

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO
DO ENVELHECIMENTO DE EQUIPAMENTOS**

‘Dissertação Submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica’

LEANDRO HENZ

Florianópolis, Setembro de 1997

METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DO ENVELHECIMENTO DE
EQUIPAMENTOS

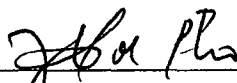
Leandro Henz

'Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia Elétrica,

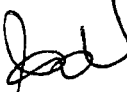
Área de concentração em Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica

e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação'



Prof. Jorge Coelho, D.Sc.

Orientador



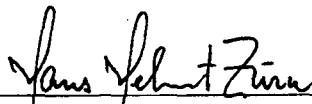
Prof. Adroaldo Raizer, Dr.

Coordenador do Curso

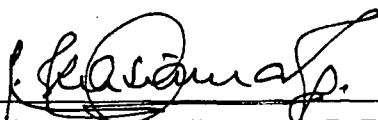
Banca Examinadora



Prof. Jorge Coelho, D. Sc. - Presidente.



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph. D.



Prof. C. Celso de Brasil Camarzo, D. Eng.

*Aos meus pais Adécio e Marlene e
minha irmã Jacqueline minha infinita
gratidão pelo amor, apoio e
confiança que sempre demonstraram
por mim.*

*À grande amiga Silvia Cossio,
exemplo de dedicação e caráter e
grande incentivadora para a
conclusão deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Jorge Coelho pelo convite, por sua confiança, apoio e orientação na realização deste trabalho.

Aos professores C. Celso de Brasil Camargo e Hans Helmut Zürn pelas sugestões que contribuíram para o enriquecimento desta dissertação e pela participação na banca examinadora.

Ao apoio financeiro do CNPq.

Ao apoio da Telepar, em especial a José Carlos Paulin que sempre entendeu as necessidades de ausência em alguns momentos durante a realização deste trabalho.

Pelas instalações e infra-estrutura proporcionados pela Universidade Federal de Santa Catarina, em particular ao LABPLAN.

Ao amigo Mauricio Ortiz e família pelo apoio, carinho e amizade que tanto contribuíram para que eu persistisse nos momentos mais difíceis.

À família Libardi por ser sempre tão amiga e por ter me ajudado tanto desde que moro em Curitiba.

Aos amigos Luciano, Raimundo, Dadier, Abel, Franz, Ana Cláudia, Flábio, Felsky, Fernando e aos amigos do futebol pela amizade, incentivo e colaboração fazendo com que minha estada em Florianópolis tenha sido tão gratificante.

A Deus que me dá saúde e me protege todos os dias de minha vida.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

<i>SUMÁRIO</i>	<i>ii</i>
<i>LISTA DE FIGURAS</i>	<i>v</i>
<i>LISTA DE TABELAS</i>	<i>vii</i>
<i>NOMENCLATURA</i>	<i>viii</i>
<i>ABREVIATURAS</i>	<i>ix</i>
<i>RESUMO</i>	<i>x</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>xi</i>
<i>1. INTRODUÇÃO</i>	<i>1</i>
<i>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i>	<i>4</i>
<i>3. METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA FUNÇÃO RISCO DE FALHA E FUNÇÃO CONFIABILIDADE</i>	<i>12</i>
<i>3.1 INTRODUÇÃO</i>	<i>12</i>
<i>3.2 FUNÇÃO RISCO DE FALHA</i>	<i>13</i>

3.3 ANÁLISE TIPO I: LOTE FIXO DE EQUIPAMENTOS NÃO-REPARÁVEIS	15
3.4 ANÁLISE TIPO II: UM CONJUNTO DE EQUIPAMENTOS IGUAIS EM OPERAÇÃO	19
3.5 ANÁLISE TIPO III: UM ÚNICO EQUIPAMENTO EM OPERAÇÃO	20
3.6 CONCLUSÕES	20
4. METODOLOGIA DE TESTES PARA CARACTERIZAÇÃO DO ENVELHECIMENTO DE EQUIPAMENTOS	22
4.1 INTRODUÇÃO	22
4.2 DEFINIÇÕES DAS FUNÇÕES-TESTE	23
4.2.1 <i>IFR</i> - Taxa de Falha Crescente	24
4.2.2 <i>IFRA</i> - Taxa de Falha Crescente na Média	27
4.2.3 <i>NBU</i> - Novo Melhor que Usado	28
4.2.4 <i>NBUE</i> - Novo Melhor que Usado sob o ponto de vista da Média	28
4.2.5 <i>NBUFR</i> - Novo Melhor que Usado sob o ponto de vista da Taxa de Risco de Falha	30
4.2.6 <i>DMRL</i> - Vida Residual Média Decrescente	30
4.3 QUADRO-RESUMO COM AS DEFINIÇÕES DAS FUNÇÕES-TESTE	32
4.4 ALGORITMO TCE	33
4.4.1 Entrada e Leitura de Dados	33
4.4.2 Suavização dos Dados	35
4.4.3 Cálculo da Função Risco de Falha e Função Confiabilidade	36
4.4.4 Determinação dos Intervalos de Tempo que Apresentam Envelhecimento de acordo com cada uma das Funções-Teste	36
4.5 CASOS-TESTE PARA COMPROVAÇÃO DOS CONCEITOS E DEFINIÇÕES MATEMÁTICAS	36
4.5.1 Caso-Teste para Distribuição Exponencial	37
4.5.2 Caso-Teste para Distribuição Weibull	40
4.6 UTILIZAÇÃO DE CARTAS DE CONTROLE	45
4.7 CONCLUSÕES	48

5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA TCE	49
5.1 INTRODUÇÃO	49
5.2 CASO-TESTE I: LOTE FIXO DE EQUIPAMENTOS NÃO-REPARÁVEIS	49
5.3 CASO-TESTE II: CONJUNTO DE EQUIPAMENTOS EM OPERAÇÃO	56
5.4 CASO-TESTE III: UM ÚNICO EQUIPAMENTO EM OPERAÇÃO	62
5.5 TEMPO DE PROCESSAMENTO	65
5.6 APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLE	68
5.7 CONCLUSÕES	70
6. CONCLUSÕES GERAIS	72
6.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	73
6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	74
APÊNDICE A. DESCRIÇÃO MATEMÁTICA PARA OBTENÇÃO DO NÚMERO DE EQUIPAMENTOS FALHADOS A PARTIR DA TAXA DE RISCO DE FALHA	75
A.1 INTRODUÇÃO	75
A.2 DEDUÇÃO MATEMÁTICA	75
APÊNDICE B. ANÁLISE DA CONVEXIDADE DE FUNÇÕES	78
B.1 INTRODUÇÃO	78
B.2 DEFINIÇÃO	78
B.3 INTERPRETAÇÃO GEOMÉTRICA DE FUNÇÕES CONVEXAS	78
B.4 FLUXOGRAMA PARA TESTAR A CONVEXIDADE DA FUNÇÃO	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 - Curva característica da Banheira</i>	07
<i>Figura 3.1 - Exemplo de Função Confiabilidade com taxa de falha constante</i>	14
<i>Figura 3.2 - Exemplo de Função Confiabilidade com taxa de falha variável</i>	14
<i>Figura 3.3 - Exemplo de Função Disponibilidade</i>	15
<i>Figura 3.4 - Fluxograma para análise do tipo I</i>	18
<i>Figura 4.1 - Exemplo genérico da interpretação geométrica de uma função convexa</i>	25
<i>Figura 4.2 - Fluxograma dos Testes para Caracterização do Envelhecimento</i>	34
<i>Figura 4.3 - Função Confiabilidade de uma distribuição Exponencial com $\lambda = 1$</i>	38
<i>Figura 4.4 - Função Taxa de Falha de uma distribuição Exponencial com $\lambda = 1$</i>	38
<i>Figura 4.5 - Função Confiabilidade de uma distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 1,2$</i>	41
<i>Figura 4.6 - Função Risco de Falha de uma distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 1,2$</i>	41
<i>Figura 4.7 - Função Vida Residual Média de uma distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 1,2$</i>	42
<i>Figura 4.8 - Função Confiabilidade de uma distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 0,8$</i>	43
<i>Figura 4.9 - Função Risco de Falha de uma distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 0,8$</i>	44
<i>Figura 4.10 - Função Vida Residual Média de uma distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 0,8$</i>	44
<i>Figura 4.11 - Esquemático de uma Carta de Controle com média, limites de controle e zonas</i>	47
<i>Figura 5.1 - Função densidade de probabilidade em função do tempo</i>	52
<i>Figura 5.2 - Função distribuição acumulada de falha em função do tempo</i>	53
<i>Figura 5.3 - Função Confiabilidade em função do tempo</i>	53
<i>Figura 5.4 - Função Risco de Falha em função do tempo</i>	54
<i>Figura 5.5 - Função Vida Residual Média em função do tempo</i>	56
<i>Figura 5.6a - Valores mensais da função Risco de Falha</i>	57
<i>Figura 5.6b - Valores trimestrais da função Risco de Falha</i>	58
<i>Figura 5.6c - Valores semestrais da função Risco de Falha</i>	58

<i>Figura 5.6d - Valores anuais da função Risco de Falha</i>	58
<i>Figura 5.7 - Função Risco de Falha: dados originais e com suavização por médias móveis</i>	59
<i>Figura 5.8 - Representação gráfica dos periodos de envelhecimento para o teste IFR1</i>	61
<i>Figura 5.9 - Função Risco de Falha: dados originais e suavização por médias aritméticas e médias móveis</i>	63
<i>Figura 5.10 - Número de Falhas acumuladas em função do tempo</i>	65
<i>Figura 5.11 - Tempo gasto de CPU em centésimos de segundo</i>	66
<i>Figura 5.12 - Tempo gasto de CPU em centésimos de segundo</i>	67
<i>Figura 5.13 - Carta de Controle para o Caso-Teste 1</i>	68
<i>Figura B.1 -Exemplo genérico de Função Convexa</i>	79
<i>Figura B.2 - Função Convexa com um intervalo de teste genérico</i>	81
<i>Figura B.3 - Fluxograma para Teste de Convexidade de Funções</i>	82

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 4.1 - Tempo, taxa de falha e Confiabilidade - Distribuição Exponencial</i>	37
<i>Tabela 4.2 - Resultados do TCE para a Distribuição Exponencial</i>	39
<i>Tabela 4.3 - Taxa de Risco de Falha e Confiabilidade - Distribuição Weibull $\alpha = 1$ e $\beta = 1,2$</i>	40
<i>Tabela 4.4 - Resultados do TCE para a Distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 1,2$</i>	42
<i>Tabela 4.5 - Taxa de Risco de Falha e Confiabilidade - Distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 0,8$</i>	43
<i>Tabela 4.6 - Resultados do TCE para a Distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 0,8$</i>	45
<i>Tabela 5.1 - Parâmetros conhecidos</i>	50
<i>Tabela 5.2 - Parâmetros calculados utilizando a metodologia TCE</i>	51
<i>Tabela 5.3 - Resultado da metodologia TCE para o Caso-Teste I</i>	55
<i>Tabela 5.4 - Resultados da Metodologia TCE para análise tipo II</i>	60
<i>Tabela 5.5 - Resultados da metodologia TCE para análise tipo III, tempo em meses</i>	64
<i>Tabela 5.6 - Tempo gasto de CPU na aplicação da metodologia TCE em centésimos de segundo</i>	66
<i>Tabela 5.7 - Tempo gasto de CPU para o Caso-Teste II em centésimos de segundo</i>	67
<i>Tabela 5.8 - Resultados da Metodologia TCE desconsiderando os Pontos Atípicos</i>	69

NOMENCLATURA

σ	- desvio padrão;
$R(t)$	- função Confiabilidade;
$pdf(t)$	- função densidade de probabilidade;
$Cdf(t)$	- função distribuição acumulada de falha;
$\lambda(t)$	- função Risco de Falha;
TTF	- intervalo de tempo até a ocorrência da falha;
\bar{D}	- média das diferenças das medidas individuais;
N	- Número de equipamentos do lote;
$N_f(t)$	- Número de equipamentos falhados;
$NA_f(t)$	- Número acumulado de equipamentos falhados;
$N_s(t)$	- Número de equipamentos restantes;
IT	- Número de iterações;
α	- parâmetro escala da distribuição Weibull;
β	- parâmetro forma da distribuição Weibull;
μ	- somatório da função Confiabilidade de 0 a ∞ ;
t	- tempo;
\bar{X}	- valor médio de medidas individuais;
$e_x(x)$	- Vida Residual Média em x .

ABREVIATURAS

CELESC	- Centrais Elétricas de Santa Catarina;
COPEL	- Companhia Paranaense de Energia Elétrica;
CPFL	- Companhia Paulista de Força e Luz;
<i>DFR</i>	- <i>decreasing failure rate</i> - taxas de falha decrescente;
<i>DFRA</i>	- <i>decreasing failure rate in average</i> - taxas de falha decrescente na média;
<i>DMRL</i>	- <i>decreasing mean residual life</i> - vida residual média decrescente;
<i>IFR</i>	- <i>increasing failure rate</i> - taxas de falha crescente;
<i>IFRA</i>	- <i>increasing failure rate in average</i> - taxas de falha crescente na média;
<i>IMRL</i>	- <i>increasing mean residual life</i> - vida residual média crescente;
MCRF	- <i>Mean Cumulative Repair Function</i> ;
<i>NBU</i>	- <i>new better than used</i> - novo melhor que usado;
<i>NBUE</i>	- <i>new better than used in expectation</i> - novo melhor que usado sob o ponto de vista da média;
<i>NBUFR</i>	- <i>new better than used in failure rate</i> - novo melhor que usado sob o ponto de vista da taxa de Risco de Falha;
<i>NWU</i>	- <i>new worse than used</i> - novo pior que usado;
<i>NWUE</i>	- <i>new worse than used in expectation</i> - novo pior que usado sob o ponto de vista da média;
<i>NWUFR</i>	- <i>new worse than used in failure rate</i> - novo pior que usado sob o ponto de vista da taxa de Risco de Falha;
ROCOF	- <i>Rate of Occurrence of failure</i> ;
TCE	- Testes para Caracterização do Envelhecimento.

RESUMO

Para a otimização de métodos e processos de manutenção e operação visando a minimização de custos e a extensão da vida útil de equipamentos e sistemas, mantendo bons níveis de confiabilidade e a qualidade dos serviços, é necessário o conhecimento do real estado dos equipamentos e sistemas. Uma das áreas relacionadas a este tema e que vêm sendo muito difundida recentemente é a caracterização do envelhecimento, determinação da vida útil e da vida remanescente de equipamentos e sistemas.

Nesta dissertação é apresentada uma metodologia de testes para a determinação dos intervalos de tempo nos quais um equipamento ou conjunto de equipamentos apresenta envelhecimento, a partir de dados coletados em campo ou em laboratório. Os intervalos de tempo são obtidos através da aplicação de testes estatísticos baseados no conceito de distribuições de probabilidade com características de envelhecimento.

A metodologia apresentada é bastante versátil podendo ser aplicada para três diferentes tipos de conjunto de dados, os quais englobam a maioria das situações reais existentes, ou seja: um conjunto de equipamentos não-reparáveis de tamanho não-variável, um conjunto de equipamentos em operação ou um único equipamento. Além disso, os testes podem ser aplicados a partir dos dados originais obtidos em campo ou em laboratório, bem como, utilizando técnicas de suavização por média aritmética e por médias móveis.

A metodologia proposta é aplicada a três Casos-Teste: um conjunto de tamanho determinado de equipamentos hipotéticos não-reparáveis, um conjunto de transformadores de distribuição de uma regional da Concessionária de Energia Elétrica de Santa Catarina e um gerador da Usina Termoelétrica de Santa Cruz no Rio de Janeiro.

ABSTRACT

In order to reach the optimum level in methods and procedures of maintenance and operation, suitable to minimize costs and the extension of systems and equipments life cycle, as well as keeping good trustful and qualified levels in services, the knowledge of the actual situation of systems and equipments is required. One of the areas related to this theme and one of those that have recently been spread out, is the characterization of the systems and equipments aging, life cycle determination and remaining life.

In this work a test methodology is proposed for determining the time intervals in which an equipment or an equipment set shows to be aging, from data collected whether in the field or in a laboratory. The time intervals are calculated through application of statistics tests based upon the concept of probability distribution with aging characteristics.

This methodology is quite flexible, and can be applied to three different types of data set, covering the most real situations, which includes a fixed set of non repairable equipment, an operational equipment set or only one equipment. Besides, the test can be performed from data obtained in the field or in a laboratory, as well as by using of softened data through arithmetical average, and moving averages techniques.

The proposed methodology is applied to three Test Cases: a determined sized set of a hypothetical non repairable equipment, a set of distribution transformers for a local company of Electrical Energy, and a generator at the Thermoelectrical Plant of Santa Cruz, in Rio de Janeiro, Brazil.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a importância da confiabilidade de equipamentos e sistemas e a adoção de políticas de manutenção e/ou substituição eficientes têm sido de grande importância para concessionárias de energia elétrica e indústrias. Um dos temas vinculados a essas áreas e que está sendo muito difundido recentemente é a caracterização do envelhecimento, determinação da vida útil e da vida remanescente de equipamentos e sistemas.

Com o conhecimento das características acima citadas pode-se:

- minimizar incertezas em um processo de decisão (por exemplo: substituição ou reparo);
- otimizar políticas de manutenção/substituição;
- determinar o número de equipamentos em estoque para reposição;
- antecipar-se aos defeitos evitando-se a paralisação de sistemas por períodos prolongados;
- comparar equipamentos de fabricantes diferentes;

Apesar disto, ainda hoje, muitas empresas, geralmente de menor porte, tomam decisões importantes envolvendo aspectos de confiabilidade, operação e segurança baseados apenas na intuição e na análise de custo imediato (o custo de substituição comparado ao custo de reparo).

Algumas variáveis de interesse que devem ser consideradas num processo decisório são mencionadas nesta dissertação, como por exemplo: a vida útil, a vida remanescente, a probabilidade de falha do equipamento novo e do equipamento já em operação e o estado de envelhecimento do equipamento ou sistema.

Esta dissertação tem por objetivo descrever uma metodologia para a caracterização do envelhecimento de equipamentos a partir de dados coletados em campo ou em laboratório, sem a necessidade de modelar estes dados através de alguma distribuição de probabilidade conhecida (Exponencial, Normal, Weibull), nem mesmo supor independência e identidade estatística entre as

amostras. A metodologia consiste em uma série de testes estatísticos para determinação dos intervalos de tempo a partir dos quais um equipamento está apresentando degradação.

Os testes estatísticos efetuados são baseados nos conceitos de distribuições de probabilidade com características de envelhecimento e que preservam a ordem cronológica dos eventos de falha. As funções-teste implementadas são: *IFR*, *IFRA*, *NBU*, *NBUE*, *NBUFR* e *DMRL* [30-34], as quais serão abordadas proximamente.

A metodologia proposta é bastante versátil visto que foram implementadas técnicas de suavização por médias aritméticas e médias móveis que permitem uma análise tanto mensal (dados originais) quanto agrupada em trimestres, semestres, anos, etc; mantendo porém a ordem cronológica dos eventos de falha, característica de suma importância considerando que o equipamento no momento da análise pode estar operando na região de taxas de falha crescentes.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica onde são citados alguns dos principais trabalhos envolvendo o envelhecimento de equipamentos e sistemas. Entre as áreas de pesquisa apresentadas pode-se citar: o estudo do envelhecimento dos materiais dos equipamentos sujeitos a estresses químicos, mecânicos, térmicos e elétricos e fatores de influência como temperatura, umidade, poeira e poluição; a modelagem da função Risco de Falha e função Confiabilidade, considerando a hipótese de independência e identidade estatística ou não; as políticas de manutenção/ substituição, manutenção preventiva e manutenção preditiva desenvolvidas segundo vários aspectos e, principalmente, o conceito de distribuições de probabilidade com características de envelhecimento, que é base para o desenvolvimento da metodologia aqui proposta.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia de cálculo da função Risco de Falha e função Confiabilidade, que são os parâmetros necessários para o emprego da metodologia de testes para caracterização do envelhecimento. Além disso, são citados os três diferentes tipos de análise implementados nesta dissertação, que são:

- Análise de um lote fixo de equipamentos não-reparáveis, onde são conhecidos o tamanho do lote e o número de equipamentos falhados em cada intervalo de tempo;
- Análise de um conjunto de equipamentos reparáveis em operação, onde são conhecidas as taxas de falhas em intervalos de tempo regulares;

- um único equipamento em operação onde são conhecidos os tempos até ocorrência de falha.

No Capítulo 4 é desenvolvida em detalhes a metodologia para determinação dos intervalos de tempo onde ocorre envelhecimento. São apresentados os conceitos e definições matemáticas das funções-teste implementadas: *IFR*, *IFRA*, *NBU*, *NBUE*, *NBUFR*, *DMRL* com base em cinco bibliografias selecionadas da literatura [30-34]. Através destas funções-teste são determinados os intervalos de tempo em que ocorre envelhecimento do equipamento ou conjunto de equipamentos sob análise. Neste capítulo também é descrito o algoritmo de Testes para Caracterização do Envelhecimento (TCE) com seus módulos básicos: entrada e leitura de dados, suavização dos dados através de médias aritméticas ou médias móveis, cálculo da função Risco de Falha e função Confiabilidade e determinação dos intervalos de tempo que apresentam envelhecimento determinados através das funções-teste.

A metodologia proposta é aplicada em uma variável que segue a distribuição Exponencial, cuja taxa de falha é constante e para uma variável que segue a distribuição Weibull, cujo comportamento de sua taxa de falha (crescente, decrescente ou constante) é bastante conhecido, de modo a comprovar sua viabilidade de utilização.

São introduzidos no Capítulo 4, os conceitos referentes a cartas de controle, uma ferramenta útil para detecção de pontos atípicos no histórico de falhas e que podem também ser aplicadas na verificação de mudanças de comportamento de funções ao longo do tempo.

No Capítulo 5 a metodologia proposta é aplicada a três Casos-Teste: um conjunto hipotético de equipamentos não-reparáveis obtidos na referência [10], um conjunto de transformadores de distribuição de uma regional de uma concessionária de energia elétrica, onde são coletadas as taxas de falha mensais durante um período de seis anos e dados de um gerador da Usina Termoelétrica de Santa Cruz onde são coletados os tempos até ocorrência de falha em um período de quinze anos e onze meses. Salienta-se que a cada um dos Casos-Teste correspondem um dos tipos de análise propostos.

Finalmente no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido, suas contribuições e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A manutenção vem desempenhando uma função cada vez mais importante devido principalmente à escassez de novos recursos para novos investimentos e à necessidade do conhecimento do real estado de equipamentos e sistemas. É imperiosa a necessidade de cada vez mais otimizar métodos e processos, reduzindo os custos mantendo porém o bom desempenho dos sistemas e a qualidade dos serviços. Devido a isto, um dos tópicos que têm sido muito pesquisado recentemente é o envelhecimento de equipamentos.

O estudo do envelhecimento de equipamentos pode ser realizado considerando o equipamento como um todo (individual ou coletivamente) ou analisando suas partes (componentes). O ideal é que se estude um único equipamento, desde que se tenha um banco de dados de tamanho suficiente para análise sob o ponto de vista estatístico. Na agregação de equipamentos deve-se tomar o cuidado para que os equipamentos analisados tenham as mesmas características físicas, construtivas e operativas, entre outras, para que os resultados obtidos representem o real comportamento do equipamento, evitando a distorção dos resultados por agrupar equipamentos com características diversas.

Infelizmente as empresas de maneira geral não possuem banco de dados apropriados para uma correta análise estatística, visto que os dados existentes englobam equipamentos com características físicas e/ou construtivas diversas, potências nominais variáveis, lotes de tamanho variável e tempos de operação diferentes.

Em função da agregação dos dados e a consideração de tendências, sazonalidade, variações cíclicas e aleatórias nos dados coletados em campo, podem ser aplicadas técnicas de suavização (*smoothness*) por médias aritméticas, médias móveis [1], bem como a aplicação de cartas de controle [2] com o objetivo de detectar pontos atípicos que podem não expressar a situação real de operação do conjunto de equipamentos.

Também são desenvolvidas pesquisas onde é analisado o envelhecimento dos materiais constituintes do equipamento submetidos a estresses químicos, mecânicos, térmicos e elétricos e fatores de influência como temperatura, umidade, poeira e poluição.

Segundo a IEC e a IEEE *Standards* [3] o envelhecimento de equipamentos eletro-mecânicos é definido como a ocorrência de mudanças irreversíveis e prejudiciais no isolamento dos materiais ou sistemas, os quais afetam sua operação, isto é, a capacidade de ter o desempenho desejado.

Infelizmente, em virtude da grande diversidade de materiais existentes, das variadas formas de manufatura e os diversos fatores de influência e estresses aplicados, aos quais são submetidos os materiais, não se tem um modelo que consiga quantificar adequadamente o envelhecimento.

Tem-se porém, que a vida útil de um equipamento eletro-mecânico está intimamente relacionada à durabilidade da sua isolação elétrica [3-5]. A isolação elétrica, além de sua função isolante, proporciona também suporte mecânico, dissipação de calor, segurança pessoal e confiabilidade. Assim, como consequência, a vida útil e vida remanescente do equipamento depende grandemente do estado de seu isolamento, principalmente o isolamento estatórico.

Continuando nesta linha de pesquisa, em 1993, Francisco & do Amaral [6] apresentaram uma metodologia para avaliação da integridade e extensão de vida de equipamentos mecânicos, em especial turbinas, baseada na obtenção de dados operativos relativos a níveis de temperatura, pressão, número de horas em operação correspondentes a estes níveis, etc; e também nas manutenções preditivas efetuadas, as quais, segundo os autores, são aconselhadas para equipamentos de maior valor, maior risco e maior importância para o sistema.

Hara *et alii* [7] em 1995 apresentaram um estudo de avaliação da vida remanescente dos geradores da Usina Governador Bento Munhoz pertencente à Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL). Neste trabalho é estabelecido que a degradação de um gerador é acelerada por esforços térmicos, elétricos, mecânicos e ambientais, sendo que os principais ofensores são a alta temperatura, o gradiente elétrico, o número de partidas-paradas e a contaminação do ar, em cada um dos esforços respectivamente.

Maka *et alii* [8], também em 1995, publicaram um artigo referente ao envelhecimento de transformadores de potência da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). Foi constatado que o fator de maior influência para o envelhecimento dos transformadores é a presença de oxigênio e água no óleo isolante do transformador. Por este motivo, a CPFL desenvolveu uma máquina termovácuo automatizada e um sistema de selagem com gás nitrogênio para eliminar o

oxigênio e a água do óleo isolante. Com esta atitude, a CPFL espera dobrar a vida útil de seus transformadores de potência de 30 para 60 anos.

Sob a ótica de uma análise estatística pode-se definir envelhecimento como um crescimento gradual da taxa de falha no tempo, ou uma diminuição gradual dos tempos até ocorrência de falha ao longo do tempo. Conseqüentemente, quanto maior o envelhecimento menor é a confiabilidade do equipamento e mais próximo está o equipamento do fim de sua vida útil. A análise estatística aplica-se tanto a equipamentos elétricos, mecânicos e/ou sistemas em geral.

Pode-se verificar que, na maioria dos equipamentos, a taxa de falha se comporta, ao longo do tempo, de acordo com a curva da banheira [9-13] (Figura 2.1), compreendendo três fases distintas:

- Fase I: conhecida como fase de maturação, *burn-in* ou mortalidade infantil, onde as taxas de falha são altas e decrescentes, caracterizando um período *DFR* (*decreasing failure rate*). Isto se deve ao fato de que muitos equipamentos apresentam defeito logo que são postos em funcionamento, oriundos de projetos inadequados ou deficiências de fabricação. Também a inadequação e ajustes da operação no período inicial contribuem para o aumento das falhas neste período;
- Fase II: conhecido como o período onde as taxas de falha são constantes, onde as falhas ocorrem ao acaso. Por alguns autores é considerado como o período de vida útil propriamente dito. Somente neste período é válida a utilização da modelagem exponencial. Uma manutenção freqüente e adequada permite uma maior permanência do equipamento nesta região de operação;
- Fase III: fase de desgaste, envelhecimento, caracterizando um período com taxas de falha crescentes e tempo entre falhas cada vez menor, caracterizando um período *IFR* (*increasing failure rate*).

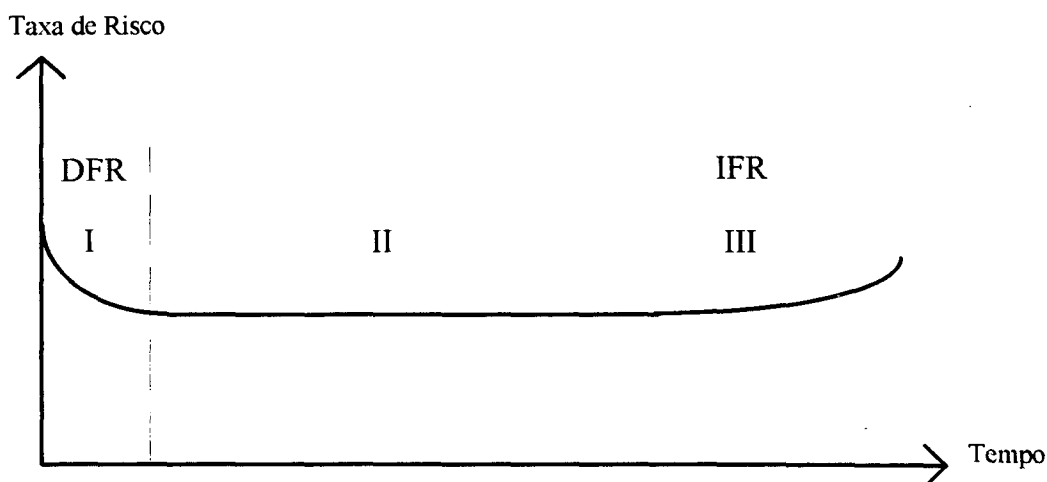


Figura 2.1 - Curva característica da Banheira

A maioria dos estudos encontrados na literatura modelam a função Risco de Falha e a função Confiabilidade considerando que as variáveis são independentes e identicamente distribuídas estatisticamente (hipótese *iid*), onde a ordem cronológica dos eventos de falha é irrelevante para a análise. Entre eles pode ser citado o processo de renovação (*good-as-new concept*), o processo Homogêneo de Poisson, a técnica de plotar o Risco de Falha (*Hazard Plotting*) [14-15]. Esta hipótese simplificadora não representa o comportamento de envelhecimento natural e contínuo ao longo do tempo.

Em virtude da dificuldade em se obter uma modelagem que represente o comportamento de um equipamento durante sua operação, seus modos de falha (aleatórias ou por desgaste), as manutenções e os tempos de reparo e, supondo que a operação se mantém dentro do período de vida útil, muitas técnicas utilizam a distribuição exponencial para representar o comportamento de equipamentos. Deve-se contudo destacar que com a utilização da distribuição exponencial há uma grande simplificação matemática em análises de confiabilidade e taxas de falha. Deste modo, a modelagem exponencial não representa adequadamente equipamentos ou sistemas que reconhecidamente apresentam envelhecimento e operam na terceira região da curva da banheira [16].

Entre os trabalhos da literatura que utilizam modelos de distribuição não-exponenciais e nem utilizam a hipótese *iid*, pode-se citar: Schilling [16], Duckett & McDonough [17], Chan & Shaw [18], Coelho & Ricardo [19] e Coelho [20].

Schilling [16], em 1985, modelou a função Risco de Falha de geradores termoelétricos na presença de envelhecimento através de um Processo Não-Homogêneo de Poisson. A

modelagem considerou cinco funções risco distintas (constante, linear, exponencial, Ascher-Feingold e Weibull). A obtenção dos parâmetros foi realizada através da maximização da função verossimilhança e os testes de aderência utilizados foram: Qui-quadrado, Kolmogorov-Smirnov e Cramer-von-Mises. Schilling constata também que a deterioração verificada provém mais da inatividade dos geradores do que sua utilização intensiva.

Duckett & McDonough [17], em 1991, apresentaram um estudo de decisão entre substituir ou reformar um transformador. Foi utilizado um conceito denominado de POP (porcentagem da população original) relacionado às falhas de um conjunto de transformadores monofásicos em estudo. O processo se baseia no cálculo do acumulado do POP e através da concavidade da função obtida pode-se determinar se o lote está apresentando deterioração ou não.

Neste último trabalho os autores verificaram que a fase de desgaste está compreendida entre o 16º e 20º ano e que, mais de 50% da população havia sido removida do sistema após vinte e cinco anos em operação. Desta forma, a decisão entre substituição e reparo está diretamente relacionada à idade do transformador, bem como, aos custos operacionais envolvidos, ao custo das perdas e à probabilidade de falha tanto do transformador novo quanto do transformador já em operação.

Chan & Shaw [18] propõem um modelo para um sistema reparável considerando que as taxas de falha são dependentes do envelhecimento e das ações de manutenção preventiva. Os tempos para a falha são modelados por uma distribuição Weibull, considerando um parâmetro de redução de falha a cada manutenção preventiva, ou seja, a cada manutenção, partes do equipamento são reparadas e a taxa de falha imediatamente após a ação da manutenção torna-se menor, podendo este fator de redução ser fixo ou variável.

Coelho & Ricardo [19] e Coelho [20] também utilizam um Processo Não-Homogêneo de Poisson baseado no conceito de Função Média de Reparos Acumulados (*MCRF - Mean Cumulative Repair Function*) para modelar as falhas acumuladas de transformadores de distribuição de energia elétrica. A derivada da *MCRF* é a *ROCOF (Rate of Occurrence of failure)* que nada mais é do que a representação da taxa de falha variável no tempo. Este método é apropriado para um sistema com grande número de equipamentos, cuja quantidade de equipamentos varia no tempo em função da necessidade de, a cada mês, colocar novas unidades em operação para suprir a expansão do sistema e atender novos consumidores. A finalidade de

utilização desta ferramenta é determinar o estoque mínimo para manutenção, proporcionando um capital imobilizado mínimo de sobressalentes [19], e também para efetuar a predição da confiabilidade [20].

Outra área de pesquisa importante que estuda o envelhecimento de equipamentos e sistemas diz respeito às políticas de manutenção/ substituição, que têm como principais objetivos:

- minimização do custo total do equipamento durante seu ciclo de vida, considerando os custos de substituição, reparo, manutenção e operação;
- maximização da disponibilidade de equipamentos e sistemas;
- aumento da confiabilidade;
- extensão da vida útil;
- antecipação a falhas forçadas evitando a paralisação de equipamentos e sistemas.

Dekker [21] apresenta uma visão geral das pesquisas com respeito à otimização da operação, citando os modelos, aplicações, obstáculos, problemas referentes a dados e perspectivas. Segundo Dekker, em geral, os estudos referentes à manutenção englobam a modelagem da deterioração dos sistemas e possíveis conseqüências.

Muitas políticas de substituição têm sido desenvolvidas nos últimos anos. O que difere entre as várias metodologias propostas é o critério de análise. Entre as metodologias de substituição citam-se:

- as metodologias baseadas no conceito de substituição por idade [22] onde um equipamento é substituído por um equipamento novo quando falha ou quando alcança a idade específica T , dependendo do que ocorrer primeiro;
- as metodologias baseadas no critério de substituição quando a taxa de custo médio total ao longo do ciclo é mínima [23] ou quando o custo total (manutenção e substituição) é mínimo [24];
- as metodologias baseadas na substituição quando a taxa de custo de reparo excede um custo limite C (considerado nível crítico) [25].

Alguns outros trabalhos se baseiam na utilização de políticas de manutenção preventiva. Costa [26], em 1995, desenvolveu uma metodologia para obtenção do intervalo ótimo

entre manutenções preventivas. O critério escolhido foi minimizar a indisponibilidade do equipamento devido à própria ação da manutenção e devido às falhas aleatórias e por desgaste.

Outra filosofia de atuação diz respeito às políticas de manutenção preditiva. Murry & Mitchell [27] desenvolveram um programa de manutenção preditiva para grandes motores e bombas da *Strategic Petroleum Reserve* com a expectativa de melhorar a disponibilidade e diminuir os custos de manutenção. Os autores salientam que a manutenção preditiva é indicada nos casos de equipamentos submetidos a períodos de operação e inatividade. Por outro lado, a manutenção preventiva é indicada nos casos de operação contínua por longos períodos, como por exemplo, geradores de energia elétrica operando na base do sistema.

Pode-se verificar que todas estas metodologias de políticas de substituição, manutenção preventiva e manutenção preditiva consideram o fator econômico implícita ou explicitamente. Por exemplo, quando se procura maximizar a disponibilidade de um equipamento, conseqüentemente há uma redução de custos com a redução de falhas e paralisações não-programadas e um aumento da vida útil dos equipamentos.

Um conceito que está presente em algumas bibliografias, principalmente relacionadas a políticas de manutenção/substituição e estudos de confiabilidade, é o conceito de distribuições de probabilidade com características de envelhecimento [28-37].

Este conceito consiste em verificar se uma distribuição de probabilidade ou um conjunto de dados apresenta características de envelhecimento (ou rejuvenescimento) segundo funções-teste específicas. As funções-teste com características de envelhecimento mais conhecidas e encontradas na literatura são:

- *IFR* - *increasing failure rate* - taxas de falha crescente;
- *IFRA* - *increasing failure rate in average* - taxas de falha crescente na média;
- *NBU* - *new better than used* - novo melhor que usado;
- *NBUE* - *new better than used in expectation* - novo melhor que usado sob o ponto de vista da média;
- *NBUFR* - *new better than used in failure rate* - novo melhor que usado sob o ponto de vista da taxa de Risco de Falha;
- *DMRL* - *decreasing mean residual life* - vida residual média decrescente;

Entre as funções-teste com características de rejuvenescimento tem-se:

- *DFR* - *decreasing failure rate* - taxas de falha decrescente;
- *DFRA* - *decreasing failure rate in average* - taxas de falha decrescente na média;
- *NWU* - *new worse than used* - novo pior que usado;
- *NWUE* - *new worse than used in expectation* - novo pior que usado sob o ponto de vista da média;
- *NWUFR* - *new worse than used in failure rate* - novo pior que usado sob o ponto de vista da taxa de Risco de Falha;
- *IMRL* - *increasing mean residual life* - vida residual média crescente;

Lai [29], além de apresentar as propriedades de várias funções-teste, fez uma explanação sobre a distribuição exponencial, uma conceituação de envelhecimento estocástico e forneceu uma coletânea das principais referências bibliográficas sobre o assunto.

O objetivo desta dissertação é implementar as funções-teste: *IFR*, *IFRA*, *NBU*, *NBUE*, *NBUFR* e *DMRL* definidas em [30-34] e aplicá-las utilizando dados teóricos e práticos, com a finalidade de determinar quais os intervalos de tempo em que o equipamento ou conjunto de equipamentos sob análise está apresentando envelhecimento e determinar quais as funções-teste mais indicadas para cada tipo de aplicação.

A justificativa para a utilização destes conceitos se deve à simplicidade de implementação, fácil entendimento das definições e aplicação prática dos conceitos. Além disso, como será demonstrado nos próximos capítulos, a metodologia proposta é bastante genérica podendo ser utilizada tanto para equipamentos não-reparáveis quanto reparáveis, não é preciso pressupor a independência e identidade estatística, utiliza os dados diretamente coletados em campo e, principalmente, mantém a ordem cronológica dos eventos de falha.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA FUNÇÃO RISCO DE FALHA E FUNÇÃO CONFIABILIDADE

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os conceitos e expressões matemáticas relacionados à função densidade de probabilidade, função distribuição acumulada de falha, função Risco de Falha e função Confiabilidade.

Os valores da função Risco de Falha e função Confiabilidade são os parâmetros necessários para a realização dos testes para caracterização do envelhecimento descritos no próximo capítulo.

Pode-se verificar, sob o ponto de vista estatístico, que o envelhecimento é caracterizado, por exemplo, quando a função Risco de Falha é crescente no tempo ou, quando os tempos até a ocorrência de falha tornam-se cada vez menores. Para a função Confiabilidade, um decréscimo da confiabilidade condicional também é indício de envelhecimento.

As expressões matemáticas apresentadas neste capítulo serão desenvolvidas e ajustadas dependendo do tipo de dados a serem analisados. No presente trabalho serão abordados três tipos de análise, dependendo da disponibilidade ou característica do registro dos dados:

- um lote fixo de equipamentos não-reparáveis;
- um conjunto de equipamentos em operação onde são fornecidas as taxas de falha mensais;
- um único equipamento em operação onde são fornecidos os *TTF's* (*time to failure* - tempos até ocorrência da falha).

3.2 FUNÇÃO RISCO DE FALHA

Infelizmente não há uniformidade dos autores quanto a utilização do termo função Risco de Falha [10;16]. São encontrados na literatura termos como:

- *hazard rate function* - função taxa de Risco de Falha;
- *rate of occurrence of failures (ROCOF)* - taxa de ocorrência de falhas;
- *intensity function* - função intensidade;
- *mortality function* - função mortalidade;
- *mortality rate function* - função taxa de mortalidade;
- *failure rate* - taxa de falha.

Conceitualmente, a função Risco de Falha ($\lambda(t)$) é definida diferentemente para sistemas reparáveis e não-reparáveis. Schilling [16] utiliza o termo função mortalidade quando se refere a sistemas não-reparáveis e função Risco de Falha quando se refere a sistemas reparáveis. Por outro lado, Billinton [10] adota o termo *hazard rate*.

Em função da não uniformização da terminologia empregada, este trabalho adota o termo função Risco de Falha ou taxa de Risco de Falha para as duas situações, tendo em mente a diferença conceitual existente entre sistemas reparáveis e não-reparáveis.

A expressão $\lambda(t)\Delta t$ em sistemas não-reparáveis exprime a probabilidade condicional de falha no intervalo $(t, t + \Delta t)$ dado que o sistema tenha sobrevivido até t . Por outro lado, para sistemas reparáveis, a expressão $\lambda(t)\Delta t$ exprime a probabilidade não-condicional de falha no instante $(t, t + \Delta t)$.

Nas Figuras 3.1 e 3.2, são mostrados dois exemplos de função Confiabilidade para equipamentos não-reparáveis e reparáveis. Na função 3.1, a função Confiabilidade é decrescente ao longo do tempo, com taxa de falha constante, significando que o número de falhas por unidade de tempo não varia. Por outro lado, na Figura 3.2, a Confiabilidade de equipamentos decresce no tempo, mas através de ações de manutenção, em t_1 e t_2 , a taxa de falha varia, alterando o número de falhas por unidade de tempo. A melhoria do sistema através de ações de manutenção pode ser melhor entendida em termos de disponibilidade (Figura 3.3), visto que em t_1 e t_2 há um ganho de

disponibilidade, apesar de não retornar o equipamento a condição de tão bom quanto novo (*new better than used*), ou seja, a manutenção melhora a disponibilidade do equipamento mas não equivale a sua substituição por um novo.

Muitas empresas procuram acompanhar a Confiabilidade e a disponibilidade de seus sistemas e seus índices de defeito. Casos esses índices sejam considerados críticos, ações são tomadas para a melhoria de desempenho, como por exemplo, o emprego de manutenções preventivas, além da manutenção corretiva efetuada usualmente em seus equipamentos.

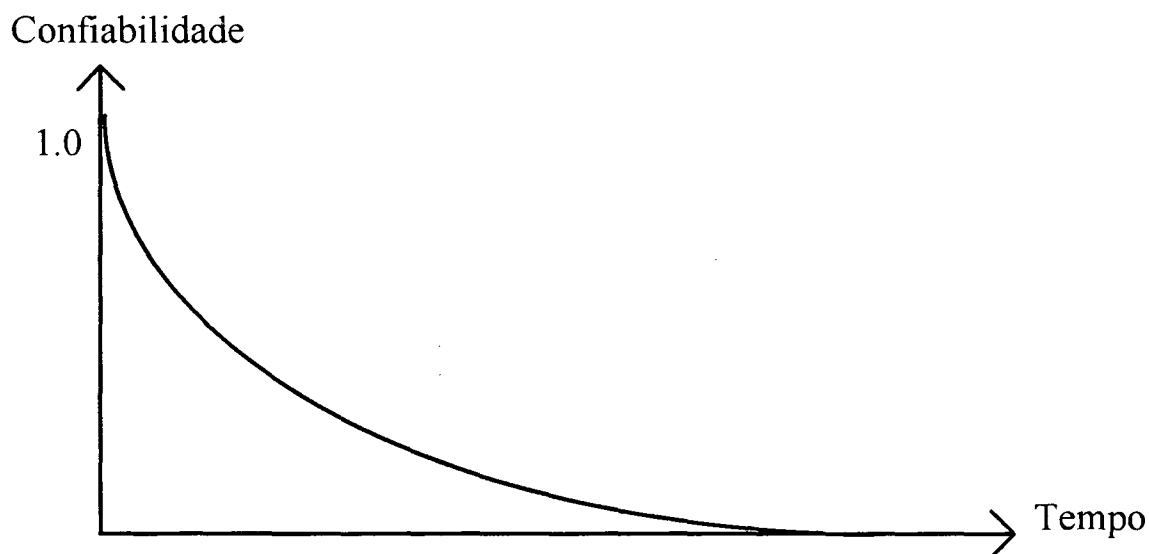


Figura 3.1 - Exemplo de Função Confiabilidade com taxa de falha constante

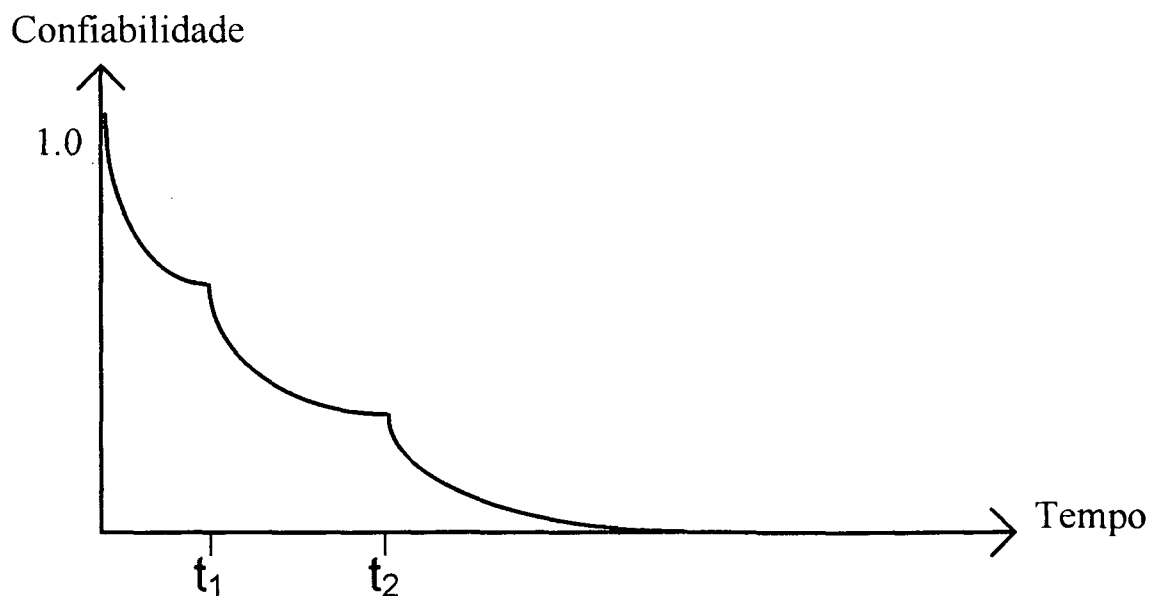


Figura 3.2 - Exemplo de Função Confiabilidade com taxa de falha variável

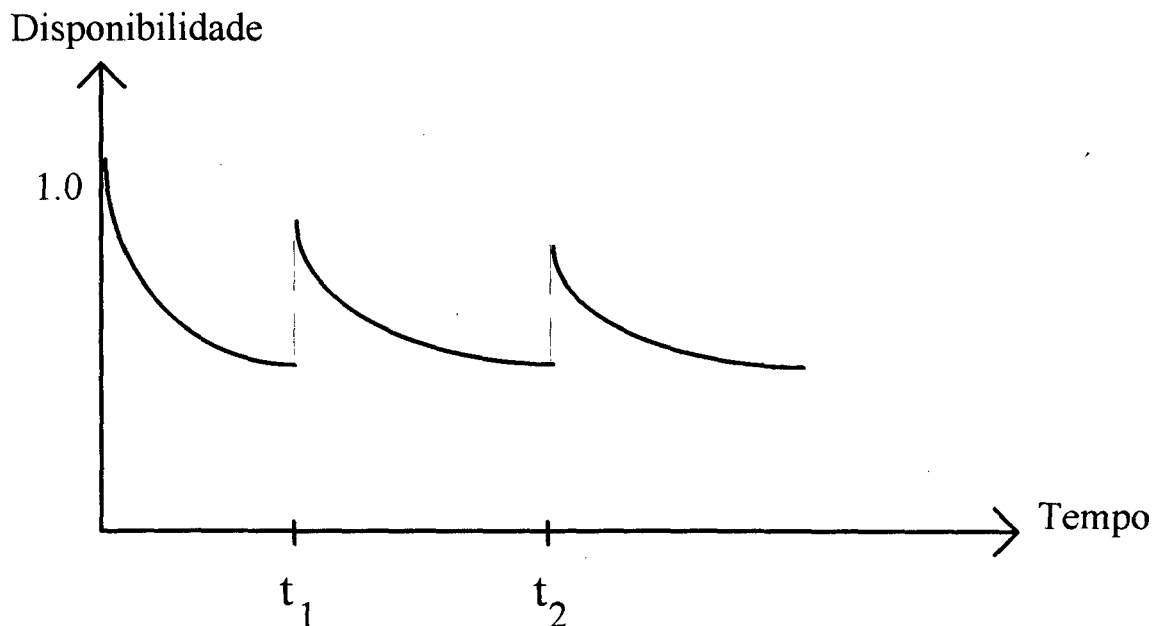


Figura 3.3 - Exemplo de Função Disponibilidade

Neste trabalho também será utilizada a expressão taxa de falha para se referir ao percentual de equipamentos falhados em relação ao total de equipamentos em operação, a qual é considerada constante durante o intervalo de tempo em análise, por exemplo, um mês.

3.3 ANÁLISE TIPO I: LOTE FIXO DE EQUIPAMENTOS NÃO-REPARÁVEIS

A seguir é apresentada a metodologia para obtenção da função densidade de probabilidade, função distribuição acumulada de falha, função Risco de Falha e função Confiabilidade. A função densidade de probabilidade e função distribuição acumulada de falha tem caráter apenas informativo não sendo objetivo final da dissertação.

Nesta análise, os parâmetros de entrada, ou seja, as variáveis conhecidas [10] são: o tamanho do lote (N) e o número de equipamentos falhados em cada intervalo de tempo ($N_f(t)$).

O número de falhas acumuladas até t ($NA_f(t)$), é obtido através do somatório do número de falhas em cada intervalo de tempo obtidos experimentalmente em laboratório ou através do somatório de dados de campo.

$$NA_f(t) = \sum N_f(t) \quad (3.1)$$

O número de sobreviventes ou equipamentos restantes ($N_s(t)$) é obtido subtraindo-se o tamanho da amostra do número de falhas acumuladas.

$$N_s(t) = N - NA_f(t) \quad (3.2)$$

Em qualquer tempo, a distribuição acumulada de falha, também conhecida como falibilidade, é obtida pela seguinte expressão [10]:

$$Cdf(t) = \frac{NA_f(t)}{N} \quad (3.3)$$

Da mesma forma, a função Confiabilidade é definida pela seguinte expressão:

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N} = 1 - \frac{NA_f(t)}{N} \quad (3.4)$$

ou seja, a função Confiabilidade expressa a relação entre os equipamentos sobreviventes e o total de equipamentos do lote. Das expressões (3.3) e (3.4) pode-se verificar a relação já conhecida de que:

$$R(t) = 1 - Cdf(t) \quad (3.5)$$

ou seja, a função Confiabilidade é o complemento da função distribuição acumulada de falha.

A função densidade de probabilidade, que pode ser interpretada como uma medida global da velocidade de falhas, é a derivada da função distribuição acumulada de falha; então, derivando $Cdf(t)$ em relação ao tempo, resulta na seguinte expressão:

$$pdf(t) = \frac{1}{N} \cdot N_f(t) \quad (3.6)$$

A função Risco de Falha é uma medida da taxa (ou velocidade) instantânea em que as falhas ocorrem, no entanto, não é simplesmente o número de falhas que ocorrem num dado período de tempo, porque também dependem, do número de componentes expostos à falha no intervalo de tempo desejado. Conclui-se assim que a expressão para $\lambda(t)$ é:

$$\lambda(t) = \frac{N_f(t)}{N_s(t)} \quad (3.7)$$

manipulando adequadamente a expressão (3.7), obtém-se:

$$\lambda(t) = \frac{N}{N} \cdot \frac{N_f(t)}{N_s(t)} = \frac{1}{R(t)} \cdot pdf(t) \quad (3.8)$$

Em termos físicos esta relação significa que a $pdf(t)$ permite que a probabilidade de falha seja avaliada em qualquer período de tempo futuro, enquanto que a taxa de Risco de Falha ($\lambda(t)$) permite que a probabilidade de falha seja avaliada no próximo período de tempo, dado que o componente tenha sobrevivido até o tempo t .

Das expressões (3.6) e (3.8) pode-se obter uma relação entre a $pdf(t)$ e $\lambda(t)$:

$$pdf(t) = \lambda(t) \cdot \frac{N_s(t)}{N} \quad (3.9)$$

Da expressão (3.9) pode-se verificar que a função densidade de probabilidade e a taxa de Risco de Falha são iguais para $t = 0$ e a partir deste ponto, a função densidade de probabilidade e a função Risco de Falha diferem pelo fator $N_s(t)/N$.

Como os dados são coletados em intervalos de tempo iguais, para o cálculo da taxa de Risco de Falha, será adotado o número médio de sobreviventes no início e fim de cada intervalo de tempo como sendo o número de equipamentos expostos à falha.

$$\lambda(t) = \frac{N_f(t)}{\left(\frac{N_s(t) + N_s(t+1)}{2} \right)} \quad (3.10)$$

Salienta-se que as equações e relações matemáticas da função Risco de Falha e função Confiabilidade apresentadas não assumem nenhuma modelagem específica de distribuição de probabilidade (por exemplo: exponencial, weibull, gamma, normal).

Na Figura 3.4 é apresentado um fluxograma exemplificando a metodologia para obtenção da função Risco de Falha e da função Confiabilidade. Neste tipo de análise também são obtidas as funções densidade de probabilidade e distribuição acumulada de falha.

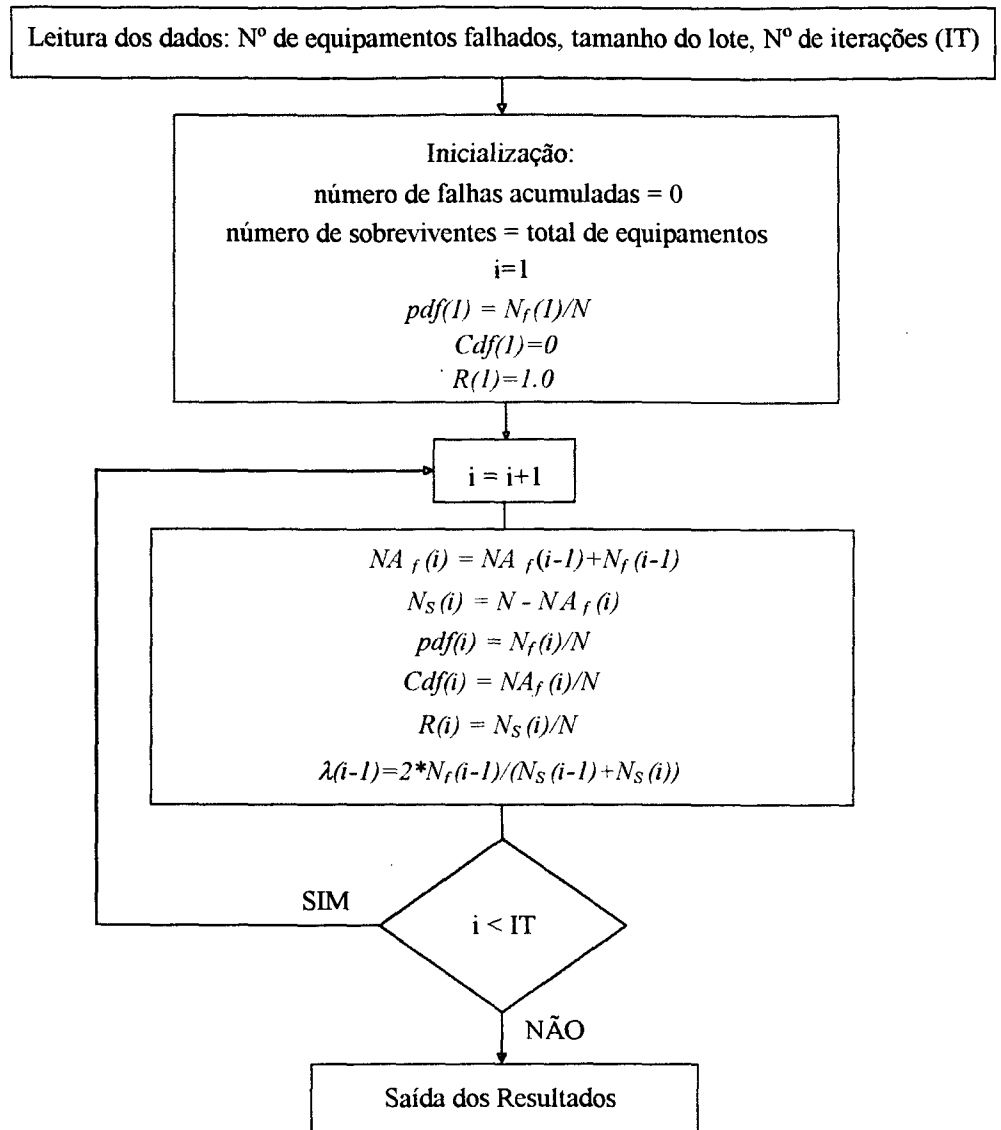


Figura 3.4 - Fluxograma para análise do tipo I

• Forma Alternativa da Análise I:

Uma forma alternativa da análise tipo I é utilizar como entrada de dados: o tamanho do lote e a taxa de Risco de Falha para cada intervalo de tempo.

Partindo-se da expressão de $\lambda(t)$ da equação (3.10) e sabendo-se que em $t = 0$, o número de equipamentos restantes é igual ao tamanho da amostra, após algumas manipulações matemáticas (Apêndice A), obtém-se a expressão:

$$N_f(0) = \frac{2 \cdot N \cdot \lambda(0)}{2 + \lambda(0)} \tag{3.11}$$

Para os demais períodos, considerando que o número de sobreviventes num intervalo de tempo (t) é igual ao número de sobreviventes num intervalo de tempo $(t - 1)$ subtraído do número de equipamentos falhados no intervalo $(t - 1)$, pode-se obter facilmente a expressão (Apêndice A):

$$N_f(t) = \frac{2 \cdot \lambda(t) \cdot (N_s(t-1) - N_f(t-1))}{2 + \lambda(t)} \quad (3.12)$$

De posse do número de equipamentos falhados, o procedimento para obtenção dos demais parâmetros é o mesmo descrito nas equações (3.1) a (3.9).

3.4 ANÁLISE TIPO II: UM CONJUNTO DE EQUIPAMENTOS IGUAIS EM OPERAÇÃO

Este tipo de análise será empregada nos dados de uma concessionária típica de distribuição de energia elétrica. Para um conjunto de equipamentos em operação é medida mensalmente a taxa de falha dos mesmos. Esta taxa de falha nada mais é que a função Risco de Falha discretizada no tempo. Considera-se que durante um intervalo de tempo (geralmente um mês) a taxa de falha permaneça com o mesmo valor.

Deve-se observar que o caso “ideal” seria uma análise individualizada para cada equipamento, ou, que o conjunto de equipamentos tenha as mesmas características físicas, construtivas e operativas, possua tempos em operação semelhantes e que a quantidade de equipamentos em operação não varie no tempo.

Infelizmente nem todas as empresas de energia elétrica tem a cultura de realizar um acompanhamento individual de cada equipamento medindo sua disponibilidade, taxas de falha, taxas de reparo, etc. Assim, só dispõem de dados de conjunto de equipamentos agrupados por regiões geográficas, considerando os equipamentos operando sob as mesmas condições.

Para o cálculo da função Confiabilidade, será utilizada a expressão geral que relaciona a função Confiabilidade à função Risco de Falha, a qual pode ser obtida através da expressão (3.13). Na referência [10] é apresentado o desenvolvimento da equação.

$$R(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t) dt\right\} \quad (3.13)$$

Como neste trabalho, a taxa de Risco de Falha é discretizada no tempo, a expressão 3.11 pode ser substituída por:

$$R(t) = \exp \left\{ - \left(\sum_{i=0}^t \lambda_i \cdot \Delta t_i \right) \right\} \quad (3.14)$$

3.5 ANÁLISE TIPO III: UM ÚNICO EQUIPAMENTO EM OPERAÇÃO

O objetivo deste item é analisar o comportamento de equipamentos de grande porte (geradores e transformadores de subestação), ou equipamentos de grande importância para o sistema ou equipamentos de alto valor, onde registros individuais de falha estão disponíveis.

Dado que os tempos até ocorrência da falha destes equipamentos são geralmente grandes e distintos entre si, a utilização das expressões abordadas nos itens 3.3 e 3.4 não é indicada, visto que as taxas de Risco de Falha calculadas em intervalos regulares de tempo não representariam a condição real de operação/falha. Deve-se portanto, calcular as taxas de Risco de Falha e valores de Confiabilidade nos instantes de tempo de ocorrência da falha.

Os dados coletados em campo são os *TTF's* (tempos até ocorrência de falha). Os tempos de reparo, bem como os períodos em que o equipamento não está em funcionamento, não são computados.

A função Risco de Falha é calculada de acordo com a equação:

$$\lambda(t) = \frac{N^o \text{ de falhas que se quer agrupar}}{\sum TTFs \text{ correspondentes}} \quad (3.15)$$

e a função Confiabilidade é calculada conforme equação (3.14) já apresentada.

3.6 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentadas e deduzidas as expressões que permitem calcular a função Risco de Falha e a função Confiabilidade nas seguintes situações:

- um lote fixo de equipamentos não-reparáveis;
- um conjunto de equipamentos em operação onde são fornecidas as taxas de falha mensais;

- um conjunto de equipamentos em operação onde são fornecidas as taxas de falha mensais;
- um único equipamento em operação onde são fornecidos os *TTF's*.

Estas três análises englobam quase a totalidade do tipo de banco de dados disponíveis pelas indústrias e empresas em geral, possibilitando a análise da caracterização do envelhecimento de equipamentos dos mais variados tipos. No capítulo 5, para cada uma das situações acima, será apresentado um Caso-Teste completo contendo os intervalos de tempo com características de envelhecimento dos equipamentos sob análise, intervalos estes identificados através de testes efetuados com os valores da função Risco de Falha e da função Confiabilidade, que são calculadas a partir das expressões descritas neste capítulo.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA DE TESTES PARA CARACTERIZAÇÃO DO ENVELHECIMENTO DE EQUIPAMENTOS

4.1 INTRODUÇÃO

Muitos estudos têm sido desenvolvidos envolvendo a identificação do envelhecimento de equipamentos ou sistemas. Entre estes estudos, pode-se citar: as políticas de manutenção/substituição e os trabalhos onde se busca identificar modelos matemáticos que representem adequadamente o funcionamento de equipamentos/sistemas. A maioria destes trabalhos são baseados na suposição de que as variáveis envolvidas são independentes e identicamente distribuídas, onde a ordem cronológica dos eventos de falha é fator irrelevante. Esta hipótese simplificadora não representa o comportamento de envelhecimento natural e contínuo ao longo do tempo, não sendo portanto recomendada.

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e definições matemáticas das funções-teste que identificam o envelhecimento (*IFR*, *IFRA*, *NBU*, *NBUE*, *NBUFR* e *DMRL*). Estas funções-teste são a base para o desenvolvimento da metodologia de Testes para Caracterização de Envelhecimento, denominada metodologia TCE. A metodologia TCE, através das funções-teste identifica os intervalos de tempo nos quais um equipamento ou conjunto de equipamentos apresenta degradação.

A principal justificativa e vantagem para utilização destas definições deve-se à aplicação direta dos dados coletados em campo (ou laboratório) para obtenção dos períodos de envelhecimento, não necessitando de ajustes dos dados (*goodness of fit*) a funções densidade de probabilidade “conhecidas” (exponencial, weibull, gama, normal, etc) e nem supor independência e identidade estatística das variáveis envolvidas. Além disso, o emprego destas definições, mantém a ordem cronológica do histórico de falhas, característica importante para uma análise correta do real estado de equipamentos na presença de envelhecimento.

Alguns conceitos relacionados a cartas de controle, uma ferramenta de apoio aos testes mencionados acima, também serão introduzidos no presente capítulo.

4.2 DEFINIÇÕES DAS FUNÇÕES-TESTE

As funções-teste para caracterização do envelhecimento mais conhecidas e citadas na literatura são: *IFR*, *IFRA*, *NBU*, *NBUE*, *NBUFR* e *DMRL*. Todas estas classes apresentam envelhecimento (degradação, desgaste). Em contrapartida, existem as funções-teste que identificam o rejuvenescimento, que são: *DFR*, *DFRA*, *NWU*, *NWUE*, *NWUFR* e *IMRL*, que não serão abordadas neste trabalho.

A seguir serão apresentados os conceitos e definições matemáticas das funções-teste acima citadas, coletadas através de várias referências bibliográficas citadas na literatura [30-34].

Para facilitar o desenvolvimento do texto e o entendimento do leitor, cada função-teste, quando necessário, será identificada por sua sigla e por um índice, por exemplo *IFR1*. O índice serve para representar o relacionamento entre a definição da função-teste e seu respectivo autor. Portanto, sempre que for mencionado o índice 1, estar-se-á referindo às definições apresentadas em Ebrahimi [30]. Da mesma forma, o índice 2 se refere a Rojo [31], o índice 3 se refere a Bagai & Jain [32], o índice 4 se refere a Sengupta [33] *et alii* e, por fim, o índice 5 se refere a Lim & Park [34].

Muitas vezes, no texto, serão utilizadas as terminologias: crescente, decrescente, não-crescente e não-decrescente. A diferença entre estes termos pode ser mostrada pelas definições:

- é decrescente se: $X(t) > X(t + 1)$ para todo $t \geq 0$;
- é crescente se: $X(t) < X(t + 1)$ para todo $t \geq 0$;
- é não-crescente se: $X(t) \geq X(t + 1)$ para todo $t \geq 0$;
- é não-decrescente se: $X(t) \leq X(t + 1)$ para todo $t \geq 0$;

onde $X(\bullet)$ é uma variável qualquer. Portanto a diferença está em permitir ou não a igualdade no teste de condição.

4.2.1 IFR - Taxa de Falha Crescente

- Segundo Ebrahimi [30], uma função é *IFR* se:

IFR1	$R(t+x)/R(t)$ é decrescente em t para todo $t, x \geq 0$. (4.1)
-------------	---

Esta definição é uma comparação de taxas de função Confiabilidade de um determinado período com taxas de função Confiabilidade dos demais períodos subsequentes.

Em termos computacionais esta definição implica na consideração de duas variáveis temporais percorrendo todo o histórico de dados, resultando num número elevado de comparações.

- Segundo Rojo [31], uma função é *IFR* se a função Taxa de Risco de Falha Acumulada é convexa, ou seja, se:

IFR2	$-\ln(R(t)) \equiv$ Taxa de Risco de Falha Acumulada é convexa. (4.2)
-------------	--

Já que uma função convexa tem uma derivada não decrescente [31], a taxa de Risco de Falha Acumulada também é não decrescente, indicando que o equipamento sob análise se deteriora com o tempo, caracterizando seu envelhecimento.

Em função da variável taxa de Risco de Falha acumulada ser discretizada no tempo, utilizou-se a interpretação geométrica de funções convexas apresentada por Bazaraa [38] (Apêndice B), segundo a qual, para uma função ser convexa, o valor da função nos pontos sobre o segmento de linha $\lambda \cdot t_1 + (1 - \lambda) \cdot t_2$ deve ser menor ou igual a altura da corda unindo os pontos $[t_1, f(t_1)]$ e $[t_2, f(t_2)]$. Um exemplo genérico de uma função convexa e sua interpretação geométrica são apresentados na Figura 4.1, onde pode ser verificado que a corda que une t_1 a t_2 não corta a função Risco de Falha Acumulada em nenhum ponto e seus valores são sempre maiores ou iguais aos valores da curva original, portanto a função apresentada é convexa.

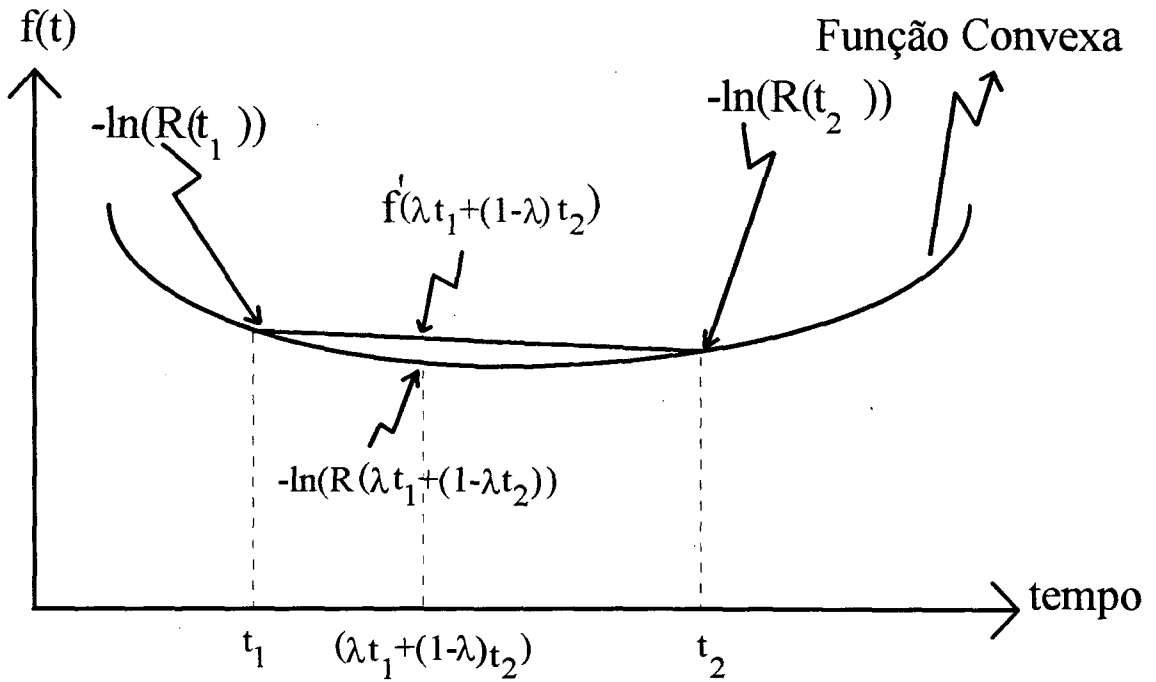


Figura 4.1 - Exemplo genérico da interpretação geométrica de uma função convexa

Na implementação computacional foram utilizadas duas variáveis temporais discretas i e j (representadas por t_1 e t_2 na figura) para varrer todo o domínio de análise. Além disso, ainda é utilizada uma terceira variável k (representada por $\lambda \cdot t_1 + (1 - \lambda) \cdot t_2$ na figura) que percorre todos os pontos internos ao intervalo $[i, j]$.

Partindo da interpretação geométrica da função convexa, faz-se o seguinte teste:

se: $(-\ln(R(k)) \leq Raux(k))$, então a condição de convexidade é cumprida neste ponto

senão: a função não satisfaz a condição de convexidade da função (4.3)

onde $Raux(k)$, é o valor da equação da reta que une os pontos i e j , calculada para o ponto k . Este processo é repetido para todo i e j do intervalo de análise. Se a condição for satisfeita para todo i e j a função é convexa em todo o intervalo. Caso contrário, identifica-se para quais intervalos de tempo a função é convexa.

- Segundo Bagai & Jain [32], uma função é *IFR* se:

IFR3	$\lambda(t) \equiv$ taxa de Risco de Falha é não-decrescente em t para todo $t \geq 0$	(4.4)
-------------	--	-------

ou seja,

$$\lambda(t) \leq \lambda(t+1) \text{ para todo } t \geq 0. \quad (4.5)$$

Esta é a definição mais simples para o conceito *IFR*, onde se verifica apenas a evolução da taxa de Risco de Falha no tempo.

- De acordo com Sengupta *et alii* [33] uma função é *IFR* se:

IFR4	$R(t+1)/R(t)$ é decrescente para todo $t \geq 0$,	(4.6)
-------------	--	-------

ou seja,

$$R(t+1)/R(t) > R(t+2)/R(t+1) \text{ para todos os valores de } t \geq 0. \quad (4.7)$$

Se o teste é satisfeito para todo t , a função é *IFR* em todo intervalo. Caso contrário, identifica-se para que valores de t a função é *IFR*.

A definição acima é similar à definição *IFR1*, porém compara apenas taxas de Confiabilidade de períodos imediatamente subsequentes.

Com relação às definições apresentadas acima pode-se tecer os seguintes comentários:

- *IFR1* é bastante rigorosa porque não permite a igualdade no teste de condição e possui duas variáveis percorrendo todo o intervalo de análise;
- *IFR2* também é bastante rigorosa e exige maior esforço computacional porque possui três variáveis de análise e, além disso, necessita calcular valores de uma reta auxiliar que serve de comparação com os dados disponíveis. Esta definição permite a igualdade no teste de condição, ou seja, no caso limite, uma função linear é uma função convexa, satisfazendo a condição.
- As definições *IFR3* e *IFR4* correspondem aos testes mais rápidos, pois só possuem uma única variável temporal. O teste *IFR3* compara a taxa de Risco de Falha de

períodos subseqüentes e permite que estas taxas de Risco de Falha sejam constantes ou crescentes. O teste *IFR4* utiliza a função Confiabilidade como parâmetro de análise e o teste de condição é satisfeito somente na situação estritamente crescente.

- *IFR1* e *IFR4* são comparações entre taxas de Confiabilidade e a variável tempo não aparece explicitamente nas expressões, portanto, não podem ser utilizadas na análise de um único equipamento, porque neste tipo de análise os valores da função Confiabilidade não são calculados em intervalos regulares de tempo, mas sim, em instantes específicos de ocorrência da falha, pois os *TTF's* são geralmente grandes e distintos entre si, conforme mencionado no Capítulo 3.
- Se a condição *IFR1* for cumprida, a condição *IFR4* também será cumprida.

4.2.2 IFRA - Taxa de Falha Crescente na Média

• Ebrahimi [30] e Sengupta *et alii* [33] estabelecem que uma função possui taxa de Risco de Falha crescente na média, ou seja, é *IFRA* se:

<i>IFRA1</i> e <i>IFRA4</i>	$(R(t))^{1/t}$ é decrescente em t para todo $t > 0$,	(4.8)
--	---	-------

ou seja,

$$(R(t))^{1/t} > (R(t+1))^{1/(t+1)} \text{ para todo } t > 0. \tag{4.9}$$

Neste teste há apenas uma variável temporal para verificação da condição *IFRA*.

- Segundo Rojo [31], uma função é *IFRA* se:

<i>IFRA2</i>	$-\ln(R(t))/t$ é não-decrescente para $t > 0$.	(4.10)
---------------------	---	--------

Isto implica em dizer que:

$$-\ln(R(t))/t \leq -\ln(R(t+1))/(t+1) \text{ para todos os valores de } t > 0. \tag{4.11}$$

Se o teste é satisfeito para todo t , a função é *IFRA* em todo intervalo. Caso contrário, identifica-se para que intervalos de tempo o teste de condição é cumprido.

Como a variável tempo aparece explicitamente nas expressões *IFRA1*, *IFRA2* e *IFRA4*, estes testes podem ser utilizados para estudo de geradores, onde não se dispõe de taxas de Risco de Falha e valores de Confiabilidade em intervalos regulares de tempo.

Com relação às definições apresentadas acima pode-se afirmar que *IFRA2* é menos rigorosa que *IFRA1* e *IFRA4* porque permite a igualdade no teste de condição.

4.2.3 *NBU* - Novo Melhor que Usado

Todas as referências bibliográficas selecionadas apresentam a mesma expressão matemática para definição deste conceito, com exceção da referência [32] que está com o sinal ao contrário, erroneamente. Uma distribuição é *NBU* [30-33] se:

<i>NBU1-4</i>	$R(x + y) \leq R(x) \cdot R(y) \quad \forall x, y \geq 0,$	<i>(4.12)</i>
----------------------	--	---------------

portanto, existem duas variáveis temporais que percorrem o intervalo (x e y).

Para $x = 1$ o teste verifica se $R(1 + y) \leq R(1) \cdot R(y)$ com y variando até que a soma ($x + y$) atinja o último intervalo de tempo do histórico. Se o teste for satisfeito para todo y , então, a função é *NBU* para $x = 1$. Incrementa-se o valor de x e repete-se o teste. Se a função for *NBU* para todo x , então, a função é *NBU* em todo o intervalo. Caso contrário, verifica-se para que valores de x a condição é satisfeita.

4.2.4 *NBUE* - Novo Melhor que Usado sob o ponto de vista da Média

- Segundo Ebrahimi [30] e Sengupta *et alii* [33], uma função é *NBUE* se:

$$\int_t^\infty R(x) \cdot dx \leq \mu \cdot R(t) \text{ para todo } t \geq 0, \tag{4.13}$$

onde:

$$\mu = \int_0^\infty R(t) dt. \tag{4.14}$$

Como estão sendo utilizadas funções discretizadas no tempo, pode-se substituir a expressão acima, sem simplificação alguma por:

NBUE1 e NBUE4	$\sum_t^{\infty} R(t) \leq \mu \cdot R(t),$	(4.15)
--------------------------	---	--------

onde:

$$\mu = \sum_0^{\infty} R(t). \tag{4.16}$$

Se a condição acima for satisfeita para todo t , a função é *NBUE1* e *NBUE4* em todo o intervalo sob análise. Senão, determina-se para que intervalos de tempo a condição é satisfeita.

- Em Bagai & Jain [32] e Lim & Park [34], uma função é *NBUE* se:

NBUE3 e NBUE5	$e_x(x) \leq e_x(0) \quad \forall x \geq 0;$	(4.17)
--------------------------	--	--------

onde:

$$e_x(x) = \frac{\int R_x(u) du}{R_x(x)} \equiv \text{vida residual média em } x. \tag{4.18}$$

Pode-se substituir a expressão da vida residual média em x por:

$$e_x(x) = \frac{\sum R_x(u) du}{R_x(x)}. \tag{4.19}$$

Se o teste é satisfeito para todo x , a função é *NBUE3* e *NBUE5* em todo intervalo analisado. Caso contrário, determina-se para quais intervalos de tempo há tendência de envelhecimento.

As definições apresentadas acima conduzem para os mesmos resultados em todos os testes efetuados com os dados disponíveis, ou seja, as definições: *NBUE1*, *NBUE3*, *NBUE4* e *NBUE5* identificaram os mesmos intervalos de tempo com características de envelhecimento.

4.2.5 NBUFR - Novo Melhor que Usado sob o ponto de vista da Taxa de Risco de Falha

Apenas Bagai & Jain [32] apresentam uma expressão matemática para o conceito NBUFR. Será NBUFR se:

NBUFR3	$\lambda(t) \geq \lambda(0)$ para todo $t \geq 0$.	(4.20)
---------------	---	--------

Este é um teste muito simples. O teste verifica para quais intervalos de tempo a taxa de Risco é maior ou igual à taxa de Risco de Falha inicial, caracterizando assim a condição NBUFR.

4.2.6 DMRL - Vida Residual Média Decrescente

- Para Bagai & Jain [32], uma função é DMRL se a vida residual média for decrescente ou constante em todo o histórico, ou seja:

DMRL3	$e_x(x)$ é não-crescente em x para todo $x \geq 0$,	(4.21)
--------------	--	--------

onde:

$$e_x(x) = \frac{\int_0^\infty R_x(u) du}{R_x(x)} \equiv \text{vida residual média de } x. \tag{4.22}$$

Novamente pode-se substituir a expressão anterior por:

$$e_x(x) = \frac{\sum_0^\infty R_x(x)}{R_x(x)}. \tag{4.23}$$

Isto implica em dizer que se $\frac{\sum_0^\infty R_x(x)}{R_x(x)} \geq \frac{\sum_0^\infty R_x(x)}{R_x(x+1)}$ para todos os valores de x no intervalo de análise, a função é DMRL em todo intervalo. Caso contrário, identifica-se para quais intervalos de tempo a condição é satisfeita.

A Vida Residual Média representa o tempo médio de vida remanescente dos equipamentos que ainda estão em operação num instante de tempo t . A Vida Residual Média indica quão longa é a expectativa média de operação de um equipamento sob análise. Para equipamentos não-reparáveis a Vida Residual Média exprime o tempo esperado em operação dado que os mesmos tenham sobrevivido até t .

- Para Lim & Park [34], uma função é *DMRL* se a vida residual média em t for menor ou igual à vida residual média em s , para todo $t \geq s \geq 0$, ou seja:

<i>DMRL5</i>	$e_s(s) \geq e_T(t)$ para todo $t \geq s \geq 0$	<i>(4.24)</i>
---------------------	--	---------------

Faz-se $s = 1$ e varia-se t em todo o intervalo a partir de s . Se o teste é satisfeito para todo t maior ou igual a s , a função é *DMRL* para $s = 1$. Incrementa-se o valor de s e repete-se o procedimento. Se a função é *DMRL* para todos os valores de s , a função é *DMRL* em todo intervalo analisado. Caso contrário é possível identificar para que valores de s a condição é satisfeita.

Pode-se concluir que *DMRL5* é mais rigorosa que *DMRL3* porque compara o valor da Vida Residual Média de um determinado ponto com todos os valores da Vida Residual Média de pontos posteriores. Já *DMRL3* compara apenas os valores da Vida Residual Média de intervalos de tempo imediatamente subseqüentes. Se a condição *DMRL5* for satisfeita a condição *DMRL3* também será satisfeita.

4.3 QUADRO-RESUMO COM AS DEFINIÇÕES DAS FUNÇÕES-TESTE

Abaixo são apresentadas as condições para verificação de envelhecimento para as funções-teste abordadas neste capítulo.

FUNÇÃO-TESTE	DEFINIÇÃO
IFR1	$\frac{R(t+x)}{R(t)}$ é decrescente em t para todo $t, x \geq 0$.
IFR2	$-\ln(R(t))$ \equiv taxa de Risco de Falha Acumulada é convexa
IFR3	$\lambda(t)$ \equiv taxa de Risco de Falha é não-decrescente em t para todo $t \geq 0$
IFR4	$\frac{R(t+1)}{R(t)}$ é decrescente para todo $t \geq 0$
IFRA1 e IFRA3	$(R(t))^{1/t}$ é decrescente em t para todo $t > 0$
IFRA2	$\frac{-\ln(R(t))}{t}$ é não-decrescente para $t > 0$
NBU1-4	$R(x+y) \leq R(x) \cdot R(y) \quad \forall x, y \geq 0$
NBUE1 e NBUE4	$\sum_t^{\infty} R(t) \leq \mu \cdot R(t)$
NBUE3 e NBUE5	$e_x(x) \leq e_x(0) \quad \forall x \geq 0$ onde: $e_x(x) \equiv$ Vida Residual Média = $e_x(x) = \frac{\sum_x^{\infty} R_x(u) du}{R_x(x)}$
NBUFR3	$\lambda(t) \geq \lambda(0)$ para todo $t \geq 0$
DMRL3	$e_x(x)$ é não-crescente em x para todo $x \geq 0$,
DMRL5	$e_s(s) \geq e_t(t)$ para todo $t \geq s \geq 0$

4.4 ALGORITMO TCE

Biblioteca Universitária
UFSC

Os conceitos e definições de funções-teste com características de envelhecimento, abordados anteriormente, foram implementados sob a forma de algoritmo e vários testes foram realizados, tanto com dados hipotéticos quanto com dados reais, com o objetivo de se determinar os intervalos de tempo nos quais o equipamento ou conjunto de equipamentos está apresentando envelhecimento (desgaste).

O algoritmo foi implementado em linguagem de programação FORTRAN.

O tempo computacional gasto no processamento varia de acordo com o histórico de falhas sob análise, mas não é fator relevante no processo.

O fluxograma da Figura 4.2 ilustra a estrutura do algoritmo. O algoritmo é simples e pode ser dividido em quatro partes básicas, a saber:

- entrada e leitura de dados;
- suavização dos dados;
- cálculo da função Risco de Falha e função Confiabilidade;
- identificação dos intervalos de tempo que apresentam envelhecimento de acordo com cada uma das funções-teste.

A seguir será apresentada uma breve descrição de cada uma das partes.

4.4.1 Entrada e Leitura de Dados

O algoritmo desenvolvido é bastante versátil, podendo ser utilizado para os seguintes tipos de dados:

- Tipo I: um lote de tamanho fixo de equipamentos não-reparáveis sob teste em laboratório. As variáveis de entrada (parâmetros conhecidos) para este tipo de análise são: o número de equipamentos falhados observados em intervalos iguais de tempo e o tamanho do lote. Pode-se também utilizar, ao invés do número de equipamentos falhados, as taxas de falha em cada intervalo de tempo. A observação dos equipamentos falhados deve ser realizada até que o último equipamento sofra falha $N_s(t) = 0$.

- TIPO II: um conjunto de equipamentos iguais em operação. Os dados de entrada são as taxas de falha para cada intervalo de tempo do conjunto de equipamentos. No capítulo seguinte será apresentado um estudo realizado com transformadores de distribuição de uma empresa de energia elétrica.

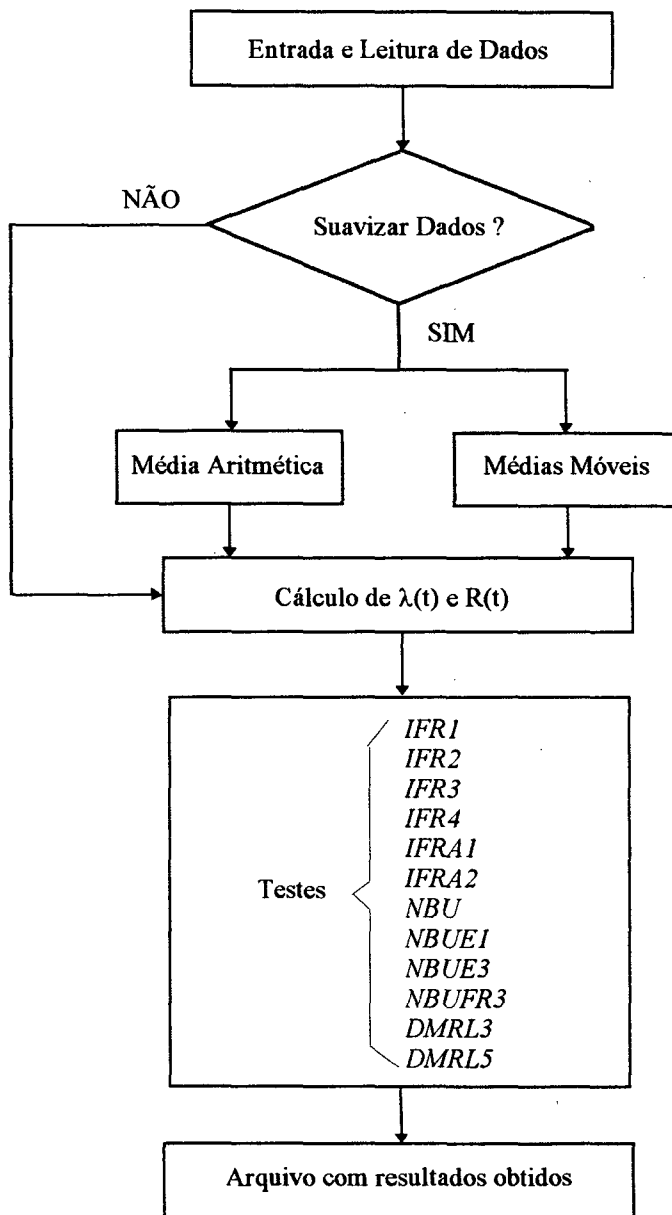


Figura 4.2 - Fluxograma dos Testes para Caracterização do Envelhecimento

- Tipo III: um único equipamento. Neste caso, os dados conhecidos são os tempos até ocorrência de falha (*TTF's*) do respectivo equipamento. No capítulo seguinte será apresentado um caso estudo de um gerador termoelétrico da usina de Santa Cruz.
- Tipo IV: um equipamento ou conjunto de equipamentos cujo comportamento pode ser aproximado por uma distribuição exponencial cuja taxa de falha é constante ou uma distribuição Weibull cuja taxa de Risco de Falha é crescente, decrescente ou constante, dependendo do parâmetro forma ser maior, menor ou igual a 1 respectivamente. Esta possibilidade foi implementada para comprovação da metodologia dos testes já que as distribuições acima citadas possuem comportamentos conhecidos. No caso da função exponencial o parâmetro de entrada é a taxa de falha (λ) e no caso da função Weibull os dados de entrada são α e β , parâmetros escala e forma respectivamente.

Cabe salientar que os dados “ideais” deveriam ser coletados considerando uma quantidade de equipamentos fixa, sob as mesmas condições físicas, construtivas e operativas e com tempos de operação equivalentes.

Infelizmente as empresas de energia elétrica não dispõem de dados com estas características. Ainda assim, como será mostrado no capítulo seguinte, os resultados obtidos com o conjunto de transformadores é apenas um indicativo do comportamento do lote de equipamentos, podendo auxiliar na determinação da condição de envelhecimento dos mesmos.

4.4.2 Suavização dos Dados

Os dados coletados para a realização dos testes apresentam componentes relacionados a: tendência, sazonalidade, variações cíclicas e aleatórias. Como o intuito deste trabalho é a verificação do envelhecimento ao longo do tempo, está-se interessado sobretudo na componente referente à tendência. Para tanto é possível utilizar os métodos de média aritmética e médias móveis para a suavização destas variações, de modo a diminuir (ou retirar totalmente) a influência dos demais fatores.

- Média aritmética: suavização por médias simples. Dado um conjunto de valores

$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n$ define-se a média aritmética de ordem k :

$$\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k}{k}, \frac{\lambda_{k+1} + \lambda_{k+2} + \dots + \lambda_{2k}}{k}, \dots, \frac{\lambda_{n+1-k} + \lambda_{n+2-k} + \dots + \lambda_n}{k}. \quad (4.25)$$

Quanto maior o valor de k , maior é o efeito de suavização das variações.

- Médias Móveis: suavização por sucessivas médias. Dado um conjunto de valores

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ define-se a média móvel de ordem k :

$$\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k}{k}, \frac{\lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_{k+1}}{k}, \dots, \frac{\lambda_{n+1-k} + \lambda_{n+2-k} + \dots + \lambda_n}{k}. \quad (4.26)$$

Também neste caso, quanto maior o valor de k , maior é o efeito de suavização das variações.

O usuário após a execução do módulo de entrada e leitura de dados tem a opção, via tela, de suavizar ou não os dados e de que forma (médias móveis ou média aritmética). Além disso, o usuário define a quantidade de meses que deseja agrupar (valor k).

4.4.3 Cálculo da Função Risco de Falha e Função Confiabilidade

O cálculo da função Risco de Falha e da função Confiabilidade é efetuado de acordo com o exposto no Capítulo 3 e servem de base para a realização dos testes para determinação dos intervalos de envelhecimento.

4.4.4 Determinação dos Intervalos de Tempo que Apresentam Envelhecimento de acordo com cada uma das Funções-Teste

É gerado pelo programa um arquivo onde são apresentados os resultados dos testes para todas as funções-teste implementadas. Além de apresentar os intervalos de tempo nos quais o equipamento sofreu degradação, o programa fornece o percentual de tempo com envelhecimento em relação ao tempo total analisado.

4.5 CASOS-TESTE PARA COMPROVAÇÃO DOS CONCEITOS E DEFINIÇÕES MATEMÁTICAS

Com o intuito de apresentar a potencialidade da metodologia para caracterização do envelhecimento descritos anteriormente e, obter a comprovação dos conceitos e definições matemáticas, serão utilizadas duas distribuições de probabilidade muito conhecidas e abordadas

na literatura. São elas: distribuição exponencial e distribuição Weibull. No próximo capítulo, os testes serão aplicados para dados de laboratório e sistemas reais.

4.5.1 Caso-Teste para Distribuição Exponencial

A distribuição de probabilidade Exponencial foi escolhida porque a mesma é muito utilizada na modelagem da Confiabilidade de equipamentos e sistemas e também pelo fato de que a distribuição exponencial é a fronteira entre as distribuições com características de envelhecimento positivo e negativo por apresentar taxa de falha constante ao longo do tempo.

Para este estudo, adotou-se o valor da taxa de falha igual a 1 e um período de análise de dez unidades de tempo.

Os valores obtidos para a função Confiabilidade são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Tempo, taxa de falha e Confiabilidade - Distribuição Exponencial

Tempo	Taxa de Falha	Confiabilidade
0	1,0	1.000000
1	1,0	0,367879
2	1,0	0,135335
3	1,0	0,049787
4	1,0	0,018316
5	1,0	0,006738
6	1,0	0,002479
7	1,0	0,000912
8	1,0	0,000335
9	1,0	0,000123

Os gráficos para função Confiabilidade e função Taxa de Falha são mostrados nas figuras 4.3 e 4.4 respectivamente.

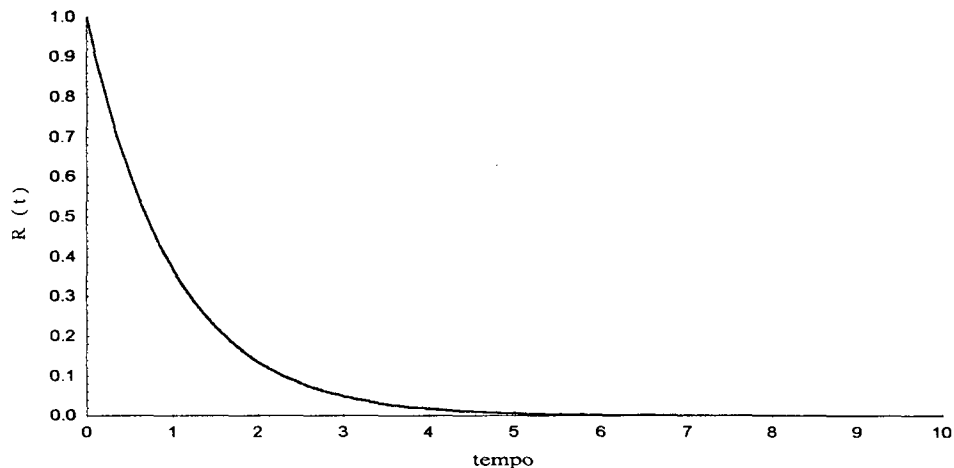


Figura 4.3 - Função Confiabilidade de uma distribuição Exponencial com $\lambda = 1$

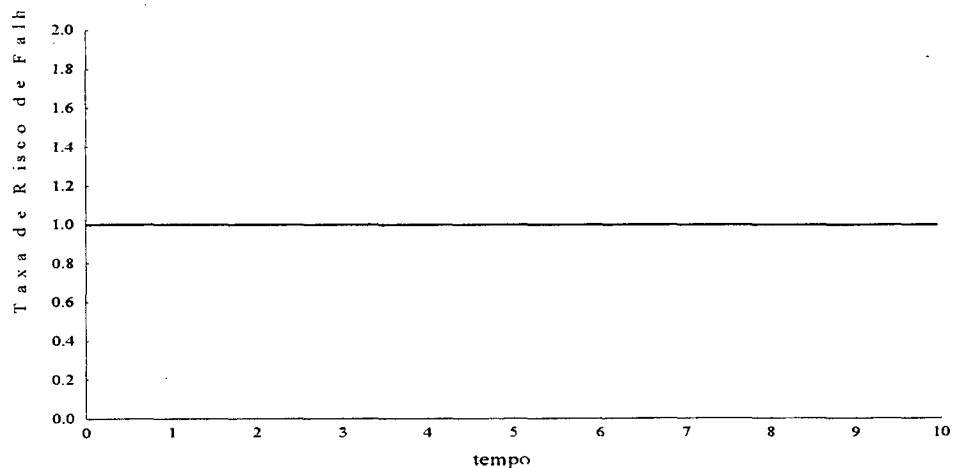


Figura 4.4 - Função Taxa de Falha de uma distribuição Exponencial com $\lambda = 1$

Os resultados dos testes baseado nos valores da Tabela 4.1 são apresentados na Tabela 4.2, onde Não significa que a condição não foi satisfeita e Sim significa que a distribuição exponencial atende à condição da função-teste.

Tabela 4.2 - Resultados do TCE para a Distribuição Exponencial

	<i>IFR</i>	<i>IFRA</i>	<i>NBU</i>	<i>NBUE</i>	<i>NBUFR</i>	<i>DMRL</i>
Definição 1	Não	Não	Sim	Sim	*	*
Definição 2	Sim	Sim	Sim	*	*	*
Definição 3	Sim	*	Sim	Sim	Sim	Sim
Definição 4	Não	Não	Sim	Sim	*	*
Definição 5	*	*	*	Sim	*	Sim

* A distribuição não é abordada na respectiva bibliografia.

Observa-se na tabela acima que algumas funções-teste foram satisfeitas em todas as definições. Pela peculiaridade da distribuição exponencial (ser fronteira entre as distribuições com taxas de Risco crescentes e decrescentes) pode-se tirar as seguintes conclusões:

- algumas definições são mais severas que outras pois não permitem a igualdade no teste de condição. Como exemplo tem-se o conceito *IFR*. Nas definições *IFR1* e *IFR4* a condição não foi satisfeita porque a mesma exige que as taxas de Confiabilidade devem ser estritamente decrescentes para que uma distribuição seja *IFR1* e *IFR4*; no caso da distribuição Exponencial as taxas de Confiabilidade são constantes.

$$IFR1: \frac{R(t+x)}{R(t)} > \frac{R(t+x+1)}{R(t+1)} \dots \text{para todo } t, x \geq 0;$$

$$IFR4: \frac{R(t+1)}{R(t)} > \frac{R(t+2)}{R(t+1)} \dots \text{para todo } t \geq 0.$$

Por outro lado, as definições *IFR2* e *IFR3* são menos restritivas permitindo a igualdade, ou seja:

IFR2: É *IFR* se a função taxa de Risco Acumulada é convexa. No caso da distribuição exponencial a taxa de Risco Acumulada é linear (caso limite da condição de convexidade).

$$IFR3: \lambda(t) \leq \lambda(t+1) \dots \text{para todo } t \geq 0.$$

- Para o caso da distribuição Exponencial, as funções-teste fornecem o mesmo resultado (Sim ou Não) para todos os intervalos de tempo devido à função Risco de Falha e função

Confiabilidade terem o mesmo comportamento ao longo do tempo. Para uma distribuição cuja função Risco de Falha seja modelada pela curva da banheira, por exemplo, não se pode dizer o mesmo, visto que a condição das funções-teste só serão cumpridas a partir do momento que a taxa de Risco de Falha torna-se crescente. A função-teste *IDMRL* [34] modela esta situação onde primeiramente a função Vida Residual Média é crescente e, a partir do momento em que a taxa de Risco de Falha torna-se crescente, a função Vida Residual Média é decrescente.

4.5.2 Caso-Teste para Distribuição Weibull

A distribuição Weibull foi escolhida porque além de ser muito utilizada na modelagem da Confiabilidade, dependendo do parâmetro forma (β), a taxa de Risco de Falha pode ser crescente ou decrescente, condição útil para verificação do TCE. Observa-se que se $\beta < 1$ a função Risco é decrescente e se $\beta > 1$ a função Risco é crescente.

A) Primeiramente serão apresentados os resultados para uma distribuição Weibull com parâmetro forma igual a 1,2 e parâmetro escala igual a 1.

Tabela 4.3 - Taxa de Risco e Confiabilidade - Distribuição Weibull $\alpha = 1$ e $\beta = 1,2$

Tempo	Taxa de Risco	Confiabilidade
0	0	1,000000
1	1,200000	0,367879
2	1,378438	0,100520
3	1,494877	0,023821
4	1,583409	0,005102
5	1,655676	0,001009
6	1,717163	0,000187
7	1,770928	0,000033
8	1,818860	0,000005
9	--	0,000001

Os gráficos para função Confiabilidade e função Taxa de Risco de Falha são mostrados nas figuras 4.5 e 4.6 respectivamente.

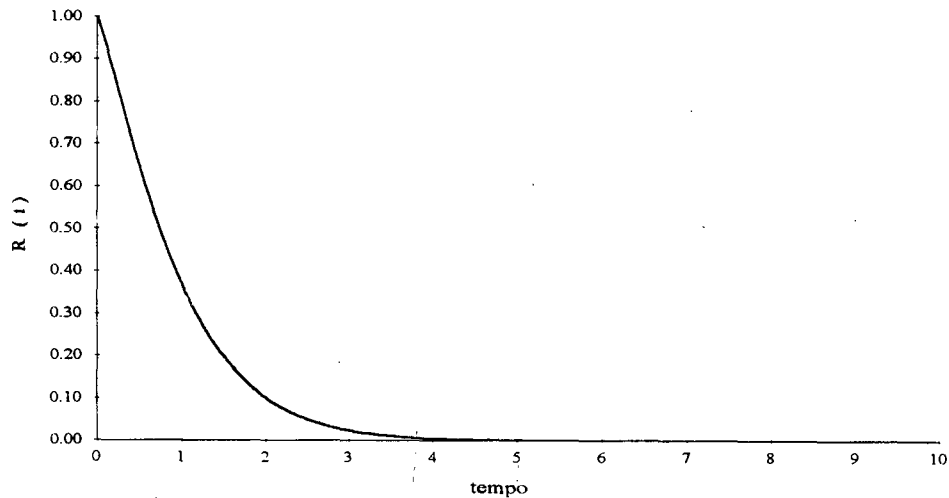


Figura 4.5 - Função Confiabilidade de uma distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 1,2$

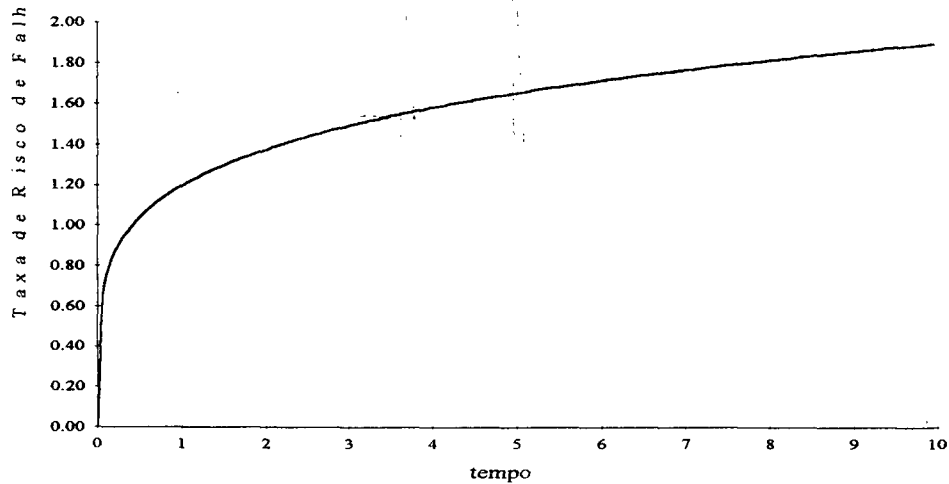


Figura 4.6 - Função Taxa de Risco de uma distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 1,2$

É apresentado na Figura 4.7 o gráfico da função Vida Residual Média. Pode-se verificar que apesar do gráfico ter um traçado todo particular, é sempre decrescente ao longo do tempo. A função Vida Residual Média é apresentada porque a mesma serve de parâmetro para os testes das funções *NBUE* e *DMRL*.

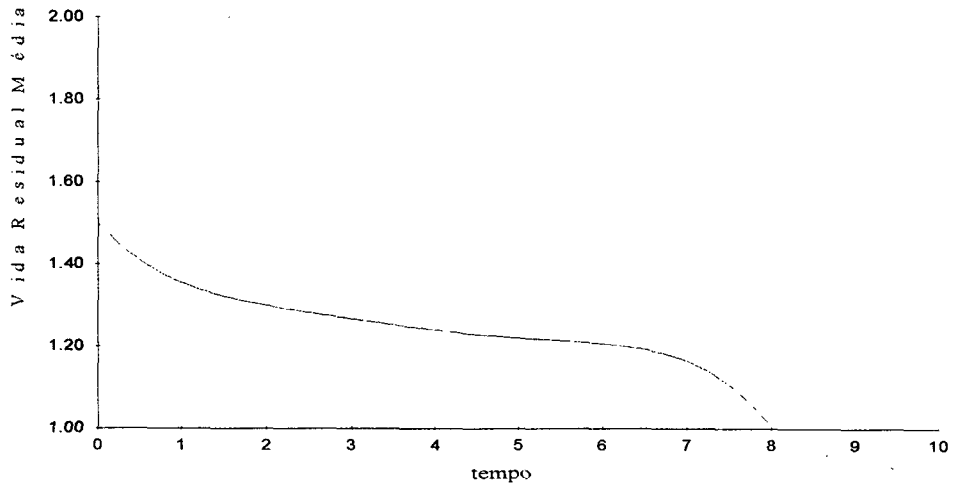


Figura 4.7 - Função Vida Residual Média de uma distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 1,2$

Tabela 4.4 - Resultados do TCE para a Distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 1,2$

	<i>IFR</i>	<i>IFRA</i>	<i>NBU</i>	<i>NBUE</i>	<i>NBUFR</i>	<i>DMRL</i>
Definição 1	Sim	Sim	Sim	Sim	*	*
Definição 2	Sim	Sim	Sim	*	*	*
Definição 3	Sim	*	Sim	Sim	Sim	Sim
Definição 4	Sim	Sim	Sim	Sim	*	*
Definição 5	*	*	*	Sim	*	Sim

* A distribuição não é abordada na respectiva bibliografia.

Como era de se esperar, constata-se que todos os testes são coerentes entre si, confirmando a característica de envelhecimento em um equipamento ou conjunto de equipamentos modelado por uma distribuição Weibull com parâmetro forma maior que um, já que as taxas de Risco são crescentes ao longo do tempo.

B) Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados para uma distribuição Weibull com parâmetro forma igual a 0,8 e parâmetro escala igual a um.

Tabela 4.5 - Taxa de Risco e Confiabilidade - Distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 0,8$

Tempo	Taxa de Risco	Confiabilidade
0	∞	1,000000
1	0,800000	0,367879
2	0,696440	0,175327
3	0,642193	0,089975
4	0,606287	0,048246
5	0,579824	0,026678
6	0,559062	0,015101
7	0,542089	0,008710
8	0,527803	0,005102
9	--	0,003029

Os gráficos para função Confiabilidade, função Taxa de Risco e função Vida Residual Média são apresentados nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10 respectivamente.

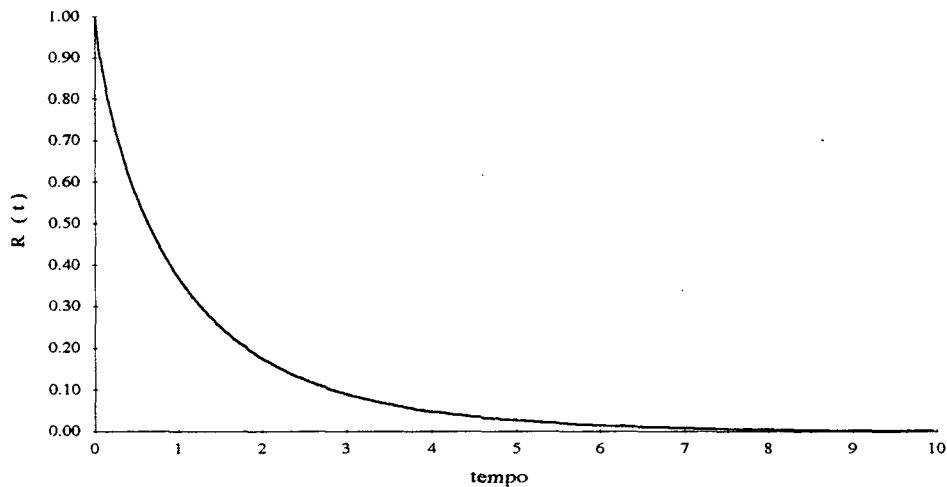


Figura 4.8 - Função Confiabilidade de uma distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 0,8$

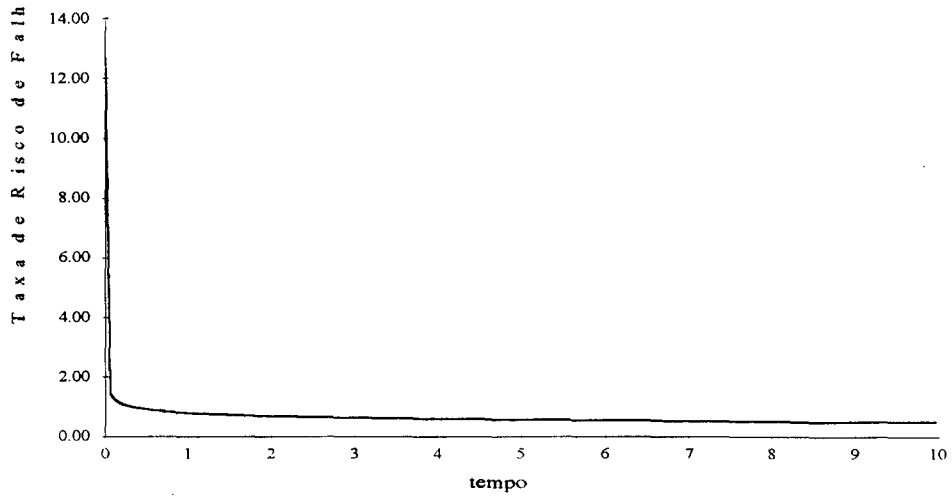


Figura 4.9 - Função Taxa de Risco de uma distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 0,8$

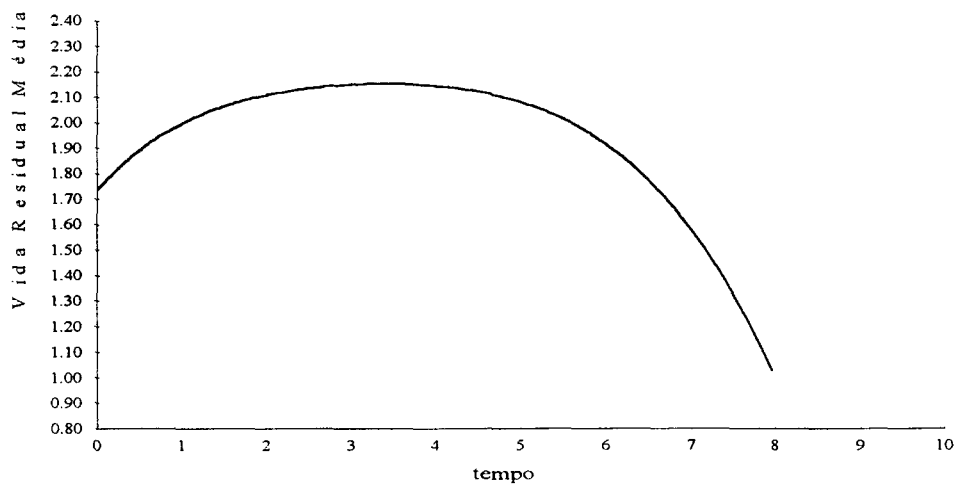


Figura 4.10 - Função Vida Residual Média de uma distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 0,8$

Na Tabela 4.6 a indicação genérica $t = i$ e j se refere aos intervalos de tempo nos quais a condição foi satisfeita.

Tabela 4.6 - Resultados do TCE para a Distribuição Weibull com $\alpha = 1$ e $\beta = 0,8$

	<i>IFR</i>	<i>IFRA</i>	<i>NBU</i>	<i>NBUE</i>	<i>NBUFR</i>	<i>DMRL</i>
Definição 1	Não	Não	$t = 0$	$t = 7$ e 8	*	*
Definição 2	Não	Não	$t = 0$	*	*	*
Definição 3	Não	*	$t = 0$	$t = 7$ e 8	Não	$t = 3$ em diante
Definição 4	Não	Não	$t = 0$	$t = 7$ e 8	*	*
Definição 5	*	*	*	$t = 7$ e 8	*	$t = 3$ em diante

* A distribuição não é abordada na respectiva bibliografia.

Baseado nos resultados apresentados acima pode-se concluir que:

- a distribuição Weibull com parâmetro forma igual a 0,8 (caracterizando uma distribuição com taxa de Risco decrescente) não satisfaz as condições *IFR*, *IFRA* e *NBUFR* para nenhum intervalo de tempo;
- a condição *NBU* sempre será satisfeita para $t = 0$. O resultado é trivial para este instante de tempo;
- a condição *NBUE* é cumprida para $t = 7$ e $t = 8$ porque nestes intervalos de tempo a vida residual média é menor que a vida residual média no instante $t = 0$; observar o gráfico da Figura 4.10.
- a condição *DMRL* é satisfeita para $t = 3$ em diante porque a partir deste intervalo de tempo a vida residual média torna-se decrescente. Pode-se observar na Figura 4.10 que o ponto $t = 3$ é o ponto de inflexão da curva.

4.6 UTILIZAÇÃO DE CARTAS DE CONTROLE

Serão apresentados a seguir algumas aplicações e a metodologia referentes a cartas de controle de medidas individuais que podem servir como ferramenta de apoio ao TCE na análise de dados de laboratório e dados de campo. As cartas de controle podem detectar pontos atípicos que

podem não expressar o real comportamento de um equipamento ou sistema. Por este motivo deve-se analisar se esses pontos atípicos devem ou não serem levados em consideração na análise de envelhecimento. Além disso, através das Cartas de Controle, pode-se verificar uma mudança de comportamento do equipamento ao longo do tempo (tendência).

As cartas de controle podem ser utilizadas para as seguintes finalidades [2]:

- servem para verificar tendências gerais, como o desgaste de equipamentos quando a taxa de Risco de Falha cresce no tempo;
- flutuações de magnitude não-usual;
- agrupamento de medidas anormais em certos pontos;
- relações entre medidas individuais e alguns padrões previamente estabelecidos;
- instabilidade do conjunto de dados verificando a ocorrência de pontos atípicos no histórico analisado;

O processo para obtenção da carta de controle é como segue:

1. Calcular a diferença entre as medidas individuais coletadas em campo, efetuando a diferença entre a primeira e a segunda medida e assim sucessivamente, até obter a diferença entre o último e o penúltimo valor. As diferenças devem ser calculadas sem considerar o sinal.
2. Calcular a média das medidas individuais. Este será o centro da carta de controle.
3. Calcular a média das diferenças calculadas no item 1. Lembrar que a quantidade de diferenças é igual ao total de medidas individuais menos um.
4. Multiplicar a média das diferenças por 2,66 para obter os limites de controle. Somar e diminuir o valor obtido à média das medidas individuais conforme equação abaixo:

$$\text{LIMITE DE CONTROLE} = \bar{X} \pm 2,66 \cdot \bar{D} \equiv \bar{X} \pm 3 \cdot \sigma$$

onde:

- \bar{X} - valor médio das medidas individuais;
- \bar{D} - média das diferenças das medidas individuais;
- σ - desvio padrão.

5. Dividir as metades superior e inferior da carta de controle em três partes iguais.
6. Traçar a carta de controle com as medidas individuais unindo os pontos por segmentos de retas, traçar uma linha reta para a média das medidas individuais e duas retas pontilhadas para os limites de controle.
7. Marcar X's sobre a carta de controle, se necessário, de acordo com os testes e critérios abordados a seguir.

I - Teste de Instabilidade: neste teste devem ser analisadas as metade superior e inferior da carta de controle separadamente.

Critério I: um ponto fora da curva (fora de 3σ);

Critério II: dois pontos de três consecutivos fora de 2σ ;

Critério III: quatro pontos de cinco consecutivos fora de 1σ ;

Critério IV: oito pontos sucessivos de um mesmo lado.

II - Teste de Estratificação: quinze pontos consecutivos entre a zona C (1σ) e o centro (média dos valores individuais) para ambos os lados. Se acontecer significa estratificação de amostras de distribuições diferentes. Este teste não é muito adequado porque não estamos analisando amostras, mas sim conjunto de equipamentos.

III - Tendência: é definida como um movimento para cima ou para baixo; X's de um lado da carta seguidos por X's do outro lado, ou uma série longa de pontos sem mudança de direção.

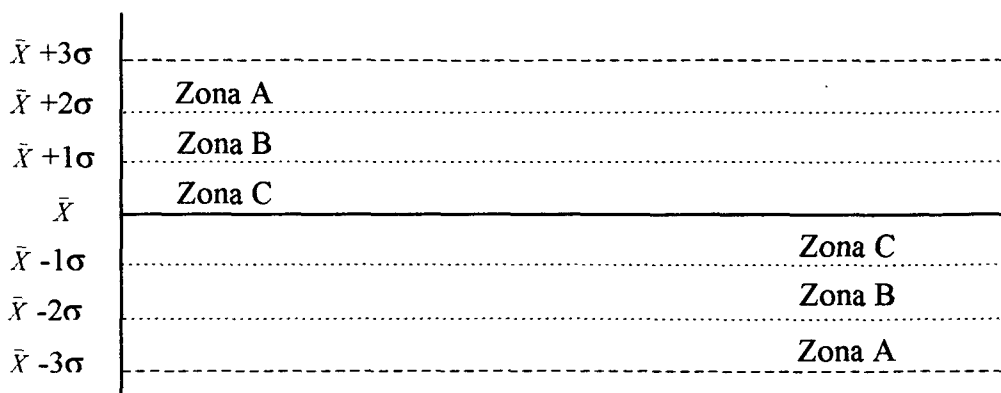


Figura 4.11 - Esquemático de uma Carta de Controle com média, limites de controle e zonas

No capítulo seguinte será apresentado um exemplo prático aplicando-se os conceitos abordados acima.

4.7 CONCLUSÕES

A metodologia dos Testes para a Caracterização do Envelhecimento (TCE) foi baseada nos conceitos e definições matemáticas das funções-teste: *IFR*, *IFRA*, *NBU*, *NBUE*, *NBUFR*, *DMRL* obtidos em [30-34].

Esta metodologia permite identificar em quais intervalos de tempo um equipamento ou conjunto de equipamentos está apresentando envelhecimento (degradação).

O algoritmo é simples e versátil possibilitando a análise de um lote fixo de equipamentos não-reparáveis, um conjunto de equipamentos em operação ou um único equipamento. Além disso, o algoritmo permite que os dados coletados sejam analisados mensalmente, trimestralmente, anualmente, etc, utilizando-se os métodos de suavização apresentados.

A metodologia foi aplicada a distribuições de probabilidade com Taxas de Risco “sabidamente” constante, crescente e decrescente com o objetivo de comprovar a potencialidade e exatidão da ferramenta apresentada.

Os resultados obtidos foram promissores e no próximo capítulo a metodologia dos testes será aplicada a casos reais.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA TCE

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, a metodologia de Testes para Caracterização do Envelhecimento, baseada na aplicação de funções-teste, as quais foram descritas no Capítulo 4: *IFR*, *IFRA*, *NBU*, *NBUE*, *NBUFR*, *DMRL*, é aplicada a um conjunto de dados da literatura [10] e a sistemas reais buscando identificar os intervalos de tempo nos quais os equipamentos analisados apresentam envelhecimento.

São apresentados os resultados obtidos para os três tipos de análise propostos, sendo que para a análise tipo II (conjunto de transformadores de distribuição) e a análise tipo III (um gerador de uma usina termoeletrica) os resultados são apresentados considerando os dados originais e suavizados por média aritmética e por médias móveis, mostrando a versatilidade da metodologia.

Um exemplo de utilização de cartas de controle também é apresentado como sugestão de ferramenta de apoio à metodologia TCE.

5.2 CASO-TESTE I: LOTE FIXO DE EQUIPAMENTOS NÃO-REPARÁVEIS

Esta aplicação se enquadra na análise do tipo I anteriormente citada nos Capítulos 3 e 4. Os dados foram coletados em Billinton [10] com o objetivo de ilustrar o procedimento para obtenção das funções densidade de probabilidade, distribuição acumulada de falha, Confiabilidade e Risco de Falha; e se refere a um equipamento hipotético em teste de vida em laboratório.

O lote contém 1000 equipamentos idênticos e são registrados o número de equipamentos falhados ($N_f(t)$) a cada intervalo de tempo (Δt) fixo de 100 horas.

Conforme apresentado a seguir, através de gráficos e comentários, este conjunto de equipamentos hipotéticos tem um comportamento que é característico de muitos equipamentos elétricos e mecânicos.

Tabela 5.1 - Parâmetros conhecidos

Intervalos de Tempo (100 horas)	Número de falhas em cada intervalo ($N_f(t)$)
0	140
1	85
2	75
3	68
4	60
5	53
6	48
7	43
8	38
9	34
10	31
11	28
12	40
13	60
14	75
15	60
16	42
17	15
18	5
--	total = 1000

De posse do número de equipamentos falhados a cada 100 horas contidos na Tabela 5.1 e utilizando a metodologia apresentada no Capítulo 3, obtém-se a Tabela 5.2 com os seguintes parâmetros: o número acumulado de falhas ($NA_f(t)$), o número de equipamentos

restantes ($N_s(t)$), a função densidade de probabilidade ($pdf(t)$), a função distribuição acumulada de falha ($Cdf(t)$), a função Confiabilidade ($R(t)$) e a função Risco de Falha ($\lambda(t)$), calculados através das equações (3.1), (3.2), (3.6), (3.3), (3.4) e (3.10) respectivamente.

Baseado na Tabela 5.2 pode-se fazer alguns comentários:

- as colunas 1 e 2 se referem aos dados coletados experimentalmente;
- as colunas 3 e 4 se referem ao número acumulado de equipamentos falhados e ao número de equipamentos restantes no início de cada intervalo. A soma dos dois parâmetros sempre equivale ao tamanho do lote;
- a função densidade de probabilidade, $pdf(t)$, é a razão entre o número de equipamentos falhados durante cada intervalo de tempo e o tamanho da amostra;

Tabela 5.2 - Parâmetros calculados utilizando a metodologia TCE

t	$N_f(t)$	$N_f A(t)$	$N_s(t)$	$pdf(t)$	$Cdf(t)$	$R(t)$	$\lambda(t)$
0	140	0	1000	0,140	0,000	1,000	0,1505
1	85	140	860	0,085	0,140	0,860	0,1040
2	75	225	775	0,075	0,225	0,775	0,1017
3	68	300	700	0,068	0,300	0,700	0,1021
4	60	368	632	0,060	0,368	0,632	0,0997
5	53	428	572	0,053	0,428	0,572	0,0972
6	48	481	519	0,048	0,481	0,519	0,0970
7	43	529	471	0,043	0,529	0,471	0,0957
8	38	572	428	0,038	0,572	0,428	0,0929
9	34	610	390	0,034	0,610	0,390	0,0912
10	31	644	356	0,031	0,644	0,356	0,0910
11	28	675	325	0,028	0,675	0,325	0,0900
12	40	703	297	0,040	0,703	0,297	0,1444
13	60	743	257	0,06	0,743	0,257	0,2643
14	75	803	197	0,075	0,803	0,197	0,4702
15	60	878	122	0,060	0,878	0,122	0,6522
16	42	938	62	0,042	0,938	0,062	1,0244
17	15	980	20	0,015	0,980	0,020	1,2000
18	5	995	5	0,005	0,995	0,005	2,0000
19		1000	0	soma=1,00	1,000	0,000	

- as funções distribuição acumulada de falha ($Cdf(t)$) e Confiabilidade ($R(t)$), colunas 6 e 7 respectivamente, são calculadas considerando o número de falhas acumuladas e o número de sobreviventes no início de cada período. A soma das duas funções é sempre igual a 1;
- a função Risco de Falha de falha ($\lambda(t)$) é calculada pela razão entre o número de equipamentos falhados em cada intervalo de tempo e a média de equipamentos restantes em cada intervalo de tempo.

Nas Figuras 5.1 a 5.4 são apresentados os gráficos das funções: densidade de probabilidade, distribuição acumulada de falha, Confiabilidade e Risco de Falha, respectivamente.

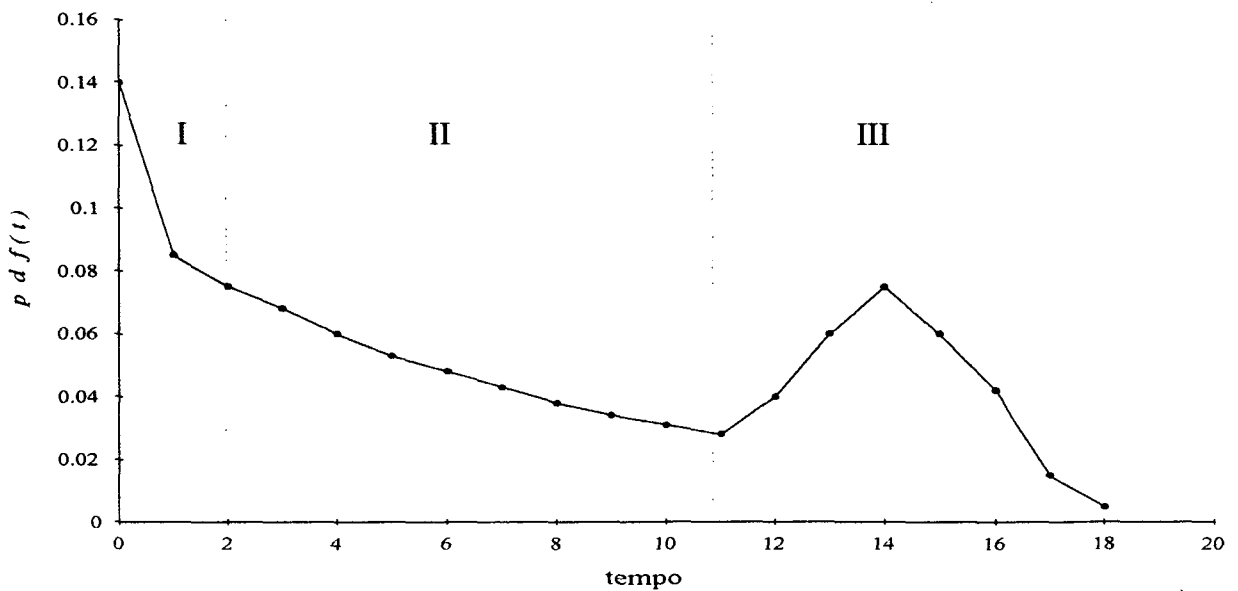


Figura 5.1 - Função densidade de probabilidade em função do tempo

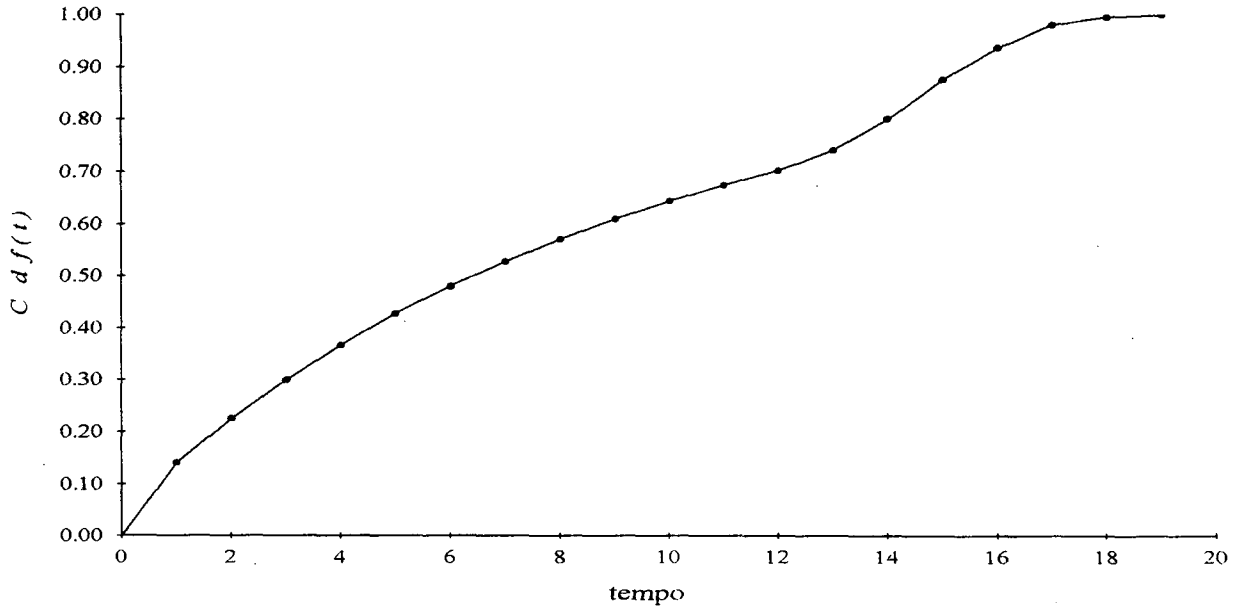


Figura 5.2 - Função distribuição de falha acumulada em função do tempo

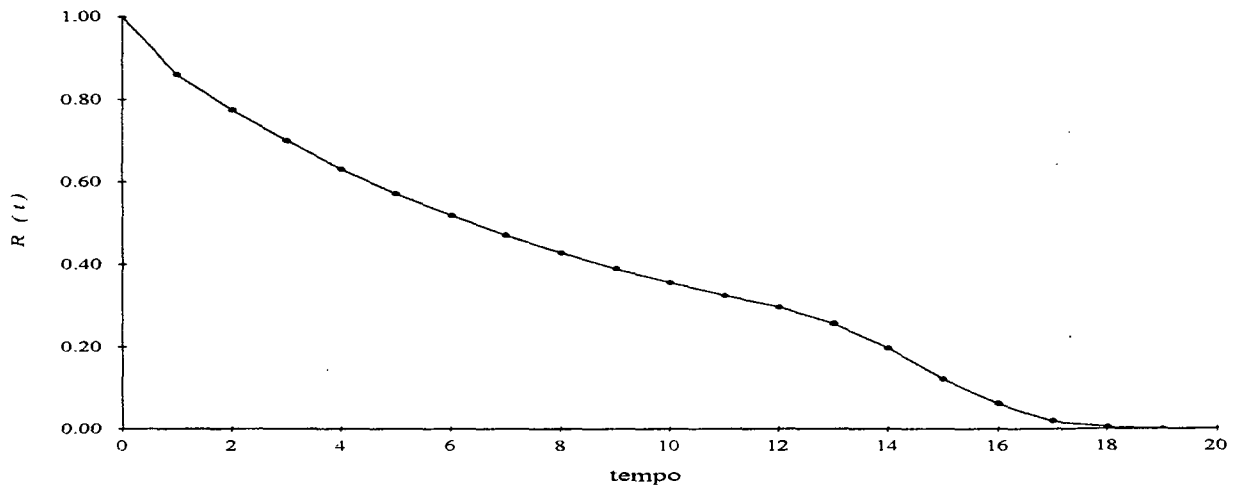


Figura 5.3 - Função Confiabilidade em função do tempo

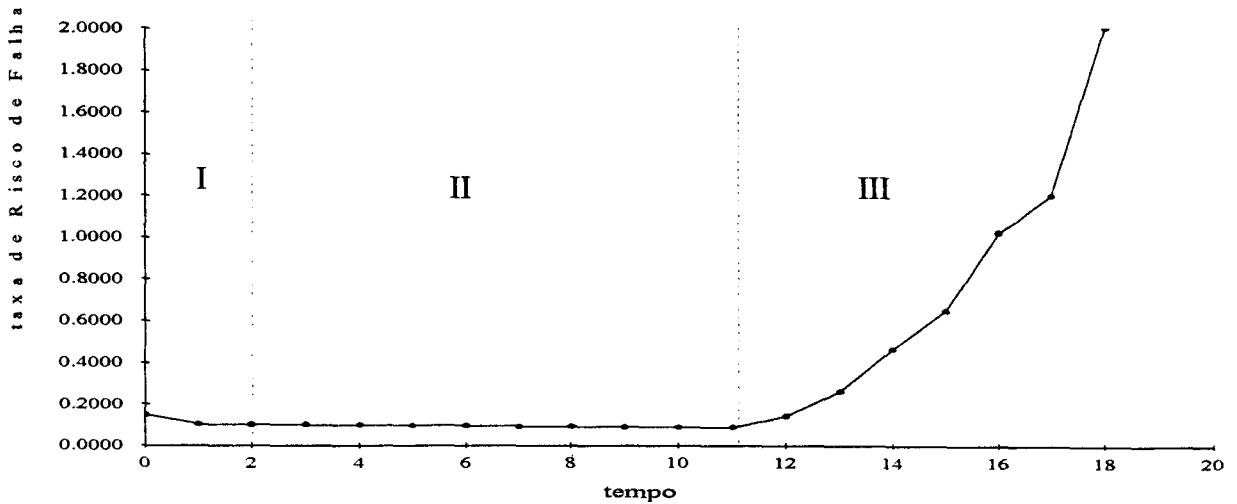


Figura 5.4 - Função Risco de Falha em função do tempo

Através do gráfico e dos resultados da Tabela 5.2 pode-se identificar que o comportamento deste conjunto de equipamentos apresenta três fases distintas.

Uma primeira região (I) que compreende os dois primeiros intervalos de tempo onde a taxa de Risco de Falha é levemente decrescente, justificada por exemplo, por erros de projeto, erros de manufatura ou adequação da operação. A segunda região (II), considerada por muitos autores como o período de vida útil propriamente dito; apresenta uma taxa de Risco de Falha constante, onde as falhas ocorrem ao acaso. A terceira região (III) e fonte de pesquisa deste trabalho é caracterizada pelo envelhecimento do equipamento, com taxas de Risco de Falha crescentes, o que diminui o tempo entre falhas.

Na Figura 5.1 também ficam bem evidenciadas as três regiões distintas sob a ótica da função densidade de probabilidade. Na região II pode-se modelar a curva por uma exponencial negativa com parâmetro constante: A região I apresenta valores maiores do que se considerasse a curva exponencial iniciando no tempo zero e finalmente a região III que pode ser modelado por uma Normal ou uma Weibull por exemplo. Nesta região a densidade de probabilidade cresce rapidamente em função do aumento do número de falhas e então passa a decrescer em direção a zero, em função da pequena quantidade de equipamentos em operação no fim da vida útil.

Através da metodologia TCE busca-se identificar o intervalo de tempo de transição entre a segunda e a terceira regiões, se ele existir, caracterizando assim o período de desgaste do equipamento.

Aplicando a metodologia TCE com os valores da função Confiabilidade e função Risco de Falha da Tabela 5.2, são obtidos os seguintes resultados:

Tabela 5.3 - Resultado da metodologia TCE para o Caso-Teste I

<i>IFR1</i>	para $t = 12$ em diante
<i>IFR2</i>	para $t = 11$ em diante
<i>IFR3</i>	para $t = 11$ em diante
<i>IFR4</i>	para $t = 11$ em diante
<i>IFRA1; IFRA4</i>	para $t = 12$ em diante
<i>IFRA2</i>	para $t = 12$ em diante
<i>NBU1; NBU2; NBU3; NBU4</i>	para $t = 13$ em diante
<i>NBUE1; NBUE4</i>	para todo t , exceto $t = 1$
<i>NBUE3; NBUE5</i>	para todo t , exceto $t = 1$
<i>NBUFR3</i>	para $t = 13$ em diante
<i>DMRL3</i>	para todo t , exceto $t = 0$
<i>DMRL5</i>	para todo t , exceto $t = 0$

Como pode-se verificar, tanto visualmente através do gráfico da função Risco de Falha, como pelos testes *IFR*, *IFRA*, *NBU* e *NBUFR* há uma tendência de envelhecimento a partir do 11º, 12º ou 13º intervalos de tempo, sendo estes pontos a fronteira entre o período com taxas de Risco de Falha constante e o período com taxas de Risco de Falha crescentes. Portanto, a partir de $t = 12$ o conjunto de equipamentos têm uma forte tendência de envelhecimento.

O teste *NBUFR*, que compara as taxas de Risco de Falha de cada intervalo de tempo com a taxa de Risco de Falha inicial aponta envelhecimento a partir do 13º intervalo de tempo.

Para justificar os resultados dos testes *NBUE* e *DMRL*, deve ser observado o gráfico da função Vida Residual Média. Os valores desta função são gerados pela metodologia TCE e calculados através da equação (4.18).

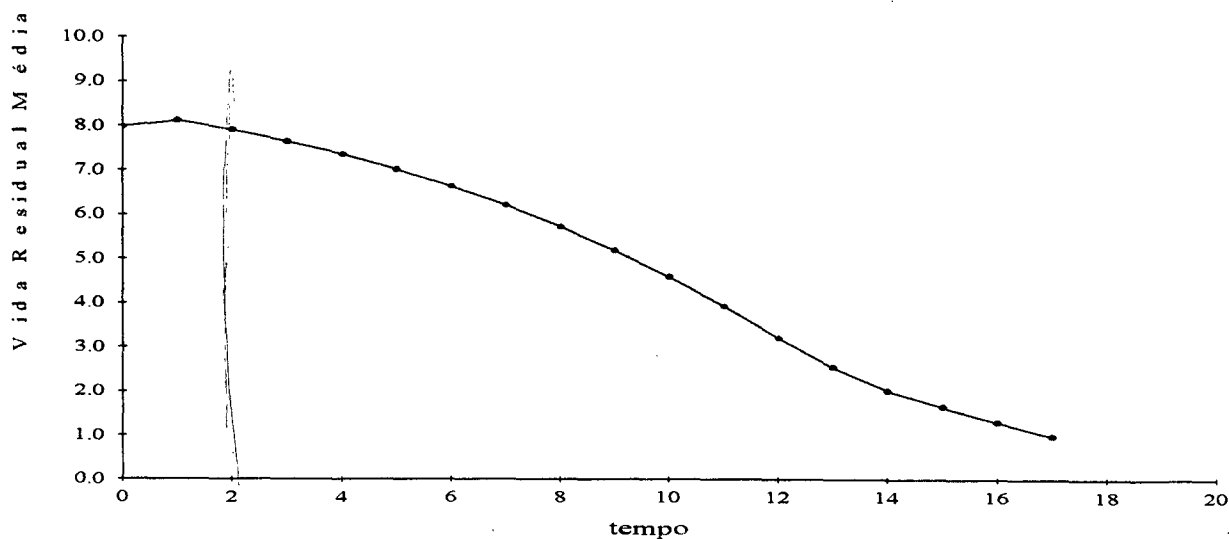


Figura 5.5 - Função Vida Residual Média em função do tempo

A condição de novo melhor que usado na média (*NBUE*), é satisfeita para um determinado intervalo de tempo se a Vida Residual Média deste período for menor ou igual a Vida Residual Média inicial. Portanto, na Figura 5.5, para $t = 2$ em diante, a Vida Residual Média é decrescente e a condição *NBUE* é satisfeita, indicando que o sistema apresenta deterioração em relação a sua situação inicial de novo.

A condição *DMRL* é cumprida se a Vida Residual Média é decrescente ao longo do tempo. Por este motivo, a condição somente não é satisfeita para $t = 0$, que é o ponto inicial de teste. A partir de $t = 1$ a Vida Residual Média é sempre decrescente no tempo, assim este teste não é conclusivo.

Em função dos testes realizados as funções-teste mais indicadas para determinação de envelhecimento são: *IFR*, *IFRA*, *NBU* e *NBUFR*.

5.3 CASO-TESTE II: CONJUNTO DE EQUIPAMENTOS EM OPERAÇÃO

Neste tipo de análise se enquadram os dados de transformadores de distribuição de concessionárias de energia elétrica. Estes dados apresentam características peculiares já que o tamanho da população é variável em função do crescimento da demanda e expansão das áreas de atendimento necessitando a instalação de novos transformadores de distribuição. Outra característica intimamente relacionada a anterior é a de que as idades de operação dos equipamentos são diferentes.

Várias simulações foram realizadas para diferentes regiões geográficas atendidas pela empresa. O conjunto de dados mensais (Figura 5.6a) é do período de Janeiro de 1985 a Dezembro de 1990, totalizando 72 meses coletados em [39]. Infelizmente dados mais recentes e compreendendo um período de maior abrangência não puderam ser obtidos junto à Concessionária de Energia Elétrica de Santa Catarina.

Com a finalidade de diminuir a influência de falhas aleatórias e efeitos de sazonalidade e também verificar o impacto nos resultados dos testes, foram utilizadas as técnicas de suavização: por média aritmética para 3, 6 e 12 meses; também por médias móveis para $k = 12$ e com os dados originais (análise mensal).

Neste trabalho será apresentado um exemplo referente aos transformadores da região de Concórdia que apresentaram uma ligeira tendência de envelhecimento, sendo que no artigo [40] os dados analisados se referem a região de Joaçaba.

Nos gráficos das figuras 5.6b a 5.6d, são apresentados os valores obtidos para a função Risco de Falha, aplicando suavização por média aritmética agrupando os dados trimestralmente, de 6 em 6 meses e anualmente. Pode-se observar que quanto maior for o número de meses agrupados, menor será a variação entre os pontos máximo e mínimo de taxa de Risco de Falha, conforme demonstrado nos gráficos 5.6a a 5.6d.

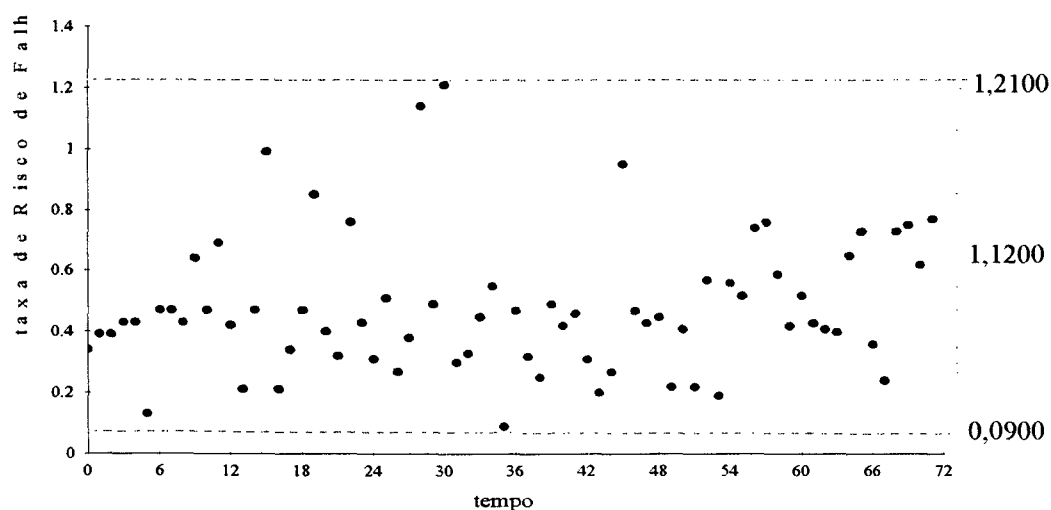


Figura 5.6a - Valores mensais da função Risco de Falha

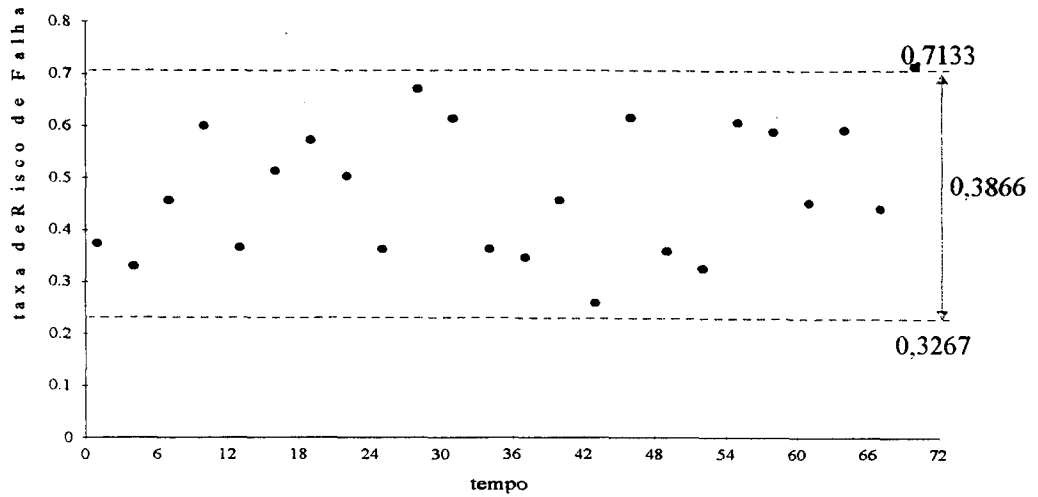


Figura 5.6b - Valores trimestrais da função Risco de Falha

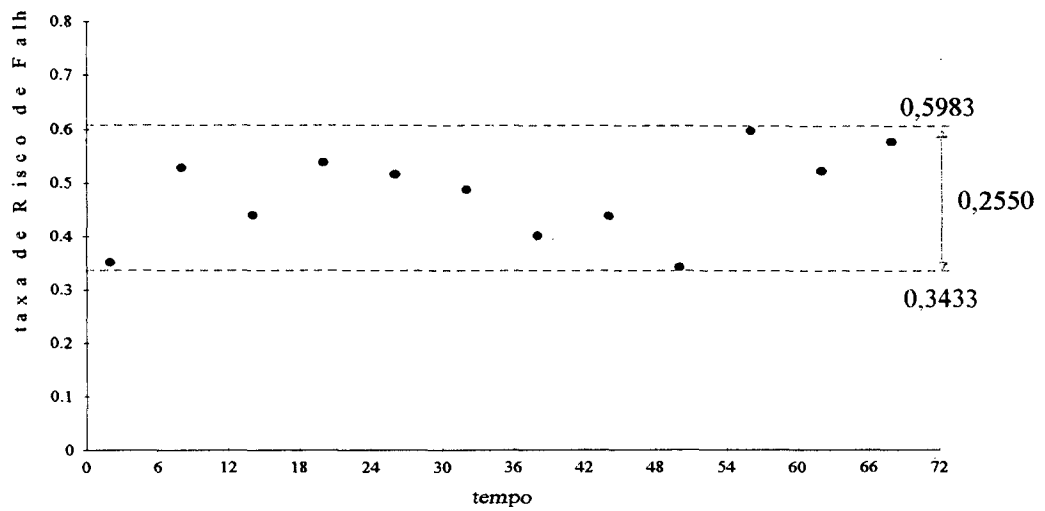


Figura 5.6c - Valores semestrais da função Risco de Falha

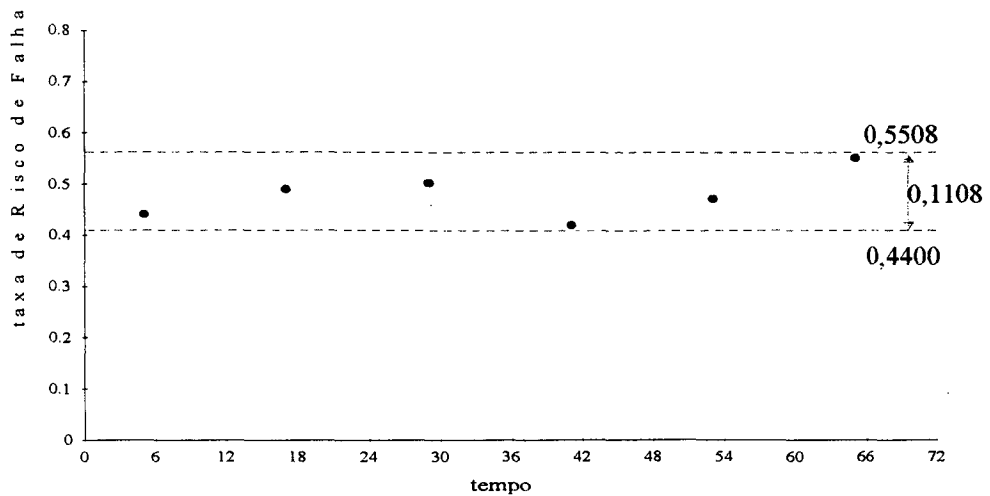


Figura 5.6d - Valores anuais da função Risco de Falha

Assim como a suavização por média aritmética, a suavização por Médias Móveis também diminui a variação entre os pontos máximo e mínimo da taxa de Risco de Falha, conforme apresentado na Figura 5.7. Também para este caso foram utilizadas Médias Móveis de ordem 12 e ordem 6 ($k = 12$ e $k = 6$ respectivamente).

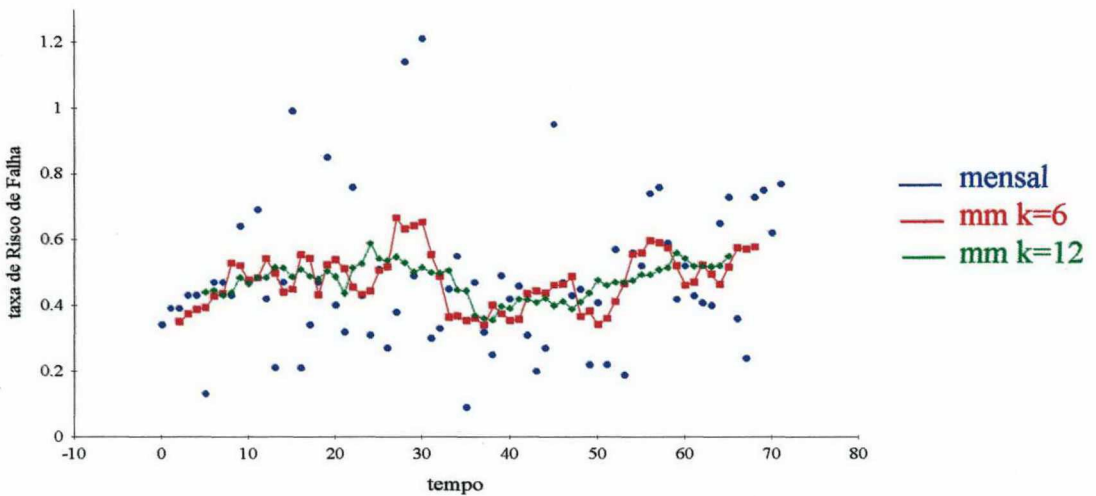


Figura 5.7 - Função Risco de Falha: dados originais e com suavização por médias móveis

Aplicando-se a metodologia TCE para o conjunto de transformadores de distribuição da região de Concórdia, são obtidos os resultados apresentados na Tabela 5.4. Salienta-se que os intervalos de tempo apresentados na Tabela 5.4 são os intervalos de tempo identificados pelas funções-teste considerando apenas a segunda metade do histórico de falhas, visto que a detecção de pontos no início do período de análise não significam uma tendência contínua de envelhecimento.

Tabela 5.4 - Resultados da Metodologia TCE para análise tipo II

	Mensal $t = 0$ a 71	Trimestral $t = 0$ a 23	Semestral $t = 0$ a 11	Anual $t = 0$ a 5	Méd. Mów. k = 12 $t = 5$ a 65
IFR1	$t = 67$ em diante	$t = 20$ em diante	$t = 9$ em diante	$t = 3$ em diante	$t = 50$ em diante
IFR2	$t = 67,70$	$t = 22$	$t = 8,10$	$t = 3$ em diante	$t = 63$ em diante
IFR3	$t = 67,68,70$	$t = 17,20,22$	$t = 8,10$	$t = 3$ em diante	$t = 63$ em diante
IFR4	$t = 67,68,70$	$t = 17,20,22$	$t = 8,10$	$t = 3$ em diante	$t = 63$ em diante
IFRA1 e IFRA4	$t = 68$ em dian4te	$t = 19,21,23$	$t = 9$ em diante	$t = 4$ em diante	$t = 52$ em diante
IFRA2	$t = 68$ em diante	$t = 19,21,23$	$t = 9$ em diante	$t = 4$ em diante	$t = 52$ em diante
NBU1-4	$t = 68$ em diante	$t = 18$ em diante	$t = 9$ em diante	$t = 4$ em diante	$t = 50$ em diante
NBUE1 e NBUE4	$t = 50$ em diante	$t = 13$ em diante	para todo t	para todo t	$t = 49$ em diante
NBUE3 e NBUE5	$t = 50$ em diante	$t = 13$ em diante	para todo t	para todo t	$t = 49$ em diante
NBUFR3	$t = 54$ a 66, 68 em diante	$t = 18$ em diante	$t = 9$ em diante	$t = 4$ em diante	$t = 50$ em diante
DMRL3	$t = 66$ em diante	$t = 19$ em diante	$t = 6$ em diante	para todo t	$t = 51$ a 58, 60 em diante
DMRL5	$t = 66$ em diante	$t = 19$ em diante	$t = 6$ em diante	para todo t	$t = 51$ a 58, 60 em diante

Na Tabela 5.4 a variável t representa meses, trimestres, semestres ou anos, dependendo do agrupamento adotado. Para as médias móveis de ordem $k = 12$, os 72 valores mensais são agrupados de 12 em 12, resultando em 61 valores de taxa de Risco de Falha. Por este motivo

considerou-se o intervalo de t entre 5 e 65. Para $t = 5$, utiliza-se a média aritmética dos 12 primeiros meses; para $t = 6$, tem-se a média aritmética dos meses 2 a 13 e assim sucessivamente.

Com este exemplo, pode-se concluir que a análise mensal não apresenta bons resultados em razão da grande variabilidade dos pontos, conseguindo identificar o crescimento das taxas de Risco de Falha somente nos últimos meses do histórico (Figura 5.8). Por outro lado, a análise semestral já indica um período de taxas crescentes após 9 semestres (54 meses). As médias móveis apontam para um valor intermediário, preservando o número de pontos originais a menos de $(k+1)$ termos. A média aritmética aglutina os termos, reduzindo a quantidade de pontos e, até mesmo, juntando estações do ano diferentes como na análise semestral.

Verifica-se que quanto mais suavizado forem os dados maior será a possibilidade de que os testes atuem adequadamente (Figura 5.8), desde que os equipamentos possuam realmente características de degradação contínua.

Os resultados obtidos para este tipo de análise devem ser utilizados com parcimônia, pois neste conjunto de transformadores, a característica de envelhecimento não fica totalmente evidenciada, visto que o banco de dados agrupa equipamentos de vários anos de uso, sendo que o crescimento das falhas podem também ter outras origens.

Apesar disso, através do monitoramento da taxa de falha, as empresas verificam o desempenho do conjunto de transformadores mantendo um nível “aceitável” de falha através de manutenções e substituições de transformadores com maior índice de defeito.

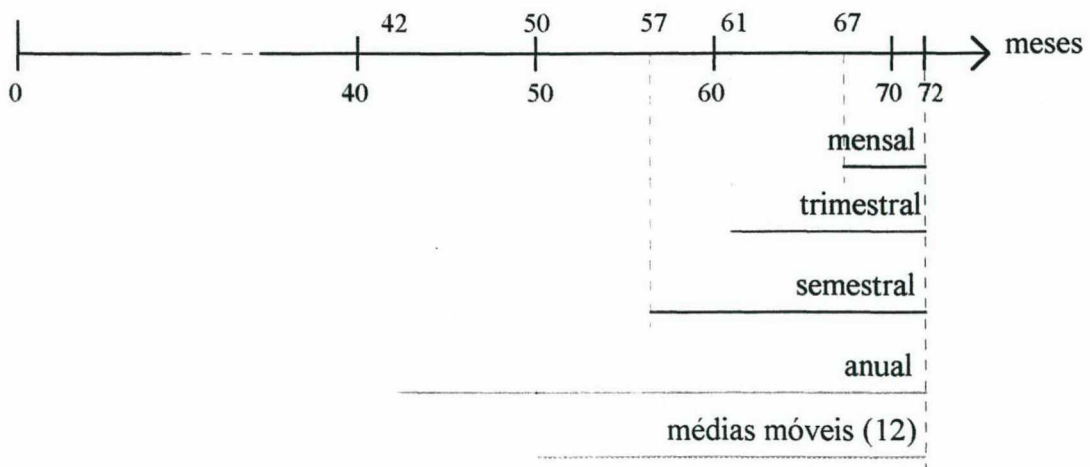


Figura 5.8 - Representação gráfica dos períodos de envelhecimento para o teste IFR1

Em relação aos resultados obtidos com a técnica de suavização, os valores indicados para as análises trimestral, semestral, anual e médias móveis são os valores médios do intervalo considerado. Por exemplo: na análise anual o valor obtido foi o terceiro ano ($t = 3$) em diante, ou seja, a média aritmética entre os meses 37 a 48. Por este motivo, a partir do mês 42 os equipamentos apresentam características de envelhecimento segundo a condição *IFR* (taxas de Risco de Falha crescentes).

No estudo realizado em [39], utilizando estes mesmos dados, os autores aplicaram a técnica de mínimos quadrados sobre o logaritmo dos índices de falhas acumuladas, obtendo uma curva representativa do conjunto de transformadores. A inclinação da curva obtida foi de 1,09, indicando uma leve tendência de envelhecimento dos dados, estando assim em consonância com os resultados obtidos aplicando-se a metodologia TCE.

5.4 CASO-TESTE III: UM ÚNICO EQUIPAMENTO EM OPERAÇÃO

Nesta análise se enquadram os dados obtidos em Schilling [16]. Faz-se uma análise individualizada de geradores da usina termoeétrica, a óleo combustível, de Santa Cruz, pertencente à Furnas Centrais Elétricas, localizada no Rio de Janeiro.

Para este exemplo são coletados os tempos de ocorrência para cada uma das falhas (*TTF's*) em ordem cronológica utilizados por Schilling para análise de Confiabilidade de equipamentos reparáveis na presença de envelhecimento. Os tempos de manutenção ou simples desligamentos onde o gerador é parado mesmo que disponível, não são contabilizados para os *TTF's*. O período de observação vai de Setembro/67 a Agosto/83.

A partir de 1973 com a primeira crise do petróleo, por ser uma usina termoeétrica a óleo, o custo de operação da usina tornou-se elevado, fazendo com que os geradores só fossem acionados em períodos de pico ou necessidade do sistema, permanecendo grande parte do tempo ociosos. Dos 15 anos e 11 meses de observação, o gerador 1 esteve em operação durante 4 anos e 10 meses, representando 30,4% do tempo total.

Nesta análise foi considerado falha quando da parada total da unidade geradora (gerador + turbina + caldeira + transformadores auxiliares) por qualquer motivo de natureza

Os valores da função Risco de Falha calculados a partir dos tempos até a ocorrência de falha, com e sem suavização, estão apresentados na Figura 5.9 abaixo. Pode-se perceber através do gráfico que os valores da função Risco de Falha têm grande variação; de praticamente zero na ocorrência da segunda falha até 22,5 dias⁻¹ em $t = 1706$. Analisando os *TTF*'s, o menor tempo que o gerador ficou em operação foi 64 min e o maior período foi de 2 anos. Outra informação interessante é que a primeira falha só ocorre após 488 dias e a segunda após 1220 dias, períodos bem superiores aos demais tempos até ocorrência de falha.

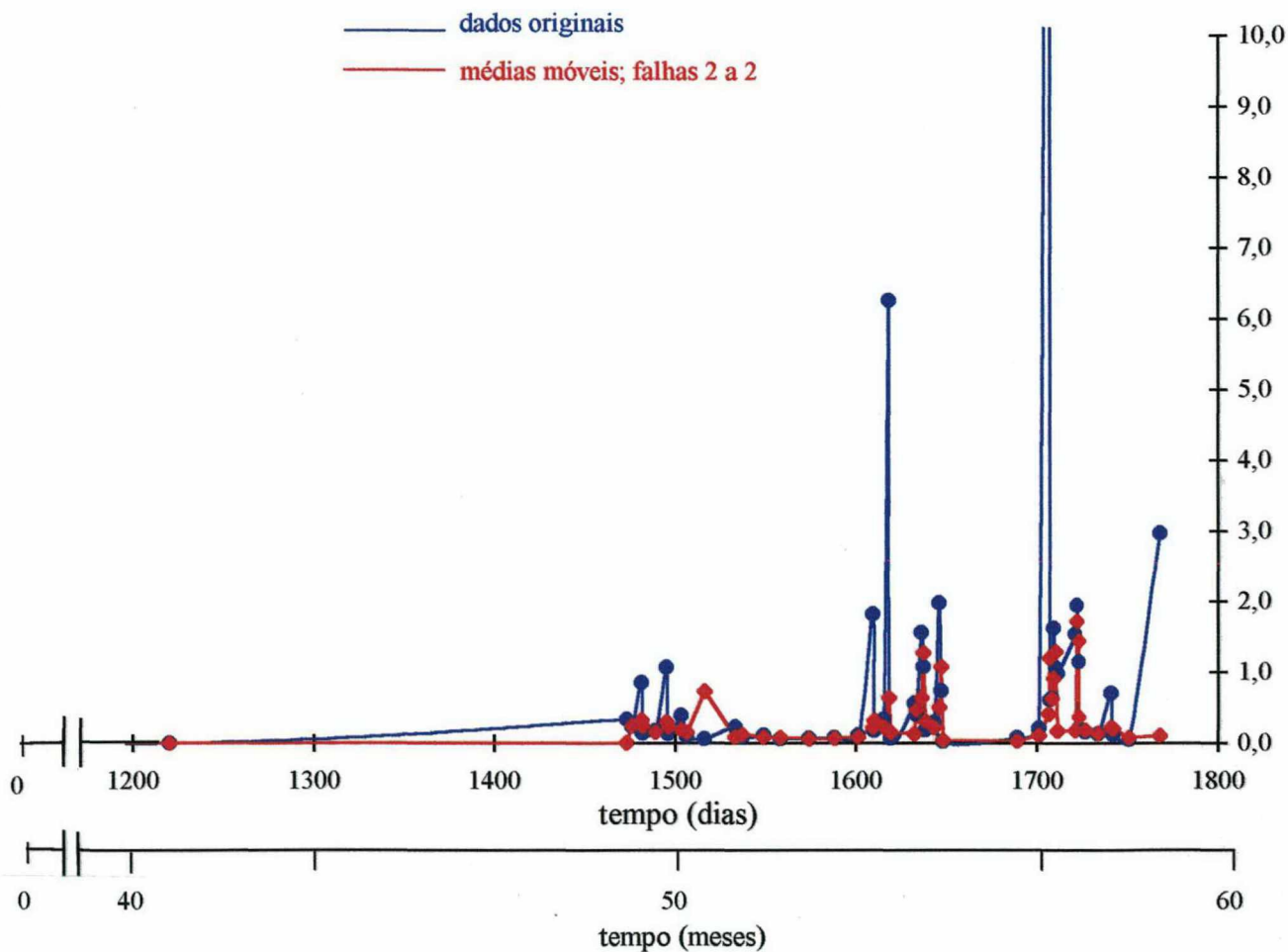


Figura 5.9 - Função Risco de Falha: dados originais e suavização por médias aritméticas e médias móveis

Aplicando-se a metodologia TCE para o gerador 1 da usina de Santa Cruz, obtém-se o quadro resumo apresentado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Resultados da metodologia TCE para análise tipo III, tempo em meses

	falhas 1 a 1	Média arit. falhas 2 a 2	Médias Móv. falhas 2 a 2
IFR2	$t = 57$	para nenhum t	$t = 57$
IFR3	$t = 56$ e 57	$t = 56$ e 57	$t = 56$ e 57
IFRA1 e IFRA4	$t = 16$ em diante	para todo t	para todo t
IFRA2	$t = 16$ em diante	para todo t	para todo t
NBUE1 e NBUE4	$t = 16$ em diante	para todo t	para todo t
NBUE3 e NBUE5	$t = 16$ em diante	para todo t	para todo t
NBUFR3	$t = 16$ em diante	para todo t	para todo t
DMRL3	$t = 56$ e 57	$t = 56$ e 57	$t = 56$ e 57
DMRL5	$t = 57$	$t = 54$	$t = 54$ e 57

Com este exemplo, demonstra-se a “rigoriedade” dos testes *IFR* e *DMRL*, que indicam um envelhecimento a partir do mês 54, que é um dos últimos meses do histórico analisado. As distribuições *IFRA*, *NBUE* e *NBUFR* são menos “restritivas” e mostram uma tendência de envelhecimento no gerador 1 da usina Santa Cruz a partir do 16º mês considerando os dados originais, ou seja, calculando a taxa de Risco de Falha a cada falha ocorrida e, para todo t , considerando os tempos até ocorrência de falha agrupados dois a dois. Isto mostra que as funções *IFRA*, *NBUE* e *NBUFR* não trazem informações adicionais com respeito ao envelhecimento.

A dificuldade na análise individualizada se deve às grandes diferenças entre os tempos até ocorrência de falha, não apresentando uma evidência de crescimento contínuo da taxa de Risco de Falha.

No estudo desenvolvido por Schilling [16] verifica-se que a gerador 1 apresenta duas fases distintas de operação (Ver Figura 5.10) com comportamento razoavelmente constante mas com coeficientes angulares distintos, sendo que na segunda fase (após 1500 dias, na Figura 5.10) o número de defeitos por unidade de tempo é maior. Esta distinção de fases se deve ao fato de

que até 1973 o gerador era operado na base do sistema e a partir deste instante passou a ser operado somente nos horários de pico.

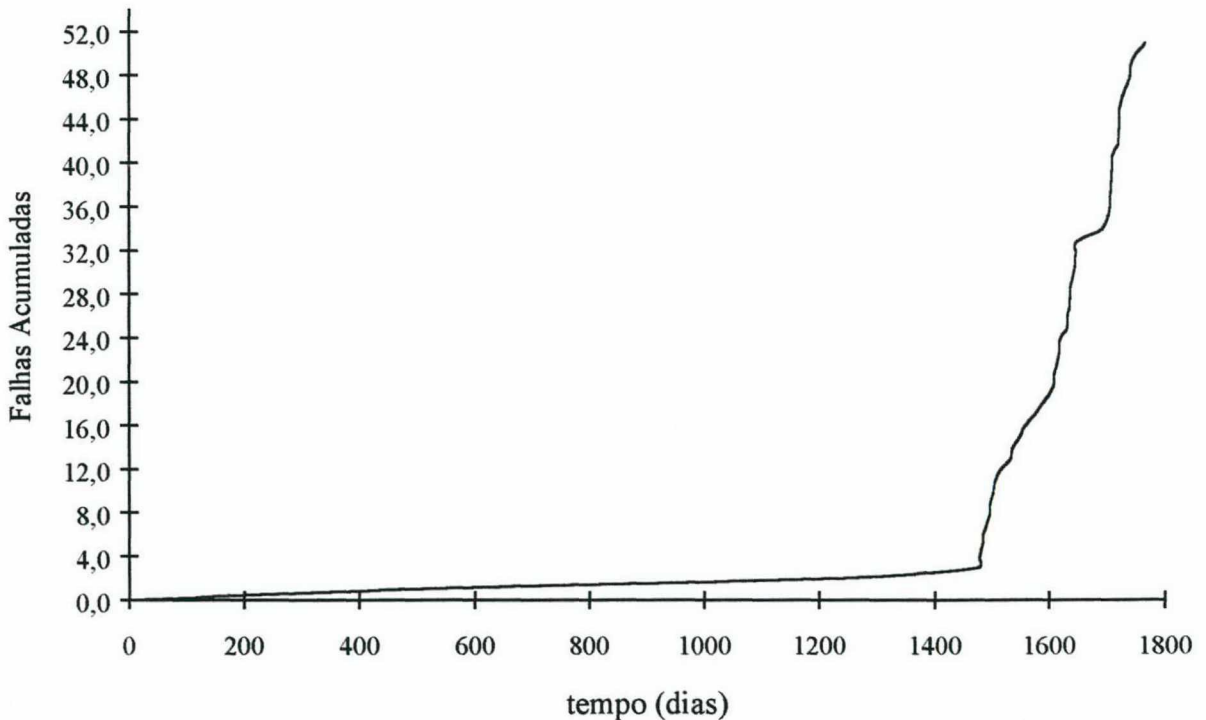


Figura 5.10 - Número de Falhas acumuladas em função do tempo

5.5 TEMPO DE PROCESSAMENTO

Conforme mencionado no capítulo anterior, o tempo de CPU gasto na aplicação da metodologia TCE é muito pequeno e está diretamente relacionado com o histórico de falhas sob análise. Quanto maior o histórico, maior será o tempo de CPU. Outro fator que influencia é a suavização aplicada aos dados. Quanto mais meses (ou falhas) forem agrupadas para a aplicação dos testes menor será o tempo gasto.

Para a comparação dos tempos gastos foram utilizados dois computadores tipo PC, com as seguintes características:

- PENTIUM 133 Mhz, 16 Mbytes de RAM e 256 Kbytes de memória cache;
- 486DX4 100 Mhz, 8 Mbytes de RAM e 256 Kbytes de memória cache.

Na Tabela 5.6 são apresentados os tempos gastos (em centésimos de segundos) na aplicação da metodologia TCE para os três Casos-Teste apresentados neste capítulo. Para o Caso-Teste II foi considerada a análise trimestral e para o Caso-Teste III foi considerado médias móveis com $k = 2$. Na Figura 5.11 é apresentado um gráfico comparativo com os resultados obtidos.

Tabela 5.6 - Tempo gasto de CPU na aplicação da metodologia TCE em centésimos de segundo

	PENTIUM 133 Mhz	486DX4 100 Mhz
Caso-Teste I	3,9	8,0
Caso-Teste II	5,5	13,0
Caso-Teste III	5,5	12,3

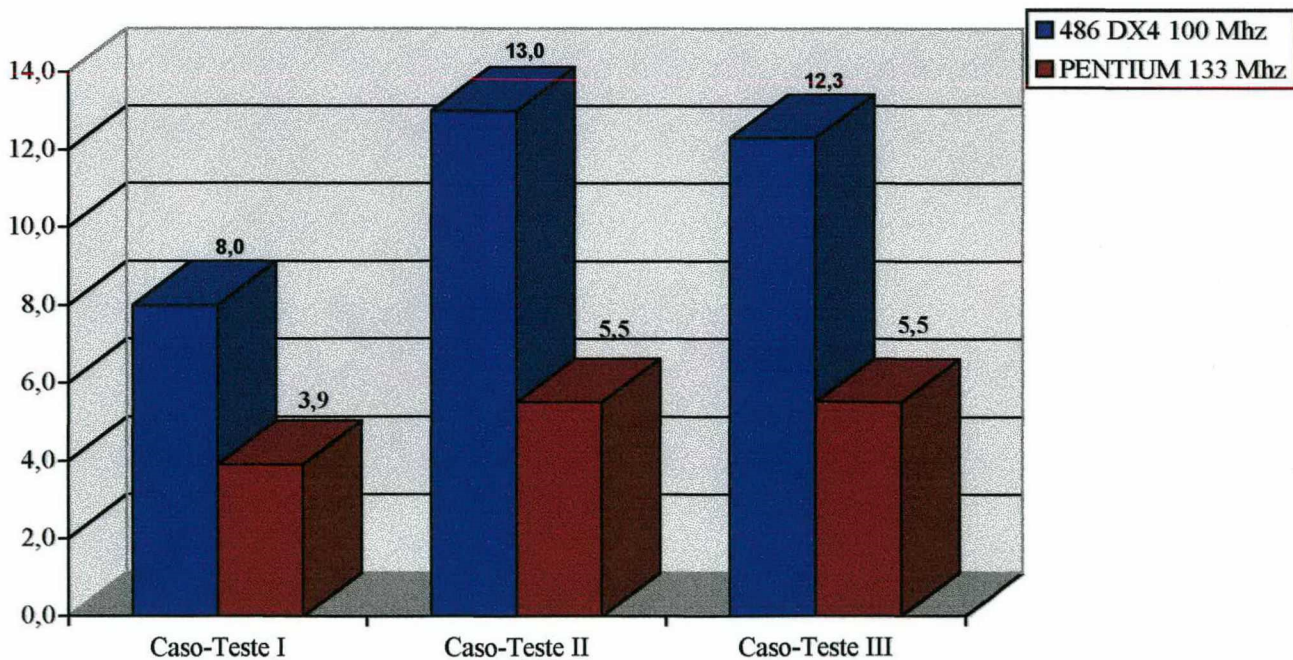


Figura 5.11 - Tempo gasto de CPU em centésimos de segundo

Na Tabela 5.7 são apresentados os tempos gastos (em centésimos de segundos) para o Caso-Teste II, considerando as suavizações utilizadas. Na Figura 5.12 é mostrado um gráfico comparativo com os resultados obtidos, demonstrando a influência do agrupamento dos meses no tempo de CPU.

Tabela 5.7 - Tempo gasto de CPU para o Caso-Teste II em centésimos de segundo

	PENTIUM 133 Mhz	486DX2 100 Mhz
Mensal	59,8	193,4
Trimestral	5,5	13,0
Semestral	2,2	4,2
Anual	1,3	2,0
Médias Móveis $k = 2$	38,7	123,1

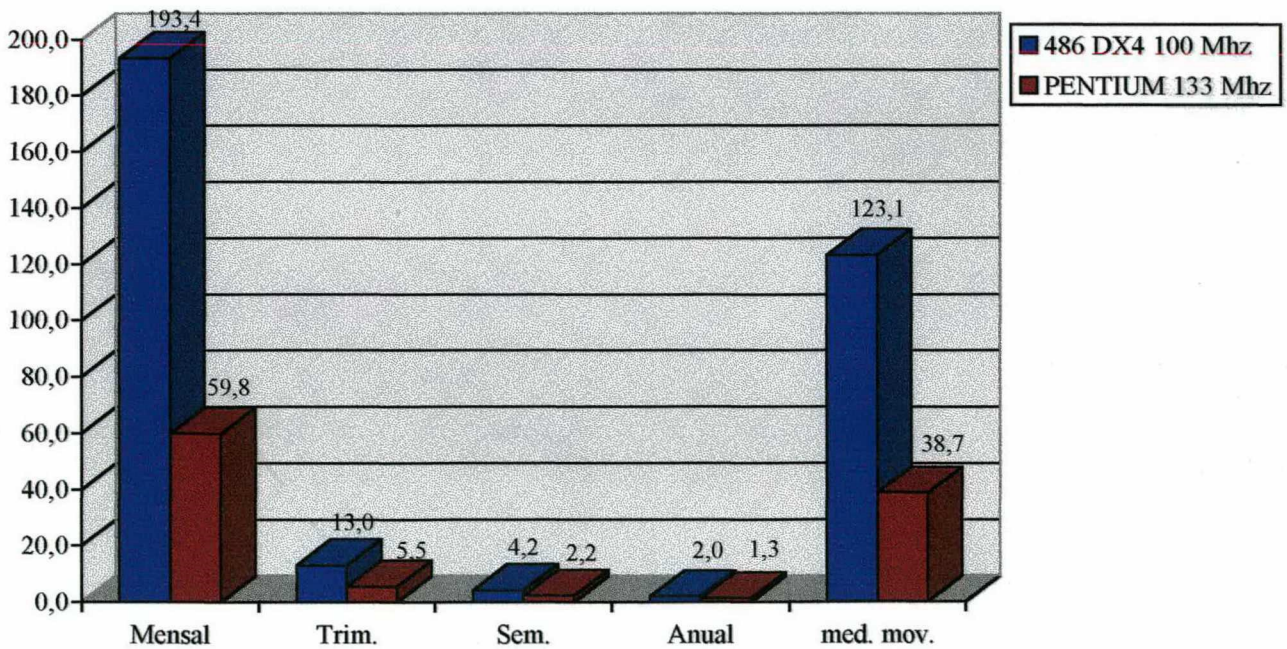


Figura 5.12 - Tempo gasto de CPU em centésimos de segundo

5.6 APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLE

Como já mencionado anteriormente, as cartas de controle podem ser utilizadas para verificação de: tendências gerais, flutuações de magnitude não-usual, instabilidade do conjunto de dados, etc. Deste modo, pode-se separar a tendência do crescimento de $\lambda(t)$ de variações aleatórias que não correspondem ao envelhecimento natural e contínuo devido ao desgaste.

O interesse desta análise é verificar se existem pontos atípicos nos dados que não expressem a situação real do conjunto de equipamentos.

A questão é se esses pontos devem ou não ser utilizados nos Testes para Caracterização do Envelhecimento. Em caso afirmativo esses dados podem influenciar significativamente no resultado dos testes, ainda mais considerando que os mesmos são bastante sensíveis a flutuações nos dados.

Os pontos atípicos são os pontos enquadrados em algum dos testes mencionados no Capítulo 4 (teste de instabilidade, teste de estratificação e tendência).

É ilustrado na Figura 5.13 a carta de controle para o conjunto de transformadores de distribuição da região de Concórdia (Caso-Teste II).

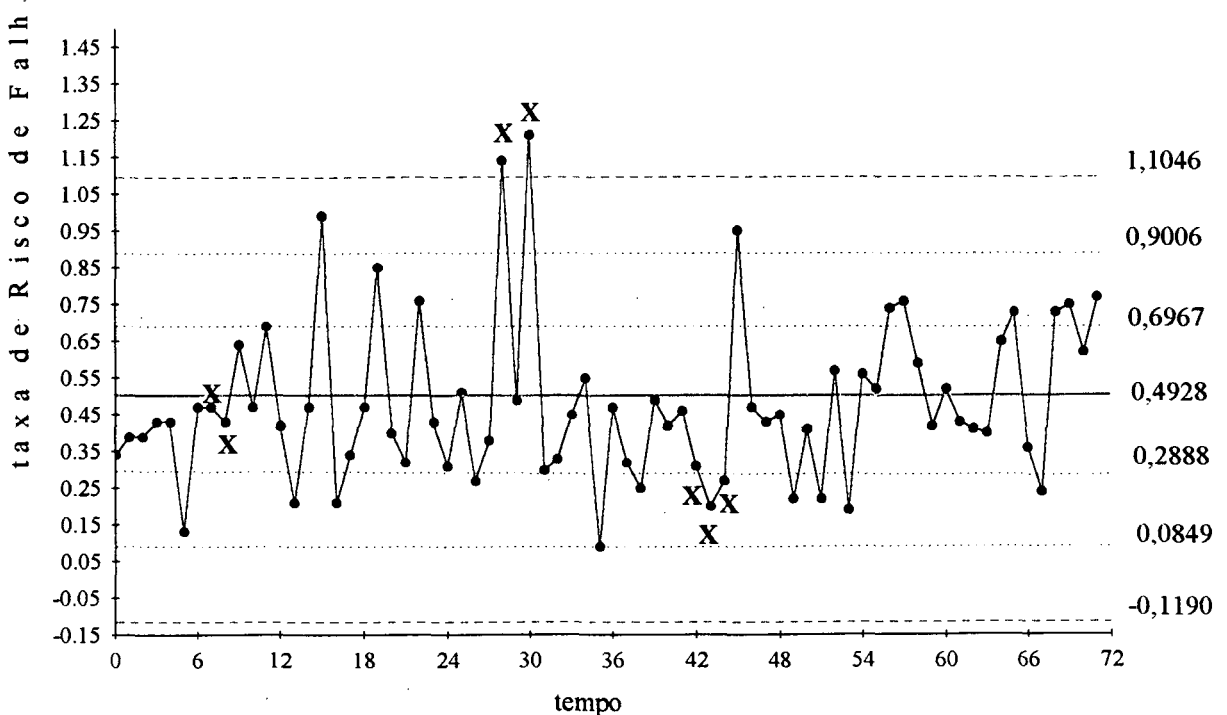


Figura 5.13 - Carta de Controle para o Caso-Teste I

As linhas tracejadas (.....) indicam os limites de controle de $\pm 1\sigma$ e $\pm 2\sigma$; a linha tracejada (-----) o limite de controle de $\pm 3\sigma$ e a linha cheia a média das taxas de falha mensais. Os pontos assinalados com um X indicam os pontos atípicos selecionados pelo teste de instabilidade (critério I: 1 ponto fora de 3σ ; e critério IV: oito pontos sucessivos de um mesmo lado da carta de controle).

Pode-se observar que a Carta de Controle não apresenta aparentemente um aspecto de tendência e também não apresenta uma mudança de comportamento visível ao longo do tempo.

A metodologia TCE foi aplicada para o estudo dos transformadores de distribuição de Concórdia, desconsiderando os sete pontos atípicos identificados na Figura 5.12. São apresentados os resultados dos Testes para Caracterização do Envelhecimento para a análise semestral.

Tabela 5.8 - Resultados da Metodologia TCE desconsiderando os Pontos Atípicos

FUNÇÃO TESTE	Semestral $t = 0$ a 11
<i>IFR1</i>	$t = 9$ em diante
<i>IFR2</i>	$t = 8, 10$
<i>IFR3</i>	$t = 8, 10$
<i>IFR4</i>	$t = 8, 10$
<i>IFRA1</i> e <i>IFRA4</i>	$t = 9$ em diante
<i>IFRA2</i>	$t = 9$ em diante
<i>NBU1-4</i>	$t = 9$ em diante
<i>NBUE1</i> e <i>NBUE4</i>	$t = 5$ em diante
<i>NBUE3</i> e <i>NBUE5</i>	$t = 5$ em diante
<i>NBUFR3</i>	$t = 9$ em diante
<i>DMRL3</i>	$t = 8$ em diante
<i>DMRL5</i>	$t = 8$ em diante

Verifica-se na Tabela 5.8 que as funções-teste: *IFR1*, *IFR2*, *IFR3*, *IFR4*, *IFRA1*, *IFRA2*, *IFRA4* e *NBUFR3* e *NBU* não apresentaram alteração nos intervalos de tempo com envelhecimento desconsiderando os pontos atípicos. Já as funções-teste: *NBUE1*, *NBUE3*,

NBUE4, *NBUE5*, *DMRL3*, *DMRL5* os resultados alteraram, diminuindo os intervalos de tempo com características de envelhecimento devido à influência das taxas de Falha dos pontos $t = 28$ e $t = 30$ na análise original, alterando-se conseqüentemente a função Vida Residual Média.

5.7 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi aplicada a metodologia TCE a três Casos-Teste, os quais englobam a maioria das situações reais de disponibilidades dos dados, ou seja, um lote de tamanho determinado de equipamentos não-reparáveis, um conjunto de equipamentos em operação e um único equipamento. Além disso, para cada Caso-Teste foram apresentados os resultados considerando-se os dados originais, suavização por média aritmética e suavização por médias móveis.

As aplicações citadas demonstram a versatilidade da metodologia TCE para determinação dos períodos em que o equipamento/conjunto de equipamentos está apresentando envelhecimento. Está-se interessado principalmente na transição entre o período de taxas de Risco de Falha constantes e o período de taxas de Risco de Falha crescentes, se o mesmo existir.

O caso “ideal” para aplicação da metodologia é um lote fixo de equipamentos não-reparáveis (Caso-Teste I), visto que em muitas aplicações práticas, representadas pela análise do tipo II, a quantidade de equipamentos em operação é variável, possui tempos de operação diferentes e as concessionárias de energia elétrica atuam corretivamente no sistema através de ações operativas, manutenções e substituição de componentes e/ou equipamentos. Na análise do exemplo-tipo III, a grande variação dos tempos até ocorrência de falha não indica um envelhecimento contínuo ao longo do tempo.

Em função dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia TCE, concluiu-se que a função-teste mais apropriada e que melhor se comportou nos três tipos de conjunto de dados é a função-teste *IFR*. Dentre as várias definições de *IFR*, a mais recomendada é a *IFR2* que permite a análise supondo intervalos de tempo iguais ou não.

A metodologia proposta é simples, o tempo computacional gasto para determinação dos intervalos de envelhecimento é pequeno e os resultados obtidos são bastante satisfatórios viabilizando a utilização da metodologia TCE.

Uma ferramenta de apoio que pode ser utilizada são as cartas de controle. Através das cartas de controle pode-se detectar pontos atípicos dos dados sob análise que podem não expressar a situação real do conjunto de equipamentos, ou mesmo analisar a tendência dos dados originais (sem suavização).

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES GERAIS

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia que reúne vários testes para a determinação dos intervalos de tempo nos quais um equipamento ou conjunto de equipamentos apresenta envelhecimento. Os intervalos de tempo são obtidos através da aplicação de testes estatísticos baseados no conceito de distribuições de probabilidade com características de envelhecimento.

A metodologia proposta é útil para um melhor entendimento da operação de um equipamento, possibilita verificar a influência das manutenções corretivas, preventivas e/ou preditivas na determinação dos intervalos de tempo com características de envelhecimento e, fornece subsídios tanto para minimização de incertezas num processo de decisão entre substituição ou reparo, quanto para a adoção de políticas de manutenção/ substituição eficazes.

Portanto, a metodologia TCE vem ao encontro da necessidade de um acompanhamento real do estado de equipamentos para otimização da utilização dos mesmos, reduzindo custos e aumentando sua vida útil, seja num cenário de escassez de recursos para investimento, seja num cenário de maximização de investimentos.

Reconhece-se que a metodologia proposta faz uma análise qualitativa na determinação dos intervalos de tempo com envelhecimento, porém não indica o quão acentuado é este envelhecimento. Além disso, tem-se a dificuldade na aquisição de dados apropriados para análise visto que as empresas possuem banco de dados de equipamentos agrupados e tempos de operação distintos.

Apesar destas reconhecidas restrições relacionadas aos dados, a principal contribuição deste trabalho é a aplicação prática do conceito de distribuições de probabilidade com características de envelhecimento para determinação de intervalos de tempo com tais características. Pode-se salientar que não foi encontrado nenhum trabalho na literatura pesquisada que tenha desenvolvido uma metodologia semelhante para determinação de intervalos de tempo com envelhecimento.

A metodologia foi aplicada a três Casos-Teste:

- I) dados de um lote hipotético de equipamentos não-reparáveis (sob teste de durabilidade);
- II) dados de um conjunto de transformadores de distribuição de uma concessionária de energia elétrica;
- III) dados de um gerador da Usina termoeleétrica de Santa Cruz.

Foram apresentados também os resultados para o Caso-Teste II considerando os dados originais, agrupando os dados em trimestres, semestres e anos por média aritmética e agrupando por médias móveis com $k = 12$ com a finalidade de verificar a influência da suavização dos dados na determinação dos intervalos com envelhecimento. Conclui-se que a utilização de agrupamento das taxas de falha minimiza o efeito de falhas aleatórias. Também foi verificado que a análise mensal de transformadores de distribuição não é recomendada pela grande flutuação das taxas de falha.

Em função dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia TCE, concluiu-se que a função-teste mais apropriada e que melhor se comportou nos três tipos de conjunto de dados é a função-teste *IFR*. Dentre as várias definições de *IFR*, a mais recomendada é a *IFR2* que permite a análise supondo intervalos de tempo iguais ou não.

6.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

As principais contribuições do presente trabalho são:

- Estudo de temas envolvendo envelhecimento: modelagem da função Risco de Falha e função Confiabilidade, políticas de manutenção/substituição, estudo dos materiais e suas propriedades físicas;
- Elaboração e implementação de um módulo para o cálculo da função Risco de Falha e função Confiabilidade;

- Apresentação detalhada dos conceitos e definições matemáticas das funções-teste (*IFR*, *IFRA*, *NBU*, *NBUE*, *NBUFR* e *DMRL*) com características de envelhecimento;
- Aplicação prática dos conceitos e definições matemáticas das funções-teste;
- Implementação computacional de uma metodologia para determinação dos intervalos de tempo nos quais um equipamento ou conjunto de equipamentos sob análise apresenta envelhecimento;

Pode-se ainda destacar que:

- A metodologia possibilita a análise tanto de equipamentos reparáveis quanto não reparáveis e possibilita a análise tanto de um equipamento isolado quanto a análise de um conjunto de equipamentos operando sob as mesmas condições;
- A metodologia permite tanto a análise dos dados originais coletados em campo ou laboratório quanto a análise dos dados agrupados por média aritmética ou médias móveis;

6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como sugestões para futuros trabalhos pode-se citar:

- Implementar novas funções-teste para caracterização do envelhecimento encontradas menos freqüentemente na literatura, verificar seus resultados e comparar com as funções-teste já implementadas;
- Associar à metodologia proposta uma análise econômica para auxiliar na elaboração de políticas de manutenção que otimizem a operação de equipamentos;
- Desenvolver um sistema especialista que trabalhe de forma integrada aos resultados obtidos pela metodologia TCE;
- Desenvolver uma metodologia que tenha por objetivo decidir entre reparar ou substituir um equipamento baseado na teoria da decisão e nos resultados da metodologia TCE.

APÊNDICE A

DESCRIÇÃO MATEMÁTICA PARA OBTENÇÃO DO NÚMERO DE EQUIPAMENTOS FALHADOS A PARTIR DA TAXA DE RISCO DE FALHA

A.1 INTRODUÇÃO

Neste apêndice é apresentada a dedução matemática das equações (3.11) e (3.12) referentes ao número de equipamentos falhados no instante de tempo $t = 0$ e para os demais intervalos de tempo respectivamente. Estas expressões fazem parte da metodologia para determinação da função densidade de probabilidade, função distribuição acumulada de falha e função Confiabilidade considerando a forma alternativa da análise de dados - tipo I, ou seja, ao invés dos parâmetros conhecidos serem o número de equipamentos falhados a cada intervalo de tempo e o tamanho do lote, são conhecidas as taxas de Risco de Falha em cada intervalo de tempo e o tamanho do lote.

A.2 DEDUÇÃO MATEMÁTICA

Como os dados são coletados em intervalos de tempo, a taxa de Risco de Falha ($\lambda(t)$) é definida como a razão entre o número de equipamentos falhados e o número médio de equipamentos restantes em cada intervalo de tempo, ou seja (equação 3.10):

$$\lambda(t) = \frac{N_f(t)}{\left(\frac{N_s(t) + N_s(t+1)}{2} \right)} \quad (A-1)$$

onde:

$N_f(t)$ - número de equipamentos falhados em cada intervalo de tempo;

$N_s(t)$ - número de equipamentos restantes em cada intervalo de tempo,

manipulando a expressão acima, obtém-se:

$$\lambda(t) = \frac{2 \cdot N_f(t)}{N_s(t) + N_s(t+1)} \quad (A-2)$$

como:

$$N_s(t+1) = N_s(t) - N_f(t) \quad (A-3)$$

obtém-se:

$$\lambda(t) = \frac{2 \cdot N_f(t)}{N_s(t) + (N_s(t) - N_f(t))} \quad (A-4)$$

Em $t = 0$, o número de equipamentos restantes é igual ao tamanho do lote N :

$$N_s(0) = N \quad (A-5)$$

Aplicando as equações (A.3) e (A.5) em (A.4) e manipulando esta expressão, chegar-se-á ao número de equipamentos falhados no instante $t = 0$, representada pela equação (A.6).

$$\lambda(0) = \frac{2 \cdot N_f(0)}{(2 \cdot N) - N_f(0)}$$

$$2 \cdot N \cdot \lambda(0) - N_f(0) \cdot \lambda(0) = 2 \cdot N_f(0)$$

$$2 \cdot N \cdot \lambda(0) = 2 \cdot N_f(0) + N_f(0) \cdot \lambda(0)$$

$$N_f(0) = \frac{2 \cdot N \cdot \lambda(0)}{2 + \lambda(0)} \quad (A-6)$$

Para $t = 1$ em diante tem-se que:

$$N_s(t) = N_s(t-1) - N_f(t-1). \quad (A-7)$$

Utilizando as equações (A.4) e (A.7) e manipulando-as, pode-se obter a expressão para o número de equipamentos falhados para todos os intervalos de tempo:

$$\lambda(t) = \frac{2 \cdot N_f(t)}{2 \cdot N_s(t) - N_f(t)}$$

$$\lambda(t) = \frac{2 \cdot N_f(t)}{2 \cdot (N_s(t-1) - N_f(t-1)) - N_f(t)}$$

$$2 \cdot (N_s(t-1) - N_f(t-1)) \cdot \lambda(t) - N_f(t) \cdot \lambda(t) = 2 \cdot N_f(t)$$

$$N_f(t) = \frac{2 \cdot \lambda(t) \cdot (N_s(t-1) - N_f(t-1))}{2 + \lambda(t)} \quad (A-8)$$

APÊNDICE B

ANÁLISE DA CONVEXIDADE DE FUNÇÕES

B.1 INTRODUÇÃO

Neste apêndice é apresentada a definição e a interpretação matemática de funções convexas [38], os quais serão úteis para o desenvolvimento da função-teste *IFR2*, que consiste em verificar se a função Risco de Falha Acumulada é convexa ou não, verificando a condição de convexidade em todos os pontos do histórico.

B.2 DEFINIÇÃO

Uma função é convexa quando:

$$f(\lambda \cdot t_1 + (1-\lambda) \cdot t_2) \leq \lambda \cdot f(t_1) + (1-\lambda) \cdot f(t_2)$$

para cada $t_1, t_2 \in \text{dominio}$ e $\lambda \in (0,1)$ (B-1)

B.3 INTERPRETAÇÃO GEOMÉTRICA DE FUNÇÕES CONVEXAS

Para uma função ser convexa, o valor da função nos pontos sobre o segmento de linha $\lambda \cdot t_1 + (1-\lambda) \cdot t_2$ deve ser menor ou igual a altura da corda unindo os pontos $[t_1, f(t_1)]$ e $[t_2, f(t_2)]$.

Um exemplo genérico de função convexa pode ser visualizado na Figura B-1.

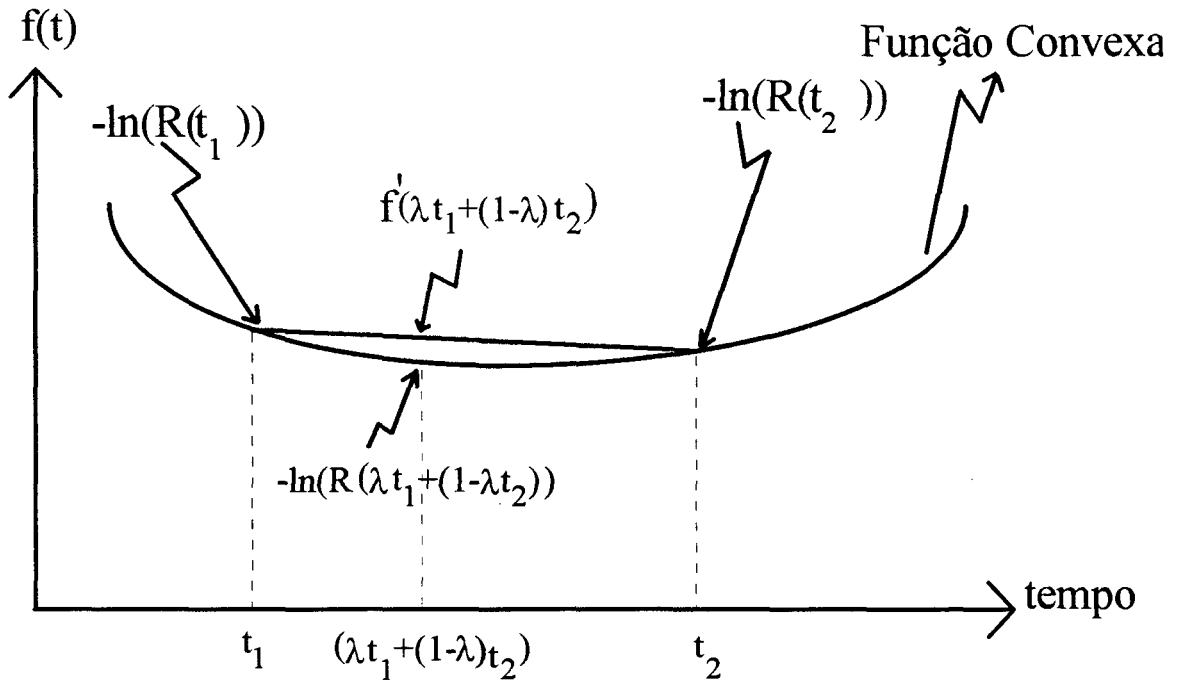


Figura B.1 -Exemplo genérico de Função Convexa

A definição é utilizada quando expressão da função f é conhecida e contínua em todo domínio de análise.

O interesse neste trabalho consiste em analisar e testar a convexidade da função $(-\ln(R(t)) \text{ versus } t)$ que é a expressão da Taxa de Risco Acumulada. Como não se dispõe da função continuamente, mas sim, em intervalos de tempo discretizados, adotou-se a interpretação geométrica de funções convexas, a fim de se obter uma rotina que teste a convexidade da função em todo o histórico de falhas..

Na implementação computacional foram utilizadas duas variáveis temporais discretas i e j (representadas por t_1 e t_2 na figura) para varrer todo o domínio de análise. Além disso, ainda é utilizada uma terceira variável k (representada por $\lambda \cdot t_1 + (1 - \lambda) \cdot t_2$ na figura) que percorre todos os pontos internos ao intervalo $[i, j]$.

Partindo da interpretação geométrica da função convexa, que diz que o valor da função nos pontos internos ao intervalo $[i, j]$ devem ser menores ou iguais à equação da reta que une i e j , no ponto k , fez-se o seguinte teste:

Se $(-\ln(R(k)) \leq Raux(k))$, onde $Raux(k)$, é o valor da equação da reta que une os pontos i e j , calculada para o ponto k , então a condição de convexidade é cumprida neste ponto. Senão, a função não satisfaz a condição de convexidade. Este processo é repetido para todo i e j do intervalo de análise. Se a condição for satisfeita para todo i e j a função é convexa em todo o intervalo. Caso contrário, identifica-se para quais intervalos de tempo a função é convexa.

Para determinar o valor de $Raux(k)$ no ponto k , é necessário obter a equação da reta que une os pontos i e j .

A equação pode ser obtida da seguinte forma:

$$\begin{cases} -\ln(R(j)) = A + B \cdot j \\ -\ln(R(i)) = A + B \cdot i \end{cases} \quad (B-2)$$

Desenvolvendo a equação B-2 para se obter o valor de A e B, tem-se:

$$\begin{aligned} \ln(R(i)) - \ln(R(j)) &= (j - i) \cdot B \\ B &= \frac{\ln(R(i)) - \ln(R(j))}{(j - i)} \end{aligned} \quad (B-3)$$

$$\begin{aligned} -\ln(R(j)) &= A + \frac{\ln(R(i)) - \ln(R(j))}{(j - i)} \cdot j \\ A &= -\ln(R(j)) + \frac{-\ln(R(i)) + \ln(R(j))}{(j - i)} \cdot j \end{aligned} \quad (B-4)$$

Manipulando os termos , obtém-se a seguinte expressão para $Raux(k)$:

$$Raux(k) = -\ln(R(j)) + \frac{[-\ln(R(i)) + \ln(R(j))]}{(j-i)} \cdot (k - j) \tag{B-5}$$

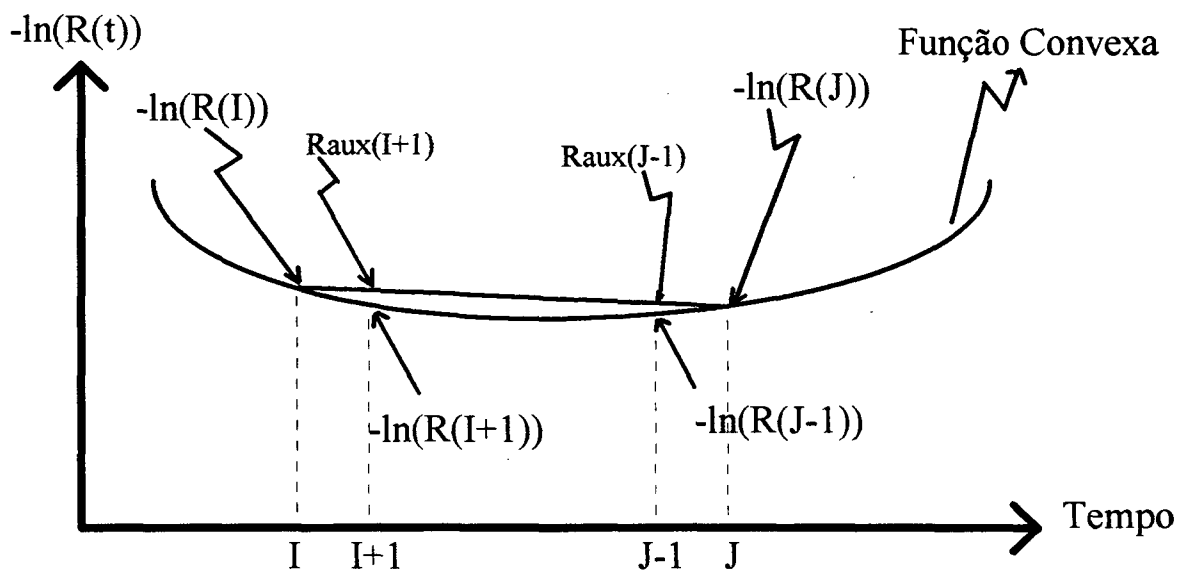


Figura B.2 - Função Convexa com um intervalo de teste genérico

A figura acima ilustra a metodologia de teste, mostrando uma função convexa com um intervalo genérico de teste, onde o valor da função Risco Acumulada ($-\ln(R(t))$), nos pontos interiores ao intervalo $[i, j]$, são menores que os valores da equação da reta gerada pela união dos pontos extremos do intervalo, nos respectivos pontos.

B.4 FLUXOGRAMA PARA TESTAR A CONVEXIDADE DA FUNÇÃO

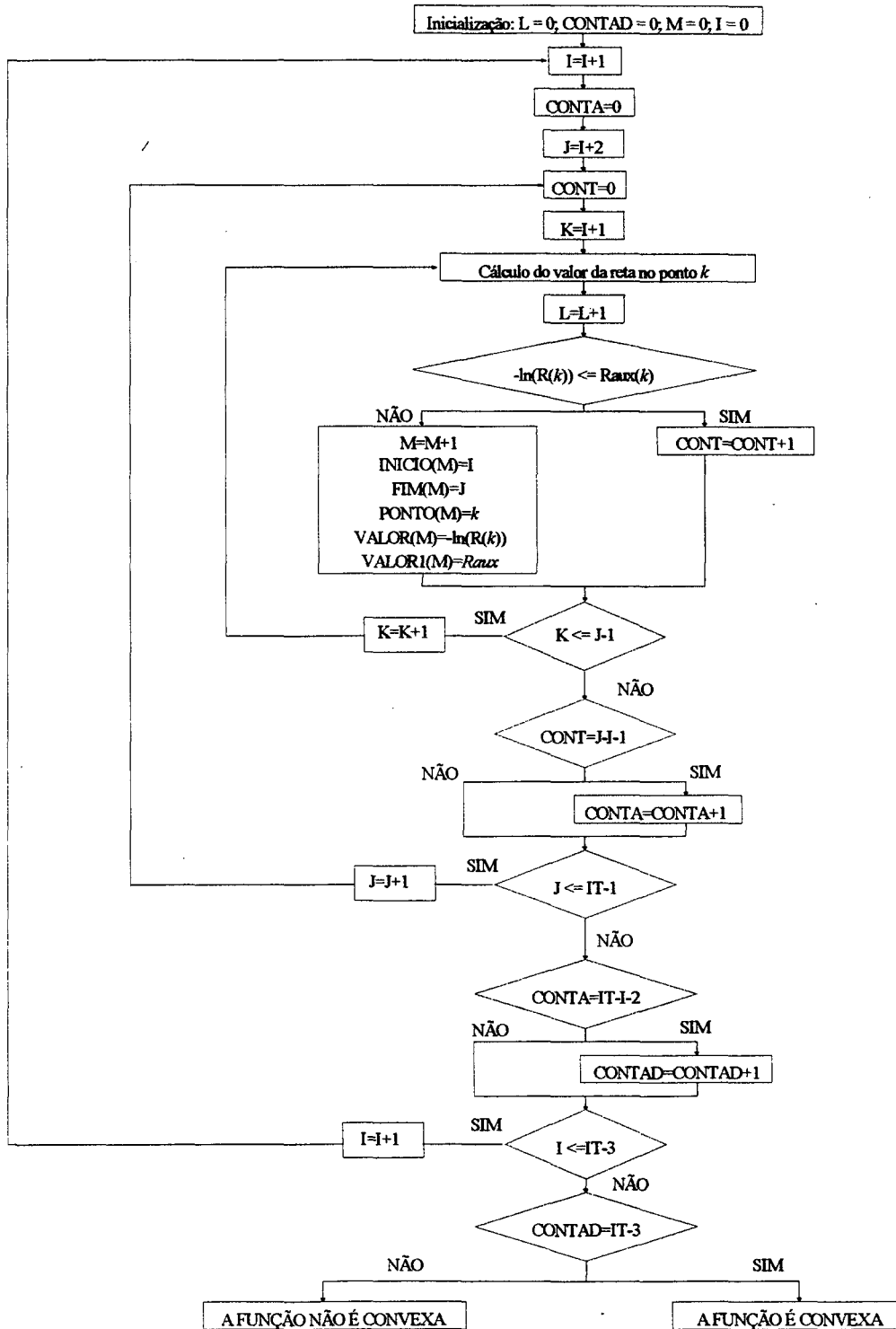


Figura B.3 - Fluxograma para Teste de Convexidade de Funções

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FONSECA, Jairo S. da; *et alii*. “Estatística Aplicada”. Editora Atlas, São Paulo, 1991.
- [2] THOMAS, D. W. *et alii*. “Statistical Quality Control”. June, 1967.
- [3] MONTANARI, G. C. & SIMONI, Luciano. “Aging Phenomenology and Modeling”. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, Nº 5, October, 1993, pp. 755-772.
- [4] NIXSON, J. M. “Avaliação da Vida Residual de Hidro-Geradores”. VI ERLAC, Foz do Iguaçu, Junho, 1995, pp. 1-5.
- [5] BATISTA, R. de Paula & MOTA, Antônio C. P. “Metodologia Empregada pela CEMIG no Controle da Vida Útil de Transformadores de Potência - Apresentação de um Exemplo Prático. Caso Transformadores da UHE São Simão”. VI Encontro Regional Latino-Americano da CIGRÉ. Foz do Iguaçu, Junho, 1995, pp. 1-5.
- [6] FRANCISCO, S. & AMARAL, José A. R. do. “Metodologia para Avaliação da Integridade e Extensão de Vida de Equipamentos Mecânicos.” XII SNPTEE, Recife, 1993, Grupo de Aspectos Técnicos e Gerenciais da Manutenção - GMA, pp. 1-5.
- [7] HARA, T. P.; *et alii*. “Avaliação do Tempo de Vida Restante das Unidades Geradoras da Usina GBM e Aspectos Técnicos e Econômicos”. VI Encontro Regional Latino-Americano da CIGRÉ. Foz do Iguaçu, Junho, 1995, pp. 1-3.
- [8] MAKI, J.; *et alii* “Dobrar a Vida Útil de Transformadores de Potência para 60 Anos”. VI Encontro Regional Latino-Americano da CIGRÉ. Foz do Iguaçu, Junho, 1995, pp. 1-5.
- [9] CAMARGO, C. Celso De B. “Confiabilidade Aplicada a Sistemas de potência Elétrica”. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1981.

- [10] BILLINTON R. & ALLAN R. N. "Reliability Evaluation of Engineering Systems - Concepts and Techniques". Pitman Books, 1983.
- [11] GUESS, F. M. & PARK Dong Ho. "Modeling Discrete Bathtub and Upside-Down Bathtub Mean Residual-Life Functions". IEEE Transactions on Reliability, Vol. 37, Nº 5, December, 1988, pp. 545-549.
- [12] SMITH, R. W. & DIETRICH, D. L.. "The Bathtub Curve: An Alternative Explanation". 1994 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.338-341
- [13] MI, J. "Bathtub Failure Rate and Upside-Down Bathtub Mean Residual Life". IEEE Transactions on Reliability, Vol. 44, Nº 3, September, 1995.
- [14] DHILLON, Balbir S. "Life Distributions". IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-30, Nº 5, December, 1981, pp. 457-460.
- [15] DHILLON, Balbir S. "Reliability Engineering in Systems Design and Operation". Van Nostrand Reinhold Company, 1983.
- [16] SCHILLING, Marcos T. "Aspectos da Confiabilidade de Sistemas Eletroenergéticos". Tese de Doutorado - COPEE/UFRJ, Rio de Janeiro, Dezembro, 1985.
- [17] DUCKETT, D. A. & McDONOUGH, C. M. "Deciding Whether to Replace or Refurbish a Transformer". Power Technology International, 1991, pp.175-179.
- [18] CHAN, Jack Kang & SHAW, Leonard. "Modeling Repairable Systems with Failure Rates that Depend on Age & Maintenance". IEEE Transactions on Reliability, Vol. 42, Nº 4, December, 1993, pp. 566-571.
- [19] COELHO, Jorge & GUTIERREZ, Ricardo. "Determinação Probabilística do Estoque de Manutenção de Transformadores de Distribuição". XII SENDI, Recife, 1994.

- [20] COELHO, Jorge. "Graphical Analysis of Time Varying Failure Indices of Distribution Transformers". Probabilistic Methods Applied to Power Systems - PMAPS, Rio de Janeiro, Setembro, 1994, pp. 85-90.
- [21] DEKKER, R. "On the Use of Operations Research Models for Maintenance Decision Making". Microeletronic Reliability, Vol. 35, Nº 9-10, pp. 1321-1331, 1995.
- [22] BERGMAN, Bo & KLEFSÖ, B. "A Graphical Method Applicable to Age-Replacement Problems". IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-31, Nº 5, December, 1982, pp. 478-480.
- [23] PARK, Kyung S.. "Optimal Continuous-Wear Limit Replacement under Periodic Inspections". IEEE Transactions on Reliability, Vol. 37, Nº 1, April, 1988, pp. 97-102.
- [24] DESPHANDE, J. V. & SINGH, H.. "Optimal Replacement of Improving & Deteriorating Repairable Systems". IEEE Transactions on Reliability, Vol. 44, Nº 3, September, 1995, pp. 500-504.
- [25] BEICHEL, Frank. "A Replacement Policy Based on Limits for the Repair Cost Rate". IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-31, Nº 4, October, 1982, pp. 401-402.
- [26] COSTA, Andréa L. "Determinação Ótima do Intervalo entre Manutenções Preventivas de Equipamentos Elétricos". Tese de Mestrado - Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSC, Florianópolis, Setembro, 1995.
- [27] MURRY, R. J. & MITCHELL, B. F.. "Cost Savings a Practical Predictive-Maintenance Program". 1994 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.206-209.
- [28] ROY, Dilip & GUPTA, R. P. "Classifications of Discrete Lives". Microeletronic Reliability, Vol 32, Nº 10, pp. 1459-1473, 1992.

- [29] LAI, C. D. "Test of Univariate & Bivariate Stochastic Ageing". IEEE Transactions on Reliability, Vol. 43, Nº 2, June, 1994, pp. 233-241.
- [30] EBRAHIMI, Nader. "Two New Replacement Policies". IEEE Transactions on Reliability, Vol. 42, Nº 1, March, 1993, pp. 141-147.
- [31] ROJO, J.. "Characterization of Some Concepts of Aging", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 44, Nº 2, 1995 June, pp. 285-290.
- [32] BAGAI, I. & JAIN, K. "Improvement, Deterioration, and Optimal Replacement under Age- Replacement with Minimal Repair", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 43, Nº 1, March, 1994.
- [33] SENGUPTA, D. *et alii*. "Reliability Bounds and Other Inequalities for Discrete Life Distributions". Microeletronic Reliability, Vol. 35, Nº 12, pp. 1473-1478, 1995.
- [34] LIM, J. H. & PARK, D. H.. "Trend Change in Mean Residual Life". IEEE Transactions on Reliability, Vol. 44, Nº 2, June, 1995.
- [35] HONZENG, Z. & YI, W. W. "The NBEFR and NWEFR Classes of Life Distributions". Microeletronic Reliability, Vol 37, Nº 6, pp. 919-922, 1997.
- [36] EBRAHIMI, N. "Engineering Notion of Mean-Residual-Life & Hazard-Rate for Finite Populations with Known Distributions". IEEE Transactions on Reliability, Vol. 45, Nº 3, September , 1996, pp. 362-367.
- [37] BARLOW Richard E. & PROSCHAN Frank. "Statistical Theory of Reliability and Life Testing". To Begin To, 1981.
- [38] BAZARAA M. S. & SHETTY, C. M.. "Nonlinear Programming - Theory and Algorithms". John Wiley & Sons, 1979.

- [39] “Índice de Avarias de Transformadores - Análises por Períodos”. Relatório Interno Nº 01, PET-EEL/GPSE, Florianópolis, 1993.
- [40] HENZ, Leandro & COELHO, Jorge. “Testes para Caracterização do Envelhecimento de Equipamentos”. XIV SNPTEE, Belém, Outubro, 1997, Grupo de Estudo de Equipamentos Elétricos e Materiais de Subestação - GEM, pp. 1-6.