR DE INDUÇÃO	30
3.1.	<i>Separando o motor de indução monofásico em seus componentes críticos:</i>	30
3.2.	<i>Análise de confiabilidade dos componentes críticos:</i>	32
3.2.1.	Análise do componente Bobina:.....	32
i.	Planejamento do ensaio:	33
ii.	Resultados do ensaio:	35
iii.	Análise estatística dos resultados:.....	36
3.2.2.	Análise do componente Bucha:	44
i.	Planejamento do ensaio:	45
ii.	Resultados do ensaio:	48
iii.	Análise estatística dos resultados:.....	48
3.2.3.	Análise do componente Capacitor:.....	56
i.	Planejamento do ensaio:	56
ii.	Resultados do ensaio:	59
iii.	Análise estatística dos resultados:.....	59
CAPÍTULO 4.....		67
4.	CONFIABILIDADE DE SISTEMAS	67
4.1.	<i>Sistemas em série:</i>	68
4.2.	<i>Diagrama de Blocos do Sistema Motor de Indução:</i>	68
4.3.	<i>Unificação da Unidade de Tempo e Cálculos de Confiabilidade no Tempo de Interesse:</i>	69
4.4.	<i>Confiabilidade do Sistema para o Tempo de Garantia:</i>	70
CAPÍTULO 5.....		71
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
ANEXO 1.....		73
	CÓDIGO PARA CÁLCULOS DOS PARÂMETROS E FIGURAS DE MÉRITO (WEIBULL).....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		75

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 - Relações entre as funções $F(t)$, $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$.</i>	21
<i>Tabela 3.1 - Apresentação do motor utilizado nos ensaios.</i>	30
<i>Tabela 3.2 - Proporção de falhas em campo de cada componente (dados AssTec WEG).</i>	31
<i>Tabela 3.3 - Proporção de falhas em campo dos componentes críticos (dados AssTec WEG).</i>	31
<i>Tabela 3.4 - Apresentação dos dados coletados nos ensaios das bobinas.</i>	35
<i>Tabela 3.5 - Tempos até falha das bobinas separados em níveis de estresse.</i>	36
<i>Tabela 3.6 - Tabela dos valores linearizados de T de cada nível de estresse das bobinas.</i>	38
<i>Tabela 3.7 - Pontos excluídos no ajuste de inclinação das retas das bobinas.</i>	38
<i>Tabela 3.8 - Pontos utilizados para calcular inclinação do modelo de Arrhenius linearizado.</i>	40
<i>Tabela 3.9 - Fatores de aceleração calculados para cada nível de estresse das bobinas.</i>	40
<i>Tabela 3.10 - Tempos até a falha e censuras das bobinas no nível de uso (95°C).</i>	41
<i>Tabela 3.11 - Relação de pesos padrões dependurados em cada grupo de estresse dos ensaios de bucha.</i>	47
<i>Tabela 3.12 - Apresentação dos dados coletados nos ensaios das buchas.</i>	48
<i>Tabela 3.13 - Tempos até falha das buchas separados em níveis de estresse.</i>	49
<i>Tabela 3.14 - Tabela dos valores linearizados de T de cada nível de estresse das buchas.</i>	50
<i>Tabela 3.15 - Pontos excluídos no ajuste de inclinação das retas das buchas.</i>	51
<i>Tabela 3.16 - Fatores de aceleração calculados para cada nível de estresse das buchas.</i>	52
<i>Tabela 3.17 - Tempos até falha e censuras das buchas no nível de uso (10 kgf):</i>	53
<i>Tabela 3.18 - Apresentação dos dados coletados nos ensaios dos capacitores.</i>	59
<i>Tabela 3.19 - Tempos até falha dos capacitores separados em níveis de estresse.</i>	60
<i>Tabela 3.20 - Tabela dos valores linearizados de T de cada nível de estresse dos capacitores.</i>	61
<i>Tabela 3.21 - Pontos excluídos no ajuste de inclinação das retas dos capacitores.</i>	62
<i>Tabela 3.22 - Fatores de aceleração calculados para cada nível de estresse dos capacitores.</i>	63
<i>Tabela 3.23 - Tempos até falha e censuras dos capacitores no nível de uso (250V).</i>	64
<i>Tabela 4.1 - Confiabilidade no tempo de garantia dos componentes ensaiados.</i>	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curvas de estresses constantes.....	11
Figura 2.2 - Curvas de estresses do tipo escada	12
Figura 2.3 - Curvas de estresses progressivos	12
Figura 2.4 - Curvas de estresses cíclicos.....	13
Figura 2.5 - Relação entre o estado da variável $X(t)$ e o tempo até falha T [4].....	18
Figura 2.6 - Variação do formato da função taxa de falhas em relação ao parâmetro b	23
Figura 3.1 - Laboratório de teste de vida em motores (WEG).	34
Figura 3.2 - Detalhe da bancada de teste de vida de motores em carga.	34
Figura 3.3 - Distribuição dos pontos até falha das bobinas.....	37
Figura 3.4 - Retas de adequação do método proposto no ensaio das bobinas.	39
Figura 3.5 - Gráfico de adequação com retas do modelo de Arrhenius para o ensaio das bobinas.	39
Figura 3.6 - Linhas de superfície da função verossimilhança para bobinas.....	42
Figura 3.7 - Gráfico da função confiabilidade R das bobinas.	42
Figura 3.8 - Gráfico da função taxa de falhas $h(t)$ das bobinas.....	43
Figura 3.9 - Gráfico da função densidade de probabilidade $f(t)$ das bobinas.....	43
Figura 3.10 - Detalhe da bucha utilizada nos motores ensaiados.	44
Figura 3.11 - Foto da bancada de ensaio em mancal utilizada nos ensaios das buchas.	45
Figura 3.12 - Detalhe da aplicação das cargas radiais nas pontas de eixo nos ensaios de bucha.	46
Figura 3.13 - Desenho esquemático do sistema de forças utilizado nos cálculos dos ensaios de bucha.	47
Figura 3.14 - Distribuição dos pontos até falha das buchas.....	49
Figura 3.15 - Retas de adequação do método proposto no ensaio das buchas.	51
Figura 3.16 - Gráfico de adequação com retas do modelo de Potência Inversa para o ensaio das buchas.	52
Figura 3.17 - Linhas de superfície da função verossimilhança para buchas.	54
Figura 3.18 - Gráfico da função confiabilidade R das buchas.....	54
Figura 3.19 - Gráfico da função taxa de falhas $h(t)$ das buchas.	55
Figura 3.20 - Gráfico da função densidade de probabilidade $f(t)$ das buchas.	55
Figura 3.21 - Vista externa da bancada de ensaio de vida em capacitores.	57
Figura 3.22 - Vista interna da bancada de ensaio de vida em capacitores.....	58
Figura 3.23 - Distribuição dos pontos até falha dos capacitores.....	60
Figura 3.24 - Retas de adequação do método proposto no ensaio dos capacitores.	62
Figura 3.25 - Gráfico de adequação com retas do modelo de Potência Inversa para o ensaio dos capacitores.	63
Figura 3.26 - Linhas de superfície da função verossimilhança para capacitores.	65
Figura 3.27 - Gráfico da função confiabilidade R dos capacitores.....	65
Figura 3.28 - Gráfico da função taxa de falhas $h(t)$ dos capacitores.	66
Figura 3.29 - Gráfico da função densidade de probabilidade $f(t)$ dos capacitores.	66
Figura 4.1 - Exemplo de um diagrama de blocos de um sistema em série.....	67
Figura 4.2 - Diagrama de blocos de um motor monofásico com capacitor de partida.....	69
Figura 4.3 - Diagrama de blocos de um motor monofásico com capacitor permanente.	69
Figura 4.4 - Diagrama de confiabilidade do sistema motor.	70

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. A importância da confiabilidade:

A confiabilidade de um produto tem, sob diversos aspectos, impacto na satisfação do consumidor, aparecendo, em muitos casos, de maneira inconsciente nas decisões de compra. Portanto, dentre os caminhos que podem ser trilhados com o objetivo de aumentar a fatia de mercado das empresas, aqueles que direcionam para uma melhoria da confiabilidade dos produtos devem ser considerados [1].

Durante o desenvolvimento de produtos, equipes de projeto se deparam com problemas inerentes à variabilidade de materiais, processo e aplicações. A visão do projeto, na maioria dos casos, é determinística, não se atendo à variabilidade dos parâmetros de projeto. Parâmetros básicos como massa, dimensões, coeficientes de atrito, forças e esforços não são absolutos, mas sujeitos à variabilidade devido ao processo, variações de materiais, fatores humanos e aplicações. Alguns parâmetros também variam com o tempo. Entender as causas e efeitos da variabilidade é, portanto, necessário para a criação de produtos confiáveis e correção de falhas em produtos já desenvolvidos [6].

Um produto confiável é aquele que inspira segurança, no qual se pode acreditar e com o qual se pode contar. Portanto, associando esta idéia ao fato da confiabilidade aparecer naturalmente nos requisitos de qualidade intrínseca do produto, geralmente associada à sua durabilidade, e também pelo fato de que ao tentar mensurar a confiabilidade comprova-se uma variabilidade nos resultados, é que se pode definir confiabilidade como sendo: **A probabilidade de um item desempenhar satisfatoriamente a função requerida, sob condições de operação estabelecidas, por um período de tempo predeterminado** [1, 4].

1.2. Definindo a confiabilidade de um produto:

Alguns elementos são importantes para definir a confiabilidade de um produto [1, 4]:

1.2.1. Definir as funções para as quais o produto foi projetado:

A falha prematura de um produto não poderá ser considerada uma indicação de baixa confiabilidade, se o usuário o estiver utilizando para exercer funções não previstas em projeto.

1.2.2. Definir o que se entende por um desempenho satisfatório:

Uma vez que as funções estão bem definidas, os parâmetros de bom funcionamento podem então ser determinados e, a partir deles, se obtêm as definições dos diversos tipos de falhas. A definição de falha nestes termos é de grande importância para o fabricante, pois está relacionada com a satisfação do usuário.

1.2.3. Definir as condições de operação:

As condições de operação também são de importância fundamental, pois a falha prematura de um produto só pode ser considerada uma indicação de baixa confiabilidade, se sua utilização tiver ocorrido em condições de projeto.

1.2.4. Definir o período de tempo durante o qual o produto deve funcionar bem (Tempo de missão):

Todo produto é projetado visando um bom funcionamento por certo período de tempo preestabelecido. Alguns produtos admitem reparos durante a missão, porém a probabilidade deste produto falhar durante a missão deve ser extremamente baixa.

1.3. Técnicas de confiabilidade:

Existem quatro técnicas nas quais se baseia a análise de confiabilidade de produtos, elas são [1]:

1.3.1.FMEA (Análise do modo e efeito de falhas):

Usado para examinar várias fontes de problemas em potencial para um sistema. Este método identifica falhas críticas em componentes, suas causas e conseqüências no sistema e no produto/processo como um todo, além de hierarquizar as falhas (grau de importância).

1.3.2.FTA (Análise da árvore de falhas):

Este método verifica as possíveis causas primárias das falhas e faz uma relação lógica entre estas e a falha final do produto.

1.3.3.Análise de tempo de falha:

Este método consiste em utilizar dados amostrais referentes à duração dos produtos e modelá-los segundo algumas distribuições estatísticas conhecidas. A partir desta modelagem estatística, algumas “figuras de mérito” podem ser estimadas e algumas perguntas chaves podem ser respondidas, tais como:

- Qual o tempo necessário para que 1% dos itens apresentem falhas?
- Caso se estipule dois anos de garantia, qual a fração esperada de produtos que irão falhar neste período?

1.3.4.Testes de vida acelerados:

A modelagem através da análise de tempo de falha é feita com base em dados e quando estes dados são originados em testes realizados em laboratório e não em informações de

campo, têm-se os testes de vida. Como um teste de vida realizado sob as condições de projeto pode necessitar de um tempo muito longo até que se observe a falha, entram em cena os testes de vida acelerados que consistem em submeter unidades a testes, porém em condições estressantes. Os resultados são assim obtidos de forma mais rápida e utilizados para estudar o desempenho do produto nas condições de uso.

1.4. Técnicas utilizadas para estimar a vida de motores de indução:

Das técnicas apresentadas em 1.3, somente a última diz respeito aos dados de vida coletados em ensaios de laboratório. A análise de tempos de falha depende das coletas de dados de falha em campo, o que não é muito eficiente quando se possuem assistências técnicas terceirizadas e que dão suporte principalmente a falhas dentro do tempo de garantia.

Portanto, a técnica utilizada para estimar vida útil de motores de indução ensaiados em laboratório são os testes de vida acelerados. O capítulo 2 aborda os testes acelerados para que se possa entender melhor como ele funciona.

1.5. Histórico de ensaios de vida em motores de indução na WEG:

Em um primeiro momento, quando a necessidade de saber a confiabilidade de um motor de indução tornou-se inevitável, principalmente porque estes motores, em geral, fazem parte de um conjunto de componentes que formam uma máquina cujos fabricantes passaram a exigir tais informações, os fabricantes de motores se capacitaram objetivando chegar a estes valores.

A solução mais rápida seria aplicar a análise de tempos de falha com dados retirados de falhas em campo por meio de assistências técnicas. Porém, a maioria das indústrias, não só as de motores de indução, possuem o controle destas informações somente no período de garantia. Portanto, torna-se inviável esta solução por terem dados somente de uma pequena porcentagem dos produtos que falham precocemente, geralmente por algum problema de fabricação ou de controle de qualidade e não por desgaste como a maioria das falhas.

Contudo, a WEG Equipamentos Elétricos S/A, no ano de 2002 construiu seu laboratório de teste de vida com o objetivo de passar a realizar testes de vida acelerados. Inicialmente, este

laboratório passou a realizar testes de vida acelerados por altas taxas de uso, o que acarretava em um teste preciso, porém muito lento na aquisição dos resultados finais de confiabilidade. Para se ter uma idéia, um ensaio demorava mais de dois anos para gerar os resultados, isso quando se chegava a algum resultado, o que é inadmissível comparado à velocidade de desenvolvimento de novos produtos no mercado industrial de hoje. Isto tudo porque ainda tinha-se total desconhecimento em relação aos testes de vida acelerados por altos níveis de estresse.

Em 2005 o laboratório se capacitou a realizar testes acelerados por altos níveis de estresse, utilizando as temperaturas de bobina e as tensões de alimentação como os principais fatores estressantes. Os resultados foram fantásticos, principalmente no tempo de duração do ensaio que diminuiu para uma média de doze a quinze meses, o que representa uma diminuição de até duas vezes no tempo total de ensaio e a certeza de que se chegaria a um resultado. Além disso, os resultados obtidos eram muito parecidos com os resultados dos ensaios acelerados por alta taxa de uso, ou seja, diminuiu-se o tempo de ensaio com a mínima perda de precisão.

1.6. O objetivo deste trabalho:

O objetivo deste trabalho é diminuir mais ainda os tempos de teste e, se possível, aumentar a precisão dos resultados. Para este objetivo, o método a ser utilizado é o de confiabilidade de sistemas, cujos componentes críticos que os formam são os objetos a serem ensaiados. Para tanto, realizou-se juntamente ao departamento de assistência técnica da WEG um FMEA de produto para descobrir quais eram os componentes críticos do motor de indução e ainda, caso um desses componentes viesse a falhar, quais seriam as chances de todo o sistema falhar. Isto definiu o peso de cada componente crítico na vida do sistema motor de indução.

A maneira de calcular os parâmetros de confiabilidade de cada componente é idêntica ao método que se usa hoje em ensaios acelerados por altos níveis de estresse. O que muda é a maneira de ensaiar estes componentes e, conseqüentemente, as variáveis de estresse a serem utilizadas.

1.7. Organização do trabalho:

O texto está separado em cinco capítulos. O primeiro, como se pôde observar, consiste em uma introdução à teoria da confiabilidade, assim como a importância e os objetivos do trabalho.

O segundo capítulo apresenta os conceitos e as ferramentas utilizadas no estudo e aplicação de testes de vida acelerados, que é uma ferramenta da teoria de confiabilidade e tem por objetivo mensurar a confiabilidade do item ensaiado no menor tempo possível.

No terceiro capítulo faz-se utilização da teoria apresentada no segundo capítulo para planejar, realizar e analisar ensaios nos componentes de um determinado motor de indução monofásico.

O quarto capítulo apresenta a teoria de confiabilidade de sistemas e utiliza os resultados encontrados no capítulo três, dos componentes do motor de indução, para encontrar medidas de confiabilidade do sistema motor de indução.

Finalmente, no quinto capítulo, encontram-se as considerações finais e as perspectivas em relação a este tema.

CAPÍTULO 2

2. TESTES DE VIDA ACELERADOS

Atualmente, os fabricantes enfrentam o desafio de desenvolver novos produtos, com tecnologia mais avançada e em tempo recorde enquanto que, paralelamente, devem continuar os esforços de melhoria da produtividade, da confiabilidade em campo e da qualidade, de maneira geral. Em termos práticos, isto significa que as informações referentes à confiabilidade dos produtos necessitam ser obtidas em um período curto de tempo, para que possam ser utilizadas em novos projetos e na melhoria dos já existentes [1].

As informações relacionadas ao desempenho dos produtos originam-se, basicamente, de duas fontes: dados de campo e dados experimentais (testes).

Os dados de campo são obtidos pelo monitoramento de amostras em campo ou através de serviços autorizados de assistência técnica. Entretanto, muitos produtos modernos são projetados para operar, sem falhas, por anos. Portanto, provavelmente poucas unidades irão apresentar falhas durante o período de observação em caso de amostras, e a informação obtida em serviços autorizados muitas vezes não são totalmente confiáveis e, em geral, estão disponíveis apenas para produtos dentro do prazo de garantia.

Devido aos problemas expostos acima, essas fontes de dados são, em grande parte, insuficientes. Faz-se necessária então a coleta de dados experimentais. Entretanto, testes realizados sob as condições normais de uso são muito demorados e caros. Uma forma, freqüentemente utilizada para obter informações de maneira mais rápida, facilitando a predição da confiabilidade, é a realização de testes acelerados. Em geral, a informação obtida sob altos níveis de estresse (taxa de uso, temperatura, tensão) é extrapolada, através de um modelo estatístico-físico razoável, para se conseguir estimativas, por exemplo, do tempo médio de vida nas condições de uso.

A verdade é que os testes acelerados, quando bem entendidos, cuidadosamente realizados e os resultados apropriadamente analisados podem gerar informações importantes que permitirão agregar muito valor ao produto [1].

2.1. Tipos de Testes Acelerados:

Os testes acelerados podem ser divididos em dois tipos. Esta classificação é feita basicamente em função da característica dos dados coletados em cada um [1]:

2.1.1. Testes de *vida* acelerados:

São aqueles onde a resposta de interesse é o “tempo até a ocorrência da falha”. O objetivo neste caso é estimar figuras de mérito tais como o tempo médio entre falhas, a função de confiabilidade ($R(t)$), etc. Através da modelagem de tais dados, pode-se, com certo cuidado, extrapolar os resultados obtidos nos testes para as condições normais de uso.

2.1.2. Testes de *degradação* acelerados:

Neste caso, a resposta de interesse é alguma medida de performance do produto ou componente (resistência à tração, oxidação, desgaste, etc.), obtida ao longo do tempo. O objetivo aqui é estudar a degradação da performance do produto ao longo do tempo e utilizar esta informação para estimar a distribuição do tempo de vida do mesmo.

2.2. Variáveis de Estresse:

Variável de estresse é aquela que, utilizada num teste em níveis diferentes daqueles considerados em condições normais de uso, encurta o tempo até a falha do produto [1, 4].

2.3. Tipos de Censura:

Freqüentemente, não é possível conduzir testes de vida em um produto até que todas as unidades falhem, devido ao longo tempo necessário para que isto ocorra. Nestas circunstâncias, o tempo total de teste é determinado tal que alguns produtos falhem, restando outros denominados *sobreviventes*, que permanecerão operando normalmente até o final do

período de teste. A interrupção do teste antes que toda a amostra apresente algum tipo de falha é denominada *censura* do teste. Os diferentes tipos de censura existentes são descritos na seqüência:

2.3.1.Censura Tipo 1:

São colocadas n unidades em teste por um período de tempo t . Registram-se os tempos-até-falha T das r unidades que falharam neste período. As unidades sobreviventes são quantificadas através da subtração do número total de unidades pelas unidades que falharam neste período ($n - r$). O número de falha r é uma variável aleatória, pois depende da duração e nível de *stress* aplicado no teste.

A realização de estudos de confiabilidade e análise das falhas das unidades testadas depende da ocorrência de falhas no período t de teste. Assim, a duração do teste deve ser determinada de tal forma a ocorrerem falhas de, pelo menos, uma porção representativa das unidades. O tempo T , quando é interrompido o teste, é referenciado como *tempo de censura* e este tipo de censura é chamada *Censura Tipo 1* [3].

2.3.2.Censura Tipo 2:

São colocadas n unidades em teste, até que r unidades falhem. O teste termina no tempo t_r . Como o número de falhas é especificado antecipadamente, sabe-se quantas informações serão obtidas do teste, o que assegura a realização do estudo de confiabilidade. O período de duração do teste T , todavia, é uma variável aleatória, pois depende da duração e nível de estresse aplicado no teste.

Neste tipo de teste, o parâmetro de censura é o número de falhas r que determina a duração do teste. Este tipo de censura é chamada *Censura Tipo 2* [3].

2.3.3.Censura Tipo 3:

Trata-se de mistura dos dois tipos de censura apresentados acima. O teste é concluído depois que r unidades falharem ou quando terminar o período de teste T , o que ocorrer

primeiro. O número de unidades que devem falhar (r) e o período de tempo (T) são determinados antes do início do teste [4].

2.3.4.Censura Aleatória:

Censura aleatória ocorre quando n unidades são testadas em diferentes períodos de tempo e não existe um número determinado de unidades que devem falhar ao final de cada período de tempo. Ou seja, não há parâmetro de tempo ou número de falhas determinado no momento de censura.

2.4. Formas de Aceleração de Testes:

Basicamente, acelera-se um teste submetendo as unidades a níveis mais altos de estresse do que aqueles encontrados nas condições normais de uso. Em outras palavras, escolhem-se níveis para as variáveis de estresse, bem mais altos do que aqueles aos quais o produto é submetido em condições normais de uso. As formas de aceleração podem ser divididas de acordo com dois tipos de variáveis de estresse [1]:

2.4.1.Aceleração por alta taxa de uso:

Neste caso, fica claro que a variável de estresse é o uso. Coloca-se o produto em operação, porém com uma taxa de uso mais elevada do que a normal. Isto pode ser conseguido através da redução do tempo de descanso do produto ou pela utilização de uma velocidade mais alta de operação.

2.4.2.Aceleração por altos níveis de estresse:

Consiste em colocar o produto em uso submetido a níveis altos das variáveis de estresse com o objetivo de encurtar o tempo de vida ou degradar a performance do produto de maneira mais rápida. Neste caso, trata-se de variáveis de estresse como temperatura, tensão, vibração, entre outras.

2.5. Formas de Aplicação da Carga de Estresse:

A carga de estresse num teste acelerado pode ser aplicada de várias maneiras. Ressalta-se que estas formas só se aplicam para o segundo tipo de variável de estresse discutido acima, isto é, outras variáveis que não o “uso”.

Existem quatro formas de aplicação de carga em testes acelerados, elas serão discutidas a seguir [1]:

2.5.1. Constante:

É o tipo mais comum. Cada unidade é submetida a um nível de estresse constante (ver figura 2.1). Note que, para que se possa fazer alguma modelagem dos dados obtidos, devem-se utilizar vários níveis de estresse. No entanto, uma vez fixado o nível de estresse para uma determinada unidade, esta ficará submetida a este nível até o final do teste. As vantagens desta forma de aplicação de estresse vão desde a simplicidade na realização do teste até o uso de modelos simples na análise dos resultados.

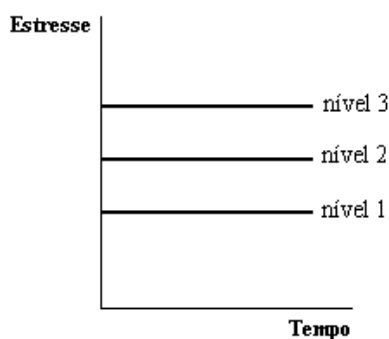


Figura 2.1 - *Curvas de estresses constantes*

2.5.2. Escada (“step stress”):

Cada unidade é submetida a um nível de estresse por um período de tempo (ver figura 2.2). Se a unidade não falhar, o nível de estresse é elevado para um novo patamar, e o procedimento se repete. A principal vantagem deste método é levar rapidamente à ocorrência de falhas. Uma pequena desvantagem em relação ao método anterior está na

estimação das medidas de confiabilidade. A maioria dos produtos em condições normais de uso é submetida a uma carga constante, e não do tipo “escada”. Portanto, o modelo deve, de maneira adequada, levar em consideração o efeito cumulativo da exposição a estresses sucessivos.

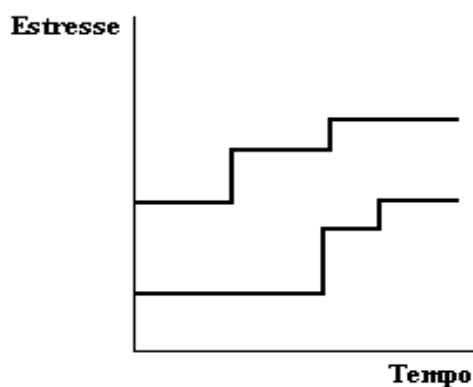


Figura 2.2 - *Curvas de estresses do tipo escada*

2.5.3. Progressivo:

Cada unidade é submetida a um nível crescente de estresse, porém esse aumento não é feito em patamares, mas progressivamente (ver figura 2.3). O uso de testes com estresse progressivo apresenta as mesmas vantagens e desvantagens do tipo “escada”. Além disso, pode ser difícil em um teste acelerado controlar o aumento progressivo do nível de estresse.

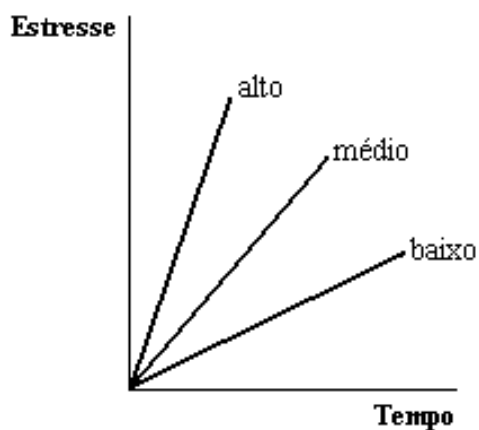


Figura 2.3 - *Curvas de estresses progressivos*

2.5.4. Cíclico:

Cada unidade é submetida a estresses de níveis alto e baixo de maneira cíclica (ver figura 2.4).

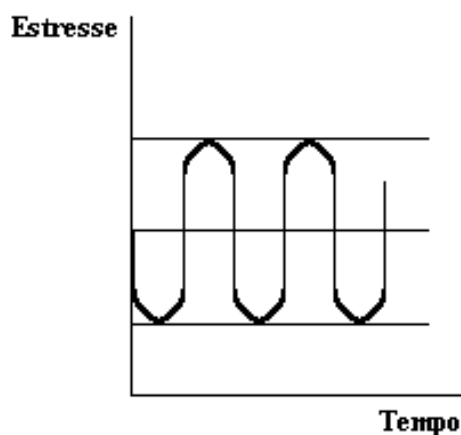


Figura 2.4 - Curvas de estresses cíclicos

2.5.5. Aleatório:

Alguns produtos, quando em uso, estão sujeitos a níveis de estresse que se alteram de maneira aleatória. Num teste acelerado, os níveis de estresse serão aplicados seguindo uma distribuição a mais próxima possível da que ocorre na realidade, porém a níveis mais elevados.

2.6. Relação Estresse-Resposta:

Qualquer pessoa que esteja familiarizada com experimentos, qualquer que seja a finalidade destes, já se deparou com a situação na qual, mesmo mantendo-se as condições do experimento fixas (por exemplo, temperatura ou tensão), nem sempre os mesmos resultados foram obtidos. Esta constatação aparentemente óbvia pode ter suas origens nas causas mais variadas, desde problemas com o aparelho de medição até o fato de não se ter capacidade de controlar todas as fontes de variabilidade envolvidas em um experimento ou teste, seja por desconhecimento destas, seja pela impossibilidade prática de se executar tal controle.

Portanto, em qualquer experimento realizado sob condições controladas de temperatura e pressão, observa-se que o tempo até falha não é o mesmo para cada um dos produtos em teste. Ou seja, observa-se uma variabilidade nos resultados [6].

Pode-se ir adiante e perguntar: ao aumentar a temperatura ou a pressão (variáveis de estresse) de um ensaio. O processo de obtenção dos tempos até falha é acelerado?

Pode-se dizer ainda, que o tempo até falha (resposta) está relacionado com o estresse (variável de estresse), segundo um modelo [1, 6]:

$$\text{tempo} = f(\text{estresse}) + \text{erro} \quad (2.1)$$

onde $f(\text{estresse})$ é o que se intitula de relação estresse-resposta e é uma função que expressa a tendência de um aumento na variável de estresse implicar em um aumento ou em uma diminuição nos tempos até falha do experimento.

A relação estresse-resposta é um modelo determinístico, ou seja, para um dado valor da variável de estresse, chega-se a um único valor para o tempo de falha. O modelo não é capaz de explicar a variabilidade de valores encontrados para a variável resposta em um mesmo nível de estresse.

Assim, é necessário acrescentar ao componente determinístico (relação estresse-resposta) um componente probabilístico que seja capaz de explicar a variabilidade dos tempos de falha das unidades sob teste em um mesmo nível de estresse. Portanto, para cada nível de estresse, os tempos de falha das unidades seguem certa distribuição de probabilidade (modelo probabilístico) [1, 6].

Concluindo, os modelos que serão utilizados nas análises estatísticas dos testes de vida acelerados serão compostos de uma parte determinística (relação estresse-resposta) e uma parte probabilística. A parte probabilística será definida de acordo com a distribuição de probabilidade Weibull cujas equações e métodos de estimação de parâmetros serão apresentados posteriormente.

Em seguida duas relações estresse-resposta muito utilizadas na prática em modelos para testes de vida acelerados são apresentadas [1]:

2.6.1. Relação de Arrhenius:

A relação de Arrhenius é utilizada para relacionar o tempo de falha do produto com a variável de estresse temperatura. Alguns exemplos de aplicação incluem:

- dielétricos;
- plásticos;
- filamentos de lâmpadas incandescentes.

Esta relação é baseada na Lei de Arrhenius. De acordo com esta lei, a taxa de uma reação química simples (de primeira ordem) depende da temperatura, segundo a seguinte expressão:

$$taxa = A' e^{(-E/kt)} \quad (2.2)$$

onde:

- E é a energia de ativação, normalmente em elétron-volts;
- k é a constante de Boltzmann: $8,6171 \times 10^{-5}$ por K (Kelvin);
- \bullet é a temperatura absoluta Kelvin ($273,16 + ^\circ\text{C}$) e
- A' é uma constante que é característica do mecanismo de falha do produto e das condições de teste.

Assim, explica-se a falha devido a uma reação química ou difusão através de uma relação bem simples. Assume-se que o produto falhou quando uma quantidade crítica do produto químico reagiu. Uma visão simplificada desta situação é dada por:

$$(\text{quantidade crítica}) = (\text{taxa}) \times (\text{tempo até a falha}) \quad (2.3)$$

De onde se tira a *Relação de Arrhenius*:

$$T = A e^{\left(\frac{E}{kt}\right)} \quad (2.4)$$

Onde T é o tempo até falha e $A = (\text{quantidade crítica}) / A'$.

A partir da relação de Arrhenius mostrada na equação 2.4, encontra-se o *Fator de Aceleração de Arrhenius* entre o tempo de falha T_0 na temperatura \bullet_0 de projeto e o tempo de falha T numa temperatura de interesse \bullet . Este fator é dado por:

$$A_c = \frac{T_0}{T} = e^{\{(E/k)[(1/t_0)-(1/t)]\}} \quad (2.5)$$

Existe uma equação muito usada na prática em ensaios de material isolante baseada na relação de Arrhenius e cuja Energia de Ativação (E) não é um parâmetro a ser estimado. Este parâmetro já é conhecido e leva em consideração a informação de que a cada 10°C acima da temperatura de uso \bullet_0 o tempo de falha cai pela metade:

$$A_c = \frac{T_0}{T} = 2^{\left(\frac{t-t_0}{10}\right)} \quad (2.6)$$

2.6.2. Relação de Potência Inversa:

Esta relação é utilizada para modelar o tempo de falha em função de qualquer tipo de variável de estresse. Alguns exemplos de aplicações incluem:

- Lâmpadas incandescentes;
- Fadiga de metais;
- Isolantes, dielétricos, etc.

Supondo que a variável de estresse V seja sempre positiva (como acontece na maioria das situações). Então a relação de potência inversa tem a seguinte forma:

$$T = \frac{A}{V^W} \quad (2.7)$$

onde: T é o tempo de falha, A e \bullet são parâmetros característicos do produto, unidade, geometria, fabricação, método de teste, etc.

A partir da equação 2.7, encontra-se o *Fator de Aceleração* entre o tempo de falha T_0 no nível de estresse V_0 (que pode ser a condição de projeto) e o tempo de falha T no nível de estresse de interesse V :

$$A_c = \frac{T_0}{T} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^W \quad (2.8)$$

Os métodos de estimação da vida útil por intermédio de experimento foram citados nos parágrafos anteriores, seja para produtos complexos ou para pequenos componentes que façam parte deste produto.

2.7. Estimativas de confiabilidade

As principais funções utilizadas para analisar a confiabilidade de um produto são: a função confiabilidade, $R(t)$; a função taxa de falhas (função de risco), $h(t)$; e o tempo médio até falha, MTTF (“Mean Time Till Failure”) para o caso de sistemas não-reparáveis como o sistema em estudo, no qual o motor quando falha é trocado inteiramente. Caso fosse um sistema reparável, ou seja, caso fossem feitas trocas de peças do motor durante sua vida, existe o tempo médio entre falhas, MTBF (“Mean Time Between Failure”).

A seguir são apresentadas as descrições destas funções (exceto a MTBF), alguns conceitos e outras funções relevantes para um estudo de confiabilidade.

2.7.1. Tempo até a falha:

O tempo até a falha designa o período desde que a unidade entrou em operação até o momento da falha. Considera-se $t = 0$ como o tempo inicial. Como o tempo até a falha pode apresentar variações, pode ser considerado uma variável aleatória e designado por T . O estado da unidade no tempo t pode ser descrito pelo estado da variável $X(t)$, uma variável dicotômica, assim definida [4]:

- $X(t) = 1$, se a unidade estiver funcionando no tempo t ;
- $X(t) = 0$, se a unidade não estiver funcionando no tempo t .

A relação entre o estado da variável $X(t)$ e o tempo até a falha T vem apresentada na figura 2.5. Note que o tempo até a falha T não precisa ser, necessariamente, medido em 0.

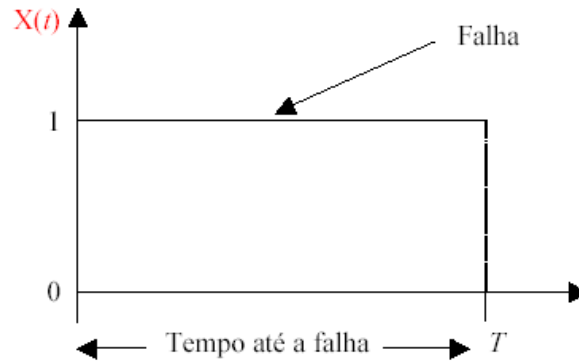


Figura 2.5 - Relação entre o estado da variável $X(t)$ e o tempo até falha T [4].

O tempo até a falha T será considerado como distribuído continuamente, com densidade de probabilidade $f(t)$. A função acumulada de falha $F(t)$ é:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u) du \quad (2.9)$$

para $t > 0$.

Portanto, $F(t)$ representa a probabilidade da unidade falhar dentro do intervalo de tempo $(0, t)$.

A densidade de probabilidade $f(t)$ é definida como [7]:

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (2.10)$$

2.7.2.A Função de Confiabilidade:

Esta é uma das principais funções probabilísticas usadas para descrever estudos provenientes de testes de durabilidade. A função de confiabilidade é definida como a probabilidade de um produto desenvolver sua função sem falhar até certo tempo t [1].

Considere uma situação em que componentes são testados quanto a sua confiabilidade. Ao final de um tempo t , têm-se: n_0 = número total de componentes testados; $n_f(t)$ = número de componentes que falharam durante o teste no período t ; $n_s(t)$ = número de componentes que não falharam durante o teste no período t sendo que $n_0 = n_f(t) + n_s(t)$. A

função confiabilidade $R(t)$ é definida como a função acumulada de sucesso no tempo t , isto é [3]:

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)} = \frac{n_s(t)}{n_0} \quad (2.11)$$

Considerando que

$$F(t) = \frac{n_f(t)}{n_0} \quad (2.12)$$

verifica-se que a função de confiabilidade $R(t)$ corresponde ao complemento da função acumulada de falha $F(t)$, ou seja:

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) \quad (2.13)$$

para $t > 0$.

2.7.3.A Função de Taxa de Falha (Função de Risco):

A taxa de falha em um determinado intervalo $(t, t + \Delta t)$ é definida como a probabilidade de que a falha ocorra neste intervalo, dado que esta não ocorreu antes de t , dividida pelo comprimento do intervalo [1, 4]. Assim, a taxa de falha no intervalo $(t, t + \Delta t)$ é expressa por:

$$P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (2.14)$$

Dividindo esta probabilidade pelo comprimento do intervalo de tempo Δt e considerando $\Delta t \rightarrow 0$, chega-se a função de risco da unidade:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.15)$$

A função de taxa de falha é bastante útil para descrever a distribuição do tempo de vida de produtos. Ela descreve a forma em que a taxa instantânea de falha muda com o tempo.

2.7.4.Relações entre as funções

Baseado nas equações (2.10) e (2.13), pode-se descrever $f(t)$ como:

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} (1 - R(t)) = -R'(t) \quad (2.16)$$

então,

$$h(t) = \frac{-R'(t)}{R(t)} = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (2.17)$$

Como $R(0) = 1$, tem-se:

$$\int_0^t h(t) dt = -\ln R(t) \quad (2.18)$$

e

$$R(t) = e^{-\int_0^t h(u) du} \quad (2.19)$$

A função de confiabilidade $R(t)$ e a função acumulada de falhas $F(t)$ podem ser determinadas pela função de risco, $h(t)$. Através das equações (2.15) e (2.19), conclui-se que a probabilidade de falhas pode ser expressa, alternativamente, por:

$$f(t) = h(t) e^{-\int_0^t h(u) du} \quad (2.20)$$

para $t > 0$.

Um resumo das relações entre as funções $F(t)$, $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$ vem apresentado na tabela 2.1 [2]:

Tabela 2.1 - Relações entre as funções $F(t)$, $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$.

	$F(t)$	$f(t)$	$R(t)$	$h(t)$
$F(t)$	-	$\int_0^t f(u)du$	$1 - R(t)$	$1 - e^{-\int_0^t h(u)du}$
$f(t)$	$\frac{d}{dt}F(t)$	-	$-\frac{d}{dt}R(t)$	$h(t)e^{-\int_0^t h(u)du}$
$R(t)$	$1 - F(t)$	$\int_t^\infty f(u)du$	-	$e^{-\int_0^t h(u)du}$
$h(t)$	$\frac{\frac{d(F(t))}{dt}}{1 - F(t)}$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(u)du}$	$-\frac{d}{dt}\ln R(t)$	-

2.7.5. Tempo médio até a falha:

Uma das principais formas de quantificar a confiabilidade de um sistema é através do tempo médio até a falha (MTTF).

Supondo que n sistemas idênticos não-reparáveis são observados até a ocorrência de falhas nos tempos t_1, t_2, \dots, t_n , a média dos tempos até a falha, MTTF, estimada será [3]:

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (2.21)$$

Uma vez conhecida a distribuição de probabilidade dos tempos observados até a falha, a MTTF corresponderá ao valor esperado da variável aleatória T , isto é:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (2.22)$$

A MTTF também pode ser estimada a partir da função de confiabilidade $R(t)$. Como $R(t) = 1 - F(t)$ e $f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$, substituindo $f(t)$ na equação 2.22, chega-se a:

$$MTTF = -\int_0^{\infty} t \frac{dR(t)}{dt} dt = -\int_0^{\infty} t dR(t) = tR(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.23)$$

Como $R(\infty) = 0$ e $R(0) = 1$, a equação 2.23 reduz-se para:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.24)$$

2.8. Modelo Probabilístico de Weibull:

Todos os modelos probabilísticos são apresentados ou definidos por meio de suas funções de confiabilidade e taxa de falha. Em seguida será apresentado o modelo probabilístico de Weibull que será o modelo utilizado neste estudo.

Como dito anteriormente, este modelo se juntará à relação estresse-resposta para modelar a análise estatística de um ensaio acelerado, isto porque os modelos estresse-resposta apresentados nas equações 2.4 e 2.7 representa sua parte determinística e o modelo probabilístico Weibull, a ser apresentado, representa sua parte probabilística. Desta forma se têm um modelo que faz a relação do quanto uma variável de estresse é eficaz na diminuição dos tempos até a falha e um outro modelo, apresentado em seguida, que tenta mensurar a variabilidade dos tempos até a falha.

A distribuição de Weibull foi proposta originalmente por W. Weibull (1954) em estudos relacionados ao tempo de falha devido à fadiga de metais. Ela é frequentemente empregada para descrever o tempo de vida de produtos industriais. Outra razão da popularidade da distribuição de Weibull em aplicações práticas deve-se ao fato dela apresentar uma grande variedade de formas.

As funções confiabilidade, taxa de falhas e densidade de probabilidade da distribuição de Weibull são dadas respectivamente por:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{h}\right)^b} \quad (2.25)$$

$$h(t) = \frac{b}{h} \left(\frac{t}{h}\right)^{b-1}, \quad t \geq 0 \quad (2.26)$$

$$f(t) = \left(\frac{b}{h^b} \right) t^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{h}\right)^b}, \quad t \geq 0 \quad (2.27)$$

Verifica-se que nelas existem dois parâmetros a serem estimados para modelar a distribuição. Um deles é o parâmetro de forma (b) que define a forma da função, como se pode verificar no gráfico da figura 2.6, que mostra a variação da função taxa de falhas em relação ao tempo para diferentes parâmetros de forma (b):

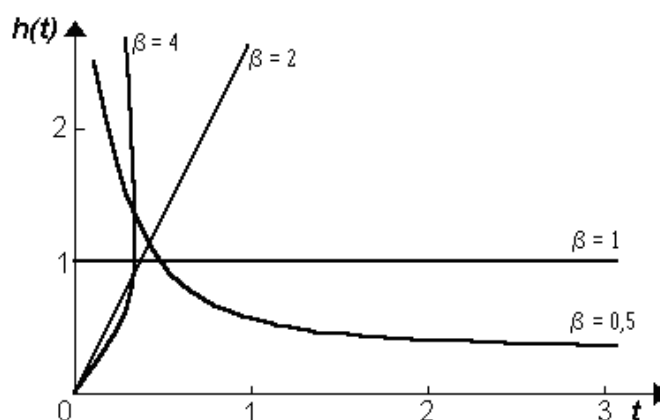


Figura 2.6 - Variação do formato da função taxa de falhas em relação ao parâmetro b.

O outro parâmetro (h) é chamado de vida característica e possui a mesma unidade de t.

Na seqüência será apresentado o principal método de estimação destes parâmetros de interesse (b e h), com os quais ficam conhecidas as funções confiabilidade e taxa de falhas para qualquer distribuição de tempos até a falha

2.8.1. Estimando os parâmetros do modelo probabilístico de Weibull:

O modelo probabilístico de Weibull é caracterizado por quantidades desconhecidas, denominados parâmetros, neste caso (b e h). Estas quantidades conferem uma forma geral ao modelo probabilístico. Entretanto, em cada estudo de confiabilidade, tais parâmetros devem ser estimados a partir das observações amostrais, de tal forma que o modelo fique determinado e possibilite responder às perguntas de interesse [1].

A precisão na estimação dos parâmetros depende da quantidade de amostras e do método utilizado para estimá-los. As propriedades de um bom estimador são: (i) não

tendencioso – o bom estimador não deve subestimar ou superestimar sistematicamente o valor do parâmetro que está sendo estimado; (ii) consistente – o bom estimador deve tender ao verdadeiro valor do parâmetro quando a quantidade de amostras aumenta; (iii) eficiente – deve apresentar variância mínima, ou seja, deve gerar intervalos de confiança estreitos na previsão do parâmetro; (iv) suficiente – deve utilizar toda a informação que a amostra contém.

Existem alguns métodos de estimação conhecidos na literatura estatística. Talvez o mais conhecido seja o método de mínimos quadrados, geralmente apresentado em cursos básicos de estatística dentro do contexto de regressão linear. No entanto, este método é inapropriado para estudos de confiabilidade. A principal razão é a sua incapacidade de incorporar censuras no seu processo de estimação. O método de máxima verossimilhança surge como uma opção apropriada para este tipo de dados. Ele incorpora as censuras, é relativamente simples de ser entendido e possui propriedades que permitem construir intervalos de confiança para as quantidades de interesse.

2.8.2.O Método de Máxima Verossimilhança:

O método de máxima verossimilhança trata o problema de estimação da seguinte forma: baseando-se nos resultados obtidos pelas amostras, qual é a distribuição entre todas aquelas definidas pelos possíveis valores de seus parâmetros, com maior possibilidade de ter gerado tais resultados? Em outras palavras se, por exemplo, a distribuição do tempo de falha é a de Weibull, para cada combinação diferente de b e h têm-se diferentes distribuições de Weibull. O método de máxima verossimilhança escolhe aqueles valores de b e h que melhor expliquem os resultados gerados pelo teste [1].

Ou seja, este método baseia-se na avaliação da probabilidade de ocorrência dos valores amostrados da variável de interesse. A partir da amostra aleatória, obtida de uma população com densidade $f(t)$ e parâmetro q , a função de verossimilhança é o resultado da função de densidade avaliada em cada ponto da amostra.

$$L(q) = \prod_{i=1}^n f(t_i; q) \quad (2.28)$$

onde \prod representa o produtório das funções.

A dependência de f em q precisa agora ser mostrada, pois L é função de q . Nesta expressão, q pode estar representando um único parâmetro ou um conjunto de parâmetros. Por exemplo, no modelo de Weibull, $q = (b \text{ e } h)$. A tradução em termos matemáticos para a frase “a distribuição que melhor explique a amostra observada” é achar o valor de q que maximize a função $L(q)$. Isto é, achar o valor de q que maximiza a probabilidade de a amostra observada ocorrer.

A função de verossimilhança $L(q)$ mostra que a contribuição de cada observação não-censurada é a sua função de densidade. A contribuição de cada observação censurada não é a sua função de densidade. Estas observações somente informam que o tempo de falha é maior que o tempo de censura observado e, portanto, que a sua contribuição para $L(q)$ é sua função de confiabilidade $R(t)$. As observações podem então ser divididas em dois conjuntos, as r primeiras são as não-censuradas ($1, 2, \dots, r$), e as $n-r$ seguintes são as censuradas ($r+1, r+2, \dots, n$). A função de verossimilhança assume a seguinte forma:

$$L(q) = \prod_{i=1}^r f(t_i; q) \prod_{i=r+1}^n R(t_i; q) \quad (2.29)$$

É sempre conveniente trabalhar com o logaritmo natural da função de verossimilhança. Os estimadores de máxima verossimilhança são os valores de q que maximizam $L(q)$ ou equivalentemente $\ln[L(q)]$. Eles são encontrados resolvendo o seguinte sistema de equações:

$$U(q) = \frac{\partial \ln L(q)}{\partial q} = 0 \quad (2.30)$$

A função de log-verossimilhança para uma amostra de dados de durabilidade provenientes de uma distribuição de Weibull é obtida a partir das equações (2.25) e (2.27), ficando da seguinte forma:

$$\ln[L(h, b)] = \ln \left\{ \prod_{i=1}^r \left(\frac{b}{h^b} \right) t_i^{b-1} e^{-\left(\frac{t_i}{h}\right)^b} \prod_{i=r+1}^n e^{-\left(\frac{t_i}{h}\right)^b} \right\}$$

$$= r \ln(b) + b \ r \ln(h) + (b - 1) \sum_{i=1}^r \ln(t_i) - h^{-b} \sum_{i=1}^n t_i^b \quad (2.31)$$

De forma alternativa, fazendo-se $y_i = \ln(t_i)$ e utilizando a distribuição do valor extremo com $m = \ln(h)$ e $S = 1/b$, obtém-se:

$$\ln[L(m,S)] = -r \ln(S) + \sum_{i=1}^r \left(\frac{y_i}{S} \right) - \frac{r m}{S} - \sum_{i=1}^n e^{(y_i - m)/S} \quad (2.32)$$

que é mais simples que a log-verossimilhança obtida para a distribuição de Weibull. Derivando a função de log-verossimilhança $\ln[L(m,S)]$ e igualando a zero, encontra-se o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial \ln L(m,S)}{\partial m} = \frac{1}{S} \left\{ -r + \sum_{i=1}^n e^{(y_i - m)/S} \right\} = 0 \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial \ln L(m,S)}{\partial S} = \frac{1}{S^2} \left\{ -rS - \sum_{i=1}^r y_i + r m + \sum_{i=1}^n e^{(y_i - m)/S} (y_i - m) \right\} = 0 \quad (2.34)$$

Para resolver este sistema de equações com dois parâmetros a serem estimados não existem soluções fechadas e métodos numéricos são necessários para encontrá-las. Nestes casos, o método iterativo de Newton-Raphson é frequentemente utilizado associado a estes modelos. Vários softwares estatísticos já possuem estas rotinas implementadas, possibilitando a estimativa dos parâmetros dos modelos. Neste trabalho, a rotina de cálculo foi implementada em Matlab, que possui o método MLE já implementado na função “*weibfit*” (ver anexo I).

2.9. Modelo de regressão para dados de testes de vida acelerados:

A extrapolação dos resultados de um teste acelerado para as condições de uso neste trabalho será feita com a aplicação da relação estresse-resposta de Arrhenius ou Potência Inversa. O ponto principal da discussão em relação a este modelo é a dependência implícita de tais relações estresse-resposta em constantes que estão associadas a mecanismos de falha específicos. Fica-se diante de duas opções: a utilização de alguns valores tabelados ou a

estimação de tais constantes através de dados experimentais. A segunda opção, que será defendida ao longo deste trabalho, exige a condução de testes sob vários níveis de estresse. A idéia é utilizar mais de uma amostra de componentes, e alocar cada uma delas a um nível diferente de estresse. Verifica-se que os dados assim obtidos, quando adequadamente modelados e analisados, permitirão ao mesmo tempo a estimação das constantes associadas às relações estresse-resposta, bem como a extrapolação de resultados para as condições de uso.

A análise é feita através de modelos de regressão, como será mostrado adiante. Tais modelos nada mais são do que a utilização das relações estresse-resposta em conjunto com o modelo probabilístico de Weibull.

2.9.1.A forma geral do modelo:

Os modelos utilizados na análise de dados de confiabilidade são construídos para o logaritmo do tempo de falha T , ou seja, $Y=\ln(T)$. Nestes modelos supõe-se que Y tem uma distribuição com parâmetro de locação $m(x)$ e parâmetro de escala $\sigma > 0$, que não depende de “ x ”. Utiliza-se a notação $m(x)$ ao invés de μ para indicar que o parâmetro de locação da distribuição de Y depende da variável de estresse “ x ”. Em outras palavras, $m(x)$ é a relação estresse-resposta. Este será o procedimento geral, qualquer que seja a distribuição suposta para Y . Neste modelo, escreve-se sempre o parâmetro de locação da distribuição de $Y=\ln(T)$ em função da variável de estresse “ x ”.

O modelo toma então a seguinte forma geral:

$$Y = \ln(T) = m(x) + S \varepsilon \quad (2.35)$$

onde ε tem distribuição que independe da variável de estresse “ x ”.

Existem várias opções de escolha para a forma funcional da dependência de m na variável de estresse “ x ”. A forma mais simples (e mais utilizada) é a linear:

$$m(x) = b_0 + b_1 x \quad (2.36)$$

Neste caso, o modelo toma a forma:

$$Y = \ln(T) = b_0 + b_1 x + S \varepsilon \quad (2.37)$$

Note que o modelo toma a forma do modelo de regressão linear simples quando se supõe que $Y = \ln(T)$ tem distribuição normal (gaussiana), com média (parâmetro de

locação) $m(x) = b_0 + b_1x$ e variância (parâmetro de escala) σ^2 (ou de maneira equivalente, ε tem distribuição normal com média zero e variância um).

A seguir, serão apresentados os modelos baseados na distribuição de Weibull (Arrhenius-Weibull e Potência Inversa-Weibull). Poderá ser observado que os dois modelos assumem a forma log-linear apresentada na equação 2.37. O que os faz diferir um do outro é a distribuição que é suposta para $\ln(T)$ e a forma como a variável de estresse “ x ” aparece no modelo.

2.9.2. Os modelos Arrhenius-Weibull e Potência Inversa-Weibull:

Estes modelos partem de dois pressupostos:

- a) No nível de estresse “ x ”, o tempo de falha T tem distribuição Weibull ($h(x)$; b), ou, de maneira equivalente, $Y=\ln(T)$ tem distribuição do valor extremo ($\ln[h(x)]$; σ) onde $S = 1/b$;
- b) O parâmetro de forma β da distribuição do tempo de falha T (Weibull) é constante ou, em outras palavras, independe da variável de estresse “ x ”. Isto equivale a dizer que a distribuição de $Y=\ln(T)$ tem parâmetro de escala $S = 1/b$, e que é o mesmo para todos os níveis de estresse.

O modelo então é dado por (2.36) onde ε tem distribuição do valor extremo padrão (isto é, $m = \ln[h(x)] = 0$ e $S = 1/b = 1$) e;

- a) Quando $x = 1/t$, sendo t a temperatura absoluta, têm-se o modelo Arrhenius-Weibull. Neste caso:
 - $b_0 = \ln(A)$;
 - $b_1 = \frac{E}{k}$ e, portanto, estimando os parâmetros do modelo, automaticamente estima-se a energia de ativação (E) e a constante “ A ”.

b) Quando $x = -\ln(V)$, onde V é a variável de estresse, têm-se o modelo de Potência Inversa-Weibull. Também neste caso estimando os parâmetros do modelo, automaticamente estimam-se as constantes da relação estresse-resposta, uma vez que:

- $b_0 = \ln(A)$;
- $b_1 = w$.

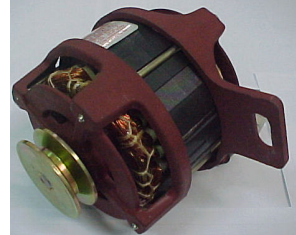
CAPÍTULO 3

3. CONFIABILIDADE DOS COMPONENTES CRÍTICOS DE UM MOTOR DE INDUÇÃO

3.1. Separando o motor de indução monofásico em seus componentes críticos:

Antes de fazer a separação em componentes críticos, apresenta-se o motor escolhido para fazer este trabalho:

Tabela 3.1 - Apresentação do motor utilizado nos ensaios.

Motor	Carcaça	Potência	Polaridade	Tensão	Classe Isol.
	N42	0,33CV	4	127V	B

Este motor é monofásico com capacitor permanente ($45\mu\text{F}$ - 250V), mancal dianteiro e traseiro com buchas e sua aplicação se dá em máquinas de lavar roupas.

Conforme citado no item anterior, para fazer a separação dos componentes críticos do motor de indução descrito acima, foram coletados dados de 3600 falhas em campo no período de janeiro de 2005 até abril de 2007 específicos para este motor juntamente ao Departamento de Assistência Técnica da WEG Motores. Estes dados repassados consistem em uma tabela com tempos e causas de falhas (FMEA) dentro do tempo de garantia. Os dados de falha em campo dentro do tempo de garantia não servem para este trabalho, mas estes dados não foram usados em sua forma absoluta (quantitativa) e sim somente como forma qualitativa, ou seja, eles serviram somente para ter uma amostra do quanto um componente do motor em questão falha mais ou menos em relação a outro componente pertencente ao mesmo motor. Esta informação é necessária para definir os componentes mais críticos e também para definir qual o peso que cada componente tem na vida do sistema como um todo.

As proporções de falha encontradas para cada componente encontram-se na tabela 3.2:

Tabela 3.2 - *Proporção de falhas em campo de cada componente (dados AssTec WEG).*

Componente	Proporção de Falhas
Bobina Principal	44,09%
Bobina Auxiliar	35,19%
Rolamento	9,47%
Bucha	4,52%
Capacitor	1,41%
Outros	5,32%
Total	100,00%

Desta forma definem-se os cinco componentes citados na tabela 3.2 como os componentes críticos do motor em questão e os valores de proporção são seus respectivos pesos na vida do sistema em questão.

Vale salientar também que as bobinas auxiliar e principal, para o caso de motores de indução monofásicos de capacitor permanente, encontram-se em pleno funcionamento durante todo o processo de utilização do motor. Como possuem modos de falha muito parecidos, pode-se considerá-las como um só componente, definindo-os somente como bobina. Da mesma forma, independente do motor avaliado possuir mancais com bucha ou rolamento na traseira ou na dianteira, pode-se tratar os problemas de campo deste componente como problemas de mancal em geral. Desta forma, a nova tabela de proporções de falhas fica somente com três componentes críticos:

Tabela 3.3 - *Proporção de falhas em campo dos componentes críticos (dados AssTec WEG).*

Componente	Proporção de Falhas
Bobina	79,28%
Mancal	13,99%
Capacitor	1,41%
Outros	5,32%
Total	100,00%

Pode-se verificar que neste caso a bobina é responsável por quase 80% das falhas e, portanto, é a principal responsável pela vida do motor em questão. O principal modo de falha encontrado é de curtos-circuitos em geral, ou seja, falhas na isolação.

3.2. Análise de confiabilidade dos componentes críticos:

A seguir serão apresentados todos os detalhes de análise de confiabilidade de cada componente crítico, incluindo planejamento do ensaio, resultados encontrados, análise estatística e cálculo dos resultados de interesse que serão fixados no valor da confiabilidade do componente no tempo de garantia.

3.2.1. Análise do componente Bobina:

A função primária de uma bobina ou enrolamento, como também é chamado, é de receber a potência elétrica diretamente da rede e alimentar o circuito magnético do motor (estator e rotor) com o fluxo magnético induzido. Posteriormente este fluxo tem a função de gerar o campo girante e conseqüentemente fazer o motor funcionar. Portanto, como se pode constatar, o bom funcionamento da bobina está diretamente ligado ao bom funcionamento do motor como um todo.

Os modos de falha do componente bobina estão, de forma geral, relacionados ao mau funcionamento de sua isolação, seja em relação à isolação dos fios com a parte magnética do estator provenientes dos papéis isolantes ou à isolação entre fios de uma mesma bobina provenientes dos vernizes de impregnação. Desta forma pode-se concluir que as falhas detectadas em bobinas estão sempre ligadas a alguma falha de isolação.

Sabe-se também que de acordo com os órgãos certificadores (IEC, UL, NBR, etc.), os materiais isolantes são separados em classes que determinam a temperatura máxima de funcionamento para que este material não fique comprometido. Os isolantes do motor utilizado nesta análise pertencem à classe B que limita sua temperatura máxima de funcionamento em 130°C.

Da informação acima se pode tirar duas conclusões. A primeira é que em temperaturas acima de 130°C o sistema de isolação do motor se degrada em uma velocidade maior do que a normal. A segunda é que se pode aproveitar da primeira conclusão para utilizar o aumento da temperatura da bobina destes motores como variável de estresse para a mesma.

Nos parágrafos acima foram definidos a confiabilidade do componente bobina. Definiu-se a função para a qual a bobina é projetada, quando se entende que seu desempenho é satisfatório e quais são as condições necessárias para que este componente

funcione dentro de suas características de projeto. Faltou somente definir o tempo de missão que para o caso deste componente crítico é o próprio tempo de missão do motor como um todo, ou seja, seu tempo de garantia que foi fixado em dois anos. Portanto, dentro destes dois anos a probabilidade de falha deste componente deve ser consideravelmente baixa.

i. Planejamento do ensaio:

Algumas definições foram tomadas antes de iniciar o ensaio para cumprir os objetivos deste trabalho, tais como realizar ao mesmo tempo testes de vida acelerados por alta taxa de uso e por altos níveis de estresse com o objetivo de diminuir o tempo de ensaio, que é o objetivo principal do trabalho. Para tanto foram feitos os ciclos de funcionamento iguais aos ciclos de funcionamento da máquina de lavar (aplicação do motor) e definiu-se utilizar um ciclo após o outro sem nenhum tempo parado, nos quais foram utilizados sobrecarga e sobretensão para chegar às temperaturas de teste. Definiram-se também as temperaturas absolutas a serem aplicadas nas bobinas como variável de estresse a serem utilizadas, desta forma os ensaios foram realizados em três níveis de temperatura definidos aleatoriamente como 115°C, 145°C e 165°C.

A temperatura de uso deste motor na aplicação também foi definida para que fosse posteriormente estimada a confiabilidade na temperatura de uso conforme a teoria de testes de vida acelerados. Portanto, o motor foi energizado em sua carga e tensão nominais e após sua estabilização foi medida a temperatura da bobina cujo resultado foi de 95°C.

Utilizou-se uma amostragem de dez motores para os testes em cada temperatura. Não foram ensaiadas mais amostras por uma limitação física das bancadas de ensaio. As figuras 3.1 e 3.2 mostram algumas fotos do sistema (bancada) utilizado nos testes em questão.



Figura 3.1 - Laboratório de teste de vida em motores (WEG).



Figura 3.2 - Detalhe da bancada de teste de vida de motores em carga.

Estas bancadas possuem dez dinâmômetros de disco de Foucault para prover carga na ponta de eixo do motor simulando a carga da aplicação. A tensão de alimentação é

igual para todos os dez motores e pode variar de 0 a 380V e o controle de reversão, temperatura e tempos de ciclo dos motores é feito por CLP.

Os ensaios foram censurados com 4631 horas de funcionamento, que se converte em pouco mais de 6 meses de teste (21/06/2007 até 28/01/2008). Isso porque com este tempo já haviam dados suficientes para a análise baseados em uma análise prévia.

ii. Resultados do ensaio:

Tabela 3.4 - Apresentação dos dados coletados nos ensaios das bobinas.

TABELA DE DADOS DO TESTE DE VIDA ACELERADO				
Falha / Censura	Tempo até falha (horas)	Causa da falha	Identificação	Grupo de Aceleração
Falha	295	Curto entre espiras	Motor 4	165°C
Falha	675	Curto entre espiras	Motor 2	165°C
Falha	879	Curto entre espiras	Motor 7	165°C
Falha	1350	Filme Isolante	Motor 8	165°C
Falha	2085	Curto entre espiras	Motor 3	165°C
Falha	2161	Curto entre espiras	Motor 5	165°C
Falha	2276	Rolamento travado	Motor 9	165°C
Falha	2397	Não identificado	Motor 6	165°C
Falha	2437	Não identificado	Motor 1	165°C
Falha	2625	Rolamento travado	Motor 10	165°C
Falha	561	Curto entre espiras	Motor 1	145°C
Falha	1273	Curto entre espiras	Motor 7	145°C
Falha	1670	Filme Isolante	Motor 8	145°C
Falha	2550	Filme Isolante	Motor 3	145°C
Falha	3961	Curto entre espiras	Motor 4	145°C
Falha	4105	Curto entre espiras	Motor 9	145°C
Falha	4324	Curto entre espiras	Motor 2	145°C
Falha	4554	Rolamento travado	Motor 5	145°C
Falha	1270	Curto entre espiras	Motor 9	115°C
Falha	2235	Curto entre espiras	Motor 6	115°C
Falha	3191	Filme Isolante	Motor 2	115°C
Censura	4631	-	Motor 6	145°C
Censura	4631	-	Motor 10	145°C
Censura	4631	-	Motor 1	115°C
Censura	4631	-	Motor 3	115°C
Censura	4631	-	Motor 4	115°C
Censura	4631	-	Motor 5	115°C
Censura	4631	-	Motor 7	115°C
Censura	4631	-	Motor 8	115°C
Censura	4631	-	Motor 10	115°C

Na tabela 3.4 encontram-se os resultados dos ensaios das bobinas. Nela pode-se observar que houve seis falhas, destacadas em vermelho, cuja causa foge das falhas devido às características do componente crítico bobina e que não estão sendo estudadas no momento. Por este motivo estes dados foram eliminados e, portanto, não serão utilizados nos cálculos que virão a seguir.

iii. Análise estatística dos resultados:

Daqui para frente serão usados somente os dados de tempo até a falha e o nível de estresse de cada grupo de aceleração conforme tabela 3.5:

Tabela 3.5 - Tempos até falha das bobinas separados em níveis de estresse.

	Níveis de Estresse (°C)		
	165	145	115
Tempos até falha (horas)	295	561	1270
	675	1273	2235
	879	1670	3191
	1350	2550	
	2085	3961	
	2161	4105	
		4324	

A relação estresse resposta escolhida para estes resultados é a relação de Arrhenius apresentada anteriormente e que segundo a teoria se molda muito bem quando a variável de estresse é a temperatura. A fórmula de Arrhenius é uma exponencial, ou seja, ela diz que a taxa com a qual certo material se degrada em relação a temperatura é exponencial e para comprovar isto foram colocados os pontos de falha observados no ensaio distribuídos na figura 3.3 e foi observado que a forma se assemelha à uma exponencial exceto para os pontos em 115°C que se assemelha à uma reta, porém acredita-se que isto ocorra pelo fato de que houve somente três pontos de observação, o que não chega a comprometer a análise.

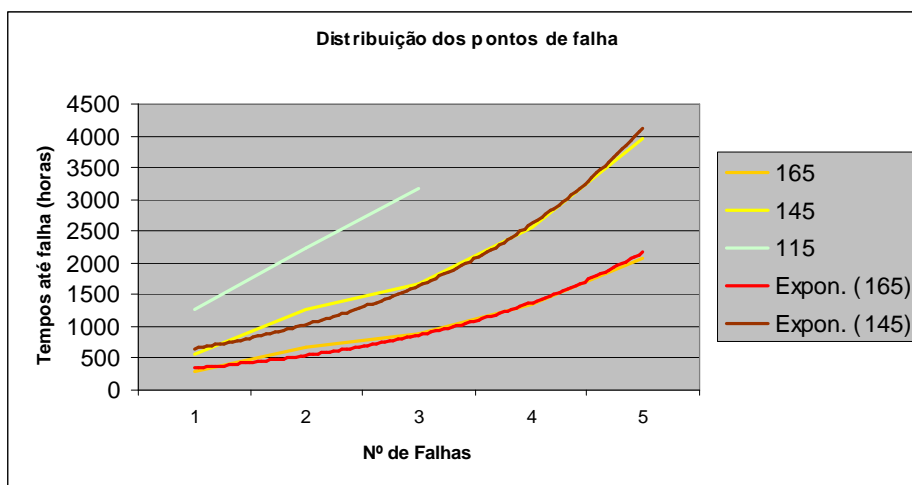


Figura 3.3 - Distribuição dos pontos até falha das bobinas.

Para encontrar os parâmetros da fórmula de Arrhenius (energia de ativação e quantidade crítica) foi usada sua forma linearizada que é encontrada aplicando logaritmo neperiano em ambos os lados da equação (3.1) de Arrhenius e a forma geral do modelo de regressão (3.2):

$$T = A e^{\left(\frac{E}{kt}\right)} \quad (3.1)$$

$$Y = \ln(T) = b_0 + b_1 x + S e \quad (3.2)$$

Desta forma chegam-se às definições já apresentadas nos itens 2.9.1 e 2.9.2:

$$b_0 = \ln(A);$$

$$b_1 = \left(\frac{E}{k}\right);$$

Onde:

$x = 1/t$, ou seja, o inverso da temperatura absoluta ($t = 273,16 + ^\circ C$);

E é a energia de ativação, normalmente em elétron-volts;

k é a constante de Boltzmann: $8,6171 \times 10^{-5}$ por Kelvin;

A é uma constante que é característica do mecanismo de falha do produto e das condições de teste.

Portanto, desta forma esta relação especifica que o logaritmo neperiano do tempo de falha, $\ln(T)$, é uma função linear do inverso da temperatura absoluta ($x = 1/t$).

Desta forma, os dados para a análise linear ficam conforme tabela 3.6:

Tabela 3.6 - Tabela dos valores linearizados de T de cada nível de estresse das bobinas.

		$x = 1/\tau$		
		0,002282	0,002391	0,002576
$\ln(T)$		5,69	6,33	7,15
		6,51	7,15	7,71
		6,78	7,42	8,07
		7,21	7,84	
		7,64	8,28	
		7,68	8,32	
			8,37	

O próximo passo deste método consiste em fazer um ajuste da inclinação da distribuição dos pontos $\ln(T)$ em cada nível de estresse x , pois teoricamente a inclinação destas retas precisa ser praticamente igual para o método funcionar, ou seja, é um teste de adequação ao método que se pretende utilizar.

Na prática, para fazer esta adequação ao método às vezes é necessário excluir algumas observações realizadas, ou seja, excluir alguns pontos de $\ln(T)$. Caso seja necessário excluir muitos pontos para se adequar ao método, ele se torna inviável.

Para o caso em estudo, eliminando os pontos grifados em vermelho na tabela 3.7, as equações das retas ficam com a inclinação muito parecida como se pode verificar na figura 3.4.

Tabela 3.7 - Pontos excluídos no ajuste de inclinação das retas das bobinas.

		$x = 1/\tau$		
		0,002282	0,002391	0,002576
$\ln(T)$		5,69	6,33	7,15
		6,51	7,15	7,71
		6,78	7,42	8,07
		7,21	7,84	
		7,64	8,28	
		7,68	8,32	
			8,37	

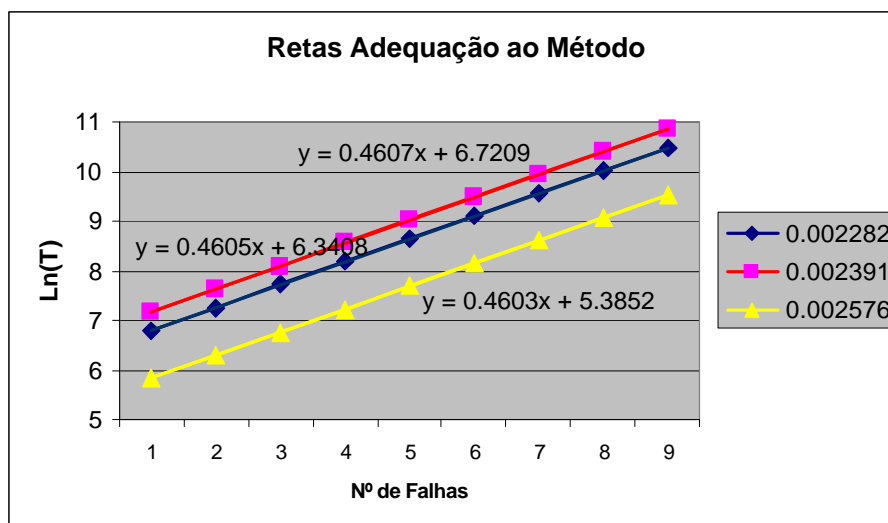


Figura 3.4 - Retas de adequação do método proposto no ensaio das bobinas.

A partir das retas de adequação ao método podem-se traçar as retas de aceleração, ou seja, as retas do modelo linearizado de Arrhenius ($\ln(T) = b_0 + b_1 x$) que são retas formadas por três pontos e que possuem inclinação muito parecida.

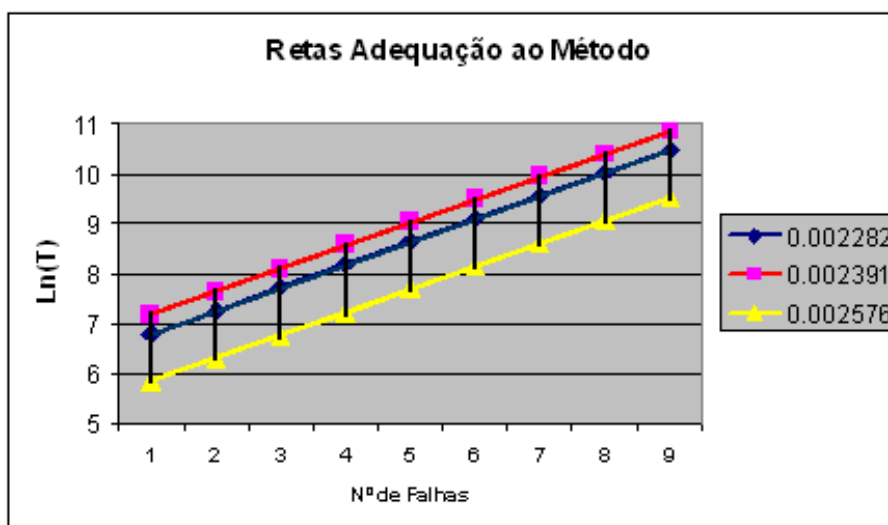


Figura 3.5 - Gráfico de adequação com retas do modelo de Arrhenius para o ensaio das bobinas.

Para exemplificar como foi calculada esta inclinação do modelo linearizado de Arrhenius será utilizada a reta formada por três pontos cujas coordenadas (x, y) são

respectivamente ($1/\tau$, $\ln(T)$) da falha de número cinco de cada grupo de aceleração conforme tabela 3.8:

Tabela 3.8 – Pontos utilizados para calcular inclinação do modelo de Arrhenius linearizado.

Grupo de aceleração	Ponto de Falha nº5		
	165°C	145°C	115°C
Coord. X ($1/\tau$)	0,002282	0,002391	0,002576
Coord. Y ($\ln(T)$)	7,686925	8,326432	9,024267

A reta formada por estes três pontos resulta em uma inclinação $\beta_1=4467$ e uma intercepção $\beta_0=-2.45$.

Com esta inclinação calculada, calcula-se a energia de ativação E conforme a equação $b_1 = \frac{E}{k}$ e, em seguida, determina-se o fator de aceleração do ensaio conforme a equação (2.5) para todos os níveis de aceleração na qual $\tau_0 = 95^\circ\text{C}$ e $\tau = 165^\circ\text{C}$; 145°C e 115°C .

Os fatores de aceleração de cada ponto de aceleração em relação à temperatura de uso (95°C) encontram-se na tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Fatores de aceleração calculados para cada nível de estresse das bobinas.

	Fator de Aceleração
165°C	6,98
145°C	4,28
115°C	1,87

Multiplicando-se os tempos até a falha e as censuras de cada grupo de aceleração (165°C , 145°C e 115°C) presentes na tabela 3.4 por seu respectivo fator de aceleração, encontram-se na tabela 3.10 os tempos até a falha e as censuras para o nível de uso (95°C) onde as células verdes indicam as censuras.

Tabela 3.10 - Tempos até a falha e censuras das bobinas no nível de uso (95°C).

Nível de Uso (°C)	
95	
Tempos até falha e censuras (horas)	1896
	4336
	5648
	8672
	13392
	2152
	4886
	6411
	9788
	15203
	2399
	3990
	5697
	8267
	8267
	8267
	8267
8267	
8267	
17775	
17775	

Os passos seguintes desta análise estatística são: a adequação destes dados em condições de uso ao modelo probabilístico de Weibull, a estimação de seus parâmetros e o cálculo dos resultados de interesse.

Para tanto, como se têm treze tempos até a falha, eles serão utilizados na rotina apresentada no anexo I que utiliza os estimadores de máxima verossimilhança (ver 2.8.2) com o objetivo de encontrar os parâmetros b e h e plotar os gráficos das equações (2.25), (2.26) e (2.27).

Na figura 3.6 pode-se visualizar os resultados do método de máxima verossimilhança na forma de um gráfico de superfícies da função verossimilhança. As coordenadas do pico (valor máximo da coordenada z) correspondem aos parâmetros desta distribuição de falhas $b = 1,48$ e $h = 12329$.

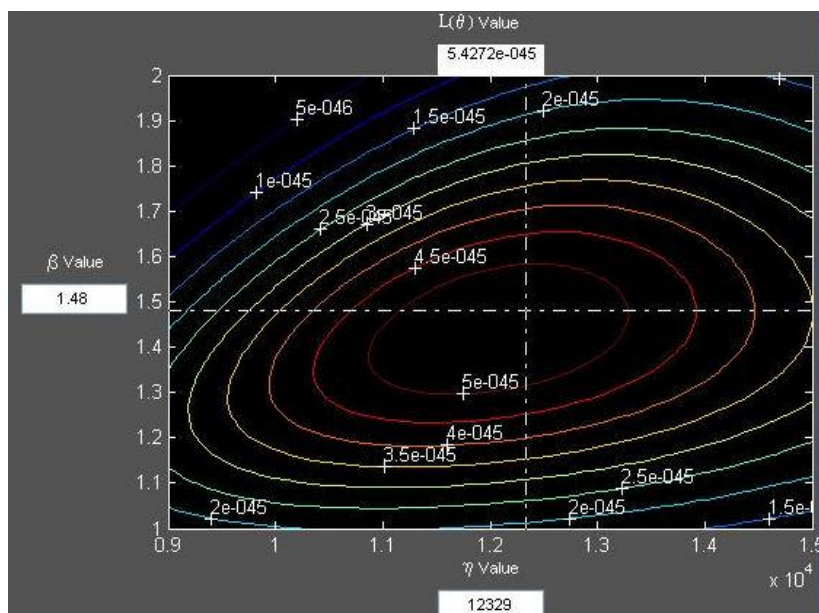


Figura 3.6 - Linhas de superfície da função verossimilhança para bobinas.

Os gráficos de confiabilidade, taxa de falhas e densidade de probabilidade (equações (2.25), (2.26) e (2.27)) para a distribuição de tempos de falha da tabela 3.10, são mostrados nas figuras 3.7, 3.8 e 3.9, respectivamente.

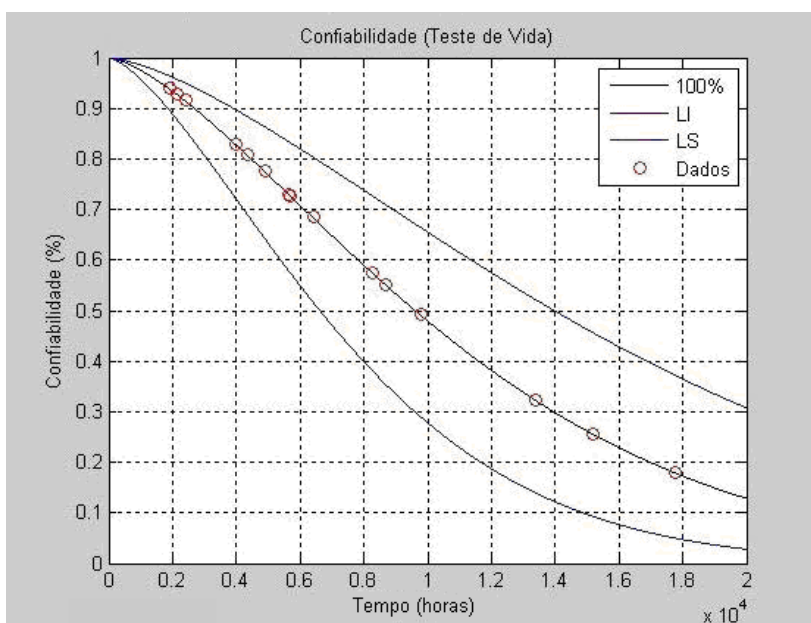


Figura 3.7 - Gráfico da função confiabilidade R das bobinas.

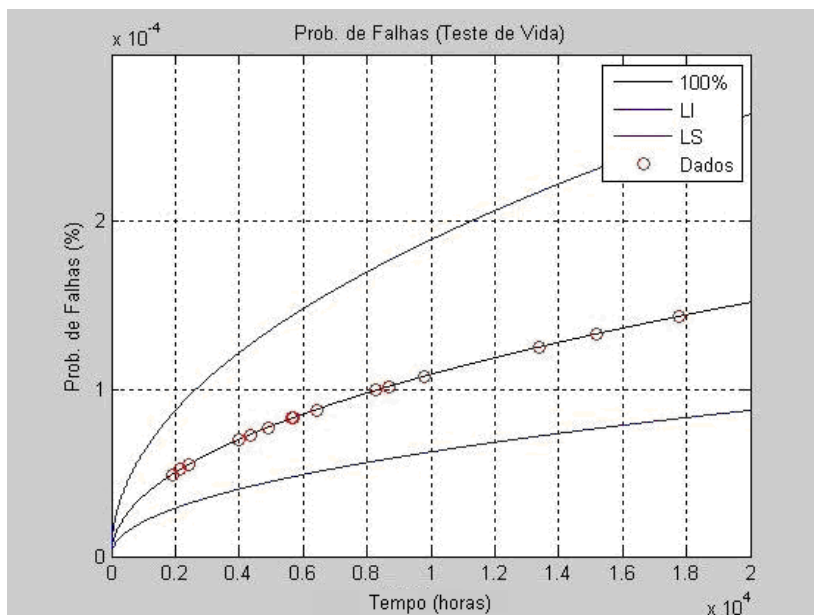


Figura 3.8 - Gráfico da função taxa de falhas $h(t)$ das bobinas.

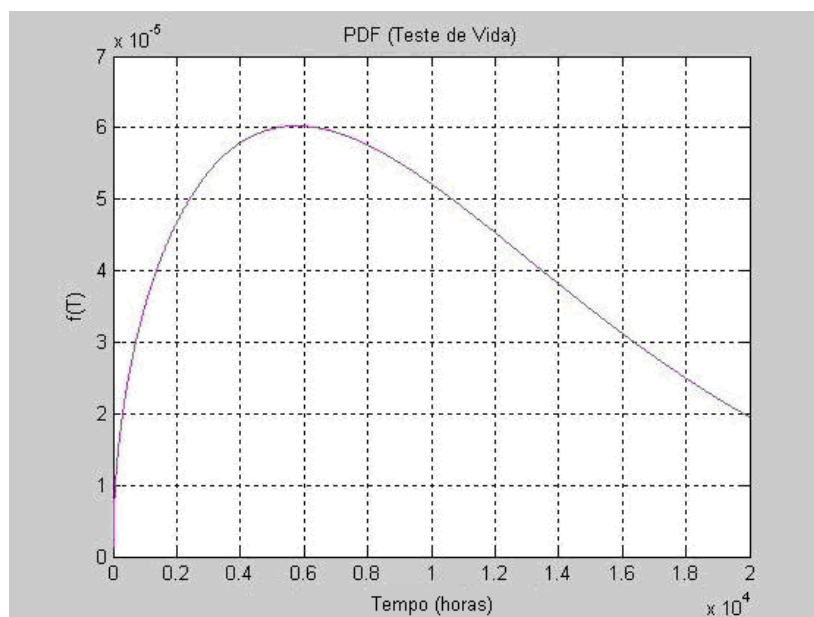


Figura 3.9 - Gráfico da função densidade de probabilidade $f(t)$ das bobinas.

Definem-se, assim, os dados de confiabilidade da distribuição de falhas do componente bobina no modelo de Weibull.

3.2.2. Análise do componente Bucha:

A função primária da bucha é de prover sustentação com o mínimo de atrito possível ao rotor de um motor de indução. Para tanto a bucha utilizada é porosa e de bronze (figura 3.10). Porosa com o objetivo de reter óleo em seus poros e diminuir o atrito com o eixo do rotor e de bronze para perder e ganhar o mínimo de massa possível durante seu contato com o eixo do rotor. Assim como a bobina, o bom funcionamento da bucha está diretamente ligado ao bom funcionamento do motor como um todo.



Figura 3.10 - Detalhe da bucha utilizada nos motores ensaiados.

Os modos de falha deste componente estão diretamente ligados ao desgaste excessivo de seu material, no caso o bronze. Este desgaste pode ocorrer devido à falta de óleo em seus poros provocado por uma alta temperatura em seus mancais, tendo como efeito a perda de material e conseqüente variação do entreferro, e em casos extremos até arraste de rotor com estator.

Da definição dos modos de falha tira-se a conclusão de que, caso seja aumentado o atrito da bucha com o eixo do rotor forçadamente, consegue-se aumentar a taxa de desgaste do material da bucha. Portanto, pode-se utilizar uma força radial exercida na ponta do eixo do motor como variável de estresse.

Nos parágrafos acima foram definidos a confiabilidade do componente bucha. Definiu-se a função para a qual a bucha é projetada, quando se entende que seu desempenho é satisfatório e quais são as condições necessárias para que este componente funcione dentro de suas características de projeto. Assim como na bobina foi definido seu tempo de missão como sendo o tempo de missão do motor como um todo, ou seja, seu tempo de garantia

fixado em dois anos. Portanto, dentro destes dois anos a probabilidade de falha deste componente também deve ser consideravelmente baixa.

i. Planejamento do ensaio:

Assim como nos ensaios das bobinas, algumas definições foram feitas antes de iniciar o ensaio, tais como realizar ao mesmo tempo, testes de vida acelerados por alta taxa de uso e por altos níveis de estresse com o objetivo de diminuir o tempo de ensaio.

Diferentemente do ensaio das bobinas, neste ensaio a estrutura utilizada não permitiu fazer os ciclos de funcionamento iguais aos ciclos de funcionamento da máquina de lavar, isto porque a bancada da figura 3.11 não possui estrutura para fazer reversão de sentido de rotação nos motores. Desta forma foi determinado aleatoriamente um ciclo de quinze minutos ligado na tensão nominal e cinco minutos desligado, sendo feito um ciclo após o outro, nos quais foram aplicadas cargas radiais nas pontas de eixo conforme figura 3.12.



Figura 3.11 - Foto da bancada de ensaio em mancal utilizada nos ensaios das buchas.



Figura 3.12 - Detalhe da aplicação das cargas radiais nas pontas de eixo nos ensaios de bucha.

Definiu-se também as cargas (variáveis de estresse) a serem aplicadas em cada um dos três grupos de dez motores, de forma a deixar a maior carga como sendo a mínima carga na qual o motor ainda ficasse em rotação plena. Ou seja, foi medida a carga máxima que se podia colocar na ponta de eixo sem que o motor parasse de girar e encontrou-se o valor de 21 kgf. As outras duas cargas foram escolhidas de forma aleatória, levando em consideração que fossem no mínimo maiores do que a carga normal de uso que é de 10 kgf. Portanto, as cargas de ensaio escolhidas foram 21 kgf, 17 kgf e 13 kgf.

Para saber quais pesos padrões colocar em cada grupo de aceleração, de forma a ter os valores determinados acima, nas pontas de eixo, utilizou-se o cálculo no qual o peso necessário é função do braço de alavanca, conforme apresentado na figura 3.12 e que deve ser calculado pela equação (3.3).

$$P = \frac{FR a}{(a + b)} \quad (3.3)$$

Onde:

- FR é a força radial desejada na ponta do eixo;
- a e b são as dimensões conforme o desenho esquemático da figura 3.13;

- P é a força peso, exercida pela ação da gravidade sobre a massa dependurada.

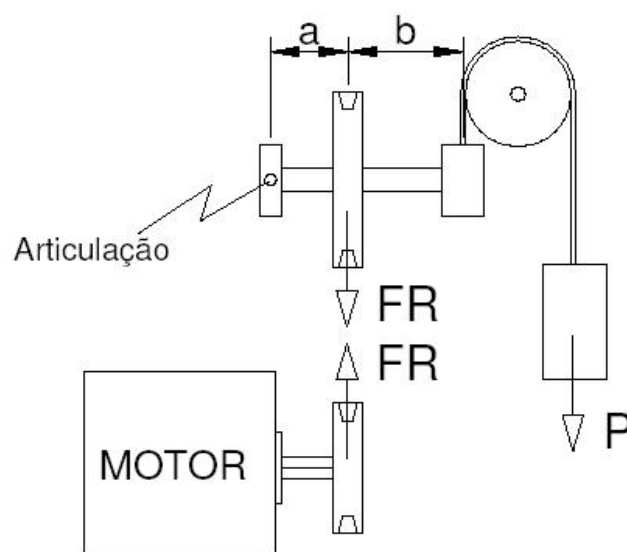


Figura 3.13 - Desenho esquemático do sistema de forças utilizado nos cálculos dos ensaios de bucha.

As dimensões a e b são iguais a 50 mm e 55 mm, respectivamente, e os valores das massas a serem dependuradas estão mostradas na tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Relação de pesos padrões dependurados em cada grupo de estresse dos ensaios de bucha.

FR (Kgf)	P (Kg)
21	10
17	8
13	6

Os ensaios foram censurados com 12560 ciclos de funcionamento, que significam pouco menos de 6 meses de teste (12/03/2007 até 30/08/2007). Isso porque com este tempo já haviam dados suficientes para a análise, baseados em uma análise prévia.

ii. Resultados do ensaio:

Tabela 3.12 - Apresentação dos dados coletados nos ensaios das buchas.

TABELA DE DADOS DO TESTE DE VIDA ACELERADO				
Falha / Censura	Tempo até falha (ciclos)	Causa da falha	Identificação	Grupo de Aceleração
Falha	3248	Desgaste Bucha	Motor 1	21Kgf
Falha	5285	Desgaste Bucha	Motor 2	21Kgf
Falha	6013	Desgaste Bucha	Motor 6	21Kgf
Falha	7215	Desgaste Bucha	Motor 8	21Kgf
Falha	9025	Desgaste Bucha	Motor 4	21Kgf
Falha	10009	Desgaste Bucha	Motor 5	21Kgf
Falha	5037	Desgaste Bucha	Motor 1	17Kgf
Falha	6520	Desgaste Bucha	Motor 10	17Kgf
Falha	7513	Desgaste Bucha	Motor 6	17Kgf
Falha	8715	Desgaste Bucha	Motor 4	17Kgf
Falha	11023	Desgaste Bucha	Motor 8	17Kgf
Falha	11565	Desgaste Bucha	Motor 3	17Kgf
Falha	6239	Desgaste Bucha	Motor 2	13Kgf
Falha	7030	Desgaste Bucha	Motor 5	13Kgf
Falha	8850	Desgaste Bucha	Motor 9	13Kgf
Falha	9981	Desgaste Bucha	Motor 6	13Kgf
Falha	11750	Desgaste Bucha	Motor 3	13Kgf
Censura	12560	-	Motor 1	13Kgf
Censura	12560	-	Motor 4	13Kgf
Censura	12560	-	Motor 7	13Kgf
Censura	12560	-	Motor 8	13Kgf
Censura	12560	-	Motor 10	13Kgf
Censura	12000	-	Motor 2	17Kgf
Censura	12000	-	Motor 5	17Kgf
Censura	12000	-	Motor 7	17Kgf
Censura	12000	-	Motor 9	17Kgf
Censura	10250	-	Motor 3	21Kgf
Censura	10250	-	Motor 7	21Kgf
Censura	10250	-	Motor 9	21Kgf
Censura	10250	-	Motor 10	21Kgf

Na tabela 3.12, encontram-se os resultados do ensaio das buchas. Nela pode-se observar que todas as falhas se deram devido ao desgaste excessivo das buchas, desta forma não houveram dados eliminados por diferença de modo de falha.

iii. Análise estatística dos resultados:

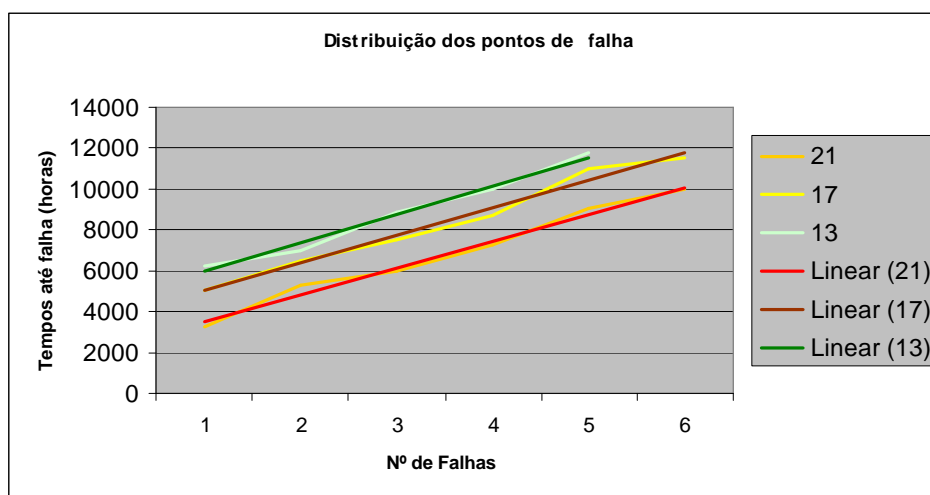
A estrutura da análise estatística de todos os componentes é muito parecida, o que muda na maioria dos casos é somente a relação estresse-resposta entre Arrhenius e Potência Inversa.

Contudo, da mesma forma que na análise das bobinas, daqui para frente serão usados somente os dados de tempo até a falha e o nível de estresse de cada grupo de falhas conforme tabela 3.13.

Tabela 3.13 - *Tempos até falha das buchas separados em níveis de estresse.*

	Níveis de Estresse (Kgf)		
	21	17	13
Tempos até falha (ciclos)	3248	5037	6239
	5285	6520	7030
	6013	7513	8850
	7215	8715	9981
	9025	11023	11750
	10009	11565	

A relação estresse resposta escolhida para estes resultados é a relação de potência inversa apresentada anteriormente e que segundo a teoria se molda muito bem quando a variável de estresse é algum tipo de fadiga de metal. A forma da potência inversa é linear, ou seja, ela diz que a taxa com a qual certo material se degrada em relação à variável de estresse é linear, e para comprovar isto foram colocados os pontos de falha observados no ensaio distribuídos no gráfico da figura 3.14 e observou-se que a forma se assemelha a uma reta:

**Figura 3.14** - *Distribuição dos pontos até falha das buchas.*

Para encontrar os parâmetros da fórmula de potência inversa foi usada sua forma linearizada que é encontrada aplicando logaritmo neperiano em ambos os lados da equação (3.4) de potência inversa e a forma geral do modelo de regressão (3.5):

$$\ln(T) = \ln\left(\frac{A}{V^w}\right) \quad (3.4)$$

$$Y = \ln(T) = b_0 + b_1 x + S e \quad (3.5)$$

Desta forma chega-se às definições já apresentadas nos itens 2.9.1 e 2.9.2:

$$b_0 = \ln(A);$$

$$b_1 = w;$$

$$x = -\ln(V);$$

Onde:

V é a variável de estresse;

A e w são parâmetros característicos do produto.

Portanto, esta relação especifica que o logaritmo neperiano do tempo de falha, $\ln(T)$, é uma função linear da variável de estresse V .

Desta forma, os dados para a análise linear ficam conforme tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Tabela dos valores linearizados de T de cada nível de estresse das buchas.

		$x = -\ln(V)$		
		-3,044522	-2,833213	-2,564949
ln(T)		8,09	8,52	8,74
		8,57	8,78	8,86
		8,70	8,92	9,09
		8,88	9,07	9,21
		9,11	9,31	9,37
		9,21	9,36	

Da mesma maneira feita na análise das bobinas, o próximo passo deste método consiste em fazer um ajuste da inclinação da distribuição dos pontos $\ln(T)$ em cada nível de estresse V , pois teoricamente a inclinação destas retas precisa ser praticamente igual, para o método funcionar, ou seja, é um teste de adequação ao método que se pretende usar.

Na prática, para fazer esta adequação ao método às vezes é necessário excluir algumas observações realizadas, ou seja, excluir alguns pontos de $\ln(T)$. Caso seja necessário excluir muitos pontos para se adequar ao método, ele se torna inviável.

Para o caso em estudo, eliminando o ponto grifado em vermelho na tabela 3.15, as equações das retas ficam com a inclinação muito parecida como se pode verificar na figura 3.15.

Tabela 3.15 - Pontos excluídos no ajuste de inclinação das retas das buchas.

		x = -ln(V)		
		-3,044522	-2,833213	-2,564949
ln(T)	8,09	8,52	8,74	
	8,57	8,78	8,86	
	8,70	8,92	9,09	
	8,88	9,07	9,21	
	9,11	9,31	9,37	
	9,21	9,36		

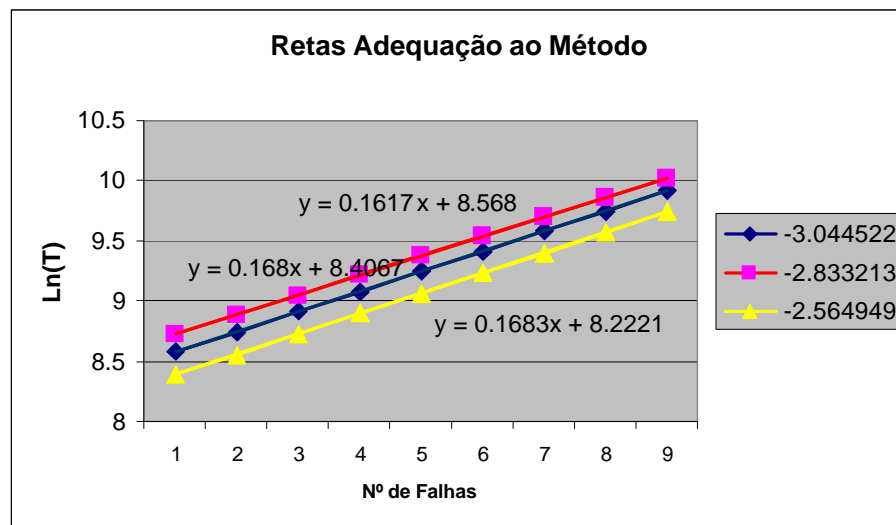


Figura 3.15 - Retas de adequação do método proposto no ensaio das buchas.

Da mesma forma que no exemplo feito para o componente bobina, a partir das retas de adequação ao método podem-se traçar as retas de aceleração, ou seja, as retas do modelo linearizado de Arrhenius ($\ln(T) = b_0 + b_1 x$) que são retas formadas por três pontos e que possuem inclinação muito parecida. Para este caso, $\beta_1 = 0,65$.

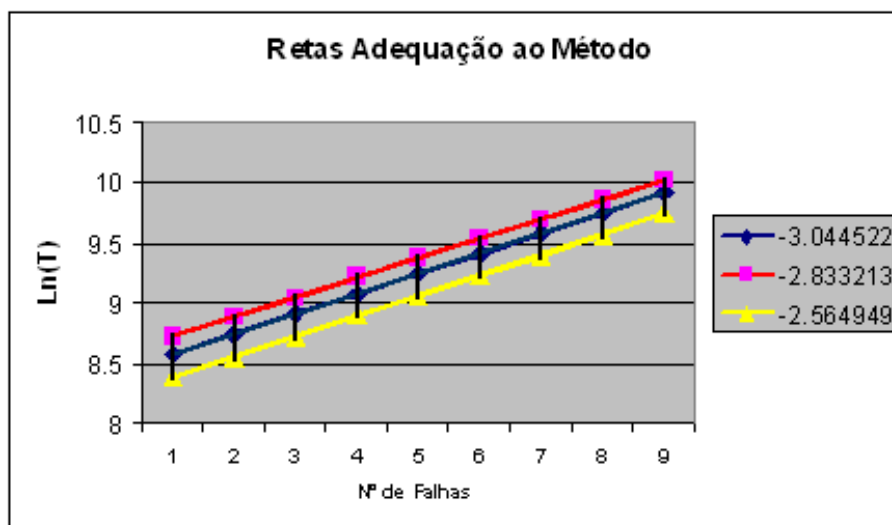


Figura 3.16 - Gráfico de adequação com retas do modelo de Potência Inversa para o ensaio das buchas.

Com esta inclinação calculada, calcula-se o fator $b_1 = w$ e em seguida determina-se o fator de aceleração do ensaio conforme a equação (2.7) para todos os níveis de aceleração na qual $\tau_0 = 10$ kgf e $\tau = (21$ kgf, 17 kgf e 13 kgf).

Portanto os fatores de aceleração de cada ponto de aceleração em relação à carga de uso (10 kgf) encontram-se na tabela 3.16.

Tabela 3.16 - Fatores de aceleração calculados para cada nível de estresse das buchas.

	Fator de Aceleração
21 kgf	1.56
17 kgf	1.35
13 kgf	1.12

Multiplicando-se os tempos até a falha e as censuras de cada grupo de aceleração (21 kgf, 17 kgf e 13 kgf) presentes na tabela 3.12 por seu respectivo fator de aceleração encontram-se na tabela 3.17 os tempos até a falha e as censuras para a carga de uso (10 kgf) onde as células verdes indicam as censuras.

Tabela 3.17 - Tempos até falha e censuras das buchas no nível de uso (10 kgf):

Nível de Uso (Kgf)	
10	
Tempos até falha e censuras (ciclos)	5076
	8260
	9397
	11276
	14105
	15642
	6818
	8825
	10170
	11797
	14921
	15654
	7017
	7906
	9953
	11225
	13214
14125	
14125	
14125	
14125	
14125	
16243	
16243	
16243	
16243	
16019	
16019	
16019	
16019	

Os passos seguintes desta análise estatística são: a adequação destes dados em condições de uso ao modelo probabilístico de Weibull, a estimação de seus parâmetros e o cálculo dos resultados de interesse.

Para tanto, como se têm dezessete tempos até falha, eles serão utilizados na rotina apresentada no anexo I que utiliza os estimadores de máxima verossimilhança (ver 2.8.2) com o objetivo de encontrar os parâmetros b e h e plotar os gráficos das equações (2.25), (2.26) e (2.27).

Na figura 3.17 verifica-se os resultados do método de máxima verossimilhança na forma de um gráfico de superfícies da função verossimilhança. As coordenadas do pico (valor máximo da coordenada z) correspondem aos parâmetros desta distribuição de falhas $b = 2,87$ e $h = 16390$.

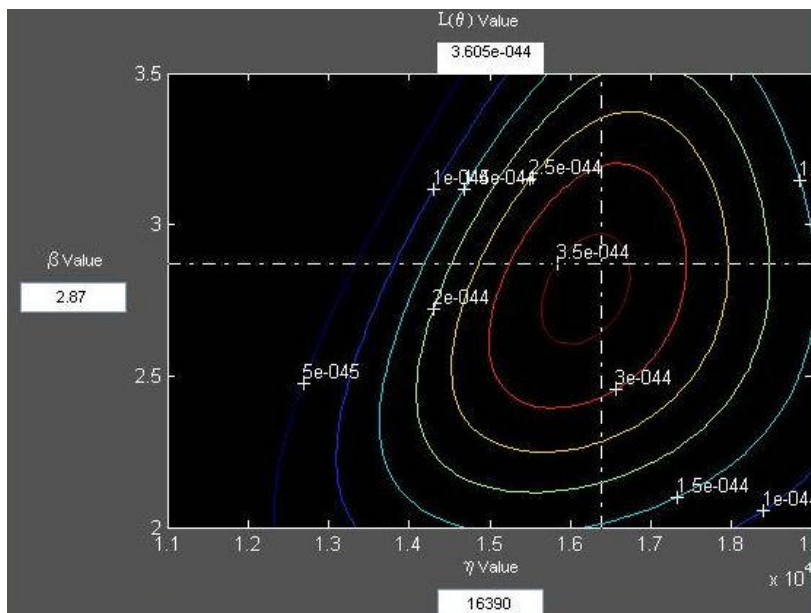


Figura 3.17 - Linhas de superfície da função verossimilhança para buchas.

Os gráficos de confiabilidade, taxa de falhas e densidade de probabilidade (equações (2.25), (2.26) e (2.27)) para a distribuição de tempos de falha da tabela 3.17, são mostrados nas figuras 3.18, 3.19 e 3.20, respectivamente.

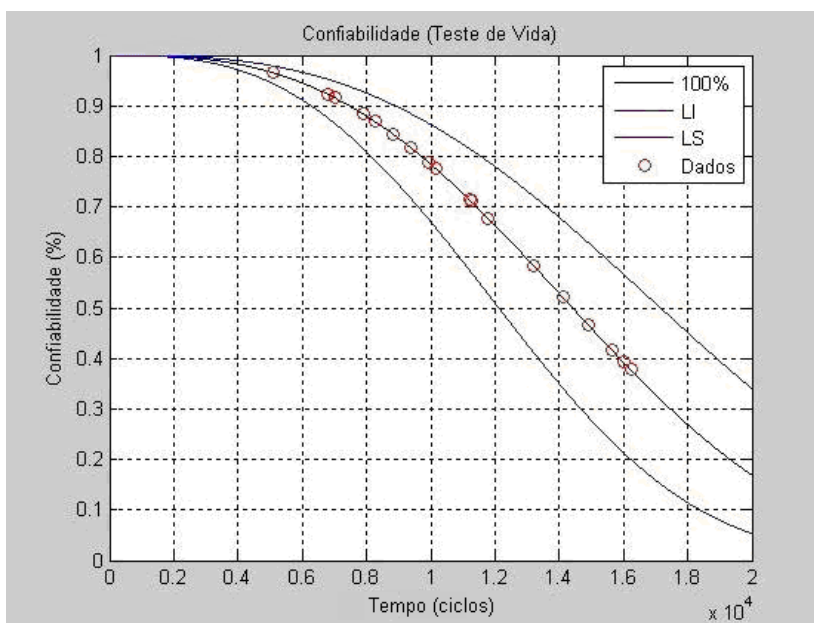


Figura 3.18 - Gráfico da função confiabilidade R das buchas.

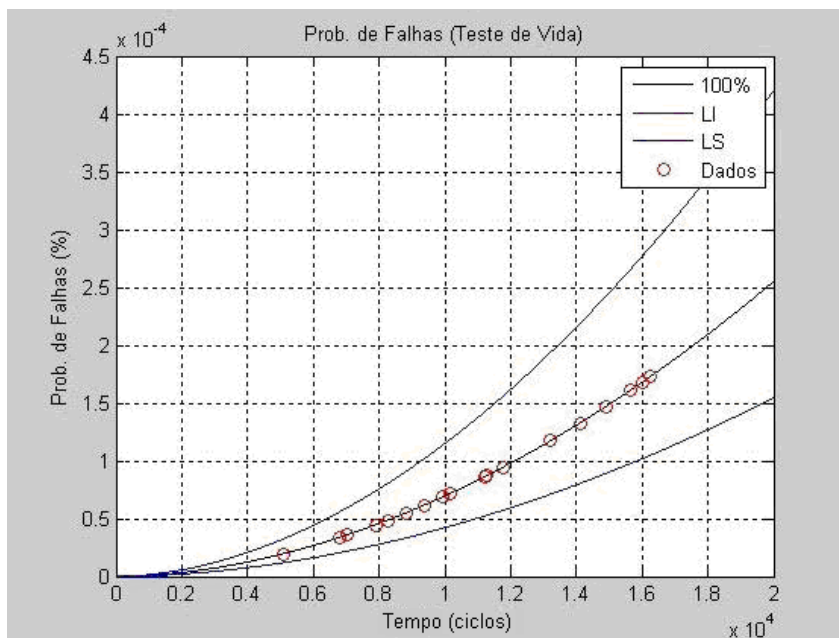


Figura 3.19 - Gráfico da função taxa de falhas $h(t)$ das buchas.

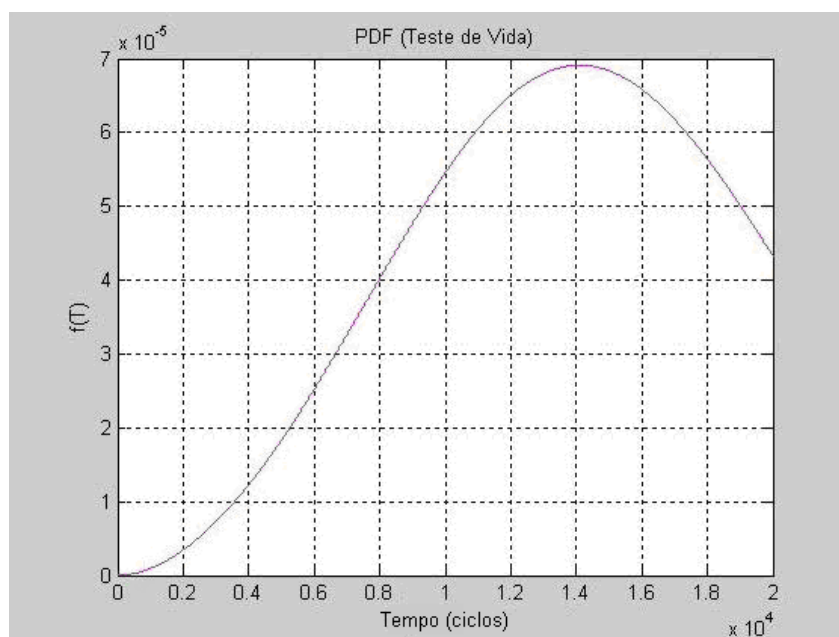


Figura 3.20 - Gráfico da função densidade de probabilidade $f(t)$ das buchas.

Definem-se assim os dados de confiabilidade desta distribuição de falhas do componente bucha no modelo de Weibull.

3.2.3. Análise do componente Capacitor:

A função primária do capacitor é de provocar uma defasagem entre as fases 0° e 90° (bobinas principal e auxiliar) essencial à criação do campo girante e, conseqüentemente, à partida do motor de indução monofásico. Desta informação percebe-se a importância deste componente e o motivo pelo qual é considerado um componente essencial ao bom funcionamento do motor.

Os modos de falha deste componente estão diretamente ligados ao desgaste excessivo da isolação de seus filmes metálicos. Este desgaste é dado geralmente por diferenças ou instabilidades das tensões aplicadas em seus terminais.

Da definição dos modos de falha tira-se a conclusão de que se os capacitores forem submetidos a níveis altos de tensão consegue-se aumentar a taxa de desgaste do material isolante. Portanto, pode-se utilizar uma fonte de tensão conjugada a um sistema de acionamento com controle de tempo como variável de estresse.

Nos parágrafos acima foram definidos a confiabilidade do componente capacitor, ou seja, foi definida a função para a qual o capacitor é projetado, quando seu desempenho é satisfatório e suas condições de operação. Assim como nos componentes anteriores, definiu-se seu tempo de missão como sendo o tempo de missão do motor como um todo, ou seja, seu tempo de garantia, fixado em dois anos. Portanto, dentro destes dois anos a probabilidade de falha deste componente também deve ser consideravelmente baixa.

i. Planejamento do ensaio:

Assim como nos ensaios anteriores, algumas definições foram feitas antes de iniciar o ensaio, tais como realizar ao mesmo tempo, testes de vida acelerados por alta taxa de uso e por altos níveis de estresse com o objetivo de diminuir o tempo de ensaio.

Novamente, assim como no ensaio das buchas, não foram feitos os ciclos de funcionamento iguais aos ciclos de funcionamento da máquina de lavar, mas desta vez porque o número de partidas (picos de corrente no capacitor) em um ciclo da máquina de lavar é muito pequeno e elas são muito espaçadas no tempo. Desta forma, foi determinado, baseado em ensaios de durabilidade em capacitores (IEC 60252-1) já realizados na WEG desde 2001, que fossem ligados continuamente.

Os níveis de aceleração foram divididos em três grupos onde a mínima tensão a ser aplicada seria a tensão de ensaio exigida pela norma IEC60252-1 e as outras duas escolhidas aleatoriamente contanto que fossem maiores que a primeira, ou seja, mais acelerado. Desta forma as três sobretensões aplicadas nos três grupos foram de 35%, 45% e 55%. As figuras 3.21 e 3.22 mostram algumas ilustrações da bancada utilizada para estes ensaios:



Figura 3.21 - *Vista externa da bancada de ensaio de vida em capacitores.*



Figura 3.22 - Vista interna da bancada de ensaio de vida em capacitores.

Na norma IEC60252-1 é considerado falho o capacitor que tiver o valor da capacitância ou da tangente de perdas alterados em 3% e 50% respectivamente, portanto, foram adotados estes critérios de falha também.

Os ensaios foram censurados com 4115 horas de funcionamento, que significam pouco menos de 6 meses de teste (06/08/2007 até 25/02/2008). Isso porque com este tempo já haviam dados suficientes para a análise, baseados em uma análise prévia.

ii. Resultados do ensaio:

Tabela 3.18 - Apresentação dos dados coletados nos ensaios dos capacitores.

TABELA DE DADOS DO TESTE DE VIDA ACELERADO				
Falha / Censura	Tempo até falha (horas)	Causa da falha	Identificação	Grupo de Aceleração
Falha	35	Variação Capacitância	Motor 1	55%
Falha	726	Variação Capacitância	Motor 3	55%
Falha	1160	Variação Capacitância	Motor 5	55%
Falha	1515	Variação Capacitância	Motor 8	55%
Falha	1816	Variação Tg Perdas	Motor 7	55%
Falha	2315	Variação Tg Perdas	Motor 2	55%
Falha	2515	Variação Capacitância	Motor 9	55%
Falha	2612	Variação Tg Perdas	Motor 10	55%
Falha	2920	Variação Tg Perdas	Motor 4	55%
Falha	1006	Variação Tg Perdas	Motor 5	45%
Falha	1230	Variação Capacitância	Motor 2	45%
Falha	1915	Variação Capacitância	Motor 3	45%
Falha	2650	Variação Tg Perdas	Motor 7	45%
Falha	2877	Variação Tg Perdas	Motor 6	45%
Falha	3215	Variação Tg Perdas	Motor 10	45%
Falha	3850	Variação Tg Perdas	Motor 9	45%
Falha	3960	Variação Capacitância	Motor 8	45%
Falha	1923	Variação Tg Perdas	Motor 2	35%
Falha	2560	Variação Capacitância	Motor 3	35%
Falha	3115	Variação Tg Perdas	Motor 5	35%
Falha	3630	Variação Capacitância	Motor 6	35%
Falha	4100	Variação Capacitância	Motor 1	35%
Censura	4115	-	Motor 4	35%
Censura	4115	-	Motor 7	35%
Censura	4115	-	Motor 8	35%
Censura	4115	-	Motor 9	35%
Censura	4115	-	Motor 10	35%
Censura	4115	-	Motor 1	45%
Censura	4115	-	Motor 4	45%
Censura	3000	-	Motor 6	55%

Na tabela 3.18 encontram-se os resultados do ensaio dos capacitores. Nela pode-se observar que todas as falhas se deram devido à variação de capacitância ou da tangente de perdas excessiva. Portanto, não houveram dados eliminados por diferença de modo de falha.

iii. Análise estatística dos resultados:

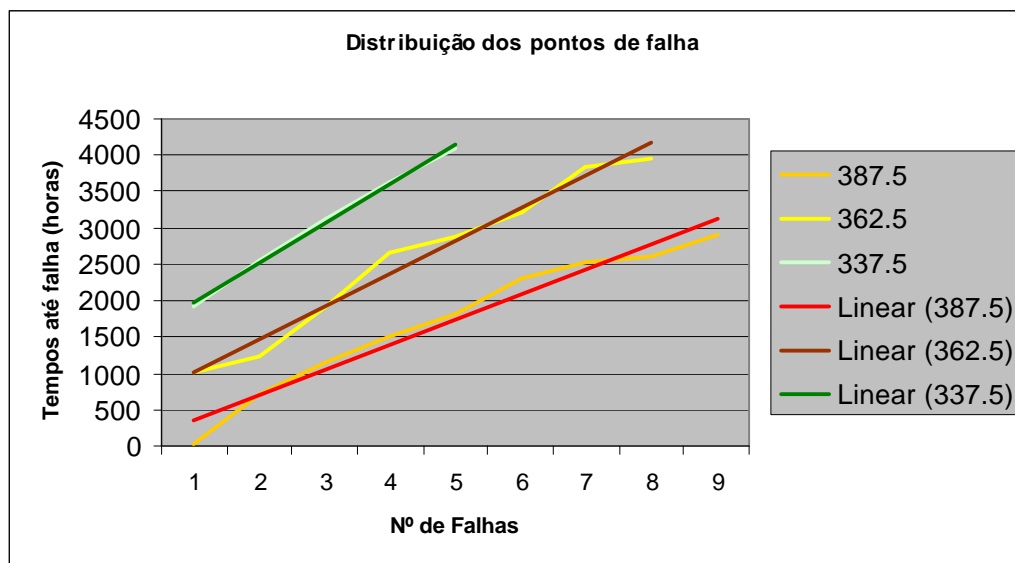
A relação estresse-resposta usada para este componente foi a mesma usada para o caso das buchas, a de Potência Inversa.

Da mesma forma que nas análises anteriores, daqui para frente serão usados somente os dados de tempo até falha e o nível de estresse de cada grupo de falhas conforme tabela 3.19:

Tabela 3.19 - Tempos até falha dos capacitores separados em níveis de estresse.

		Níveis de Estresse (%V)		
		55	45	35
Tempos (horas)	até falha	35	1006	1923
		726	1230	2560
		1160	1915	3115
		1515	2650	3630
		1816	2877	4100
		2315	3215	
		2515	3850	
		2612	3960	
		2920		

A relação estresse resposta escolhida para estes resultados é a relação de potência inversa apresentada anteriormente e que segundo a teoria se molda muito bem quando a variável de estresse é algum tipo de fadiga de metal, neste caso associado às placas dos capacitores. A forma da potência inversa é linear, ou seja, ela diz que a taxa com a qual certo material se degrada em relação à sua variável de estresse é linear, e para comprovar isto foram colocados os pontos de falha observados nos ensaios distribuídos na figura 3.23 e observou-se que a forma se assemelha a uma reta:

**Figura 3.23** - Distribuição dos pontos até falha dos capacitores.

Para encontrar os parâmetros da fórmula de potência inversa foi usada sua forma linearizada que é encontrada aplicando logaritmo neperiano em ambos os lados da equação (3.6) de potência inversa e a forma geral do modelo de regressão (3.7):

$$\ln(T) = \ln\left(\frac{A}{V^w}\right) \quad (3.6)$$

$$Y = \ln(T) = b_0 + b_1 x + S e \quad (3.7)$$

Desta forma chega-se às definições já apresentadas nos itens 2.9.1 e 2.9.2:

$$b_0 = \ln(A);$$

$$b_1 = w;$$

$$x = -\ln(V);$$

Onde:

V é a variável de estresse;

A e w são parâmetros característicos do produto.

Assim, esta relação especifica que o logaritmo neperiano do tempo de falha, $\ln(T)$, é uma função linear da variável de estresse V .

Os dados para a análise linear ficam conforme tabela 3.20.

Tabela 3.20 - Tabela dos valores linearizados de T de cada nível de estresse dos capacitores.

		$x = -\ln(V)$		
		-5.959716	-5.893024	-5.821566
$\ln(T)$		3.56	6.91	7.56
		6.59	7.11	7.85
		7.06	7.56	8.04
		7.32	7.88	8.20
		7.50	7.96	8.32
		7.75	8.08	
		7.83	8.26	
		7.87	8.28	
		7.98		

Da mesma maneira feita nas análises anteriores, o próximo passo deste método consiste em fazer um ajuste da inclinação da distribuição dos pontos $\ln(T)$ em cada nível de estresse V , pois teoricamente a inclinação destas retas precisa ser praticamente igual, para o método funcionar, ou seja, é um teste de adequação ao método que se pretende usar.

Na prática, para fazer esta adequação ao método às vezes é necessário excluir algumas observações realizadas, ou seja, excluir alguns pontos de $\ln(T)$. Caso seja necessário excluir muitos pontos para se adequar ao método, ele se torna inviável.

No caso, eliminando o ponto grifado em vermelho na tabela 3.21, as equações das retas ficam com a inclinação muito parecida como se pode verificar na figura 3.24.

Tabela 3.21 - Pontos excluídos no ajuste de inclinação das retas dos capacitores.

		x = -ln(V)		
		-5.959716	-5.893024	-5.821566
ln(T)		3.56	6.91	7.56
		6.59	7.11	7.85
		7.06	7.56	8.04
		7.32	7.88	8.20
		7.50	7.96	8.32
		7.75	8.08	
		7.83	8.26	
		7.87	8.28	
		7.98		

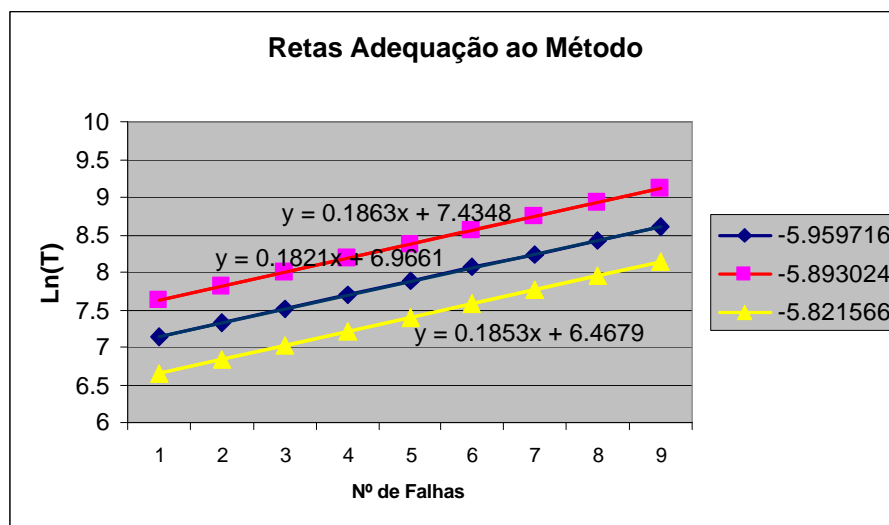


Figura 3.24 - Retas de adequação do método proposto no ensaio dos capacitores.

Da mesma forma que no exemplo feito para o componente bobina, a partir das retas de adequação ao método podem-se traçar as retas de aceleração, ou seja, as retas do modelo linearizado de Arrhenius ($\ln(T) = b_0 + b_1 x$) que são retas formadas por três pontos e que possuem inclinação muito parecida, para este caso, $\beta_1 = 7,04$.

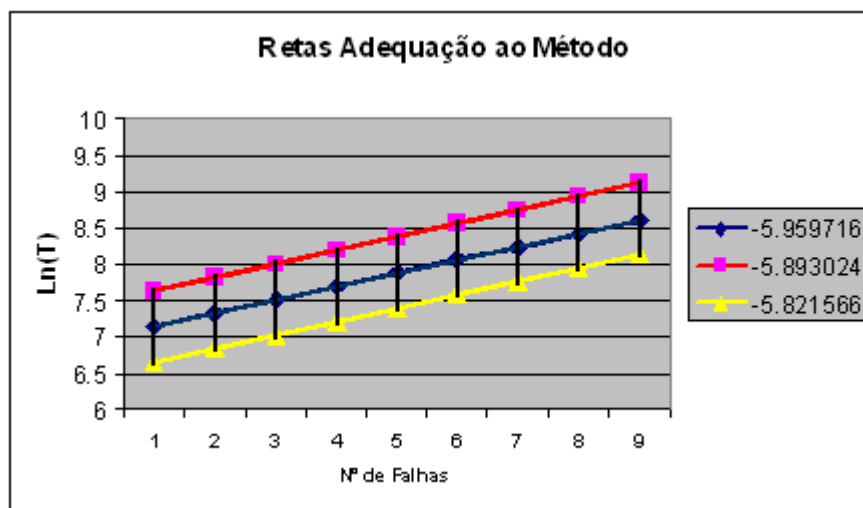


Figura 3.25 - Gráfico de adequação com retas do modelo de Potência Inversa para o ensaio dos capacitores.

Com esta inclinação calculada, calcula-se o fator $b_1 = w$ e em seguida determina-se o fator de aceleração do ensaio conforme a equação (2.7) para todos os níveis de aceleração na qual $\tau_0 = V_n$ e $\tau = 1,55 V_n$; $1,45 V_n$ e $1,35 V_n$, onde V_n é a tensão nominal do capacitor.

Portanto, os fatores de aceleração de cada ponto de aceleração em relação à tensão de uso ($V_n = 250V$) encontram-se na tabela 3.22.

Tabela 3.22 - Fatores de aceleração calculados para cada nível de estresse dos capacitores.

	Fator de Aceleração
55%	3,54
45%	2,92
35%	2,38

Multiplicando-se os tempos até a falha e as censuras de cada grupo de aceleração ($1,55 V_n$, $1,45 V_n$ e $1,35 V_n$) presentes na tabela 3.18 por seu respectivo fator de aceleração encontram-se na tabela 3.23 os tempos até a falha e as censuras para a tensão nominal de uso ($250V$) onde as células verdes indicam as censuras.

Tabela 3.23 - Tempos até falha e censuras dos capacitores no nível de uso (250V).

Nível de Uso (V)	
	250
Tempos até falha e censuras (horas)	124
	2572
	4109
	5367
	6433
	8201
	8910
	9253
	10344
	2940
	3594
	5596
	7744
	8407
	9395
	11251
	11572
	4572
	6087
	7407
	8631
	9749
9784	
9784	
9784	
9784	
9784	
12025	
12025	
10628	

Os passos seguintes desta análise estatística são: a adequação destes dados em condições de uso ao modelo probabilístico de Weibull, a estimação de seus parâmetros e o cálculo dos resultados de interesse.

Para tanto, como se têm vinte e dois tempos até a falha, eles serão utilizados na rotina apresentada no anexo I que utiliza os estimadores de máxima verossimilhança (ver 2.8.2) com o objetivo de encontrar os parâmetros b e h e plotar os gráficos das equações (2.25), (2.26) e (2.27).

Na figura 3.26 pode-se ver os resultados do método de máxima verossimilhança na forma de um gráfico de superfícies da função verossimilhança. As coordenadas do pico (valor máximo da coordenada z) correspondem aos parâmetros desta distribuição de falhas $b = 1,94$ e $h = 9851$.

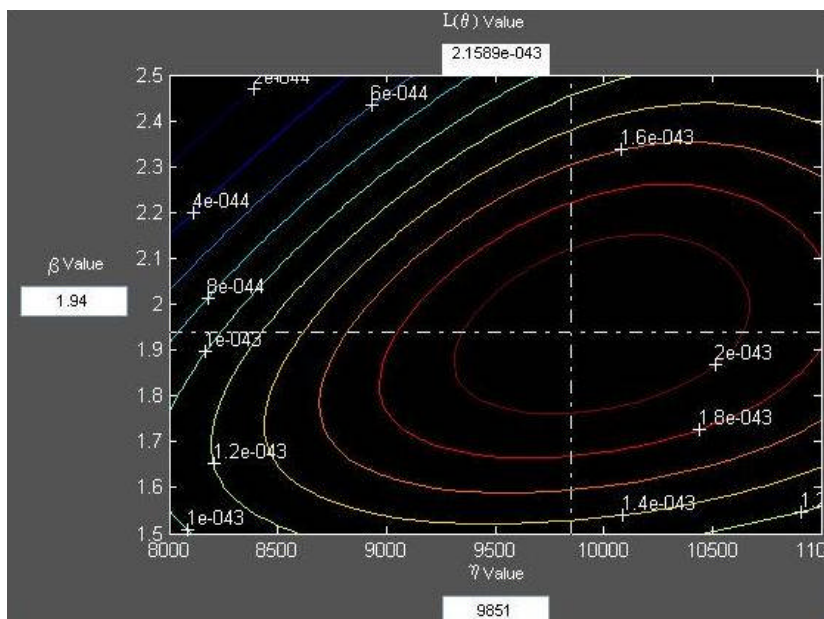


Figura 3.26 - Linhas de superfície da função verossimilhança para capacitores.

Os gráficos de confiabilidade, taxa de falhas e densidade de probabilidade (equações (2.25), (2.26) e (2.27)) para a distribuição de tempos de falha da tabela 3.23, são mostrados nas figuras 3.27, 3.28 e 3.29, respectivamente.

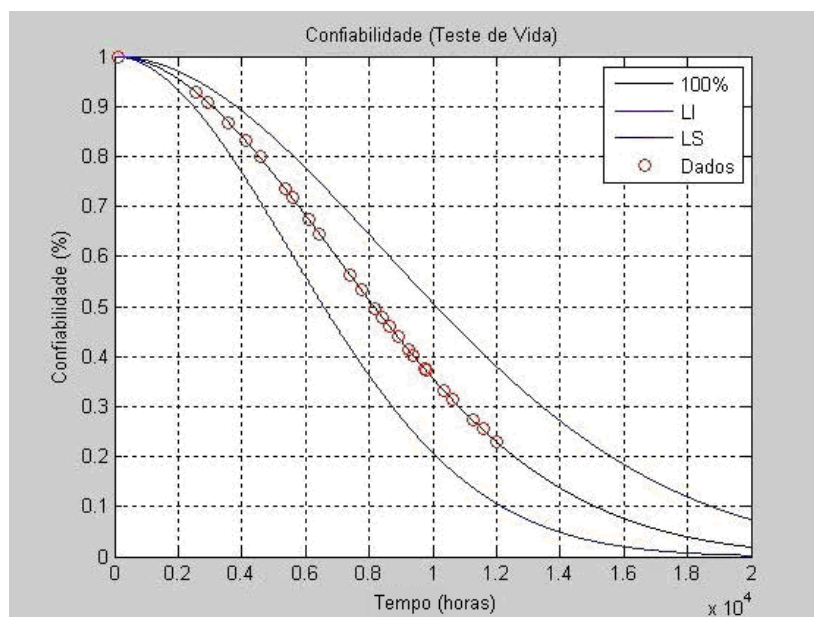


Figura 3.27 - Gráfico da função confiabilidade R dos capacitores.

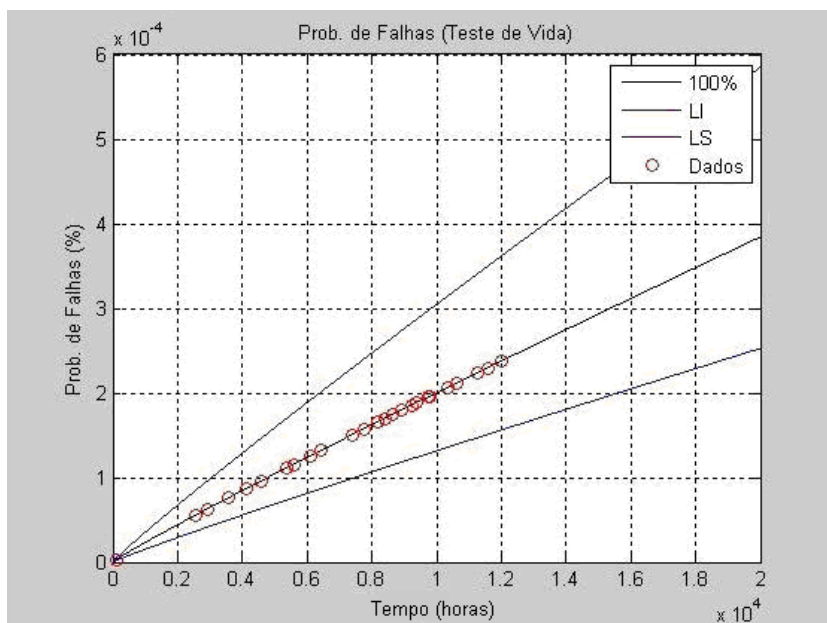


Figura 3.28 - Gráfico da função taxa de falhas $h(t)$ dos capacitores.

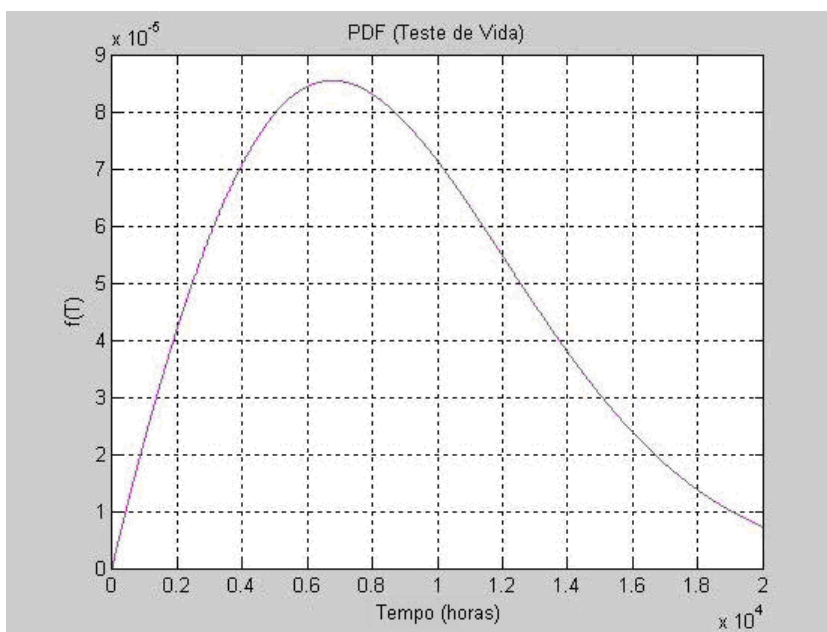


Figura 3.29 - Gráfico da função densidade de probabilidade $f(t)$ dos capacitores.

Definem-se assim os dados de confiabilidade desta distribuição de falhas do componente capacitor no modelo de Weibull.

CAPÍTULO 4

4. CONFIABILIDADE DE SISTEMAS

Todo sistema (ou produto) é composto de subsistemas ou componentes organizados de forma a desempenhar sua função de projeto, com índices aceitáveis de desempenho e confiabilidade [3]. Os componentes utilizados, suas qualidades, desempenhos e aplicações têm efeito direto sobre o desempenho do sistema. Portanto, devem ser analisadas a importância e confiabilidade de cada componente, para que seja possível avaliar a confiabilidade global do produto ou sistema em questão.

Para iniciar a avaliação de confiabilidade de sistemas é necessário, primeiramente, montar o diagrama de blocos do produto, onde são apresentados todos os subsistemas ou componentes utilizados e suas inter-relações. A partir do diagrama de blocos, é possível verificar o tipo de ligação entre componentes (série, paralelo, série-paralelo, etc.) e avaliar a confiabilidade do sistema como um todo.

Um exemplo de diagrama de blocos para uma lanterna vem apresentado na figura 4.1. Os componentes operacionais no exemplo são: pilha, interruptor, contatos e lâmpada. Se um destes componentes falhar, a lanterna deixa de funcionar. Portanto, o arranjo dos componentes neste produto é em série.

Neste trabalho, somente será focado sistemas de componentes arranjados em série, já que o sistema motor de indução, que será objeto de análise neste estudo está separado somente em seus componentes críticos e, conseqüentemente, arranjados em série. Informações acerca de outros tipos de arranjos, tais como paralelo, mistos e arranjos complexos, podem ser encontradas em [2] e [3].



Figura 4.1 - Exemplo de um diagrama de blocos de um sistema em série.

4.1. Sistemas em série:

Um sistema em série é composto de n elementos conectados em série. A falha de qualquer um dos componentes resultará na falha de todo o sistema. Conseqüentemente, a confiabilidade de um sistema em série sempre será menor que a confiabilidade de seu elemento mais fraco.

Para a determinação da confiabilidade do sistema em série, é necessário o conhecimento da probabilidade de sucesso dos elementos que o compõem. A confiabilidade do sistema, considerando elementos dependentes, é dada por:

$$R = P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = P(x_1)P(x_2|x_1)P(x_3|x_1x_2)\dots P(x_n|x_1x_2x_3\dots x_{n-1}) \quad (4.1)$$

onde x_i representa o estado operacional do i ésimo elemento (operante ou inoperante), $P(x_i)$ é a probabilidade associada a cada um destes estados e R representa a confiabilidade do sistema.

A confiabilidade de um sistema em série composto por n elementos independentes é dada por:

$$R = P(x_1)P(x_2)\dots P(x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i) \quad (4.2)$$

Também se pode calcular a probabilidade de falha do sistema e, a partir desta, obter a confiabilidade do sistema em série; isto é:

$$R = P(\overline{x_1} + \overline{x_2} + \dots + \overline{x_n}) \quad (4.3)$$

Onde $\overline{x_i}$ representa a falha do i ésimo elemento, $P(\overline{x_i})$ a probabilidade do i ésimo elemento não estar operando, $+$ denota união de eventos e P_f designa a densidade acumulada de falha do sistema. A confiabilidade do sistema em série pode ser então, obtida por:

$$R = 1 - P_f \quad (4.4)$$

4.2. Diagrama de Blocos do Sistema Motor de Indução:

Como dito anteriormente, neste trabalho foram estudados somente os componentes críticos do motor de indução monofásico. Portanto, obviamente qualquer componente destes que venha a falhar, o sistema motor irá deixar de funcionar imediatamente, resultando nos arranjos em série demonstrados nas figuras 4.2 e 4.3 para os dois casos de motores de indução monofásicos.

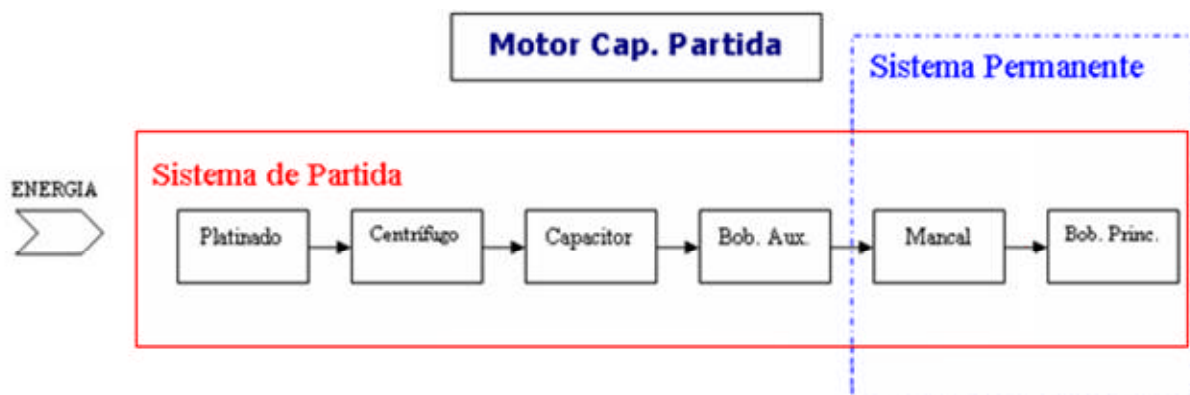


Figura 4.2 - Diagrama de blocos de um motor monofásico com capacitor de partida.

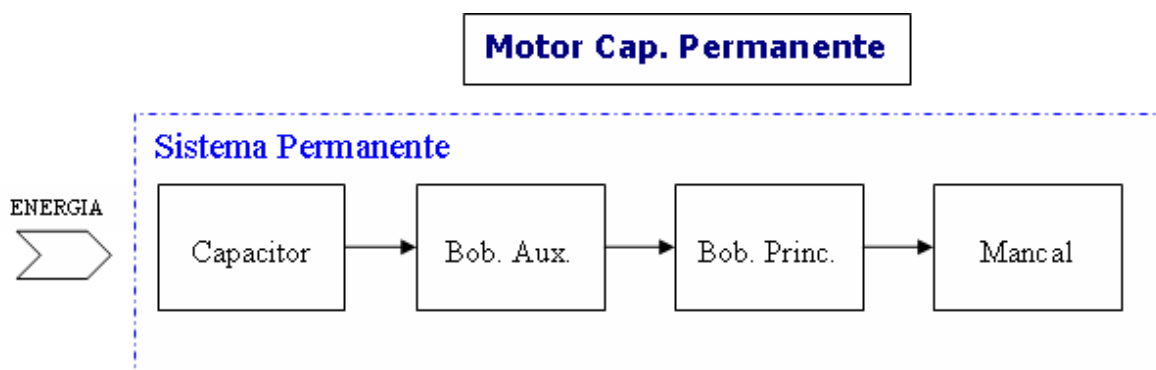


Figura 4.3 - Diagrama de blocos de um motor monofásico com capacitor permanente.

Neste caso o motor escolhido é com capacitor permanente. Assim, o diagrama de blocos é o da figura 4.3.

4.3. Unificação da Unidade de Tempo e Cálculos de Confiabilidade no Tempo de Interesse:

Neste ponto do trabalho é necessário unificar a unidade usada em cada componente para determinar a vida do sistema em sua aplicação em uma unidade única.

Dos três componentes que foram ensaiados, o único que não possui a unidade em horas de funcionamento é a bucha que está em ciclos. Portanto, como um ciclo do ensaio de bucha é composto de quinze minutos ligado e cinco minutos desligado, um ciclo tem um quarto de hora de funcionamento. Desta forma, todos os valores encontrados em ciclos para o caso do componente bucha, devem ser multiplicados por este fator.

Considerando que uma dona de casa utiliza sua máquina de lavar roupas (aplicação do motor em estudo) em média (pessimista) uma vez ao dia, e que o ciclo de uma máquina possui uma hora e quinze minutos de funcionamento, sendo que deste tempo total, excluindo os tempos de repouso, somente durante uma hora e nove minutos o motor encontra-se energizado. Determina-se então que uma máquina de lavar roupas no intervalo de dois anos tem um tempo de funcionamento médio de 840 horas.

Ao utilizar a equação (2.24), tendo-se determinado os parâmetros b e h de cada componente no capítulo 3, pode-se calcular para cada componente sua confiabilidade para o tempo de garantia fixado em dois anos (840 horas) conforme tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Confiabilidade no tempo de garantia dos componentes ensaiados.

	Confiabilidade em 840 horas
Bobina	98,1%
Bucha	98,9%
Capacitor	99,2%

4.4. Confiabilidade do Sistema para o Tempo de Garantia:

Para o sistema em série da figura 4.3, têm-se a seguinte relação de acordo com os valores de confiabilidade calculados no item anterior.

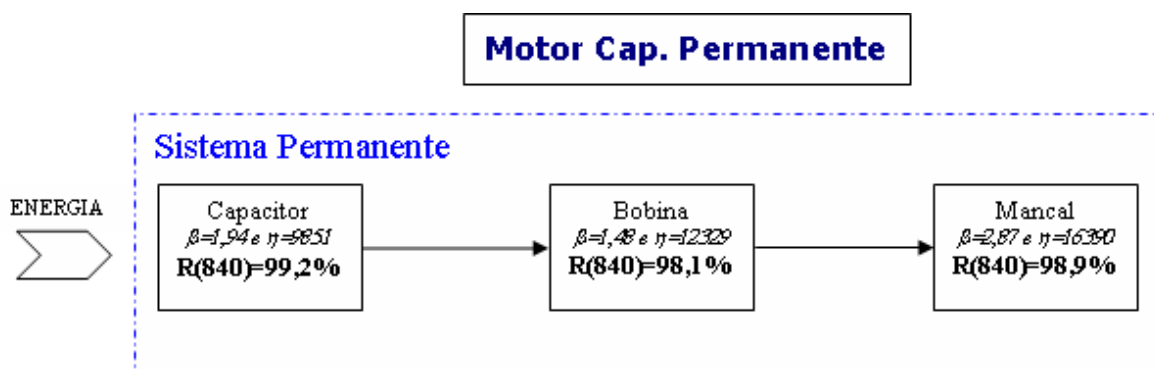


Figura 4.4 - Diagrama de confiabilidade do sistema motor.

O cálculo de confiabilidade do sistema em série é dado pela simples multiplicação da confiabilidade de cada componente em separado conforme equação (4.2). Desta forma a confiabilidade do sistema motor de indução monofásico para máquina de lavar roupas em estudo no tempo de garantia (2 anos) é de **96,2%**.

CAPÍTULO 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para se ter uma idéia do ganho de tempo que foi obtido, o último ensaio deste tipo que foi realizado durou um ano e nove meses. Se for considerado que seria possível realizar os ensaios de todos os componentes ao mesmo tempo, pois eles utilizam estruturas de ensaio diferentes, o tempo de ensaio para os componentes neste trabalho foi de pouco mais de seis meses. Isto significa um ganho de três vezes, ou seja, com o tempo no qual era feito um ensaio, agora se podem fazer três.

Futuramente será possível acelerar ainda mais os testes, pois foi verificado que em alguns ensaios, por receio de perder os dados, não foram utilizados fatores de aceleração em seu máximo possível, ou seja, próximo do fator de aceleração nos quais diferentes modos de falha começam a aparecer nos ensaios dos componentes. Algo que se alcança somente com a experiência.

Os resultados não são muito diferentes dos que eram encontrados nos ensaios feitos no motor completo. Acredita-se até que sejam mais precisos agora pelo fato de estarem focados nos componentes que costumam falhar em seu uso normal.

Um grande diferencial deste novo método é que se consegue verificar a confiabilidade do sistema através da confiabilidade dos componentes que mais falham. Desta forma, caso a empresa esteja interessada em melhorar estes índices, sabe-se qual componente se deve atacar e quanto se deve ganhar em confiabilidade para atingir suas metas de falha em campo.

Pode-se desenvolver um exemplo para a informação levantada acima. Supondo que um lote de 5000 peças do motor em estudo foi fabricado e entregue ao fabricante das máquinas de lavar roupas. Espera-se que, segundo os cálculos de confiabilidade, no intervalo de dois anos (tempo de garantia) a empresa receba reclamações de cento e noventa peças, sendo que destas peças, de acordo com a proporcionalidade de ocorrências em campo, cento e cinquenta seriam problemas na bobina, vinte e sete seriam problemas de mancal, três seriam problemas de capacitor e os dez restantes seriam problemas não identificados. Desta forma a empresa tem

um panorama de quais são suas principais deficiências. Caso a empresa coloque uma meta de diminuir o número de falhas dentro do tempo de garantia de cento e noventa para cento e quarenta peças, ela sabe que se variar a qualidade de sua bobina, sem variar nas qualidades de mancal e capacitores, ela teria que melhorar a confiabilidade deste componente em um ponto percentual para atingir esta meta.

As perspectivas em relação a este trabalho na WEG são as melhores possíveis. Este método será empregado como o principal modelo para se calcular os parâmetros de confiabilidade de motores de indução em curto espaço de tempo.

Como previsão para trabalhos futuros, o método será aplicado em motores que possuem resultados de ensaios no banco de dados da empresa. A comparação desses resultados permitirá validar o método apresentado nesta dissertação.

ANEXO 1

CÓDIGO PARA CÁLCULOS DOS PARÂMETROS E FIGURAS DE MÉRITO (WEIBULL)

```

%Arquivo ".m" para calculo de figuras de mérito em ensaios de vida
%Entrada de Dados
clear all
NF=22;
NFD=[%Vetor dos tempos até falha];
CENS=[%Vetor lógico com informação de dados censurados];
NP=20000;
RDES=0.9999;
LCONF=0.05;

%Cálculos dos parâmetros Eta e Beta (Weibull) incluindo limites de
%confiança
[parmhat, parmci] = wblfit(NFD, LCONF, CENS);
beta = parmhat(1, 2);
betaLI = parmci(1,2);
betaLS = parmci(2,2);
eta = parmhat(1, 1);
etaLI = parmci(1, 1);
etaLS = parmci(2, 1);

%Calculo de figuras de mérito
for j=1:NP
P1=(j/eta)^beta;
P1I=(j/etaLI)^beta;
P1S=(j/etaLS)^beta;
P2=P1*(-1);
P2I=P1I*(-1);
P2S=P1S*(-1);
P3=beta-1;
P4=(j/eta)^P3;
P4I=(j/etaLI)^P3;
P4S=(j/etaLS)^P3;
PF(1,j)=(beta/eta)*P4;
PFI(1,j)=(beta/etaLI)*P4I;
PFS(1,j)=(beta/etaLS)*P4S;
R(1,j)=exp(P2);
RI(1,j)=exp(P2I);
RS(1,j)=exp(P2S);
PDF(1,j)=((beta/eta)*(j/eta)^P3*exp(P2));
X(1,j)=j;
clear j
end
for j=1:NF
RNFD(1,j)=R(1,NFD(j,1));

```

```

PFNFD(1,j)=PF(1,NFD(j,1));
clear j
end
MTTF(1,1)=etaLI*gamma((1/betaLI)+1);
MTTF(1,2)=eta*gamma((1/beta)+1);
MTTF(1,3)=etaLS*gamma((1/betaLS)+1);
TG(1,1)=(etaLI)*((-1)*log(RDES))^(1/betaLI);
TG(1,2)=(eta)*((-1)*log(RDES))^(1/beta);
TG(1,3)=(etaLS)*((-1)*log(RDES))^(1/betaLS);

%Desenha Gráficos (Confiabilidade, PDF e Probabilidade de Falha)
plot(X,R,'k-',X,RI,'b-',X,RS,'b-',NFD,RNFD,'ro'), grid on,
legend('100%', 'LI', 'LS', 'Dados'), title('Confiabilidade (Teste de Vida)'),
xlabel('N° de Ciclos' ), ylabel('Confiabilidade (%)' ), zoom on;
figure;
plot(X,PF,'k-',X,PFI,'b-',X,PFS,'b-',NFD,PFNFD,'ro'), grid on,
legend('100%', 'LI', 'LS', 'Dados'), title('Prob. de Falhas (Teste de Vida)'),
xlabel('N° de Ciclos' ), ylabel('Prob. de Falhas (%)' ), zoom on;
figure;
plot(X,PDF,'m-'), grid on, title('PDF (Teste de Vida)' ), xlabel('N° de
Ciclos'), ylabel('f(T)');
figure;
wblplot(NFD);
clear parcl
clear parclI
clear parclS
clear parc2
clear parclI2
clear parclS2
clear P1
clear P1I
clear P1S
clear P2
clear P2I
clear P2S
clear P3

```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FREITAS, M.; COLOSIMO, E. **Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1997.
- [2] LEEMIS, L. M. **Reliability: probabilistic models and statistical methods**. New Jersey: Prentice-Hall, 1995.
- [3] ELSAYED, E.A. **Reliability engineering**. Reading, MA: Addison Wesley Longman, 1996.
- [4] HOYLAND, A.; RAUSAND, M. **System reliability theory; Models and statistical methods**. New York: Wiley-Interscience, 1994.
- [5] MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Applied statistics and probability for engineers**. New York: John Wiley, 1995.
- [6] O'CONNOR, P.D.T. **Practical reliability engineering**. 3 ed. rev. Chichester: John Wiley, 1995.
- [7] MOOD, A.M.; GRAYBILL, F.A.; BOES, D.C. **Introduction to the theory of statistics**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1974.