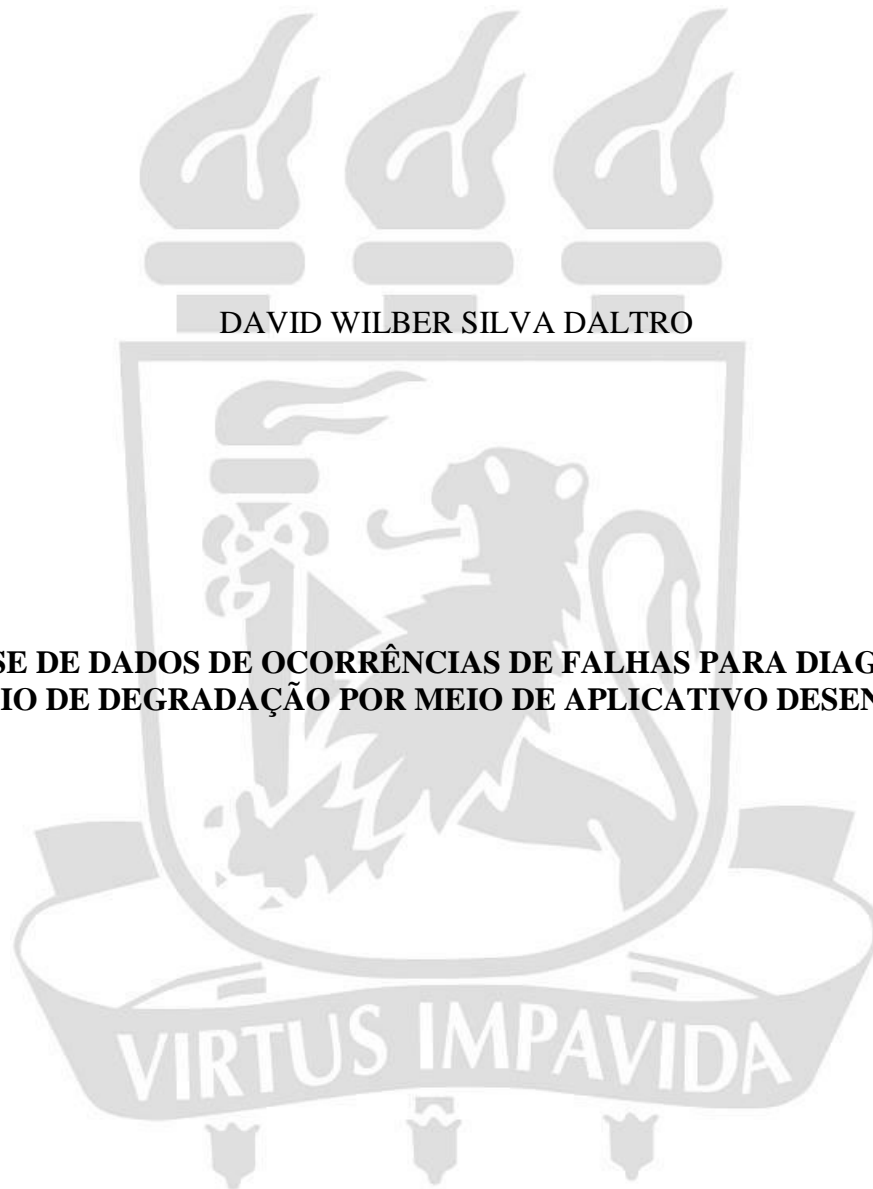


UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



DAVID WILBER SILVA DALTRO

**ANÁLISE DE DADOS DE OCORRÊNCIAS DE FALHAS PARA DIAGNÓSTICO
DE INÍCIO DE DEGRADAÇÃO POR MEIO DE APLICATIVO DESENVOLVIDO**

Recife
2017

DAVID WILBER SILVA DALTRO

**ANÁLISE DE DADOS DE OCORRÊNCIAS DE FALHAS PARA DIAGNÓSTICO
DE INÍCIO DE DEGRADAÇÃO POR MEIO DE APLICATIVO DESENVOLVIDO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador: Prof. Dr. Cícero Mariano Pires dos Santos

Recife
2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

D152a Daltro, David Wilber Silva.

Análise de dados de ocorrências de falhas para diagnóstico de início de degradação por meio de aplicativo desenvolvido / David Wilber Silva Daltro. - 2017.

139 folhas, il., tab., abr. sigl.

Orientador: Prof. Dr. Cícero Mariano Pires dos Santos.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.

Inclui Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Degradação. 3. Envelhecimento. 4. Deterioração.
5. *Weibull*. 6. JAVA. I. Santos, Cícero Mariano Pires dos (Orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-164



Universidade Federal de Pernambuco
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

DAVID WILBER SILVA DALTRO

TÍTULO

**“ANÁLISE DE DADOS DE OCORRÊNCIAS DE FALHAS
PARA DIAGNÓSTICO DE INÍCIO DE DEGRADAÇÃO
POR MEIO DE APLICATIVO DESENVOLVIDO”**

A comissão examinadora composta pelos professores: CÍCERO MARIANO PIRES DOS SANTOS, DEE/UFPE; RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO, DEE/UFPE, e ANDRÉ MARQUES CAVALCANTI, DCA/UFPE, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **DAVID WILBER SILVA DALTRO APROVADO.**

Recife, 20 de dezembro de 2017.

MARCELO CABRAL CAVALCANTI
Coordenador do PPGEE

CÍCERO MARIANO PIRES DOS SANTOS
Orientador e Membro Titular Interno

ANDRÉ MARQUES CAVALCANTI
Membro Titular Externo

RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO
Membro Titular Interno

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter guiado meu caminho, concedendo sabedoria e sempre me dando força nas horas de necessidade.

Agradeço a minha família, que sempre posso contar em qualquer situação, seja ela boa ou ruim, sendo um recanto de conforto para mim.

Agradeço a minha namorada, por sempre me encorajar a dar o meu melhor, confiar em minha capacidade e nunca desistir.

Agradeço ao meu orientador Prof. Cícero Mariano Pires dos Santos pela paciência e todos ensinamentos passados, sempre confiando em meu potencial, sempre com uma resposta confortante, sendo mais do que um orientador, um amigo.

Agradeço aos professores André Marques Cavalcanti e Ronaldo Ribeiro de Aquino pelas pertinentes sugestões visando a melhoria da dissertação.

Agradeço aos meus amigos, os quais posso contar em qualquer ocasião, em especial a Natanael Souza dos Santos, que prestou auxílio no aprendizado em JAVA e na programação do aplicativo.

Agradeço ao apoio financeiro oferecido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), apoio que foi de grande importância.

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente com a produção deste documento.

*“Nossas virtudes e nossos defeitos são inseparáveis, assim como a força e a matéria.
Quando se separados, o homem deixa de existir”.*

(Nikola Tesla)

RESUMO

Esta dissertação formula uma proposta metodológica para identificação do processo de degradação de itens, fundamentada em pesquisa bibliográfica e através de inovações que foram adicionadas por meio de adequadas funções-teste, e explorando devidamente o uso de cartas de controle, como ferramenta auxiliar. A dissertação estabelecerá tal metodologia com aperfeiçoamentos, considerando as pesquisas bibliográfica realizadas. Com a metodologia devidamente apresentada e definida, foi desenvolvido um aplicativo, em linguagem de programação JAVA, que faz aplicação da mesma, gerando resultados, gráficos e numéricos, que indicam o período em que o item analisado entra no processo de envelhecimento (degradação), fazendo uso de dados de campo de unidades geradoras de energia elétrica, resultado de pesquisa de campo, adequadamente realizada e analisada. A utilização dos resultados, apresentados pelo aplicativo, possibilitara a formulação de proposta de estratégia de manutenção, baseada na condição, presente na literatura, e assim, conseqüentemente, possibilitando as pertinentes análises de vantagens e desvantagens no uso das novas estratégias.

Palavras-chave: Degradação. Envelhecimento. Deterioração. Weibull. JAVA.

ABSTRACT

This dissertation formulates a methodological proposal to identify the process of item degradation, based on bibliographic research and through innovations that have been added through adequate test functions, and properly exploiting the use of control charts as an auxiliary tool. The dissertation will establish such methodology with improvements, considering the bibliographical research carried out. With the methodology properly presented and defined, an application was developed, in JAVA programming language, that makes application of the same, generating results, graphical and numerical, that indicate the period in which the analyzed item starts the process of aging (degradation), making use of field data of electric power generating units, field research results, properly performed and analyzed. The use of the results, presented by the application, will allow the formulation of a proposal of maintenance strategy, based on the condition, present in the literature, and, consequently, enabling the pertinent analysis of advantages and disadvantages in the use of the new strategies.

Keywords: Degradation. Aging. Deterioration. Weibull. JAVA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico Exemplo de uma Função Distribuição de Probabilidade Contínua.	24
Figura 2 - Gráfico Exemplo de uma Função Densidade de Probabilidade Contínua Normal.	26
Figura 3 - Diagrama Simplificado de Atividade de um Item.	28
Figura 4 - Relação Complementar Entre $Q(t)$ e $R(t)$	30
Figura 5 - Função Densidade de Probabilidade Exponencial para Três Diferentes Parâmetros.	33
Figura 6 - Função Distribuição Acumulada Exponencial para Três Diferentes Parâmetros.	34
Figura 7 - Função Densidade de Probabilidade Weibull para Três Diferentes Conjuntos de Parâmetros.	35
Figura 8 - Função Distribuição Acumulada Weibull para Três Diferentes Conjuntos de Parâmetros.	35
Figura 9 - Exemplo Gráfico da Taxa de Falhas sem a Utilização de Agrupamento das Falhas.	38
Figura 10 - Exemplo Gráfico da Taxa de Falhas com a Utilização de Agrupamento das Falhas $n=2$	39
Figura 11 - Esquema Gráfico de Cálculo dos Termos do Somatório no Expoente da Eq. (2.43), Representados por Cálculo de Área.	40
Figura 12 - Ilustração do Cálculo do Expoente da Eq. (43).	41
Figura 13 - Ilustração do Cálculo do Expoente da Eq. (44).	42
Figura 14 - Gráfico da Confiabilidade do Item ao Longo do Tempo.	43
Figura 15 - Gráfico da Taxa de Falhas do Lote de 40 Itens.	45
Figura 16 - Gráfico da Confiabilidade do Lote de 40 Itens.	46
Figura 17 - Curva da Banheira.	50
Figura 18 - Cadeia de Implicações das Classes de Funções com Características de Envelhecimento.	54
Figura 19 - Descrição de Cada Variável no Gráfico de Taxa de Falhas.	55
Figura 20 - Descrição de Cada Variável no Gráfico de Confiabilidade.	56
Figura 21 - Ilustração Geométrica da Definição de Função Convexa.	58
Figura 22 - Comparação entre a Função $-\ln(R(t))$ com a Função da Reta entre os Pontos.	60
Figura 23 - Exemplo Genérico de uma Carta de Controle.	74
Figura 24 - Principais Padrões de Tendências Possíveis em uma Carta de Controle.	75
Figura 25 - Exemplo de pontos fora dos limites.	76
Figura 26 - Nove Pontos Consecutivos Incidindo no Lado Superior da Carta de Controle.	77
Figura 27 - Dez de Onze Pontos Consecutivos Incidindo do Mesmo Lado da Carta De Controle.	77
Figura 28 - Dois entre Três Pontos Consecutivos Incidindo Além das Linhas.	78
Figura 29 - Gráfico da Taxa de Falhas para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=1,2$ e $\eta=1$	80
Figura 30 - Gráfico da Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=1,2$ e $\eta=1$	80
Figura 31 - Gráfico da Taxa de Falhas para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=0,8$ e $\eta=1$	82
Figura 32 - Gráfico da Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=0,8$ e $\eta=1$	83
Figura 33 - Gráfico da Vida Residual Média para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=0,8$ e $\eta=1$	84

Figura 34 - Gráfico da Taxa de Falhas para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=1$ e $\eta=1$.	85
Figura 35 - Gráfico da Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=1$ e $\eta=1$.	85
Figura 36 - Gráfico da Vida Residual Média para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=1$ e $\eta=1$.	87
Figura 37 - Fluxograma Completo da Metodologia.	88
Figura 38 - Interface do Aplicativo Identificador de Degradação.	89
Figura 39 - Exemplo do Formato da Entrada de Dados em Formato de Datas, para um Único Equipamento (arquivo txt).	91
Figura 40 - Exemplo do Formato da Entrada de Dados em Formato de TBFs, para um Único Equipamento (arquivo txt).	91
Figura 41 - Exemplo do Formato da Entrada de Dados de um Conjunto de Equipamentos (arquivo txt).	92
Figura 42 - Testes para Classes de Funções com Características de Envelhecimento para o lote da Tabela 2.6.	93
Figura 43 - Gráfico de Taxa de Falhas Gerado pelo Aplicativo a Partir dos Dados do Lote da Tabela 2.6.	93
Figura 44 - Gráfico da Confiabilidade Gerado pelo Aplicativo a Partir dos Dados do Lote da Tabela 2.6.	94
Figura 45 - Gráfico de Falhas Acumuladas Gerado pelo Aplicativo a Partir dos Dados do Lote da Tabela 2.6.	94
Figura 46 - Exemplo de Visualização de uma Carta de Controle no Aplicativo.	95
Figura 47 - Exemplo de Visualização de um Gráfico de Taxa de Falha Anual.	96
Figura 48 - Exemplo Genérico do Efeito de Suavização por Médias Móveis Simples com $k = 3$.	96
Figura 49 - Resultados dos TIDs das Classes para Máquina 1.	100
Figura 50 - Aplicação da Carta de Controle para os Dados da Máquina 1.	101
Figura 51 - Gráfico de Número de Falhas Acumuladas para Máquina 1.	101
Figura 52 - Resultados dos TIDs das Classes para Máquina 2.	103
Figura 53 - Aplicação da Carta de Controle para os Dados da Máquina 2.	103
Figura 54 - Gráfico de Número de Falhas Acumuladas para Máquina 2.	104
Figura 55 - Resultados dos TIDs das Classes para Máquina 3.	105
Figura 56 - Aplicação da Carta de Controle para os Dados da Máquina 3.	106
Figura 57 - Gráfico de Número de Falhas Acumuladas para Máquina 3.	106
Figura 58 - Resultados dos TIDs das Classes para Máquina A.	110
Figura 59 - Aplicação da Carta de Controle para os Dados da Máquina A.	110
Figura 60 - Gráfico de Número de Falhas Acumuladas para Máquina A.	111
Figura 61 - Gráfico de Taxa de Falha Anual da Máquina A.	111
Figura 62 - Resultados dos TIDs das Classes para Máquina B.	112
Figura 63 - Aplicação da Carta de Controle para os Dados da Máquina B.	113
Figura 64 - Gráfico de Número de Falhas Acumuladas para Máquina B.	113
Figura 65 - Gráfico de Taxa de Falha Anual da Máquina B.	114
Figura 66 - Ponto para Mudança na Política de Manutenção.	115
Figura 67 - Comportamento da Confiabilidade de Acordo com o Tipo de Manutenção Realizada.	117
Figura 68 - Reparo Mínimo, Imperfeito e Perfeito versus Mudanças na Taxa de Falhas.	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempos de Falha em Horas de um Único Equipamento.	37
Tabela 2 - Taxa de Falhas do Mesmo Equipamento.	38
Tabela 3 - Taxa de Falhas para um Único Equipamento com um Agrupamento de $n=2$	39
Tabela 4 - Informações Completas Sobre o Item.	42
Tabela 5 - Comparação entre os Resultados de $R(t)$ Calculados pela Equação Antiga e pela Equação Nova.	43
Tabela 6 - Tempo de Falha de Cada um dos Itens em um Lote de 40.	44
Tabela 7 - Informações Calculadas pela Análise dos Tempos de Falhas do Lote.	45
Tabela 8 - Analogia saúde humana x máquina.	49
Tabela 10 - Classes de Funções de Envelhecimento, seus Acrônimos e Principais Referências.	53
Tabela 11 - Dados Genéricos de Falhas de um Único Equipamento.	54
Tabela 12 - Dados Calculados a Partir dos Dados de Falhas de um Único Equipamento. .	55
Tabela 13 - Valores da Taxa de Falha e Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de $\beta=1,2$ e $\eta=1$	79
Tabela 14 - Teste das Classes para Presença de Envelhecimento para Distribuição Weibull $\beta=1,2$ e $\eta=1$	81
Tabela 15 - Valores da Taxa de Falha e Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de $\beta=0,8$ e $\eta=1$	82
Tabela 16 - Teste das Classes para Presença de Envelhecimento para Distribuição Weibull $\beta=0,8$ e $\eta=1$	83
Tabela 17 - Valores da Taxa de Falha e Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de $\beta=1$ e $\eta=1$	84
Tabela 18 - Valores da Taxa de Falha e Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de $\beta=1$ e $\eta=1$	86
Tabela 19 - Dados de TBF (dias) da Máquina 1.	98
Tabela 20 - Dados de TBF (dias) da Máquina 2.	99
Tabela 21 - Dados de TBF (dias) da Máquina 3.	99
Tabela 22 - Dados de TBF (horas) da Máquina A.	108
Tabela 23 - Dados de TBF (horas) da Máquina B.	109
Tabela 24 - Principais Políticas de MP Dependentes da Idade, suas Referências e Características.	120
Tabela 25 - Principais Políticas de MP Periódicas, suas Referências e Características. ...	121
Tabela 26 - Principais Políticas de Limite de Falhas, suas Referências e Características. ...	122
Tabela 27 - Principais Políticas de MP Sequencial, suas Referências e Características. ...	123
Tabela 28 - Principais Políticas de Limites de Reparos, suas Referências e Características.	124
Tabela 29 - Principais Políticas de Contagem de Número de Reparos e Tempo de Referência, suas Referências e Características.	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TID	Tempo até Início da Degradação
IFR	Increasing Failure Rate
IFRA	Increasing Failure Rate Average
NBU	New Better than Used
NBUE	New Better than Used in Expectation
NBUC	New Better than Used in Convex ordering
NBUF	New Better than Used in Failure Rate
HNBU	Harmonically New Better than Used in Expectation
DMRL	Decreasing Mean Residual Life
NBUFRA	New Better than Used in Failure Rate Average
NBAFR	New Better than Average Failure Rate
NBWUE	New Better then Worse than Used in Expectation
MP	Manutenção Preventiva
MC	Manutenção Corretiva
TTR	Time To Repair (Tempo Para Reparo)
TTF	Time To Failure (Tempo Para Falhar)
TBF	Time Between Failures (Tempo Entre Falhas)
MTTR	Mean Time To Repair (Tempo Médio Para Reparo)
MTTF	Mean Time To Failure (Tempo Médio Para Falhar)
MTBF	Mean Time Between Failures (Tempo Médio Entre Falhas)
CC	Carta de Controle
IDeg	Identificador de Degradação (Aplicativo)
RCM	Reliability Centered Maintenance (Manutenção Centrada na Confiabilidade)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2	OBJETIVO	16
1.3	MOTIVAÇÃO.....	16
1.4	ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL DA DISSERTAÇÃO	17
2	REVISÃO MATEMÁTICA E CONCEITUAL	20
2.1	INTRODUÇÃO A CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE.....	20
2.2	A MATEMÁTICA DA MANUTENÇÃO	21
2.2.1	Variável Aleatória	21
2.2.2	Probabilidade	22
2.2.3	Distribuições Discretas	22
2.2.3.1	Função Massa de Probabilidade	23
2.2.4	Distribuições Contínuas	23
2.2.4.1	Função Distribuição de Probabilidade.....	24
2.2.4.2	Função Densidade de Probabilidade.....	25
2.2.5	Tipos de Distribuições de Probabilidade Discretas	26
2.2.6	Tipos de Distribuições de Probabilidade Contínuas	27
2.2.7	Conceitos e Funções de Interesse	27
2.2.7.1	Distribuição Exponencial	32
2.2.7.2	Distribuição Weibull.....	34
2.2.7.3	Equipamento Único	36
2.2.7.4	Conjunto de Equipamentos.....	44
2.3	TERMOS E DEFINIÇÕES	46
2.3.1	Defeito	46
2.3.2	Falha	47
2.3.3	Pane	47
2.3.4	Disponibilidade	47
2.3.5	Taxa de Falha	48
3	O FENÔMENO DEGRADAÇÃO	49
4	FUNÇÕES COM CARACTERÍSTICAS DE ENVELHECIMENTO	53
4.1	IFR	57
4.1.1	IFR Tipo 1 (IFR1)	57

4.1.2	IFR Tipo 2 (IFR2)	58
4.1.3	IFR Tipo 3 (IFR3)	61
4.1.4	IFR Tipo 4 (IFR4)	61
4.2	IFRA	62
4.2.1	IFRA Tipo 1 (IFRA1)	62
4.2.2	IFRA Tipo 2 (IFRA2)	63
4.3	NBU.....	63
4.4	NBUE	64
4.4.1	NBUE Tipo 1 (NBUE1)	64
4.4.2	NBUE Tipo 2 (NBUE2)	65
4.5	NBUFR.....	66
4.6	DMRL.....	66
4.6.1	DMRL Tipo 1 (DMRL1)	66
4.6.2	DMRL Tipo 2 (DMRL2)	67
4.7	HNBUE	68
4.8	NBAFR	69
5	PREPARO E FILTRAGEM DE DADOS	70
5.1	SUAVIZAÇÃO POR MÉDIAS MÓVEIS.....	70
5.1.1	Médias Móveis Simples (SMA)	71
5.1.2	Médias Móveis Exponenciais (EMA)	71
5.2	CARTAS DE CONTROLE.....	73
5.2.1	Tendências	75
5.2.2	Regras	75
5.2.2.1	Ponto Fora dos Limites Máximo e Mínimo	75
5.2.2.2	Sequencias	76
5.2.2.3	Análise de Setores	78
6	A METODOLOGIA	79
6.1	COMPROVAÇÃO DA METODOLOGIA.....	79
6.2	ALGORITMO DA METODOLOGIA	87
7	O APLICATIVO	89
8	RESULTADOS OBTIDOS	98
8.1	PRIMEIRO CASO: GERADORES TÉRMICOS	98
8.1.1	Gerador Térmico 1	100
8.1.2	Gerador Térmico 2	102

8.1.3	Gerador Térmico 3	105
8.2	SEGUNDO CASO: MÁQUINAS ELÉTRICAS	107
8.2.1	Máquina A	109
8.2.2	Máquina B	112
9	APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO BASEADA NA CONDIÇÃO	115
9.1	POLÍTICA DE MP DEPENDENTE DA IDADE	119
9.2	POLÍTICA DE MP PERIÓDICA	120
9.3	POLÍTICA DE LIMITE DE FALHAS	121
9.4	POLÍTICA DE MP SEQUENCIAL	122
9.5	POLÍTICA DE LIMITE DE REPAROS	123
9.6	POLÍTICA DE CONTAGEM DE NÚMERO DE REPAROS E TEMPO DE REFERÊNCIA	124
9.7	SUGESTÕES DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PARA DEGRADAÇÃO	125
9.7.1	Itens Reparáveis	126
9.7.2	Itens Não-Reparáveis	126
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
11	CONCLUSÃO	129
	REFERÊNCIAS	131

1 INTRODUÇÃO

O atual capítulo apresenta as considerações iniciais, a contribuição desta dissertação e uma breve descrição da organização do texto.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Degradação é algo inerente à vida de qualquer equipamento ou produto. Um item sujeito a um nível relativamente elevado de degradação tende a falhar com mais frequência. O que precisa de atenção é o fato de que a degradação pode ser acelerada de acordo com fatores externos como, por exemplo, umidade, vibração e temperatura, sendo assim, um mesmo item submetido à mesma tarefa e em ambientes diferentes apresentam taxas de degradação também diferentes. A questão é: Como identificar que um item já está em um nível considerável de degradação, visto que nem todos itens degradados apresentam características visuais.

De acordo com JIANG (2011), existe um tempo no qual a taxa de degradação muda rapidamente. Tal ponto foi, aqui nomeado, de Tempo até Início da Degradação (TID). É útil identificar tal ponto, uma vez que a probabilidade de uma falha funcional ocorrer irá prontamente aumentar após o item ser utilizado além do ponto de mudança.

Existem alguns meios de se identificar o ponto de mudança da degradação, a maioria baseado na adaptação das curvas construídas, a partir dos dados de eventos de falha, em distribuições de probabilidade conhecidas, como Exponencial e Weibull. E também existem outras formas, como a utilizada por SCHILLING et al (1988), que apresenta uma metodologia baseada em testes estatísticos não-paramétricos de MANN (1945) para detecção de tendências, ou a utilizada por HENZ (1997), que emprega a comparação estatístico-matemática da curva construída com funções que apresentam propriedades de degradação. Um estudo aprofundado sobre vantagens e características da estatística não-paramétrica pode ser conferido em KVAM & VIDAKOVIC (2007).

1.2 OBJETIVO

É visada uma abordagem alternativa de se encontrar o Tempo até Início da Degradação, ou TID, onde se utilizam testes estatísticos que realiza a comparação da função gerada pelos dados com diferentes classes de funções que incorporam características de envelhecimento, com a finalidade identificar o tempo em que ocorre o aumento da taxa de falhas.

O tempo estimado até ocorrer o início do processo de degradação, como dito anteriormente, será chamado de Tempo até Início da Degradação (TID), que é onde ocorre o ponto de mudança de degradação. Para encontra-lo, serão utilizadas comparações matemáticas com as funções distribuição como as citadas em LAI & XIE (2006), que são: IFR, IFRA, NBU, NBUE, NBUFR, HNBUE, DMRL e NBUFRA (NBAFR). Cada comparação irá gerar um TID do item em questão que depende da lógica matemática caracterizada por cada função.

Em suma, a dissertação visa desenvolver uma metodologia para estimar o período a partir do qual determinado item entra no estado de velhice, do ponto de vista da degradação/desempenho, e então sugerir o que deve ser feito em relação a isso, como por exemplo, a implementação de uma política de manutenção baseada na condição.

1.3 MOTIVAÇÃO

Com o atual cenário da economia e da busca pelo aumento de competitividade, cortes de gastos são cada vez mais cobijados pelas empresas. Como dito por NUDURUPATI et al (2010), as empresas estão enfrentando desafios para ter sucesso no mercado competitivo. A demanda dos clientes está mudando em termos de sofisticação dos produtos e serviços de que necessitam. Como resultado, as empresas precisam se tornar mais responsivas aos clientes e as necessidades do mercado, com um maior número de produtos e / ou serviços, processos mais flexíveis, enquanto reduz custos. Ainda segundo NUDURUPATI et al (2010), a manutenção é uma ação responsável por considerável demanda de custos, e, devido a isto, as empresas costumam vê-la como uma vilã, um mal necessário na produção. Claramente trata-se de uma visão errônea, que enquanto for encarada de tal maneira, a mesma não poderá ser utilizada em prol da correção de erros e melhoria na própria produção.

1.4 ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em oito capítulos, conforme é descrito a seguir:

Capítulo 1 – *Introdução:*

Apresenta uma breve apresentação do trabalho, falando sobre seu objetivo, motivação e organização.

Capítulo 2 – *Revisão Matemática e Conceitual:*

Uma apresentação das ferramentas conceituais utilizadas para definir os principais conceitos, termos e ferramentas matemáticas da manutenibilidade e confiabilidade, ambas fortemente interligadas ao estudo da degradação. Contém também uma breve revisão da teoria da probabilidade, distribuições de probabilidade e outros conceitos matemáticos necessários para o entendimento das equações utilizadas.

Capítulo 3 – *O Fenômeno Degradação:*

Um capítulo que fala sobre o que é a degradação e suas formas de se manifestar. Contendo análises feitas por diversas literaturas de diferentes autores, com o intuito de explicar a importância da consideração da análise de degradação no escopo corporativo.

Capítulo 4 – *Funções com Características de Envelhecimento:*

Capítulo contendo a descrição e definição das funções-testes apresentadas nesse documento, sendo estas IFR, IFRA, NBU, NBUE, NBUFR, HNBUE, DMRL, NBUFRA (NBAFR), utilizadas na metodologia apresentada.

Capítulo 5 – *Preparo e Filtragem de Dados:*

Introdução as cartas de controle e a suavização por médias móveis simples e médias móveis exponenciais. Mostra a teoria e a matemática por trás das ferramentas e alguns exemplos de utilização em aplicações.

Capítulo 6 – A Metodologia:

O desenvolvimento da metodologia em si está contido nesse capítulo, apresentando a validação da mesma, através da aplicação em bancos de dados os quais se conhece o comportamento. Em seguida, é apresentada a hierarquia da metodologia em um fluxograma completo.

Capítulo 7 – O Aplicativo:

Capítulo que visa a aplicação da metodologia em dados de campo reais, chegando a uma conclusão sobre a degradação apresentada junto com os respectivos TIDs (Tempo até Início da Degradação).

Capítulo 8 – Resultados Obtidos:

Destina-se a mostrar a funcionalidade e eficiência da metodologia e do aplicativo, analisando dados de situações reais de equipamentos apresentando degradação.

Capítulo 9 – Aplicação da Manutenção Baseada na Condição:

Após o resultado da metodologia, é necessária uma mudança no esquema de manutenção adotado. Tal capítulo contém a apresentação de políticas de manutenção pesquisadas na literatura e, baseado nisso, a sugestão de implementação de uma política de manutenção baseada na condição de degradação.

Capítulo 10 – Considerações Finais:

Capítulo que apresenta algumas considerações finais em relação a aplicação da metodologia e utilização do aplicativo, acompanhado de algumas sugestões para futuros trabalhos.

Conclusão:

Por fim um capítulo apresentando conclusões acerca da dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO MATEMÁTICA E CONCEITUAL

Antes de falar sobre a degradação, é necessário introduzir alguns conceitos, como Confiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade e Taxa de Falhas, assim como algumas expressões e termos matemáticos.

2.1 INTRODUÇÃO A CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE

A maioria dos processos produtivos, seja de bens ou serviços, é necessária uma operação prolongada ou até mesmo contínua de seus itens responsáveis pela entrega do produto final. Assim, é desejado que o sistema cumpra o papel que lhe é designado durante o período em que seja requisitado, pois, na ocorrência de falhas, poderão acarretar-se danos cujas consequências possam ocasionar significativos prejuízos, podendo inclusive colocar em risco a vida humana.

Sendo assim, é necessária uma garantia de que tal item irá desempenhar sua(s) tarefa(s) na forma requisitada e durante o tempo necessário. Essa garantia existe em forma de medida e é conhecida como confiabilidade.

Segundo KARDEC & NASCIF (2010), o termo confiabilidade, na manutenção, surgiu na década de 50, nos Estados Unidos, devido à análise de falhas nos equipamentos de uso militar. Já na década de 60, foi criado um grupo de estudo e desenvolvimento de confiabilidade, voltado para a indústria aeronáutica. O grupo chegou à conclusão de que, para muitos itens, a prática da manutenção preventiva não era eficaz e que se um item não possuía um certo modo de falha dominante e específico, as revisões periódicas não aumentariam muito o nível de confiabilidade. Tais conclusões provocaram uma mudança nos procedimentos que estavam em vigor até então e deram início à importância do emprego da palavra confiabilidade na indústria.

Em conformidade com a NBR 5462 (1994) confiabilidade deve ser entendida como “Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.”

Em outras palavras, confiabilidade expressa a confiança de que um item irá cumprir, sem falhas, uma missão durante um intervalo de tempo determinado.

Os maiores objetivos do estudo de confiabilidade são:

- Estudar e estabelecer as leis estatísticas por trás das ocorrências de falhas nos itens.
- Implementar métodos que visam melhorar os itens, utilizando de estratégias que possam alterar os índices de falha.

Um item pode falhar, por maior que seja sua confiabilidade, neste caso o que se deseja é que ele seja reparado e volte à ativa o mais rápido possível, a depender da importância que desempenha no processo produtivo. A Manutenibilidade tem relação justamente com o tempo para realização dos serviços que possibilitam o retorno do item. Podemos dizer que o tempo de reparo de um item é, então, uma medida de manutenibilidade.

Em conformidade com a NBR 5462 (1994), manutenibilidade é “A Capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos”.¹

Assim, vemos que a manutenibilidade representa muito mais, ela representa a capacidade de se manter um item, que envolve o planejamento do mesmo e está presente antes e durante a sua concepção, envolvendo a fase de projeto e toda a vida do mesmo. As ações voltadas ao gerenciamento da vida de um item em sua fase produtiva ocorrem sob a ótica da manutenção que é definida pela NBR 5462 (1994) como sendo “Combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinada a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desenvolver uma função requerida”.²

A função confiabilidade é aqui neste trabalho representada por $R(t)$, sendo R a inicial da sua palavra de origem, *reliability*, enquanto que manutenibilidade é representada por $M(t)$.

2.2 A MATEMÁTICA DA MANUTENÇÃO

Esta seção apresenta uma revisão matemática necessária para a compreensão de alguns termos e fundamentos utilizados na metodologia aplicada na dissertação.

2.2.1 Variável Aleatória

Considere, por exemplo, um fenômeno aleatório qualquer, com espaço amostral específico, e cujo comportamento probabilístico deseja-se estudar, uma vez que, a esse evento, pode-se associar diferentes estados ou condições. Imagine uma peça manufaturada que possa apresentar-se de duas formas possíveis com defeito ou sem defeito. Para facilitar, vamos atribuir as peças o valor 0, para as peças que não tem defeito, e o valor 1 para as peças que possuem

¹ O termo “manutenibilidade” é usado como uma medida do desempenho de manutenibilidade.

² A manutenção pode incluir uma modificação do item.

defeito. A variável aleatória associa a cada elemento do espaço amostral um número. Nesse caso os elementos podem ser com defeito, representados pelo valor 1 ou sem defeito, representados pelo valor 0.

Por definição, as variáveis aleatórias são representadas por letras maiúsculas e podem representar tanto funções discretas como funções contínuas.

2.2.2 Probabilidade

KARDEK & NASCIF (2010) apresentam probabilidade como um conceito da estatística que representa a relação entre o número de casos favoráveis a certo evento e o número de casos possíveis. Sendo P esta relação, tem-se que:

$$P = \frac{N^{\circ} \text{ de casos favoráveis}}{N^{\circ} \text{ de casos possíveis}} \quad (1)$$

E ainda:

$$0 \leq P \leq 1 \quad (2)$$

Onde $P=0$ significa certeza de que o certo evento não ocorrerá e $P=1$ certeza de que o mesmo ocorrerá. Por ser associada uma probabilidade, a confiabilidade pode variar, também, de 0 a 1 (ou 0% a 100%). É importante salientar que este conceito é chamado de frequencista, pois está associado a frequência de ocorrência.

2.2.3 Distribuições Discretas

Quando uma variável aleatória assume apenas valores finitos ou um conjunto infinito de valores contáveis para os quais a variável aleatória tem uma probabilidade positiva, é dito que tal variável e sua função distribuição são de natureza discreta.

2.2.3.1 Função Massa de Probabilidade

Considerando a variável aleatória discreta X , onde os valores x_1, x_2, \dots, x_n estão dentro do domínio de X , com p_1, p_2, \dots, p_n sendo suas respectivas probabilidades. Colocando isso matematicamente, a probabilidade de que X irá assumir o valor x_i é dada por:

$$P(X = x_i) = p_i, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (3)$$

Sendo assim, pode-se definir a nova função:

$$f(x) = p_i, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (4)$$

Tal função é conhecida como *Função Massa de Probabilidade* da variável aleatória discreta X . Esta função possui as seguintes propriedades:

- $f(x) = 0$; $\forall x \notin X$;
- $0 \leq f(x) \leq 1$; $\forall x \in X$;
- $\sum_{i=1}^n f(x_i) = \sum_{i=1}^n P(X = x_i) = 1$;

Tendo conhecimento da função massa de probabilidade da variável aleatória X , então a probabilidade de que $X \leq x$ é:

$$P(X \leq x) = F(x_n) = \sum_{i=1}^n p_i \quad (5)$$

Onde $F(x)$ é a função distribuição acumulada da variável discreta X .

2.2.4 Distribuições Contínuas

Considerando que a variável aleatória X pode representar uma infinidade de valores em um intervalo finito ou infinito, dizemos que tal variável aleatória é de natureza contínua.

2.2.4.1 Função Distribuição de Probabilidade

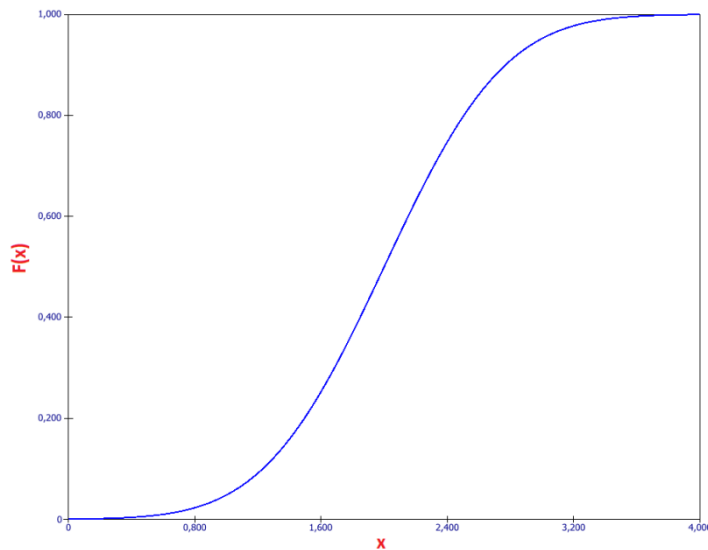
Dado uma variável aleatória X e que para qualquer número real x , a probabilidade de que X assumirá um valor menor ou igual a x é conhecida como Função Distribuição de Probabilidade (ou Função Distribuição Acumulada) da variável aleatória X , sendo representada por $F(X)$, assim:

$$F(x) = P(X \leq x), -\infty < x < +\infty \quad (6)$$

Sendo $0 \leq F(x) \leq 1$.

Podemos ver uma ilustração exemplo da função distribuição de probabilidade a seguir:

Figura 1 - Gráfico Exemplo de uma Função Distribuição de Probabilidade Contínua.



Fonte: Próprio Autor.

É importante ressaltar que a função distribuição de uma variável aleatória X é uma função não decrescente de x . Tomando valores quaisquer x_1 e x_2 , de tal forma que $x_1 < x_2$, os eventos $X \leq x_1$ e $X \leq x_2$ são mutuamente exclusivos, ou seja:

$$P(X \leq x_2) = P(X \leq x_1) + P(x_1 < X \leq x_2) \quad (7)$$

Assim:

$$P(x_1 < X \leq x_2) = F(x_2) - F(x_1) \quad (8)$$

A função distribuição de probabilidade é conhecida também, por este motivo, como Função Distribuição Acumulada (*Cumulative Distribution Function* – CDF).

2.2.4.2 Função Densidade de Probabilidade

Sendo X uma variável aleatória contínua, é de extremo interesse se conhecer a probabilidade desta variável assumir valores em dados intervalos.

Assim, vamos considerar a probabilidade de que X está entre os valores x e $x + \Delta x$, sendo Δx um valor que se torna infinitesimalmente pequeno. E vamos assumir uma nova função, $f(x)$, no qual:

$$f(x) \cdot \Delta x = P(x \leq X \leq x + \Delta x) \quad (9)$$

A função $f(x)$ é conhecida como Função Densidade de Probabilidade (*Probability Density Function* – PDF).

Temos então as duas funções distintas e particulares de probabilidade, $f(X)$ e $F(X)$, que são de extrema importância nas análises probabilísticas. Estas funções estão relacionadas entre si pela equação:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x') dx' \quad (10)$$

Ou, aplicando a diferenciação:

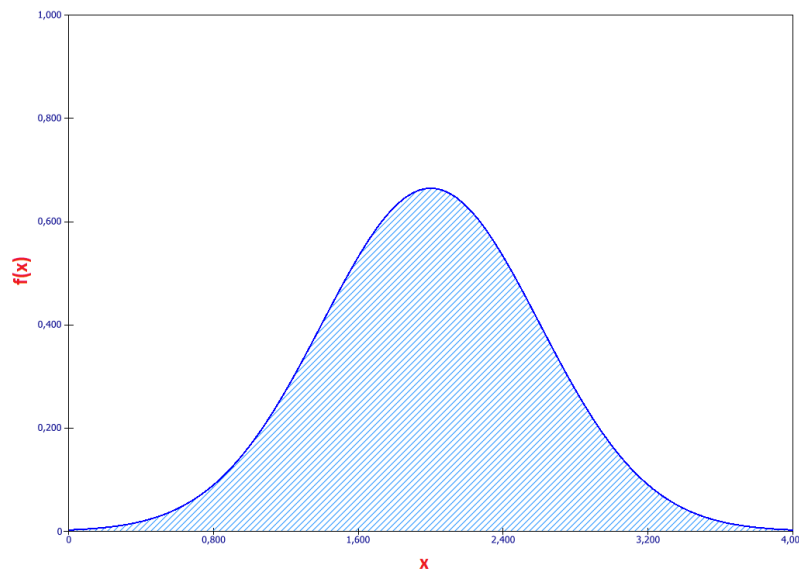
$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x) \quad (11)$$

Assim, observe que a probabilidade de que X está entre a e b pode ser obtida por:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a) \quad (12)$$

A imagem a seguir ilustra um exemplo de função densidade de probabilidade.

Figura 2 - Gráfico Exemplo de uma Função Densidade de Probabilidade Contínua Normal.



Fonte: Próprio Autor.

2.2.5 Tipos de Distribuições de Probabilidade Discretas

Dentre as distribuições discretas mais conhecidas, podemos citar as seguintes, a título de informação:

- Distribuição de Bernoulli;
- Distribuição Binomial;
- Distribuição Binomial Negativa;
- Distribuição Hipergeométrica;
- Distribuição de Poisson;
- Lei de Zipf;

Estas distribuições não serão desenvolvidas e explicadas aqui devido ao fato de não participarem no escopo da dissertação, mas que podem ser estudadas, com clareza, em DEVORE (2011), por exemplo.

2.2.6 Tipos de Distribuições de Probabilidade Contínuas

Na engenharia da manutenção, vários modelos de distribuição podem ser utilizados para as análises parametrizadas do comportamento das falhas durante a vida útil de diferentes itens. Cada uma, por sua vez, se encaixa melhor a determinado item, ou seja, dependendo do item e do histórico de ocorrências, poderá ocorrer um melhor ajuste em algum modelo de distribuição do que em outros.

As principais distribuições de probabilidade contínuas encontradas na literatura são:

- Exponencial;
- Normal;
- Log-Normal;
- Weibull;
- Gama;
- Logística;
- Gumbel;

Neste documento, as distribuições Exponencial e Weibull são as de maior interesse, então serão aqui, respectivamente, desenvolvidas e definidas mais adiante.

2.2.7 Conceitos e Funções de Interesse

Conforme notas de aula de SANTOS (2013), a taxa de ocorrência das falhas, denominada de taxa de falha (λ) é definida como:

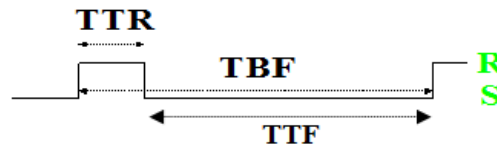
$$\lambda(t) = \frac{\text{Número de Falhas}}{\text{Tempo Total Sob Observação}} \quad (13)$$

E a taxa com o que item é reparado, obviamente após a ocorrência de uma falha, denominada de taxa de reparo (μ) é definida como:

$$\mu(t) = \frac{\text{Número de Reparos}}{\text{Tempo Total Sob Observação}} \quad (14)$$

Podemos representar de forma simplificada em um diagrama a atividade de um item, como indicado na Figura 2.3:

Figura 3 - Diagrama Simplificado de Atividade de um Item.



Fonte: SANTOS, 2013.

Onde:

R = O item está em reparo;

S = O item está em serviço;

TTR = Tempo Para Reparar (Time To Repair);

TBF = Tempo Entre Reparos (Time Between Repairs);

TTF = Tempo Para Falhar (Time To Failure);

Considerando funcionamento simultâneo de N_T itens iguais e em perfeitas condições e que após certo tempo t restarão em funcionamento $N_S(t)$ sobreviventes e $N_F(t)$ terão falhado, assim:

$$N_T = N_S(t) + N_F(t) \quad (15)$$

Com isso, pela definição de confiabilidade, temos que

$$R(t) = \frac{N_S(t)}{N_T} \quad (16)$$

E da mesma forma, a não-confiabilidade (ou probabilidade de falha) sendo

$$Q(t) = \frac{N_F(t)}{N_T} \quad (17)$$

levando em conta que

$$R(t) + Q(t) = 1 \quad (18)$$

e também que

$$Q(t) = F(t) \quad (19)$$

Onde $F(t)$ representa a função distribuição acumulada, sendo, de acordo com a Eq. (19), equivalente a não-confiabilidade $Q(t)$.

Aplicando a substituição da Eq. (19) na Eq. (11), mudando a variável para tempo, t , e resolvendo, tem-se

$$f(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = - \frac{d}{dt} R(t) = \frac{1}{N_T} \left(\frac{dN_F(t)}{dt} \right) \quad (20)$$

ou ainda

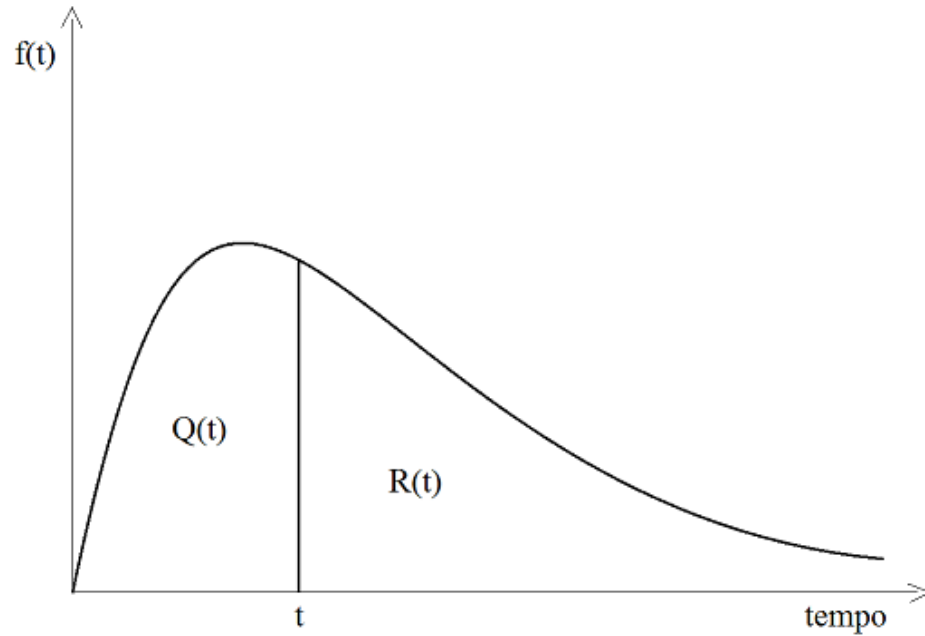
$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (21)$$

Substituindo a Eq. (21) na Eq. (18), tem-se

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (22)$$

A relação entre a Eq. (21) e a Eq. (22) pode ser vista na figura a seguir:

Figura 4 - Relação Complementar Entre Q(t) e R(t).



Fonte: SANTOS, 2013.

A Eq. (13) pode ser escrita de outra forma, como sendo

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (23)$$

Substituindo a Eq. (2.20) contendo R(t) na Eq. (2.23), chega-se a

$$\lambda(t) = \frac{1}{R(t)} \left(- \frac{dR(t)}{dt} \right) \quad (24)$$

E resolvendo por integração, chega-se, finalmente, a equação conhecida como Equação Geral da Confiabilidade, que pode ser vista a seguir:

$$R(t) = e^{-\int \lambda(t).dt} \quad (25)$$

Observe que para λ constante, a Eq. (25) se resume a

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (26)$$

Agora pode ser introduzida as definições de MTTF, MTTR e MTBF. Baseando-se na Figura 2.3, temos as seguintes definições.

$$MTTF = \frac{\sum TTF}{N} \quad (27)$$

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{N} \quad (28)$$

$$MTBF = \frac{\sum TBF}{N} \quad (29)$$

Onde N representa o número de ocorrências verificadas, MTTF o tempo médio para falhar, MTTR o tempo médio para reparar e MTBF o tempo médio entre falhas.

Visualizando as equações (27), (28) e (29), vemos que elas representam simplesmente a média aritmética de suas respectivas métricas, como se indica em suas próprias nomenclaturas.

Por fim desta sessão, será mostrada a equação da disponibilidade, que é

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (30)$$

Que para equipamentos de natureza eletrônica, onde $TTF \gg TTR$, considerando-se como reparo destes apenas uma troca rápida de um componente (diferente de equipamentos de grande porte, como por exemplo uma máquina elétrica) e presença de redundâncias em sistemas de equipamentos eletrônicos e a diferença de custos, a equação se torna (SANTOS, 2013):

$$D = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (31)$$

Com os termos TBF, TTF, Taxa de Falhas e Confiabilidade, matematicamente apresentados, já podem ser definidas as distribuições Exponencial e Weibull.

2.2.7.1 Distribuição Exponencial

É uma das distribuições mais simples, matematicamente falando. Esta distribuição possui a característica marcante de ter uma taxa de falhas constante, sendo a única com esta propriedade. Essa distribuição é utilizada como modelo para descrever o comportamento do tempo de vida de alguns materiais e produtos, como por exemplo, o tempo de vida de óleos isolantes e dielétricos (PORTALACTION, 2014).

Considerando que a variável aleatória X possui uma distribuição exponencial com parâmetro λ , sendo $\lambda > 0$, sua função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & , \quad x \geq 0 \\ 0 & , \quad x < 0 \end{cases} \quad (32)$$

Onde:

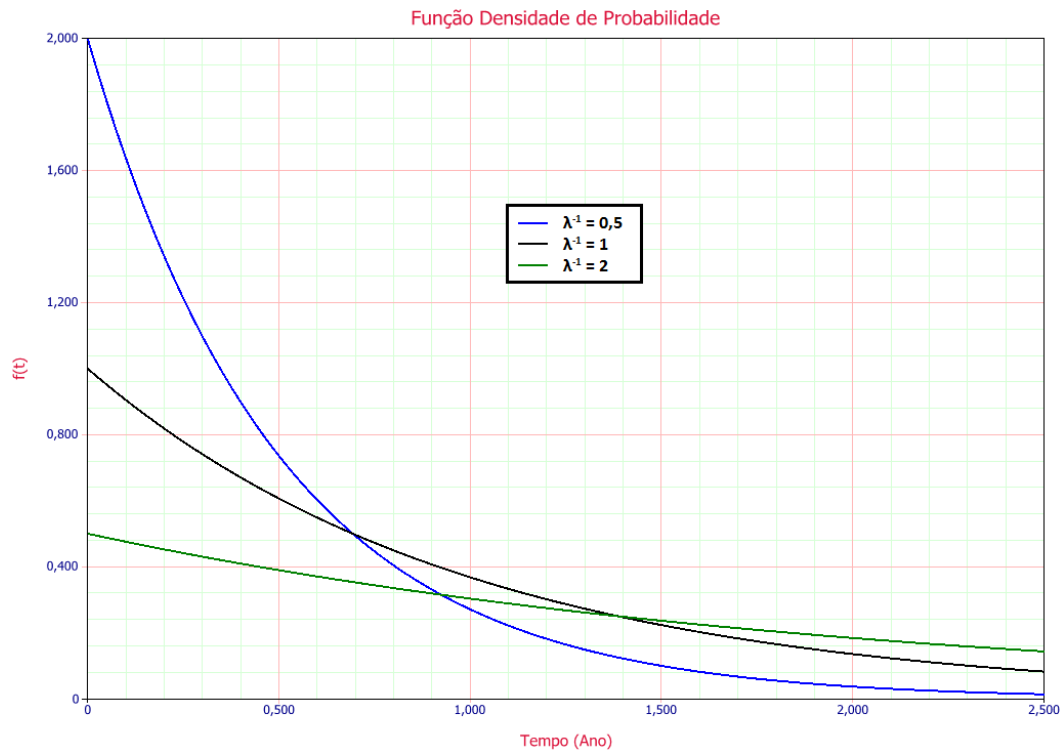
λ = Taxa de falhas (MTTF^{-1});

x = Tempo de falha;

É importante que λ^{-1} e x sejam expressos em função da mesma unidade (por exemplo, horas).

Um gráfico genérico da função densidade de probabilidade desta distribuição é mostrado a seguir para três diferentes valores de λ^{-1} ou MTTF.

Figura 5 - Função Densidade de Probabilidade Exponencial para Três Diferentes Parâmetros.



Fonte: Próprio Autor.

Sua função distribuição acumulada $F(x)$ é dada por:

$$F(x) = \int_0^x f(t)dt = \begin{cases} e^{-\lambda \cdot x} & , \quad x \geq 0 \\ 0 & , \quad x < 0 \end{cases} \quad (33)$$

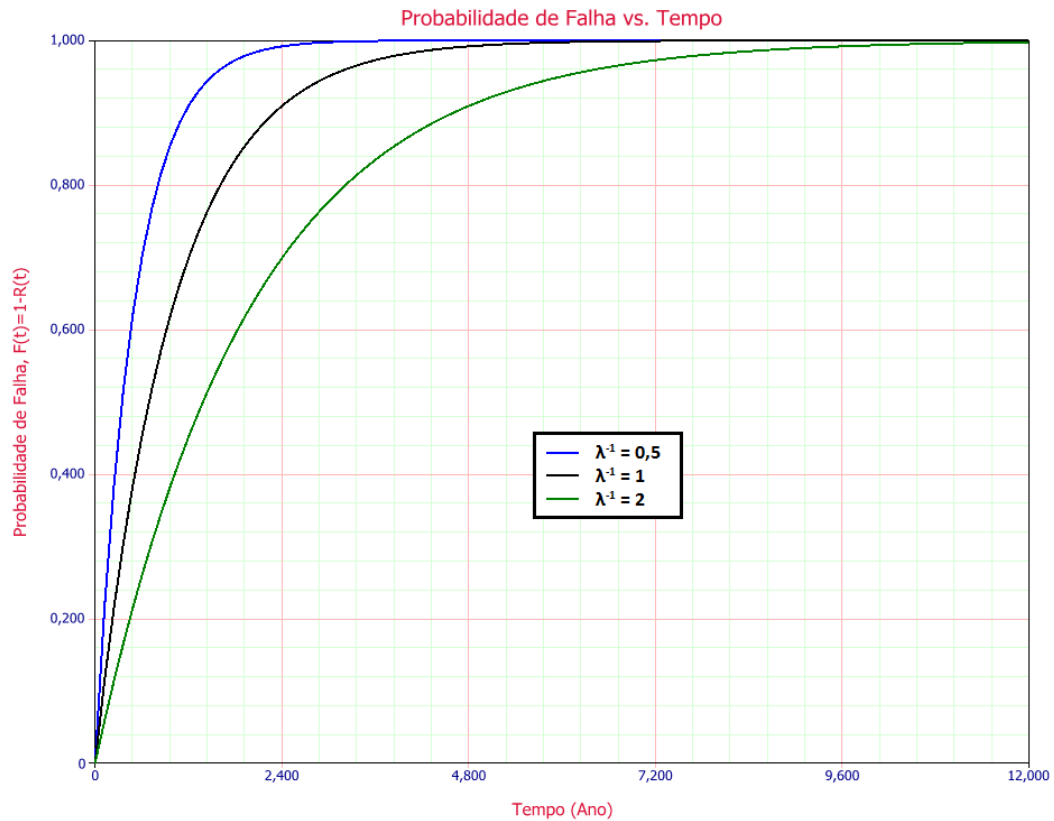
Note que, na engenharia de manutenção, a fda (função distribuição acumulada) é representada pela função probabilidade de falha, que é a não-confiabilidade. Sendo assim, temos:

$$F(x) = Q(x) = 1 - R(x) \quad (34)$$

Onde $Q(x)$ representa a não-confiabilidade e $R(x)$ a confiabilidade.

A seguir, a título de exemplo, pode ser visto também um gráfico de Função Distribuição Acumulada Exponencial, para três parâmetros diferentes:

Figura 6 - Função Distribuição Acumulada Exponencial para Três Diferentes Parâmetros.



Fonte: Próprio Autor.

2.2.7.2 Distribuição Weibull

Esta distribuição de probabilidade leva o nome do físico Ernest Hjalmar Wallodi Weibull, sendo inicialmente analisada por ele com base em estudos sobre a resistência dos aços. É vastamente aplicada em análise de confiabilidade devido a suas características e vantagens, como por exemplo, a capacidade de representar a mortalidade infantil, falhas aleatórias e sua fácil representação gráfica. Sua função densidade de probabilidade é definida por (PORTALACTION, 2014):

$$f(x) = \begin{cases} \left(\frac{\beta}{\eta^\beta}\right) x^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} & , \quad x \geq 0 \\ 0 & , \quad x < 0 \end{cases} \quad (35)$$

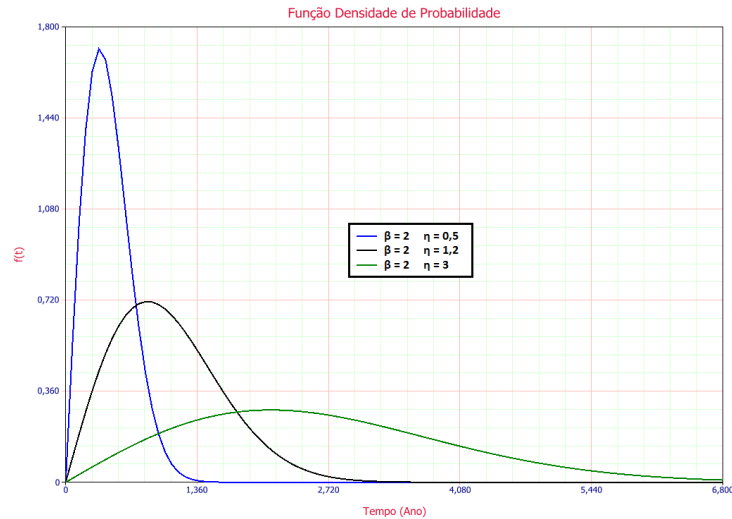
Sendo:

β = Parâmetro de forma;

η = Parâmetro de escala;

A plotagem a seguir mostra esta função para $\beta = 2$ e três diferentes valores de η .

Figura 7 - Função Densidade de Probabilidade Weibull para Três Diferentes Conjuntos de Parâmetros.



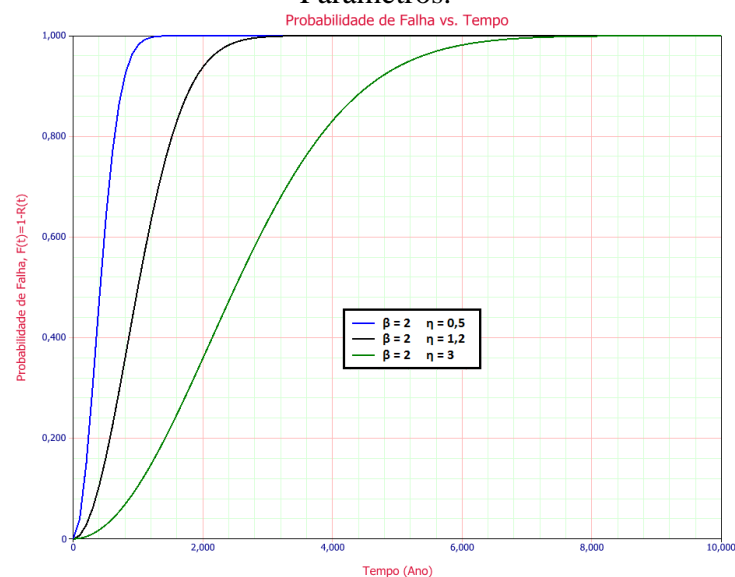
Fonte: Próprio Autor.

A equação da Distribuição Acumulada Weibull é:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} & , \quad x \geq 0 \\ 0 & , \quad x < 0 \end{cases} \quad (36)$$

A seguir pode ser visto também um gráfico exemplo de Função Distribuição Acumulada Weibull para três diferentes conjuntos de parâmetros:

Figura 8 - Função Distribuição Acumulada Weibull para Três Diferentes Conjuntos de Parâmetros.



Fonte: Próprio Autor.

As notas de aula de SANTOS (2013) explicam que para parâmetros de forma $\beta > 1$, a função distribuição Weibull representa o período em que há a degradação do item (Taxa de falhas crescente). Enquanto que $\beta = 0$ representa uma taxa de falha constante e $\beta < 1$ o início da curva da banheira, onde o comportamento da taxa de falhas é decrescente no tempo (mortalidade infantil). A taxa de falhas Weibull (coeficiente da exponencial na derivada da sua função distribuição acumulada) e sua função confiabilidade, $1-F(t)$, podem ser calculadas por:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} \cdot t^{\beta-1} \quad (37)$$

$$R(t) = e^{\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]} \quad (38)$$

Os dados aqui tratados são dados de taxas de falhas, extraídos através de informações de TBF ou TTF. A partir dos dados de taxas de falha, as respectivas confiabilidades podem ser calculadas. A taxa de falha e a confiabilidade são as variáveis base para aplicação da comparação de classes de funções. Sabendo disto, dois tipos de situações podem ser consideradas no estudo: Um único equipamento em funcionamento e um conjunto de equipamentos em funcionamento.

2.2.7.3 Equipamento Único

Para um único equipamento em funcionamento, é possível calcular a taxa de falhas de um período de acordo com a Eq. (13):

$$\lambda = \frac{\text{numero de falhas}}{\text{tempo observado}}$$

Ou seja, se os tempos de cada ocorrência de falha forem conhecidos, junto com os tempos de reparo, a taxa de falhas pode ser calculada por períodos sempre que ocorrer uma falha como, similar ao motivo da diferença entre a Eq. (30) e a Eq. (31):

$$\lambda_i = \frac{1}{TTF_i} \quad (39)$$

ou

$$\lambda_i = \frac{1}{TBF_i} \quad (40)$$

Se for preferível que se agrupem falhas e períodos, para se calcular uma taxa de falhas média no período, deve-se escolher um valor de agrupamento de n falhas e a utilizar a equação de taxa de falhas como se segue:

$$\lambda_i = \frac{n}{\sum_{j=n.(i-1)+1}^{n.i} TTF_j} \quad (41)$$

ou

$$\lambda_i = \frac{n}{\sum_{j=n.(i-1)+1}^{n.i} TBF_j} \quad (42)$$

A título de exemplo, suponha que foi registrado para determinado equipamento, que é instantaneamente reparado quando falha, os seguintes tempos de falha, em horas:

Tabela 1 - Tempos de Falha em Horas de um Único Equipamento.

Índice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo até Falha	357	234	653	402	873	623	211	267	478	509
Tempo	357	591	1244	1646	2519	3142	3353	3620	4098	4607

Fonte: Próprio Autor.

Para o cálculo de taxa de falhas para cada falha individualmente, temos pela Eq. (39):

$$\lambda_i = \frac{1}{TTF_i}$$

Onde i representa o índice do tempo até falha.

Calculando cada λ , temos a seguinte tabela:

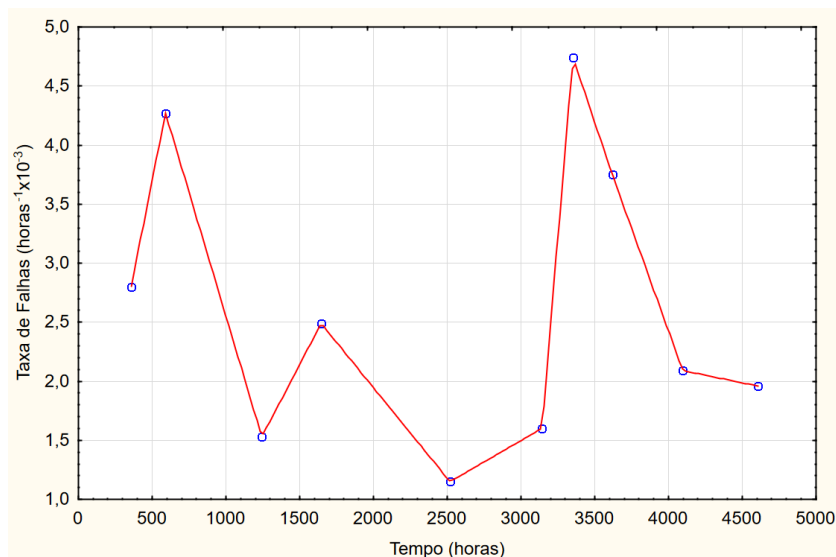
Tabela 2 - Taxa de Falhas do Mesmo Equipamento.

Índice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Taxa de Falhas (horas ⁻¹ x10 ⁻³)	2,80	4,27	1,53	2,49	1,15	1,60	4,74	3,75	2,09	1,96
Tempo	357	591	1244	1646	2519	3142	3353	3620	4098	4607

Fonte: Próprio Autor.

Se plotarmos o gráfico Taxa de Falhas versus Tempo, temos a seguinte informação sobre o comportamento da taxa de falhas:

Figura 9 - Exemplo Gráfico da Taxa de Falhas sem a Utilização de Agrupamento das Falhas.



Fonte: Próprio Autor.

Caso seja preferível um agrupamento de $n=2$ para o cálculo de falhas, faz-se, pela Eq. (41):

$$\lambda_i = \frac{2}{\sum_{j=2(i-1)+1}^{2i} TTF_j}$$

E perceba que os valores da abcissa serão sempre o tempo acumulado até o último ponto da respectiva equação na taxa de falhas.

Calculando as taxas de falhas para $n=2$, temos:

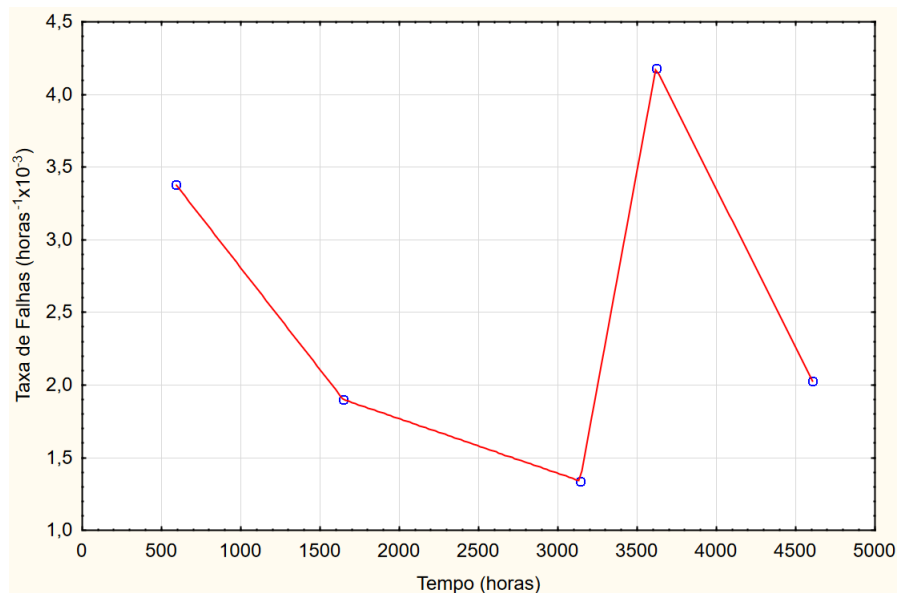
Tabela 3 - Taxa de Falhas para um Único Equipamento com um Agrupamento de $n=2$.

Índice	1	2	3	4	5
Taxa de Falhas ($\text{horas}^{-1} \times 10^{-3}$)	3,38	1,90	1,34	4,18	2,03
Tempo	591	1646	3142	3620	4607

Fonte: Próprio Autor.

Plotando:

Figura 10 - Exemplo Gráfico da Taxa de Falhas com a Utilização de Agrupamento das Falhas $n=2$.



Fonte: Próprio Autor.

É interessante notar que o termo de agrupamento de falhas n possui um efeito semelhante a uma suavização por média aritmética simples.

Para o cálculo da confiabilidade, temos que, como citado na seção 2.2.6, a equação geral da confiabilidade:

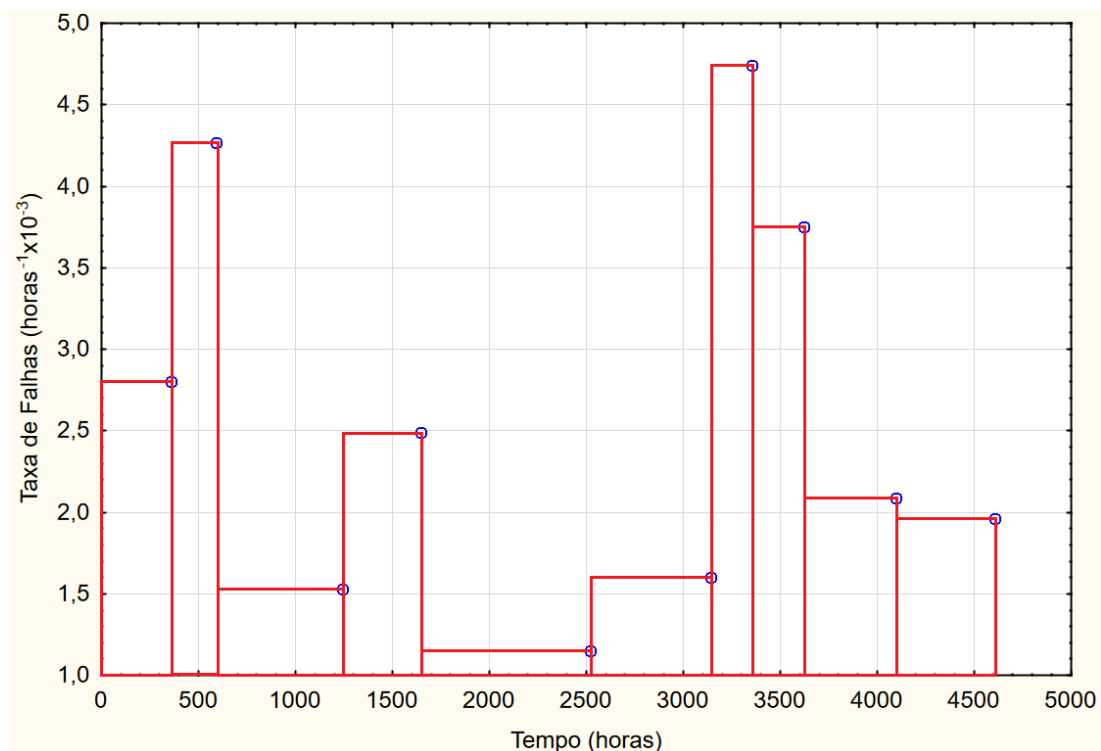
$$R(t) = e^{-\int \lambda(t).dt}$$

Como os dados tratados aqui são pontuais e finitos, a equação pode ser escrita como:

$$R_i = e^{-\left(\sum_{j=1}^i \lambda_j \cdot \Delta t_j\right)} \quad (43)$$

Supondo as condições iniciais $R_0=1$ e $\lambda_0=\lambda_1$, a interpretação gráfica da equação anterior pode ser vista a seguir:

Figura 11 - Esquema Gráfico de Cálculo dos Termos do Somatório no Expoente da Eq. (43), representados por Cálculo de Área.

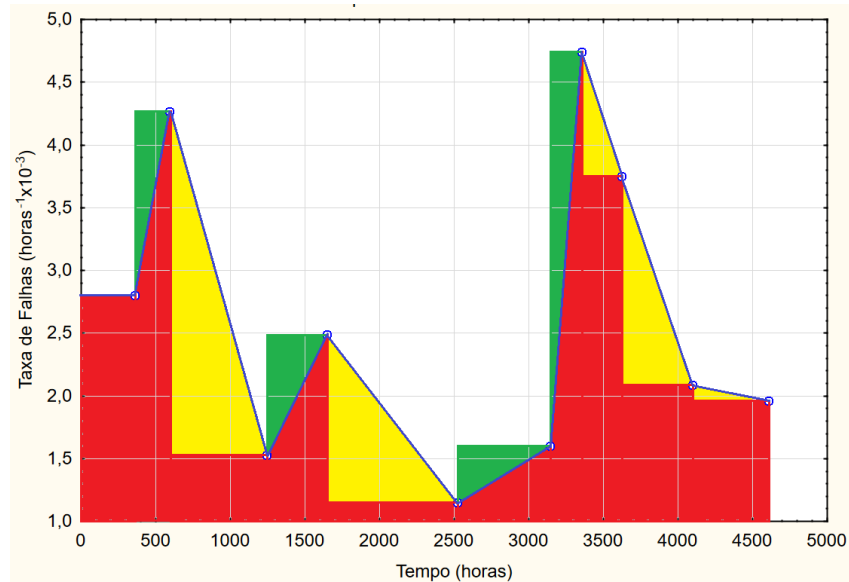


Fonte: Próprio Autor.

Cada termo do somatório no expoente da exponencial é representado pela área de cada um dos retângulos na Figura 11, pois, a taxa de falhas encontrada é fixa em cada intervalo, representando uma aproximação da integral da equação geral da confiabilidade original.

Agora note, na Figura 12, que, se a variação da taxa de falhas for considerada linear, de um ponto a outro, o erro da adaptação da integral é considerável:

Figura 12 - Ilustração do Cálculo do Expoente da Eq. (43).



Fonte: Próprio Autor.

Cada cor possuindo o seguinte significado:

- Vermelho = Área corretamente calculada na equação;
- Verde = Área calculada a mais (erro positivo);
- Amarelo = Área faltando no cálculo (erro negativo);

Ao analisar a Figura 12, é visto que o erro negativo é maior que o erro positivo, implicando em uma confiabilidade instantânea maior do que de fato seria.

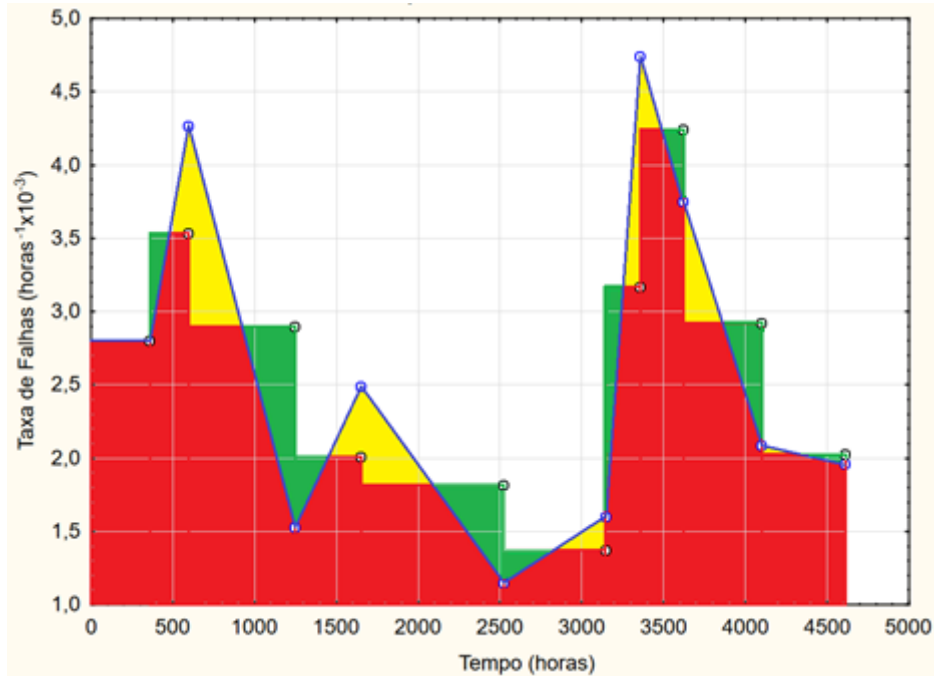
Afim de diminuir esses erros, é proposta uma variação na equação para se calcular a média das taxas de falha dos períodos consecutivos, ou seja:

$$R_i = e^{-\left[\sum_{j=1}^i \left(\frac{\lambda_j + \lambda_{j-1}}{2}\right) \Delta t_j\right]} \quad (44)$$

Para $i > 0$, com $\lambda_0 = \lambda_1$ e $R_0 = 1$.

Tal modificação tem como resultado, visivelmente, a seguinte melhora:

Figura 13 - Ilustração do Cálculo do Expoente da Eq. (44).



Fonte: Próprio Autor.

Se a imagem for analisada, é possível notar um aumento na área calculada corretamente (vermelho) e um aumento no equilíbrio entre os erros positivos e negativos (No final de cada período, pode ser visto que geometricamente os erros se anulam). Por isso, a equação utilizada na metodologia e no aplicativo foi a última citada. É importante citar que, caso os valores das Tabelas 2 e 3, por exemplo, forem utilizados para cálculo dos pontos da função confiabilidade, temos como resultado a Tabela 4 (como dito antes, estabelecendo as condições iniciais $R_0 = 1$ e $\lambda_0 = \lambda_1$):

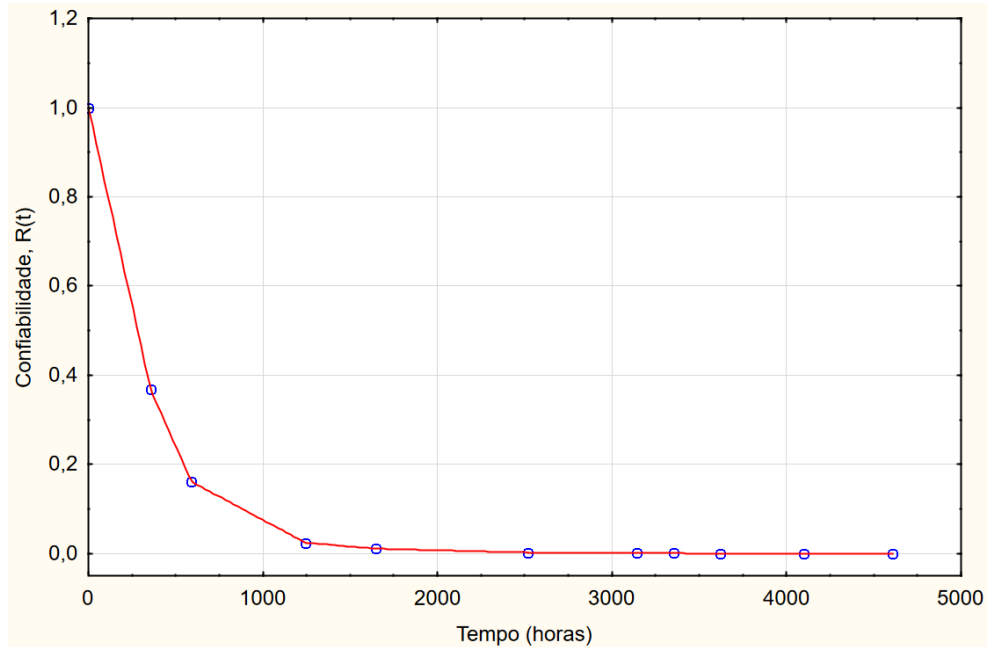
Tabela 4 - Informações Completas Sobre o Item.

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
λ ($\times 10^{-3}$)	2,80	2,80	4,27	1,53	2,49	1,15	1,60	4,74	3,75	2,09	1,96
Δt	0	357	234	653	402	873	623	211	267	478	509
R	1	0,3679	0,1609	0,0242	0,0108	0,0022	0,0009	0,0005	0,0002	0	0
t	0	357	591	1244	1646	2519	3142	3353	3620	4098	4607

Fonte: Próprio Autor.

Plotando, então, o gráfico da confiabilidade, $R(t)$, temos:

Figura 14 - Gráfico da Confiabilidade do Item ao Longo do Tempo.



Fonte: Próprio Autor.

O gráfico indica, por exemplo, que, um item igual e na mesma condição inicial do item exemplificado, muito dificilmente sobreviveria muito mais após atingir 1500 horas de operação, pois a probabilidade de sobreviver é muito próxima de zero nesse ponto, cerca de 2%, que equivale a uma probabilidade de falha de 98%.

A tabela a seguir compara os resultados para R calculado da forma antiga e da nova.

Tabela 5 - Comparação entre os Resultados de $R(t)$ Calculados pela Equação Antiga e pela Equação Nova.

I	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_{ANTIGO}	1	0,3679	0,1353	0,0497	0,0183	0,0067	0,0025	0,0009	0,0003	0,0001	0
R_{NOVO}	1	0,3679	0,1609	0,0242	0,0108	0,0022	0,0009	0,0005	0,0002	0	0
t	0	357	591	1244	1646	2519	3142	3353	3620	4098	4607

Fonte: Próprio Autor.

Observe que, na maioria do tempo, o valor de R_{ANTIGO} é ligeiramente maior do que o valor do R_{NOVO} .

2.2.7.4 Conjunto de Equipamentos

Suponha que, ao invés de um único equipamento em operação, haja um conjunto de N_0 equipamentos, novos, tenha sido colocado em funcionamento simultâneo e então sido computados os tempos de falha de cada um deles até a falha do último. Vamos considerar, como exemplo, que numa situação dessas, com um lote de $N_0=40$ equipamentos, os seguintes tempos de falha foram obtidos, em horas:

Tabela 6 - Tempo de Falha de Cada um dos Itens em um Lote de 40.

93,2	131,7	163,5	202,9	240,6	289,0	347,4	362,8	383,7	412,9
449,7	473,2	494,1	533,0	569,4	583,1	682,2	730,1	881,0	924,5
936,5	961,9	1.135,0	1.282,1	1.368,3	1.409,6	1.459,9	1.688,5	1.759,0	1.835,3
1.982,1	2.205,0	2.473,2	2.785,9	3.259,7	3.551,2	3.864,3	4.192,1	4.405,6	4.602,2

Fonte: Adaptado de SANTOS, 2013.

Seguindo as notas de SANTOS (2013), para análise deste lote, é necessário escolher um período de observação fixo Δt para formação de intervalos que varrem todo o período e são espaçados em Δt , e então computar as seguintes informações para cada intervalo:

- ΔN_f = Falhas no Intervalo (até o fim do intervalo);
- N_f = Falhas Acumuladas (até o fim do intervalo);
- N_s = Sobreviventes (no início do intervalo);

Tendo obtido todas essas informações para cada intervalo, a taxa de falhas e a confiabilidade em cada um deles pode ser calculada por:

$$\lambda_i = \frac{\Delta N_f}{N_s \cdot \Delta t} \quad (45) \quad e \quad R_i = 1 - \frac{N_f}{N_0} \quad (46)$$

Através dos tempos de falha fornecidos pela Tabela 6, com $N_0 = 40$, e, por exemplo, intervalos de $\Delta t = 500$ horas, é possível ser confeccionada a Tabela 7.

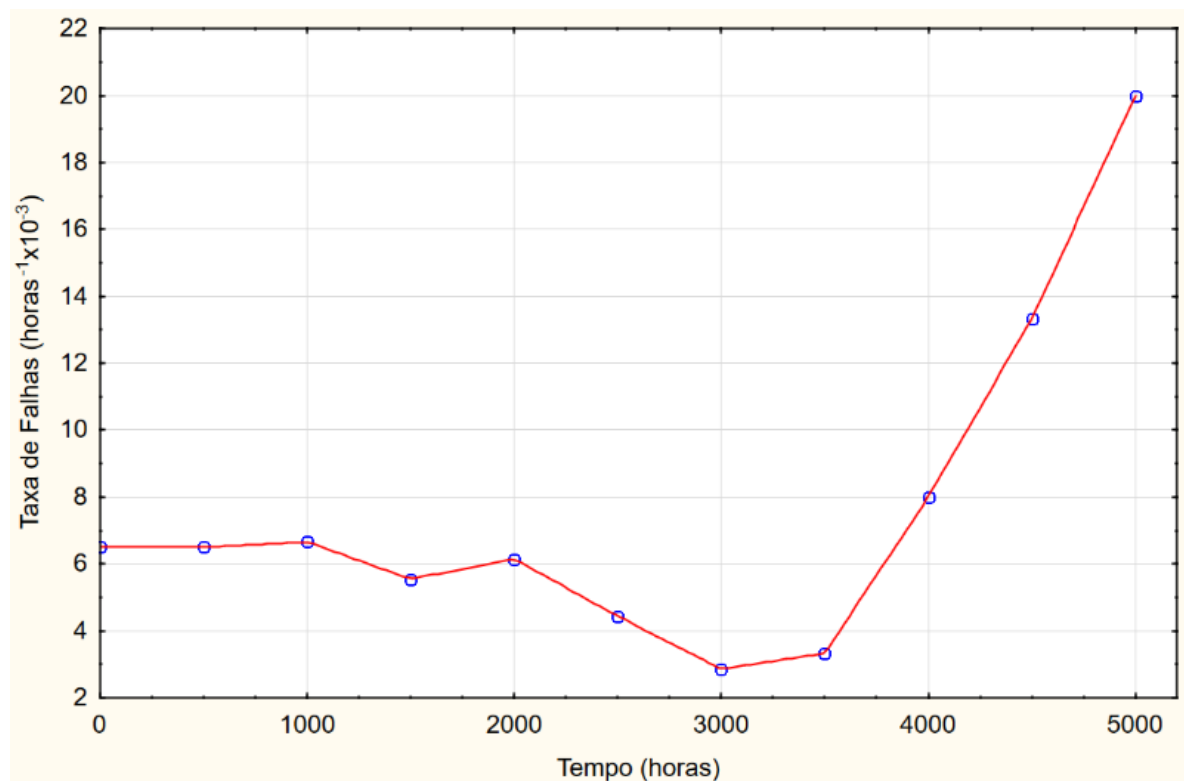
Tabela 7 - Informações Calculadas pela Análise dos Tempos de Falhas do Lote.

i	Intervalo $\Delta t = 500$ h	Falhas no Intervalo ΔN_f	Falhas Acumuladas N_f	Sobreviventes N_s	$\lambda = \frac{\Delta N_f}{N_s \cdot \Delta t}$ ($h^{-1} \times 10^{-4}$)	$R = 1 - \frac{N_f}{N_0}$
1	0-500	13	13	40	6,50	0,675
2	500-1000	9	22	27	6,66	0,450
3	1000-1500	5	27	18	5,55	0,325
4	1500-2000	4	31	13	6,15	0,225
5	2000-2500	2	33	9	4,44	0,175
6	2500-3000	1	34	7	2,86	0,150
7	3000-3500	1	35	6	3,33	0,125
8	3500-4000	2	37	5	8,00	0,075
9	4000-4500	2	39	3	13,33	0,025
10	4500-5000	1	40	1	20,00	0

Fonte: Adaptado de SANTOS, 2013.

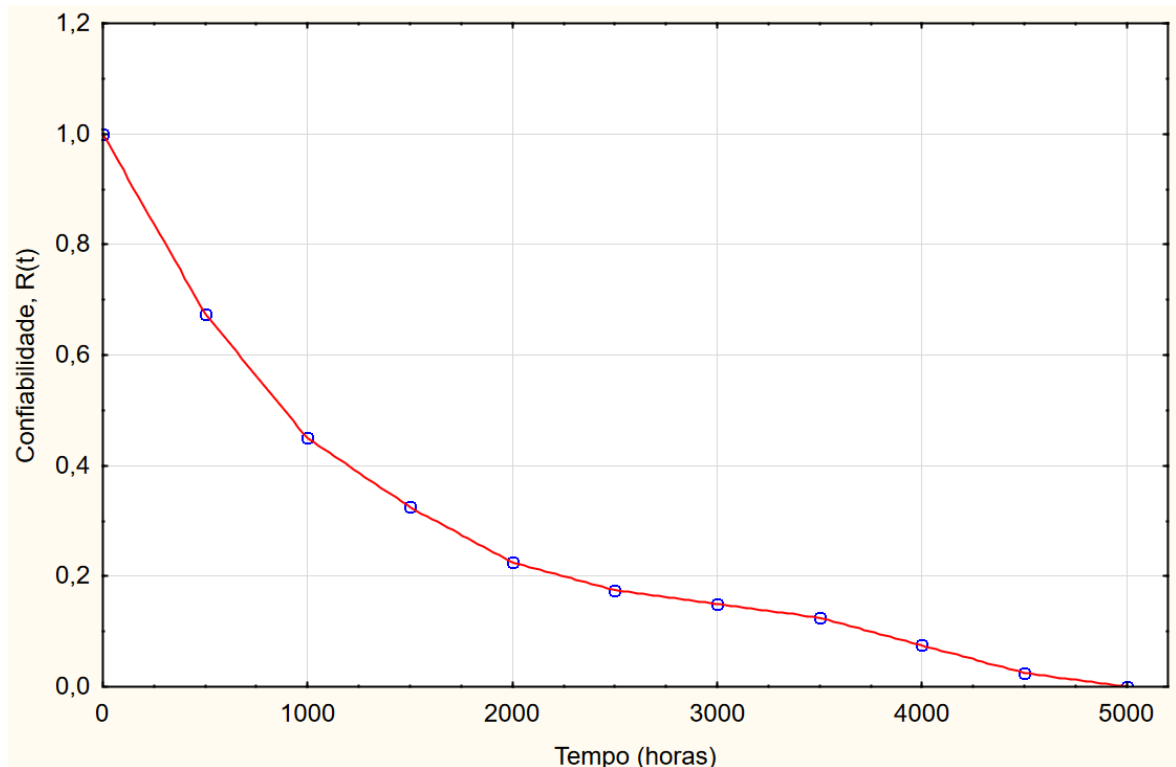
Agora os gráficos da taxa de falha versus tempo e da confiabilidade versus tempo podem ser devidamente plotados:

Figura 15 - Gráfico da Taxa de Falhas do Lote de 40 Itens.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 16 - Gráfico da Confiabilidade do Lote de 40 Itens.



Fonte: Próprio Autor.

2.3 TERMOS E DEFINIÇÕES

Alguns termos comumente utilizados na linguagem da manutenibilidade podem ser vistos nas seções a seguir, junto com suas respectivas definições.

2.3.1 Defeito

A NBR 5462 (1994), define defeito como “Qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos seus requisitos”.³

Assim, quando um item apresenta uma diferença de desempenho, porém sem comprometer a capacidade do mesmo de realizar sua função, é dito que o item apresenta defeito.

³ a) Os requisitos podem, ou não, ser expressos na forma de uma especificação.

b) Um defeito pode, ou não, afetar a capacidade de um item em desempenhar uma função requerida.

2.3.2 Falha

Segundo a norma NBR 5462 (1994), falha se caracteriza pelo “Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”.⁴ Ou seja, é dito que um item falhou quando ele deixou de desempenhar a função que lhe foi requerida.

2.3.3 Pane

Pode ser visto na NBR 5462 (1994) que pane representa o “Estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção preventiva ou outras ações planejadas, ou pela falta de recursos externos”.⁵ Então tem-se que a pane é um estado em que um item não está desempenhando sua função requerida, com exceção desta incapacidade durante manutenção preventiva ou qualquer outra ação planejada.

2.3.4 Disponibilidade

É a possibilidade de que algo, seja um produto ou serviço, esteja disponível para uso quando lhe for solicitado. Quando um item não está em condições de ser utilizado, seja por apresentar falha, estar em estado de pane, ou até mesmo parado para manutenção preventiva, é dito que o item está indisponível.

Pode ser visto na NBR 5462 (1994) que disponibilidade é:

Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.⁶

A função disponibilidade é representada por $D(t)$.

⁴ a) Depois da falha, o item tem uma pane.

b) A “falha” é um evento; diferente de “pane” que é um estado.

c) Este conceito, como definido, não se aplica a itens compostos somente por software.

⁵ Uma pane é geralmente o resultado de uma falha de um item, mas pode existir sem uma falha anterior.

⁶ O termo “disponibilidade” é usado como uma medida do desempenho de disponibilidade.

2.3.5 Taxa de Falha

Trata-se da probabilidade de um item falhar em um intervalo de tempo $[t_1, t_2)$, podendo ser expressa em função da função confiabilidade.

Consta na NBR 5462 (1994) a seguinte definição para taxa de falhas instantânea:

Limite, se existir, da razão da probabilidade condicional de que a falha de um item ocorra em um dado intervalo de tempo $(t, t+\Delta t)$, visto que o item estava disponível no instante t , pela duração Δt deste intervalo, quanto Δt tende a zero. Matematicamente,

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[t < T < (t + \Delta t) \mid T > t]}{\Delta t} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} \cdot \frac{1}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Onde:

t = variável aleatória de interesse⁷

$F(t)$ = função de distribuição acumulada para o instante t

$R(t)$ = função de confiabilidade para o instante t

$f(t)$ = função de densidade de probabilidade para o instante t .

⁷ A variável t pode ser o tempo até a primeira falha, ou o tempo entre a falha de um item reparado, ou o tempo até falha de um item não-reparado.

3 O FENÔMENO DEGRADAÇÃO

Este capítulo é dedicado a fazer uma apresentação sucinta e objetiva acerca do processo de degradação. Para entender melhor a degradação, podemos fazer uma analogia Homem versus Máquina, mostrada na tabela seguinte.

Tabela 8 - Analogia saúde humana x máquina.

SAÚDE HUMANA	Analogia		SAÚDE DA MÁQUINA
Conhecimento do homem	Nascimento	Entrada em Operação	Conhecimento tecnológico
Conhecimento das doenças	Longevidade	Durabilidade	Conhecimento dos modos de falha
Carnê de saúde			Histórico
Dossiê médico	Boa Saúde	Confiabilidade	Dossiê da máquina
Diagnóstico, exame, visita médica			Diagnóstico, perícia, inspeção
Conhecimento dos tratamentos	Recuperação Rápida	Mantenabilidade	Conhecimento das ações curativas
Tratamento curativo			Retirada do estado de pane, reparo
Operação	Morte	Sucata	Renovação, modernização, troca
MEDICINA			MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

Fonte: MONCHY, 1989, pg. 2.

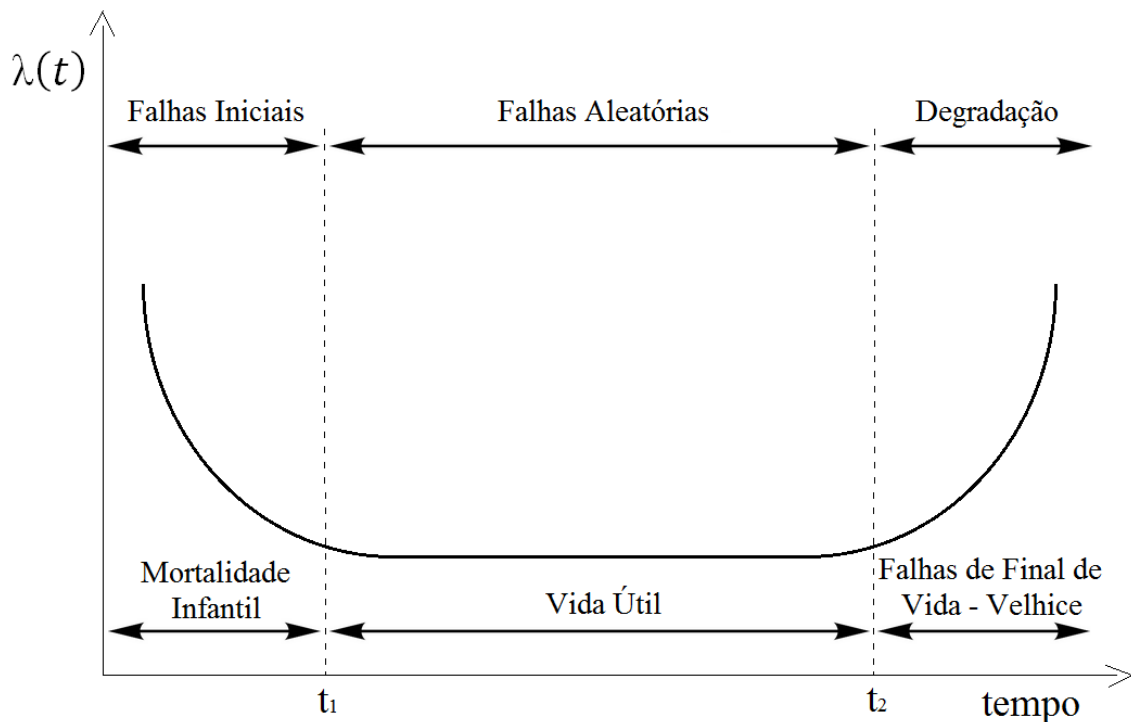
Com tal analogia apresentada, MONCHY (1989) estabelece que: “A manutenção é a medicina das máquinas”. Segundo ele, esta expressão concisa e prática nos permite desmitificar a função da manutenção, porém em nenhum momento pretende conter algum juízo de valor sobre a importância Homem/Máquina.

Assim, o processo de degradação nada mais é do que o processo de envelhecimento da máquina. Tal processo pode ser acelerado, dependendo da forma e intensidade em que a máquina é utilizada, porém nunca pode ser retardado, pois o projeto estabelece uma

longevidade para a máquina, em sua concepção (SANTOS, 2013). Ou seja, cada componente tem uma vida útil, limitando assim a vida máxima da máquina, não sendo algo determinístico, mas sim estimado.

Se a analogia Homem versus Máquina for retratada graficamente, a seguinte curva é obtida.

Figura 17 - Curva da Banheira.



Fonte: SANTOS (2013).

A curva retratada é conhecida como curva da banheira, e representa a curva da taxa de falhas de um equipamento inédito, pois leva em consideração as falhas iniciais, que normalmente são erros de projeto que são corrigidos antes do lançamento de um item no mercado. Tal curva também atende ao ser humano, pois cada ser humano é um projeto inédito, pois, por mais que se saibam as doenças e tratamentos, sempre há mortalidade infantil. Esse trabalho, no entanto, se concentra no final de vida da máquina, mais especificamente na transição da vida útil para a velhice, onde se localiza o ponto de mudança na degradação (Na Figura 17 representado por t_2).

Com a evolução tecnológica, a complexidade dos equipamentos aumentou, porém, o desgaste dos mesmos é um processo ainda inevitável. Por mais que um equipamento seja bem

projetado, pelas propriedades naturais de desgaste dos componentes do mesmo, não é possível que ele seja eterno. Sempre haverá desgastes, sejam devidos ao próprio modo de funcionamento do equipamento ou devido a elementos externos inerentes ao ambiente, como temperatura, vibração e umidade, que são capazes de acelerar o processo de degradação.

De acordo com SALEEM et al (2006), o envelhecimento é um processo progressivo e contínuo que muitas vezes depende de um grande número de covariáveis, como por exemplo: Período de operação, cargas, propriedades físicas dos materiais, e condições operacionais, sendo esses mencionados apenas os que desempenham um papel dominante. Ainda segundo SALEEM et al (2006), o envelhecimento pode ser desencadeado por outros fatores, sendo tecnológicos, ou mesmo sociais ou econômicos: desempenho inferior ao de equipamentos novos e mais modernos; conceito, design ou materiais superados por novas tecnologias; incompatibilidade ou obsolescência dos sistemas ou softwares de controle e comando; falta de peças sobressalentes; limite de lucratividade alcançado; regulamentos mais severos; margens de segurança mais rigorosas e evolução no perfil operacional das instalações e na regulamentação do meio ambiente. O envelhecimento em componentes e sistemas afeta os recursos disponíveis em uma organização e traz uma maior pressão sobre o custo. As fases de análises de envelhecimento são geralmente a identificação de componentes críticos, a identificação e avaliação dos efeitos do envelhecimento e o desenvolvimento de métodos de mitigação.

A metodologia aqui apresentada visa fornecer um procedimento para avaliar o período em que ocorre envelhecimento causado pelos fatores preponderantes, podendo ser utilizado como ferramenta de auxílio na decisão, não sendo então uma ferramenta de diagnóstico absoluto.

É de grande interesse ter uma noção do tempo a partir do qual o equipamento não é mais viável do ponto de vista econômico, ou seja, o tempo a partir do qual a taxa de falhas dele aumenta, caracterizando o período de envelhecimento do mesmo, onde são necessárias mais ações de manutenção e reparo, havendo um gasto de capital que excede o usual, necessário para manter o equipamento em pleno funcionamento.

Dado que os processos tradicionais de estimativa de confiabilidade de sistemas dependem de tempos de falhas dos equipamentos e sabendo que os custos para ensaios de vida da maioria dos itens são muito elevados, SI & ZHOU (2014) citam a importância de se observar o efeito degradação e propõem uma técnica de estimativa de confiabilidade baseada na degradação.

Pode ser visto que há uma variedade de estudos envolvendo degradação. Tal estudo do envelhecimento de equipamentos pode ser realizado considerando 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 (HENZ, 1997). Para uma melhor análise estatística baseada em dados de um equipamento, é extremamente importante a utilização de um banco de dados confiável, levantado com seriedade e competência, caso contrário, o estudo estatístico não será fiel, logo não sendo útil.

Ainda segundo HENZ (1997), 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.

Erros na confecção de bancos de dados de ocorrências são mais comuns do que se imagina, seja por alguma informação errada ou por dubiedade, gerada por uma possível falta de padronização nos termos ou por deficiências na comunicação entre setores. Esse tipo de problema é algo que precisa ser sanado para que bancos de dados utilizáveis e estatisticamente confiáveis sejam criados.

Tendo em mãos um banco de dados pertinente, o importante agora é saber utiliza-lo de maneira correta. Diversas técnicas estatísticas podem ser utilizadas, todavia, o escopo desse trabalho é utilizar testes estatísticos baseados nos conceitos de distribuições de probabilidade com características de envelhecimento. Tais testes tem o intuito de comparar a informação do banco de dados, respeitando a ordem cronológica dos eventos, com funções chamadas funções-teste, que possuem características de envelhecimento.

É importante salientar que para a maior parte dos itens que compõem aeronaves, por exemplo, estudos realizados no âmbito da metodologia RCM identificaram que nestes itens não ocorrem alteração no comportamento da taxa de falhas desde o início de vida até seu fim (MOUBRAY, 1997), tornando metodologias como esta, desenvolvida e aplicada nesta dissertação, ineficazes (não aplicáveis). Tais itens não sofrem com o efeito degradação da mesma forma que os itens aqui apresentados.

4 FUNÇÕES COM CARACTERÍSTICAS DE ENVELHECIMENTO

Os primeiros conceitos sobre classes de funções com características de envelhecimento surgiram no livro pioneiro de BARLOW & PROSCHAN (1981), o qual teve sua primeira edição impressa pela Holt, Rinehart and Winston (HRW) em 1975.

O documento de LAI (1994) apresenta uma tabela bastante interessante, onde constam várias referências sobre cada uma das classes de funções de envelhecimento em suas primeiras aparições.

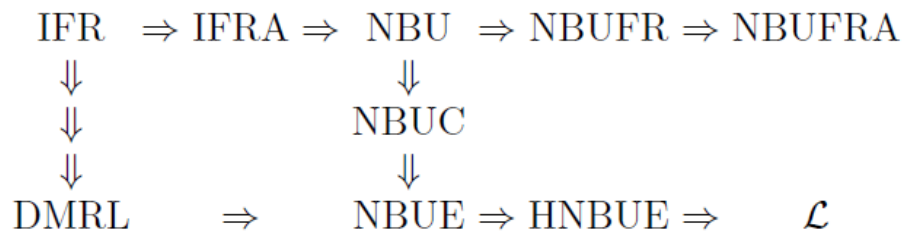
Tabela 9 - Classes de Funções de Envelhecimento, seus Acrônimos e Principais Referências.

<i>Classe</i>	<i>Nome da Classe</i>	<i>Referência</i>
IFR	Increasing Failure Rate	BARLOW & PROSCHAN (1981)
IFRA	Increasing Failure Rate Average	BARLOW & PROSCHAN (1981)
DMRL	Decreasing Mean Residual Life	BRYSON & SIDDIQUI (1969)
NBU	New Better than Used	BARLOW & PROSCHAN (1981)
NBUE	New Better than Used in Expectation	BARLOW & PROSCHAN (1981)
HNBU	Harmonically New Better than Used in Expectation	ROLSKI (1975)
\mathcal{L} (LIFRA)	Classe com característica de envelhecimento baseada na transformada de Laplace (Laplace Increasing Rate on Average)	KLEFSJÖ (1983)
NBUFR	New Better than Used in Failure Rate	DESHPANDE et al (1983)
NBUFRA (NBAFR)	New Better than Used in Failure Rate Average (New Better than Average Failure Rate)	LOH (1984a) e LOH (1984b)
NBUC	New Better than Used in Convex Ordering	CAO & WANG (1991)
SIFR	Stochastically Increasing Failure Rate	SINGH & DESHPANDE (1985)
SNBU	Stochastically New Better than Used	SINGH & DESHPANDE (1985)
NBU-t_0	New Better than Used of Age t_0	HOLLANDER et al (1986)
BMRL-t_0	Better Mean Residual Life at t_0^*	KULASEKER & PARK (1987)
DVRL	Decreasing Variance of Residual Life	LAUNER (1984)
DPRL-α	Decreasing 100 α Percentile Residual Life	JOE & PROSCHAN (1984)
NBUP-α	New Better than Used with Respect to the 100 α Percentile	JOE & PROSCHAN (1984)

Fonte: Adaptado de LAI, 1994.

LAI & XIE (2006) fornecem um esquema da cadeia de implicações para as principais classes de funções com características de envelhecimento:

Figura 18 - Cadeia de Implicações das Classes de Funções com Características de Envelhecimento.



Fonte: LAI, 1994.

O desenvolvimento matemático das implicações descritas acima pode ser conferido em DESHPANDE et al (1986), KOCHAR & WIENS (1987) e parcialmente em BARLOW & PROSCHAN (1981).

Em geral, para as funções citadas aqui, algumas foram encontradas na literatura com mais de uma definição para sua classificação. Assim, cada função é citada por tipo junto com a literatura relacionada a mesma. Os autores geralmente se reportam a função confiabilidade como sendo \bar{F} (*Survivor Function*).

Antes de descrever as classes, é necessário primeiro apresentar a forma em que as variáveis são utilizadas nas equações. Se, por exemplo, os seguintes dados de tempos até falhar foram computados, em horas, para um único equipamento:

Tabela 10 - Dados Genéricos de Falhas de um Único Equipamento.

i	1	2	3	4	5
TTF (Δt)	257	389	415	356	423
Tempo	257	646	1061	1417	1840

Fonte: Próprio Autor.

Para calcular $\lambda(t)$ e $R(t)$, utilizam-se as equações (39) e (44):

$$\lambda_i = \frac{1}{TTF_i} \quad e \quad R_i = e^{-\left[\sum_{j=1}^i \left(\frac{\lambda_j + \lambda_{j-1}}{2}\right) \Delta t_j\right]} \quad \text{para } i > 0$$

Tomando as condições iniciais $\lambda_0 = 0$ e $R_0=1$, tem-se a seguinte tabela de resultados:

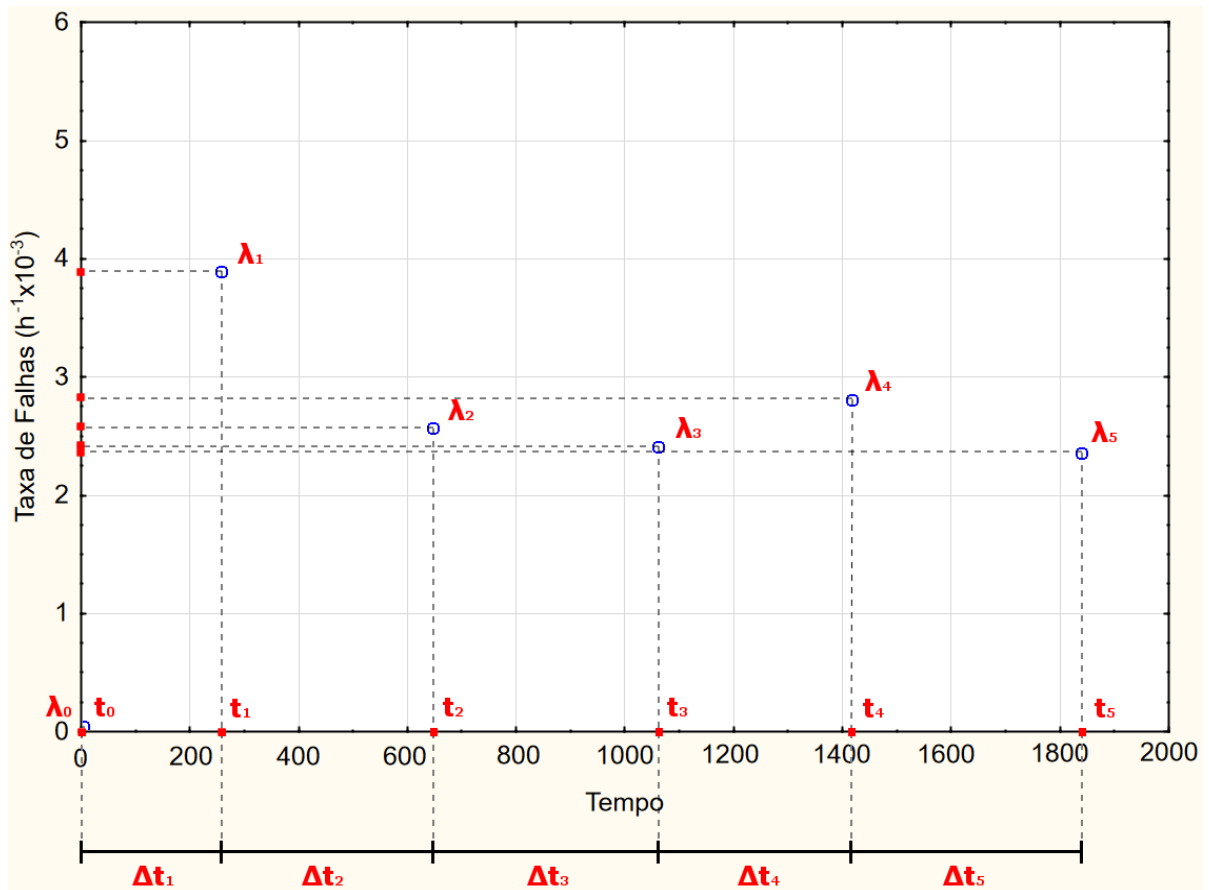
Tabela 11 - Dados Calculados a Partir dos Dados de Falhas de um Único Equipamento.

i	0	1	2	3	4	5
t	0	257	646	1061	1417	1840
λ ($h^{-1} \times 10^{-3}$)	0	3,89	2,57	2,41	2,81	2,36
R	1	0,606616	0,172678	0,061441	0,024262	0,008129

Fonte: Próprio Autor.

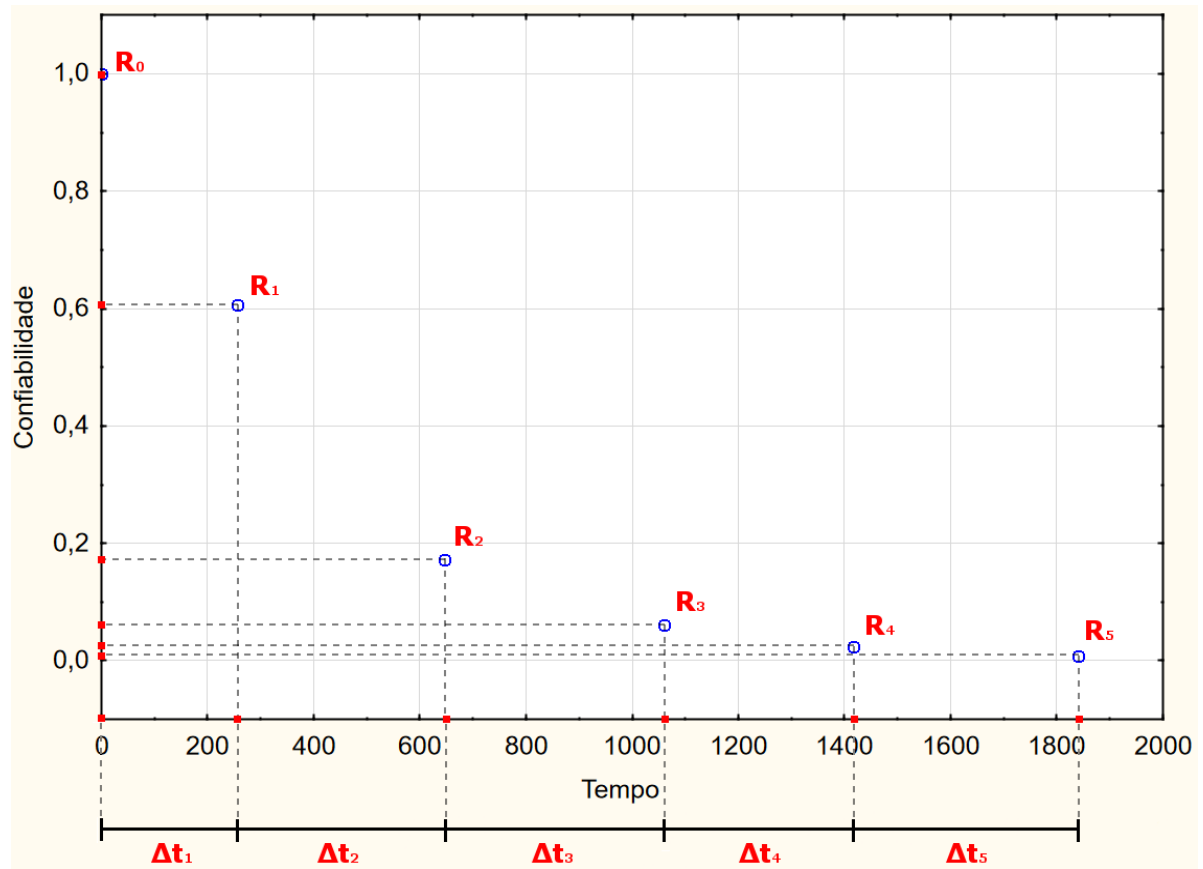
Nas plotagens a seguir podemos ver cada variável interpretada graficamente.

Figura 19 - Descrição de Cada Variável no Gráfico de Taxa de Falhas.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 20 - Descrição de Cada Variável no Gráfico de Confiabilidade.



Fonte: Próprio Autor.

A forma em que as variáveis R , λ , t e Δt se apresentam, nas Figuras 19 e 20, será a utilizada na descrição matemática das classes de funções com características de envelhecimento.

Os tópicos que seguem agora irão descrever as definições matemáticas das funções tratadas na metodologia deste documento (IFR, IFRA, NBU, NBUE, NBUFR, DMRL, HNBUE, NBAFR), para que possa ser feita uma comparação com os dados obtidos em campo e identificação dos intervalos em que os dados indicam degradação do item sob ponto de vista de cada uma das classes de funções teste.

4.1 IFR

Ao todo, foram encontradas 4 definições diferentes para classificação de uma função IFR. Elas serão aqui nomeadas como sendo tipo 1, tipo 2, tipo 3 e tipo 4. Sempre que houver mais de uma definição para uma classe de funções, esse critério de nomenclatura será utilizado.

A comparação com a classe de funções IFR verifica o comportamento da taxa de falhas de uma maneira geral, investigando o crescimento ou tendência de crescimento da mesma.

4.1.1 IFR Tipo 1 (IFR1)

EBRAHIMI (1993) cita a definição de função IFR como sendo uma função que possui a seguinte característica:

$$\frac{R(t+x)}{R(t)} \text{ é decrescente em } t \text{ para todo } t \geq 0 \text{ e } x > 0.$$

Mudando a equação para o formato dos termos apresentados nas Figuras 19 e 20, temos:

$$IFR1 \rightarrow \frac{R_{i+x}}{R_i} \text{ é decrescente para todo } i \geq 0 \text{ e } x > 0.$$

Observe que o i representa o índice do t em questão.

A equação trata-se de uma comparação entre a taxa de falha de determinado período com cada um dos períodos que seguem. Caso a taxa de falhas dos períodos subsequentes sejam menores do que o período em questão, então diz-se que a função é IFR tipo 1 a partir daquele período até o último período respeitado pela equação. Ou seja, para o caso de tempo com índices, a seguinte verificação é realizada:

$$\frac{R_{i+x}}{R_i} > \frac{R_{(i+1)+x}}{R_{(i+1)}} > \frac{R_{(i+2)+x}}{R_{(i+2)}} > \dots > \frac{R_{k+x}}{R_k} \quad \forall x > 0, k > i$$

Com todas as verificações atendidas, confirma-se então que a função é IFR1 no intervalo de tempo índice i até o tempo de índice k . Ou seja, a função é IFR1 no intervalo $[t_i, t_k]$.

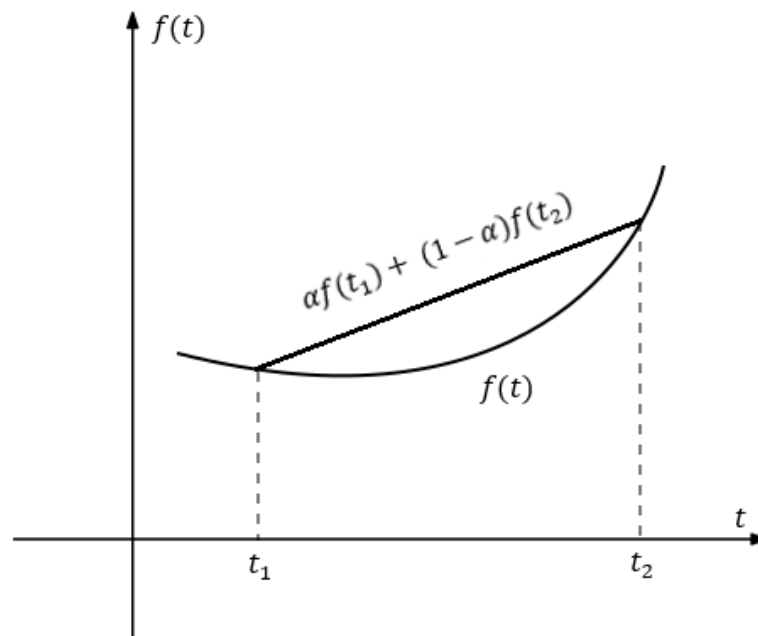
4.1.2 IFR Tipo 2 (IFR2)

De acordo com ROJO (1995), uma função é IFR se a função Taxa de Risco Acumulada é uma função convexa, assim:

$$-\ln(R(t)) \text{ é convexa.}$$

Agora é necessária uma abordagem rápida sobre como identificar uma função convexa. Podemos ver na Figura 4.4 o esboço de uma dessas funções. Se fizermos uma interpolação linear $\alpha f(t_1) + (1-\alpha)f(t_2)$ e todos os pontos desse segmento de reta, que está definido no intervalo $[t_1, t_2]$, forem maiores ou iguais ao valor da função $f(\alpha f(t_1) + (1-\alpha)f(t_2))$, então a função é dita convexa naquele intervalo.

Figura 21 - Ilustração Geométrica da Definição de Função Convexa.



Fonte: Adaptado de TORRES, 2001, pg. 16.

Assim, uma função é dita convexa quando:

$$f(\alpha t_1 + (1 - \alpha)t_2) \leq \alpha f(t_1) + (1 - \alpha)f(t_2) \quad \text{para } t_1, t_2 \in \text{domínio e } \alpha \in (0,1)$$

Se for calculada a equação da reta para aquele intervalo, pode ser feita uma comparação dinâmica para todos os pontos no intervalo. Para calcular a equação da reta $f_r(x) = ax+b$, fazemos:

$$\begin{cases} f(t_1) = a(t_1) + b & (47) \\ f(t_2) = a(t_2) + b & (48) \end{cases}$$

Subtraindo a Eq. (48) da Eq. (47), temos:

$$f(t_1) - f(t_2) = a(t_1 - t_2)$$

Isolando “a”:

$$a = \frac{f(t_1) - f(t_2)}{(t_1 - t_2)} \quad (49)$$

Substituindo a Eq. (49) na Eq. (47), tem-se:

$$f(t_1) = \left(\frac{f(t_1) - f(t_2)}{(t_1 - t_2)} \right) (t_1) + b$$

Isolando “b”:

$$b = f(t_1) - \left(\frac{f(t_1) - f(t_2)}{(t_1 - t_2)} \right) (t_1) \quad (50)$$

Encontrados os coeficientes a e b , os mesmos podem ser substituídos na equação da reta para encontrar:

$$f_r(t) = \left(\frac{f(t_1) - f(t_2)}{(t_1 - t_2)} \right) t + f(t_1) - \left(\frac{f(t_1) - f(t_2)}{(t_1 - t_2)} \right) (t_1) \quad (51)$$

E finalmente, arrumando a Eq. (51):

$$f_r(t) = \left(\frac{f(t_1) - f(t_2)}{t_1 - t_2} \right) (t - t_1) + f(t_1) \quad (52)$$

Com isso, a função é IFR2 no intervalo $[t_1, t_2]$ se a seguinte condição for satisfeita para todo ponto t contido neste intervalo:

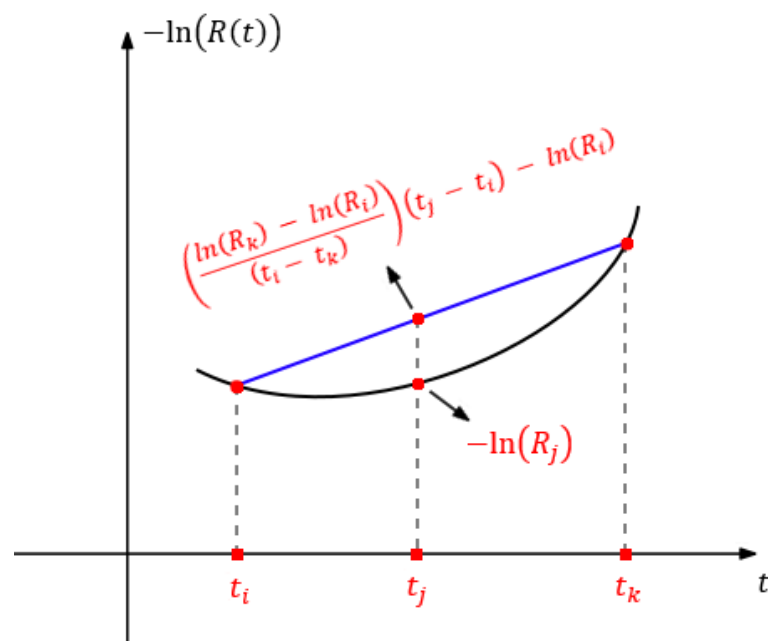
$$\left(\frac{\ln(R(t_2)) - \ln(R(t_1))}{t_1 - t_2} \right) (t - t_1) - \ln(R(t_1)) \geq -\ln(R(t))$$

Caso a verificação seja satisfeita para todo par $[t_1, t_2]$ e todo t dentro deste intervalo, dizemos que a função é IFR2, caso contrário, podem ser identificados os intervalos em que a função faz parte desta classe. Transformando a equação no formato de índices:

$$IFR2 \quad \rightarrow \quad \left(\frac{\ln(R_k) - \ln(R_i)}{t_i - t_k} \right) (t_j - t_i) - \ln(R_i) \geq -\ln(R_j) \quad \forall j, \quad i < j < k$$

A ilustração a seguir mostra a comparação realizada no teste:

Figura 22 - Comparação entre a Função $-\ln(R(t))$ com a Função da Reta entre os Pontos.



Fonte: Próprio Autor.

Se ao percorrer todos os tempos de índice j , no intervalo $[t_i, t_k]$, todas as comparações passarem no teste, então a função é convexa neste intervalo, logo é IFR2.

4.1.3 IFR Tipo 3 (IFR3)

A definição tipo 3 de função IFR pode ser vista em BAGAIN & JAIN (1994). Esta é a definição mais simplista de função IFR, que verifica o crescimento da taxa de falhas no tempo:

$\lambda(t)$ é não – decrescente em t para todo t .

Assim:

IFR3 $\rightarrow \lambda_i$ é não – decrescente para todo i .

Esta análise representa o clássico final de vida na curva da banheira do item, onde a taxa de falhas não decresce. Ao verificar o intervalo no qual a taxa de falhas não decresce, se confirma a função pertencer à classe IFR3 neste intervalo.

4.1.4 IFR Tipo 4 (IFR4)

Em SENGUPTA et al (1995), é vista uma definição de função IFR muito similar à definição IFR1, com a diferença de somente as taxas imediatamente seguintes de função confiabilidade serem analisadas.

$\frac{R(t+1)}{R(t)}$ é decrescente em t para todo $t \geq 0$.

Ou seja:

IFR4 $\rightarrow \frac{R_{i+1}}{R_i}$ é decrescente para todo $i \geq 0$.

Assim:

$$\frac{R_{i+1}}{R_i} > \frac{R_{(i+1)+1}}{R_{(i+1)}} > \frac{R_{(i+2)+1}}{R_{(i+2)}} > \dots > \frac{R_{k+1}}{R_k} \quad k > i$$

Com todas verificações acima satisfeitas, a função é dita IFR4 no intervalo $[t_i, t_k]$.

4.2 IFRA

Esse tipo de função é caracterizado pelo crescimento da taxa de falhas na média. Foram encontradas 2 diferentes definições para essa classe.

4.2.1 IFRA Tipo 1 (IFRA1)

Os trabalhos de EBRAHIMI (1993) e SENGUPTA et al (1995) definem uma função IFRA como sendo:

$$(R(t))^{\frac{1}{t}} \text{ é decrescente em } t \text{ para todo } t > 0.$$

Convertendo a equação, temos:

$$\text{IFRA1} \quad \rightarrow \quad (R_i)^{\frac{1}{t_i}} \text{ é decrescente para todo } i > 0.$$

A definição IFRA1 implica no atendimento da seguinte condição:

$$(R_i)^{\frac{1}{t_i}} > (R_{(i+1)})^{\frac{1}{t_{(i+1)}}} > (R_{(i+2)})^{\frac{1}{t_{(i+2)}}} > \dots > (R_k)^{\frac{1}{t_k}} \quad \text{para } k > i$$

Com a validação das condições, a função é dita IFRA1 no intervalo $[t_i, t_k]$.

4.2.2 IFRA Tipo 2 (IFRA2)

Na literatura de ROJO (1995) podemos ver a seguinte definição para função IFRA:

$$\frac{-\ln(R(t))}{t} \text{ é não - decrescente em } t \text{ para todo } t > 0.$$

Então:

$$\text{IFRA2} \quad \rightarrow \quad \frac{-\ln(R_i)}{t_i} \text{ é não - decrescente para todo } i > 0.$$

Sendo assim, matematicamente podemos comprovar se uma função é IFRA2 no intervalo $[t_i, t_k]$ fazendo a verificação:

$$\frac{-\ln(R_i)}{t_i} \leq \frac{-\ln(R_{(i+1)})}{t_{(i+1)}} \leq \frac{-\ln(R_{(i+2)})}{t_{(i+2)}} \leq \dots \leq \frac{-\ln(R_k)}{t_k} \quad \text{para } k > i$$

4.3 NBU

A definição unânime encontrada para função NBU (EBRAHIMI, 1993 - ROJO, 1995 - SENGUPTA et al, 1995) foi:

$$R(x + y) \leq R(x) \cdot R(y) \quad \forall x, y \geq 0$$

BAGAIN & JAIN (1994) apresentam a mesma inequação, porém, acabam trocando o sinal da inequação, caracterizando assim um erro na sua definição de classe NBU.

Transformando a equação no formato de índices, tem-se:

$$\text{NBU} \quad \rightarrow \quad R_{(i+k)} \leq R_i \cdot R_k \quad \text{para } k \geq i \geq 0$$

Começando com $i=0$, tem-se a comparação $R_{(0+k)} \leq R_0 \cdot R_k$, e então o índice k é incrementada um a um, começando em zero, até que $(i+k)$ seja o índice do último valor de R no banco de dados. Caso todas as verificações de k passem nas comparações, então diz-se que a função é NBU a partir do tempo de índice $i=0$. Veja que também podem ser calculados os intervalos em que a função é NBU, caso não seja completamente.

4.4 NBUE

Foram encontradas na literatura duas definições para classe NBUE.

4.4.1 NBUE Tipo 1 (NBUE1)

Em EBRAHIMI (1993) e SENGUPTA (1995), a definição de função NBUE se dá para uma função que obedece a seguinte inequação:

$$\int_t^{\infty} R(x) \cdot dx \leq E \cdot R(t) \quad \forall t \geq 0.$$

Sendo,

$$E = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (53)$$

Como os dados nesse trabalho são pontuais, tem-se que converter a equação para a sua devida forma de somatório com índices, com isso, logo em seguida aplicando a adaptação proposta:

$$E = \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j \quad (54)$$

E então, substituindo a Eq. (54) na inequação que descreve uma função NBUE1, e então aplicando a mesma modificação feita na Eq. (43) para se chegar a Eq. (44), tem-se:

$$NBUE1 \rightarrow \sum_{j=i+1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j \leq \left(\sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j \right) \cdot R_i \quad \text{para } i \geq 0$$

O valor de índice de tempo i que satisfizer a comparação acima é o valor do qual a partir dele a função é NBUE tipo 1, até o último ponto do banco de dados ou até o último índice que satisfizer a inequação.

No trabalho de HENZ (1997), ele acaba esquecendo-se do termo Δt nos somatórios, quando faz a conversão de integral para somatório, e isso acaba se repetindo para todas as conversões, erroneamente.

4.4.2 NBUE Tipo 2 (NBUE2)

Os autores BAGAI & JAIN (1994) e LIM & PARK (1995) apresentam a função NBUE como sendo:

$$m(t) \leq m(0) \quad \forall t \geq 0$$

Onde a função $m(t)$ representa a vida residual média em t , e sua equação geral é, de acordo com o relatório técnico sobre vida residual média, de GUESS & PROSCHAN (1985):

$$m(t) = \frac{\int_t^{\infty} R(u) \cdot du}{R(t)} \quad (55)$$

Convertendo a Eq. (4.9) para sua forma de somatório com índices, e a devida adaptação, temos:

$$m_i = \frac{\sum_{j=i+1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j}{R_i} \quad (56)$$

Sendo assim:

$$NBUE2 \quad \rightarrow \quad \frac{\sum_{j=i+1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j}{R_i} \leq \frac{\sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j}{R_0} \quad \forall i \geq 0$$

4.5 NBUFR

Seguindo a definição de BAGAI & JAIN (1994), uma função é NBUFR se as taxas de falha dos períodos seguintes forem maiores ou iguais à taxa de falha inicial, ou seja:

$$NBUFR \quad \rightarrow \quad \lambda(t) \geq \lambda(0) \quad \forall t \geq 0$$

Logo:

$$NBUFR \quad \rightarrow \quad \lambda_i \geq \lambda_0 \quad \forall i \geq 0$$

Assim, é possível identificar intervalos de uma função em que a mesma se comporta como uma função NBUFR.

4.6 DMRL

Na literatura consta duas diferentes definições para classe DMRL.

4.6.1 DMRL Tipo 1 (DMRL1)

BAGAI & JAIN (1994) consideram uma função DMRL se a vida residual média da mesma for não crescente em todo domínio. Lembrando, da Eq. (56), que:

$$m_i = \frac{\sum_{j=i+1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j}{R_i}$$

Temos, então:

$$DMRL1 \quad \rightarrow \quad \frac{\sum_{j=i+1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j}{R_i} \text{ é não - crescente} \quad \forall i \geq 0$$

Ou seja, a seguinte análise comparativa desse ser feita:

$$\frac{\sum_{j=i+1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j}{R_i} \geq \frac{\sum_{j=(i+1)+1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j}{R_{(i+1)}} \geq \dots \geq \frac{\sum_{j=k+1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j}{R_k} \quad \text{para } k > i$$

Após verificação e confirmação das comparações anteriores, a função é dita NBUFR no intervalo $[t_i, t_k]$.

4.6.2 DMRL Tipo 2 (DMRL2)

Consta em LIM & PARK (1995) a seguinte definição para função DMRL:

$$m(s) \geq m(t_2) \quad \forall t_2 \geq s \geq t_1$$

Que equivale à:

$$m_s \geq m_k \quad \forall k \geq s \geq i$$

Assim, a análise deve varrer todos os valores t_s no intervalo $[t_i, t_k]$, iniciando de $t_s = t_i$, e analisar se a vida residual média é, em cada um de todos os pontos, maior do que a vida residual média em t_k .

Temos então, pela Eq. (56), que:

$$DMRL2 \quad \rightarrow \quad \frac{\sum_{j=s+1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j}{R_s} \geq \frac{\sum_{j=k+1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j}{R_k} \quad \forall k \geq s \geq i$$

Caso a análise seja confirmada, a função é dita pertencente a classe DMRL2 no intervalo $[t_i, t_k]$.

4.7 HNBUE

Tal classe de funções foi apresentada por ROLSKI (1975) e estudada, 7 anos depois, por KLEFSJÖ (1982).

Trabalhos como os de CAI (1994), BASU & BHATTACHARJEE (1984) e CHENG & LAM (2001) descrevem e consideram em seus trabalhos uma função como sendo HNBUE se a seguinte condição for satisfeita:

$$\int_t^{\infty} R(u) \cdot du \leq E \cdot e^{-\frac{t}{\mu}} \quad \forall t \geq 0$$

Sendo E o valor médio, dado pela Eq. (53):

$$E = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt$$

Transformando as inequações para somatórios finitos, com orientação por índices, e substituindo, da Eq. (54),

$$E = \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j$$

na inequação HNBUE, temos então:

$$HNBUE \rightarrow \sum_{j=i+1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j \leq \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j \cdot e^{-\frac{t_i}{\left(\sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{R_j + R_{j-1}}{2} \right) \cdot \Delta t_j \right)}} \quad \forall i \geq 0$$

4.8 NBAFR

LOH (1984a) apresenta a definição de função NBAFR como sendo:

$$\lambda(0) \leq t^{-1} \cdot \int_0^t \lambda(s) \cdot ds \quad \text{para } t > 0$$

No trabalho desenvolvido por TIWARI & ZALKIKAR (1994), é citado que alternativamente a inequação utilizada pode ser:

$$R(t) \leq e^{-\lambda(0) \cdot t} \quad \text{para } t > 0$$

Com isso, utilizando a inequação alternativa, fazendo a devida conversão para a formatação utilizada no atual documento, encontra-se:

$$NBAFR \quad \rightarrow \quad R_i \leq e^{-\lambda_0 \cdot t_i} \quad \text{para } i \geq 0$$

5 PREPARO E FILTRAGEM DE DADOS

Os dados brutos muitas vezes precisam do tratamento adequado antes que possam ser utilizados. As técnicas de suavização por médias móveis e médias móveis exponenciais fornecem a possibilidade de uma suavização dos dados para que a distância entre os pontos, ou a dispersão, seja minimizada, preparo que se mostra necessário dependendo da finalidade na utilização dos dados.

A presença de ruídos ou dados gerados por erro humano ou até erros de leitura por sensores se mostra um problema, uma vez que geram dados falsos que serão contabilizados nas técnicas matemáticas, todavia, estes podem ser expurgados através de técnicas e artifícios conhecidos, como por exemplo a ferramenta Carta de Controle.

No aplicativo concebido como fruto deste documento, é dada ao usuário a opção de suavização por médias móveis ou médias móveis exponenciais e a utilização de Carta de Controle, no intuito de se moldar à finalidade do mesmo e eliminar dados que contenham vícios, erros, anomalias ou afins.

5.1 SUAVIZAÇÃO POR MÉDIAS MÓVEIS

A utilização de suavização por Médias Móveis Simples (SMA) e Médias Móveis Exponenciais (EMA) está presente em uma ampla gama de variedade de estudos e aplicações. Alguns exemplos de sua utilização são: Previsão de demanda (PEREIRA et al, 2006), Filtragem de ruídos (KUNCAR, 2016), Análise de séries temporais (HANSUN, 2013), Suavização de controle em parques eólicos (HAQUE et al, 2015) e Limpeza de medições de potência (KANE & COOKINGHAM, 1999).

O aplicativo é provido da opção de suavização por SMA e EMA, caso o banco de dados utilizado pelo usuário, dependendo da aplicação, necessite de uma diminuição na dispersão dos dados.

5.1.1 Médias Móveis Simples (SMA)

Considerando, como caráter exemplificativo, um banco de dados contendo N dados, sendo eles $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_N$. Na suavização, de ordem k , desses dados por médias móveis simples, o primeiro dado suavizado pode ser obtido pela equação:

$$Y_k^* = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_k}{k} \quad (57)$$

Onde o sobrescrito $*$ representa um valor suavizado. A média então se move por todo o banco de dados, mantendo constantes o valor k e o número de termos do somatório do numerador. Assim, podemos dizer que o novo conjunto de dados suavizados é:

$$Y_k^* = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_k}{k},$$

$$Y_{k+1}^* = \frac{Y_2 + Y_3 + Y_4 + \dots + Y_{k+1}}{k},$$

...

$$Y_N^* = \frac{Y_{N-k} + Y_{N-k+1} + Y_{N-k+2} + \dots + Y_N}{k}.$$

É interessante notar que uma suavização de ordem k faz com que o número total de dados seja subtraído em um valor k .

5.1.2 Médias Móveis Exponenciais (EMA)

A principal diferença entre os métodos SMA e EMA é que o método de suavização por médias móveis exponenciais dá uma importância maior, proporcional à α , ao último termo do subconjunto.

Tomando o mesmo conjunto de dados $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_N$, para realizar a suavização EMA deste conjunto, devemos escolher a ordem k da suavização, assim como no SMA, e escolher adicionalmente um termo α , sendo $0 < \alpha < 1$, que é o responsável por ponderar a

importância entre o último dado e os demais. O primeiro dado suavizado, suavizado se calcula exatamente como no método SMA:

$$Y_k^* = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_k}{k} \quad (58)$$

E os demais pela equação:

$$Y_j^* = Y_j \cdot \alpha + Y_{j-1}^* (1 - \alpha) \quad (59)$$

Sendo J apenas um contador que se inicia em k+1 e vai até N.

Levando em conta as considerações anteriores, temos que o novo conjunto de dados suavizado pelo método EMA é:

$$Y_k^* = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_k}{k},$$

$$Y_{k+1}^* = Y_{k+1} \cdot \alpha + Y_k^* (1 - \alpha),$$

...

$$Y_N^* = Y_N \cdot \alpha + Y_{N-1}^* (1 - \alpha).$$

Na prática, o método EMA possui uma resposta mais rápida a mudanças de magnitude se comparado ao método SMA, que possui uma resposta mais atrasada.

5.2 CARTAS DE CONTROLE

Como cita HENZ (1997), as cartas de controle podem ser utilizadas para as seguintes finalidades:

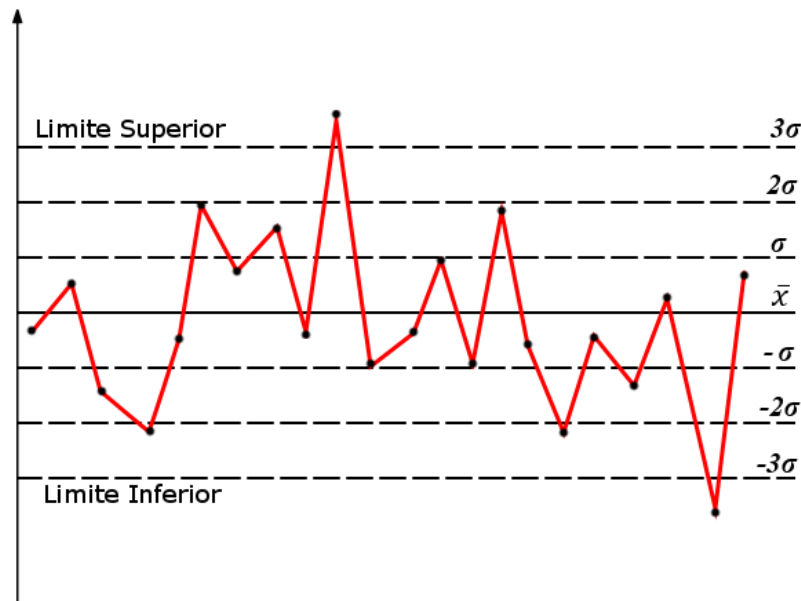
- Checar tendências gerais, como o desgaste de equipamentos quando a taxa de risco de falha cresce no tempo;
- Verificar flutuações de magnitude não usuais;
- Observar o agrupamento de medidas anormais em certos pontos;
- Ver relações entre medidas individuais e alguns padrões previamente estabelecidos;
- Constatar se há instabilidade do conjunto de dados verificando a ocorrência de pontos atípicos no histórico;

FOGLIATTO et al (2003) diz que “Tais cartas permitem o monitoramento de variáveis (por exemplo, medições de desempenho, expressas em valores contínuos) ou atributos (características de qualidade expressas em valores discretos) que determinam o desempenho do processo. O objetivo das cartas de controle é possibilitar uma avaliação da estabilidade do processo e identificação de causas especiais de variação”.

HENZ (1997) ainda destaca a importância da ferramenta de Cartas de Controle, explicando que através dela pode-se detectar pontos atípicos dos dados sob análise que podem não expressar a situação real do item ou do conjunto de itens, ou mesmo analisar a tendência dos dados originais (sem suavização).

Um gráfico típico de carta de controle pode ser visto na Figura 23, que é uma representação gráfica de uma característica de qualidade que foi medida ou calculada a partir de uma amostra versus o número de amostra ou tempo. Em geral, as amostras são selecionadas em intervalos periódicos, tais como cada hora, ou na ocorrência de eventos, como falha.

Figura 23 - Exemplo Genérico de uma Carta de Controle.



Fonte: Próprio Autor.

Pode ser observado que o gráfico consta de 8 setores, os quais os pontos podem estar localizados: Abaixo de -3σ , entre -2σ e -3σ , entre $-\sigma$ e -2σ , entre \bar{x} e $-\sigma$, entre \bar{x} e σ , entre σ e 2σ , entre 2σ e 3σ e acima de 3σ . Tais setores são responsáveis por verificar os possíveis problemas no banco de dados, para que o usuário seja capaz de expurgá-los. Vide SANTOS (2013), os limites são calculados através da média dos dados \bar{x} e o desvio padrão σ dos mesmos. Assim temos que a média \bar{x} , em um conjunto de dados contendo n dados é:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (60)$$

E o desvio padrão, σ :

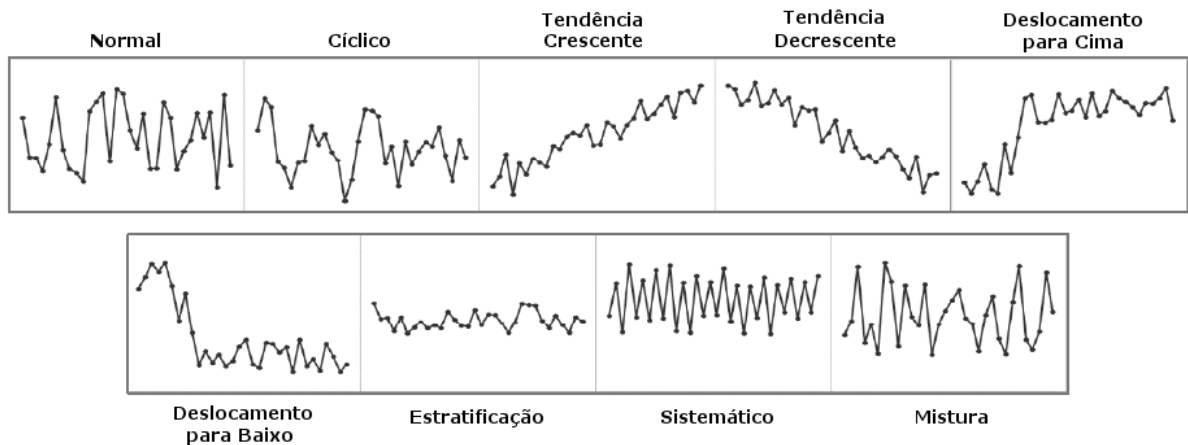
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (61)$$

Com os valores de \bar{x} e σ devidamente calculados, os setores podem ser construídos e todos os pontos x plotados sobre a carta de controle e então serem observados os padrões, se houver, de tendência e comportamento.

5.2.1 Tendências

Os principais padrões de comportamento que podem ser observados em uma carta de controle são citados no trabalho de LAVANGNANANDA (2015), fruto de suas observações em pesquisas científicas prévias. Tais comportamentos e tendências são ilustrados na figura a seguir:

Figura 24 - Principais Padrões de Tendências Possíveis em uma Carta de Controle.



Fonte: LAVANGNANANDA, 2015.

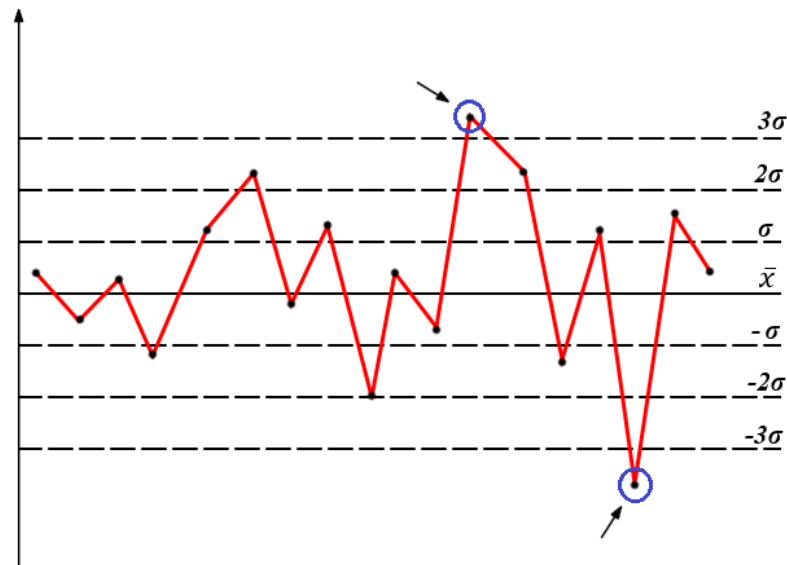
5.2.2 Regras

A outra capacidade e finalidade das cartas de controle é a remoção de pontos anômalos, estes removidos vide critérios previamente estabelecidos, de acordo com a aplicação. As principais regras de remoção são aplicadas de acordo com as seguintes situações citadas nas seções em sequência (SANTOS, 2013).

5.2.2.1 Ponto Fora dos Limites Máximo e Mínimo

Flutuações de magnitude não usuais são considerados pontos anormais. A figura a seguir ilustra tal situação:

Figura 25 - Exemplo de pontos fora dos limites.



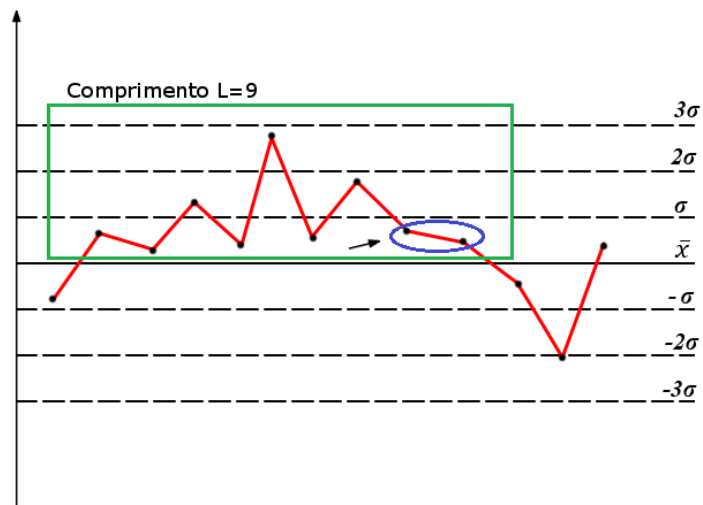
Fonte: Próprio Autor.

Esta regra remove os pontos que possuem magnitude acima do valor 3σ e abaixo do valor -3σ . Tais pontos são considerados estarem fora do limite de controle. Note que, ao serem removidos os pontos circunscritos na Figura 25, a anomalia é expurgada.

5.2.2.2 Sequencias

A carta de controle é formada por dois lados: Lado Superior (LS, superior a \bar{x}) e Lado Inferior (LI, inferior a \bar{x}). Esta regra visa controlar sequências consecutivas, analisadas em subconjuntos de comprimento L , que possam presentes em grande número em um mesmo lado da carta. Geralmente um comprimento $L=8$ contendo somente pontos em um mesmo lado da carta é considerada uma situação anormal (SANTOS, 2013), assim, a partir do sétimo ponto, os demais serão eliminados, de acordo com esta regra. A Figura 26, a seguir, exemplifica esta situação.

Figura 26 - Nove Pontos Consecutivos Incidindo no Lado Superior da Carta de Controle.



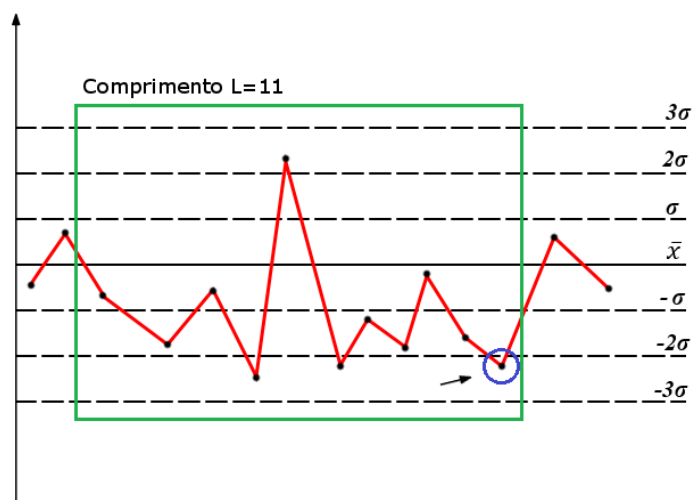
Fonte: Próprio Autor.

Esta regra também identifica pontos como atípicos nas seguintes situações (SANTOS, 2013):

- Pelo menos 10 de 11 pontos consecutivos incidem em um mesmo lado da CC;
- Pelo menos 12 de 14 pontos consecutivos incidem em um mesmo lado da CC;
- Pelo menos 16 de 20 pontos consecutivos incidem em um mesmo lado da CC;

A Figura 27 exemplifica a situação a):

Figura 27 - Dez de Onze Pontos Consecutivos Incidindo do Mesmo Lado da Carta De Controle.



Fonte: Próprio Autor.

Pode se observar na Figura 27 que o ponto circulado deve ser removido afim de a anomalia ser contornada.

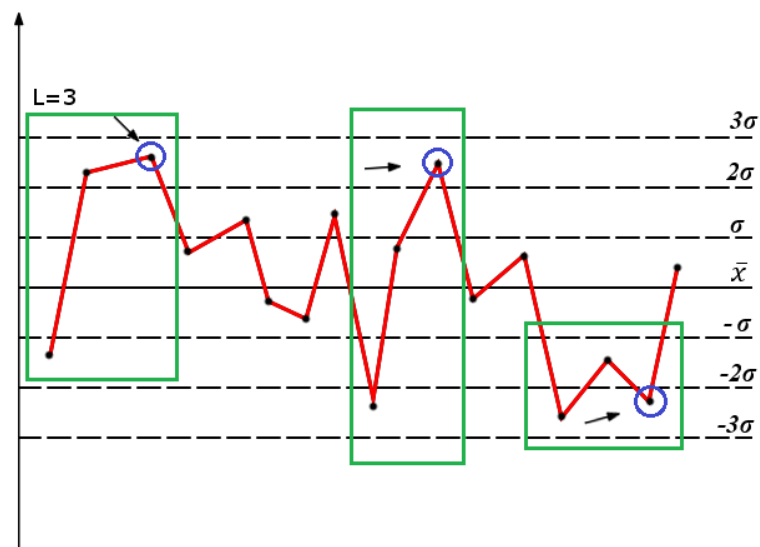
5.2.2.3 Análise de Setores

Este critério de remoção analisa os setores para remover pontos. De acordo com SANTOS (2013), a seguinte situação é anormal:

- 2 entre 3 pontos consecutivos incidem além das linhas $\pm 2\sigma$;

A Figura 28 ilustra uma aparição tripla desta ocorrência:

Figura 28 - Dois entre Três Pontos Consecutivos Incidindo Além das Linhas.



Fonte: Próprio Autor.

Complementarmente, HENZ (1997) cita a seguinte situação como uma ocorrência anormal:

- 4 entre 5 pontos consecutivos incidem além das linhas $\pm\sigma$;

6 A METODOLOGIA

Com as técnicas de suavização, a carta de controle e as funções testes devidamente apresentadas e definidas, pode ser dado início à metodologia.

6.1 COMPROVAÇÃO DA METODOLOGIA

Uma ótima maneira de se verificar o uso das comparações com as classes de funções que apresentam envelhecimento como um meio válido para identificação da degradação, é aplicar a metodologia para um conjunto de dados os quais se sabe que há envelhecimento. Como citado anteriormente, na seção 2.2.7.2, a distribuição de Weibull com parâmetro de forma $\beta > 1$ representa o período de degradação de um item (Final de vida da curva da banheira), apresentando um comportamento crescente da função taxa de falhas. Sendo assim, se tomarmos como exemplo a distribuição de Weibull com parâmetro de forma $\beta = 1,2$ e parâmetro de escala $\eta = 1$, podemos utilizar a equação da taxa de falhas Weibull, Eq. (37), e equação da confiabilidade Weibull, Eq. (38), mostrados na seção 2.2.7.2 e obter os resultados mostrados na Tabela 13.

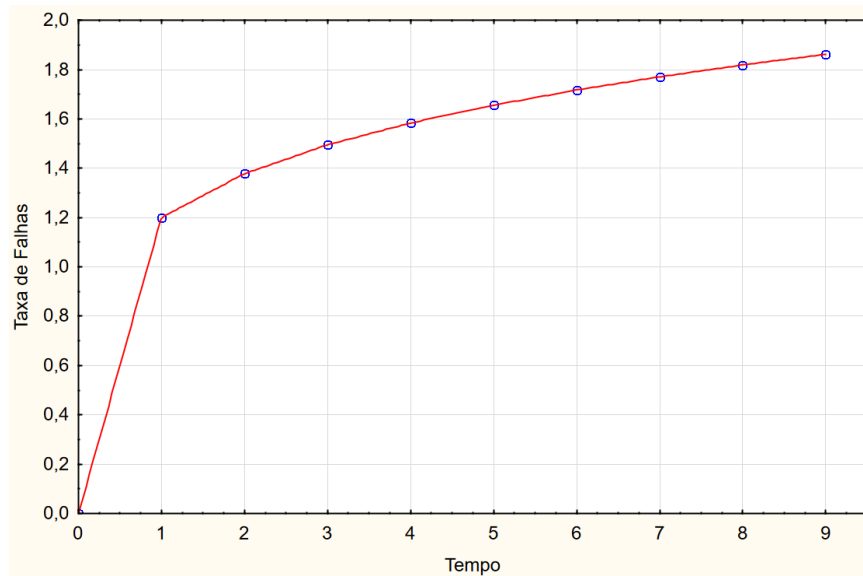
Tabela 12 - Valores da Taxa de Falha e Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de $\beta=1,2$ e $\eta=1$.

t	$\lambda(t)$	R(t)
0	0,0000	1,000000000
1	1,2000	0,367879441
2	1,3784	0,100520186
3	1,4949	0,023820878
4	1,5834	0,005102464
5	1,6557	0,001009149
6	1,7172	0,000186736
7	1,7709	0,000032626
8	1,8189	0,000005418
9	1,8622	0,000000860

Fonte: Próprio Autor.

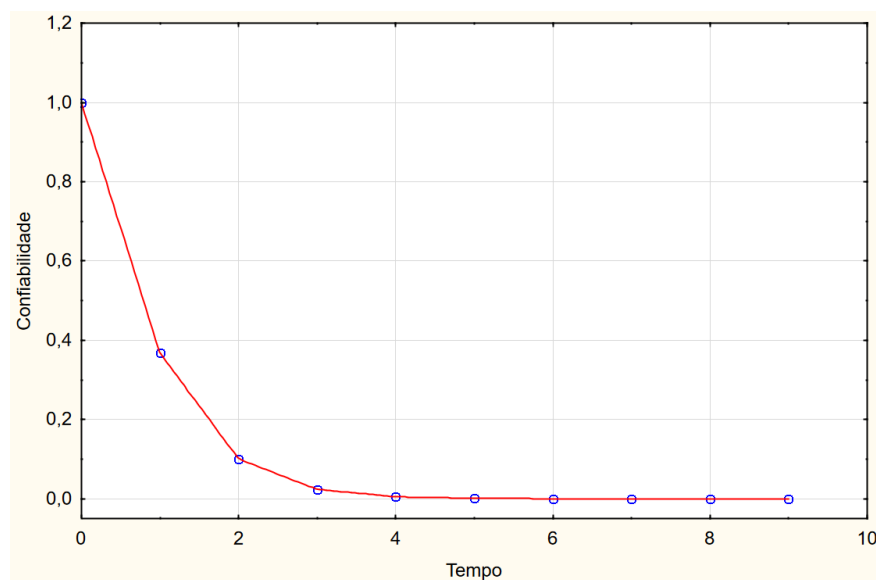
Os gráficos dos resultados da Tabela 13 podem ser vistos nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 - Gráfico da Taxa de Falhas para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=1,2$ e $\eta=1$.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 30 - Gráfico da Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=1,2$ e $\eta=1$.



Fonte: Próprio Autor.

Como pode ser visto na Figura 29, a distribuição Weibull com tais parâmetros apresenta uma taxa de falhas crescente, indicando degradação.

Assim, se aplicarmos os valores de $\lambda(t)$ e $R(t)$ nas comparações com as classes de funções com características de envelhecimento, apresentadas no Capítulo 4, podemos chegar a conclusão que todas elas indicam que há envelhecimento de fato:

Tabela 13 - Teste das Classes para Presença de Envelhecimento para Distribuição Weibull $\beta=1,2$ e $\eta=1$.

Classe	Indicação do Envelhecimento	TID
IFR1	Sim ✓	$t = 0$
IFR2	Sim ✓	$t = 0$
IFR3	Sim ✓	$t = 0$
IFR4	Sim ✓	$t = 0$
IFRA1	Sim ✓	$t = 1$
IFRA2	Sim ✓	$t = 1$
NBU	Sim ✓	$t = 0$
NBUE1	Sim ✓	$t = 0$
NBUE2	Sim ✓	$t = 0$
NBUFR	Sim ✓	$t = 0$
DMRL1	Sim ✓	$t = 0$
DMRL2	Sim ✓	$t = 0$
HNBUE	Sim ✓	$t = 0$
NBAFR	Sim ✓	$t = 0$

Fonte: Próprio Autor.

O caso teste, então, comprovou a validade no uso das classes de funções que apresentam envelhecimento na identificação da presença de degradação em uma outra função que de fato apresenta degradação. É possível ver que as Classes IFRA1 e IFRA2 acusam degradação a partir de $t = 1$ devido ao fato de começarem a verificação a partir do índice $i=1$, uma vez que para $i=0$, $t=0$, e as equações de IFRA1 e IFRA2 apresentam uma descontinuidade neste ponto.

A próxima verificação é em relação a verificação de “falsos-positivos”, ou seja, testar uma função a qual se conhece a não presença de degradação. Com a versatilidade da função Weibull, se for utilizado um parâmetro de forma $\beta < 1$, o resultado será uma função taxa de falhas decrescente no tempo. Assim, se escolhermos por exemplo $\beta = 0,8$ e $\eta = 1$, e calcularmos os mesmos dados da Tabela 6.1 para esses novos parâmetros, obtem-se como resultado a Tabela 15.

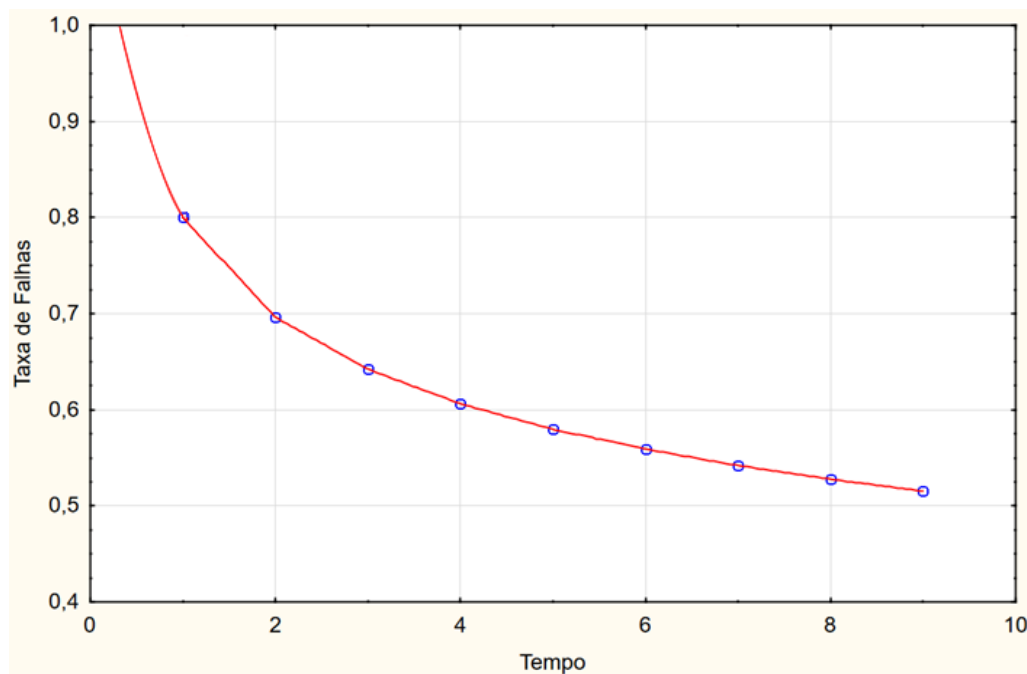
Tabela 14 - Valores da Taxa de Falha e Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de $\beta=0,8$ e $\eta=1$.

t	$\lambda(t)$	R(t)
0^+	∞	1,000000000
1	0,8000	0,367879441
2	0,6964	0,175327236
3	0,6422	0,089974886
4	0,6063	0,048246444
5	0,5798	0,026678472
6	0,5591	0,015101477
7	0,5421	0,008710062
8	0,5278	0,005102464
9	0,5155	0,003028929

Fonte: Próprio Autor.

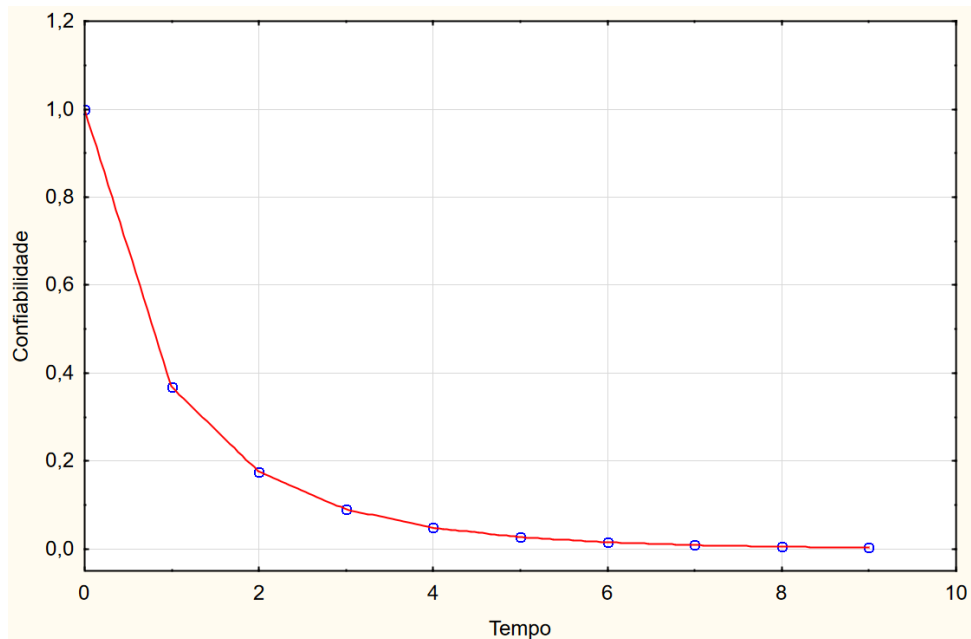
As plotagens a seguir mostram o comportamento gráfico da taxa de falhas e da confiabilidade.

Figura 31 - Gráfico da Taxa de Falhas para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=0,8$ e $\eta=1$.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 32 - Gráfico da Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=0,8$ e $\eta=1$.



Fonte: Próprio Autor.

Pode ser conferido na Figura 31, a taxa de falhas se comporta como no início da curva da banheira, apresentando decrescimento. Se utilizarmos os testes de comparações com as classes de funções com características de envelhecimento, chegamos a seguinte conclusão:

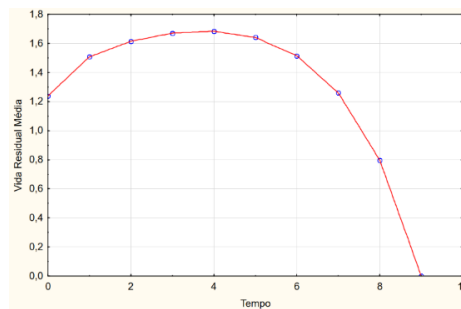
Tabela 15 - Teste das Classes para Presença de Envelhecimento para Distribuição Weibull $\beta=0,8$ e $\eta=1$.

Classe	Indicação do Envelhecimento	TID
IFR1	Não X	Inexistente
IFR2	Não X	Inexistente
IFR3	Não X	Inexistente
IFR4	Não X	Inexistente
IFRA1	Não X	Inexistente
IFRA2	Não X	Inexistente
NBU	Não X	Inexistente
NBUE1	Sim ✓	t = 8
NBUE2	Sim ✓	t = 8
NBUFR	Não X	Inexistente
DMRL1	Sim ✓	t = 4
DMRL2	Sim ✓	t = 4
HNBUE	Não X	Inexistente
NBAFR	Não X	Inexistente

Fonte: Próprio Autor.

É possível ver que as classes NBUE1, NBUE2, DMRL1 e DMRL2 apresentam envelhecimento em seus testes. Para as classes NBUE, isso se dá pelo fato da vida residual média em $t=8$ ser menor que a vida residual média em $t=0$. Já para as classes DMRL, isso ocorre devido à vida residual média ser decrescente a partir de $t=4$. Essas afirmações podem ser confirmadas no gráfico da vida residual média para esta distribuição, na Figura 33.

Figura 33 - Gráfico da Vida Residual Média para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=0,8$ e $\eta=1$.



Fonte: Próprio Autor.

Como já foram testados os casos de funções com taxa de falhas crescente e decrescente, falta apenas ser conferido o comportamento dos testes de classes para uma função com taxa de falhas constante. Tanto a função exponencial como a de Weibull podem ser utilizadas como exemplo, pois a distribuição Weibull com parâmetros $\beta=1$ e $\eta=1$ se resume, matematicamente, a uma distribuição exponencial com taxa de falhas constante $\lambda(t) = 1$ e função confiabilidade $R(t) = e^{-t}$. Construindo uma tabela com os dados das respectivas funções, temos:

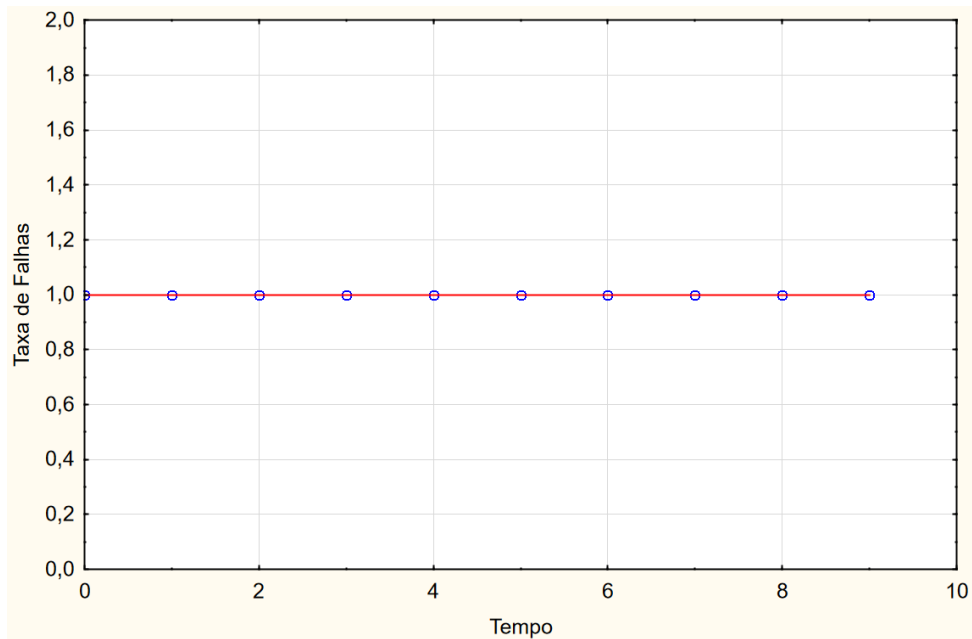
Tabela 16 - Valores da Taxa de Falha e Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de $\beta=1$ e $\eta=1$.

t	$\lambda(t)$	R(t)
0	1	1,000000000
1	1	0,367879441
2	1	0,135335283
3	1	0,049787068
4	1	0,018315638
5	1	0,006737947
6	1	0,002478752
7	1	0,000911882
8	1	0,000335463
9	1	0,000123410

Fonte: Próprio Autor.

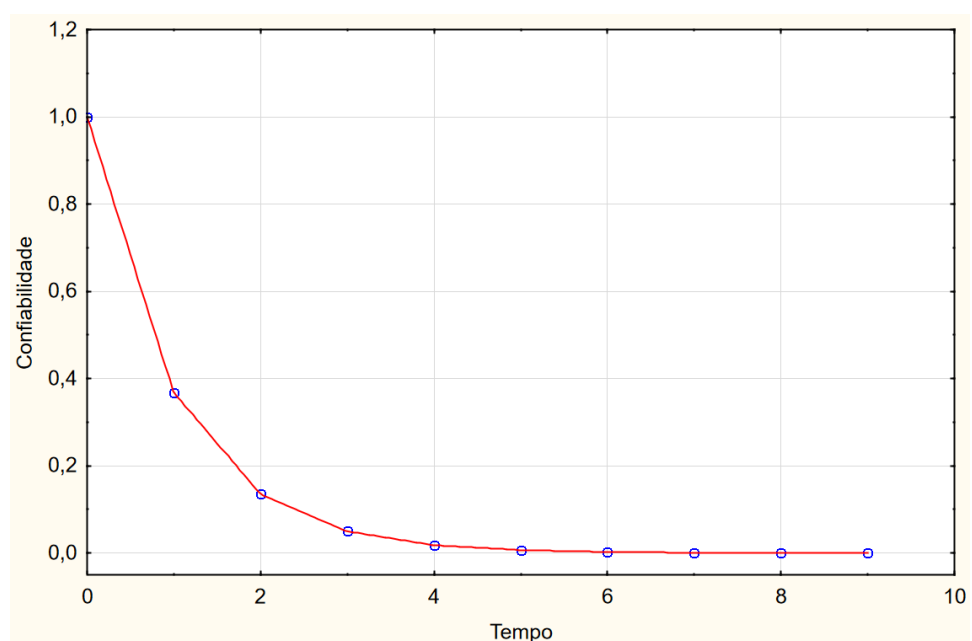
Ao construir gráficos para os valores da Tabela 17, resultam-se os gráficos das Figuras 34 e 35.

Figura 34 - Gráfico da Taxa de Falhas para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=1$ e $\eta=1$.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 35 - Gráfico da Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=1$ e $\eta=1$.



Fonte: Próprio Autor.

Aplicando os dados na comparação com as classes de funções com características de envelhecimento, temos o seguinte resultado para o último tipo de comportamento de taxa de falhas:

Tabela 17 - Valores da Taxa de Falha e Confiabilidade para uma Distribuição Weibull de $\beta=1$ e $\eta=1$.

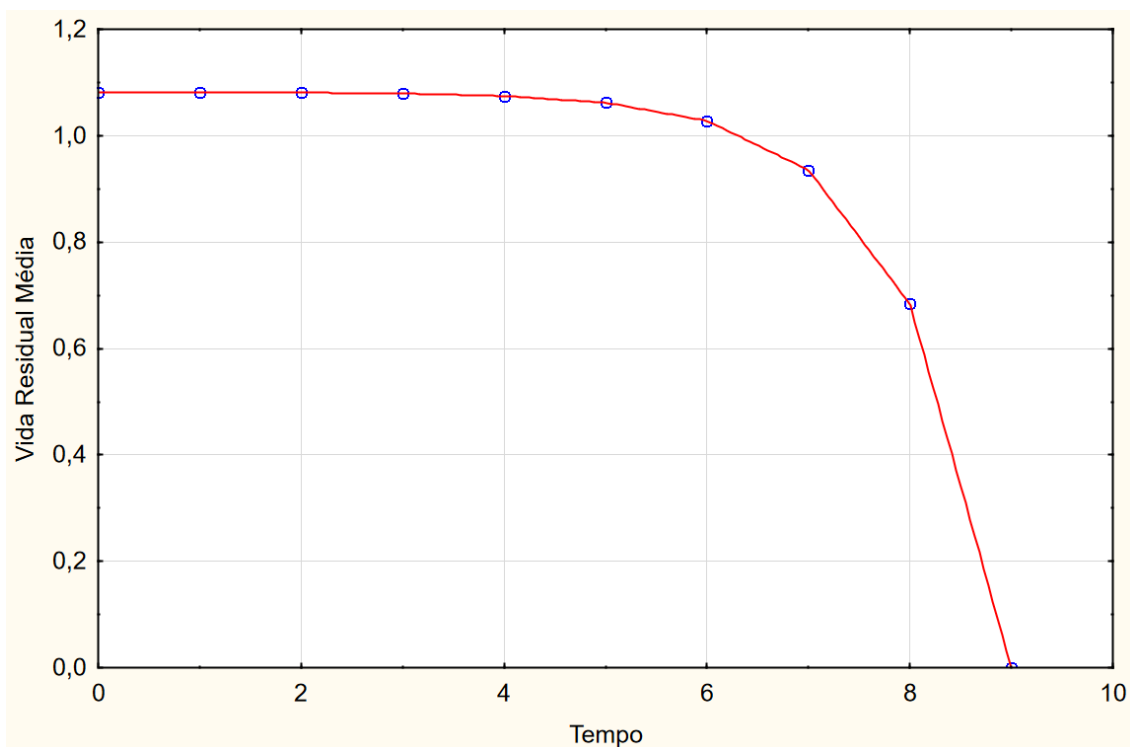
Classe	Indicação do Envelhecimento	TID
IFR1	Não X	Inexistente
IFR2	Sim ✓	$t = 0$
IFR3	Sim ✓	$t = 0$
IFR4	Não X	Inexistente
IFRA1	Não X	Inexistente
IFRA2	Sim ✓	$t = 1$
NBU	Sim ✓	$t = 0$
NBUE1	Sim ✓	$t = 0$
NBUE2	Sim ✓	$t = 0$
NBUFR	Sim ✓	$t = 0$
DMRL1	Sim ✓	$t = 0$
DMRL2	Sim ✓	$t = 0$
HNBUE	Sim ✓	$t = 0$
NBAFR	Sim ✓	$t = 0$

Fonte: Próprio Autor.

Algumas explicações acerca da Tabela 18 são necessárias neste ponto. Como pode ser visto, a maioria das funções acusa envelhecimento, e ainda a partir do primeiro tempo analisado. Isso ocorre devido à distribuição com taxa de falhas constante estar no limiar da entrada no período de degradação (taxa de falhas crescente). Isso faz com que muitas igualdades, permitidas na definição da maioria das classes, sejam atingidas, validando então o teste. Outro ponto é que, neste caso, a função taxa de falhas e a função confiabilidade mantem o mesmo comportamento durante toda a vida, impossibilitando a detecção de variações pelos testes de classes. Numa situação real, a taxa de falha não se mantém puramente constante, sendo possível então detectar as variações apropriadamente.

No teste para classe IFR2, por exemplo, a função $-\ln(R_i)$ encontrada é uma reta, representando o limite de condição aceita para convexidade. Já nos testes de classes IFR1 e IFR4, a igualdade não, uma vez que essas classes não permitem a igualdade, sendo mais restritas. Por último, as classes que utilizam como análise a vida residual média são satisfeitas devido ao fato desta função ser decrescente ao longo do tempo, e, conseqüentemente, menor que a vida residual em zero, como pode ser visto no gráfico a seguir.

Figura 36 - Gráfico da Vida Residual Média para uma Distribuição Weibull de Parâmetros $\beta=1$ e $\eta=1$.



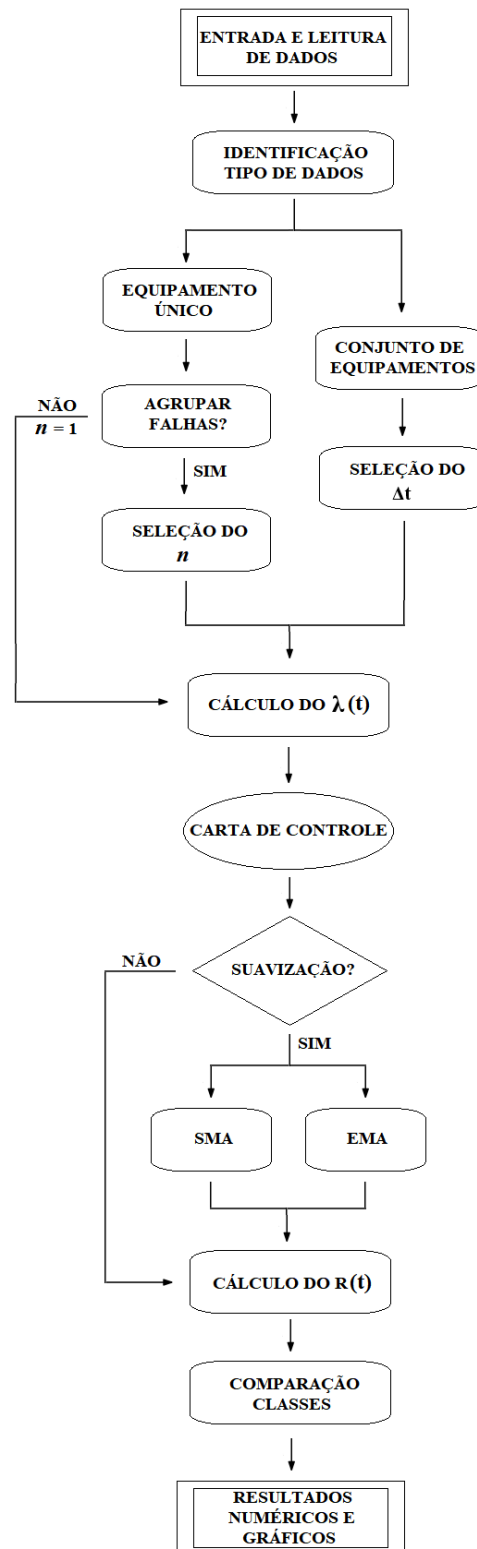
Fonte: Próprio Autor.

Verificado o comportamento dos testes para os três diferentes tipos de função taxa de falhas (decrescente, constante, crescente), é possível, então, confirmar a eficiência da metodologia.

6.2 ALGORITMO DA METODOLOGIA

Até este ponto foram apresentadas todas as partes que em conjunto compõem a metodologia como um todo. O fluxograma a seguir mostra de maneira geral como cada parte se relaciona com as demais, formando a metodologia.

Figura 37 - Fluxograma Completo da Metodologia.



Fonte: Próprio Autor.

Com as definições devidamente apresentadas e a metodologia estabelecida juntamente com seu algoritmo, pode-se ser apresentado o Aplicativo desenvolvido.

7 O APLICATIVO

Baseando-se na metodologia apresentada, foi construído um aplicativo, contendo uma interface gráfica, na linguagem de programação JAVA. O aplicativo é capaz de realizar o tratamento dos dados por médias móveis e médias móveis exponenciais, tratamento de dados por carta de controle, cálculo da taxa de falhas e confiabilidade, tudo isso em conjunto com a plotagem dos gráficos, e enfim testar os dados para as diferentes classes discutidas no capítulo 4, apresentando os resultados de TID encontrados em cada teste.

O aplicativo foi desenvolvido em um ambiente com configuração de memória RAM de 12 GB e processador Intel core i7 870 2.93 GHz, rodando o sistema operacional Windows 10 Professional x64, utilizando JAVA como linguagem de programação, na versão 1.8.0_131. O ambiente de desenvolvimento integrado utilizado foi o Eclipse na versão Neon.3 Release (4.6.3). Os gráficos foram gerados com o auxílio da biblioteca JFreeChart, versão 1.0.19. A figura em sequência mostra a interface do aplicativo desenvolvido.

Figura 38 - Interface do Aplicativo Identificador de Degradação.

The screenshot shows the 'Identificador de Degradação' application interface. The window title is 'Identificador de Degradação'. The interface includes a control panel with the following elements:

- 1**: 'Selecionar entrada (txt)' button.
- 2**: Radio button for 'Equipamento Único', 'Selecionar n:' dropdown (value 1), and 'Selecionar escala de tempo:' dropdown (value Horas).
- 3**: Radio button for 'Conjunto de Equipamentos' and 'Selecionar ΔT:' input field (value 500).
- 4**: 'Iniciar Teste' button.
- 5**: 'Carta de Controle' checkbox.
- 6**: Tabbed interface with tabs: 'Dados', 'Testes', 'Carta de Controle', 'Gráfico de Confiabilidade', 'Gráfico de Taxa de Falha', 'Gráfico de Falhas Acumuladas', and 'Falhas por Ano'.

The data table displays the following information:

t	λ	ΔT	R
500.0	6.5E-4	500.0	0.675
1000.0	6.666666666666666E-4	500.0	0.44999999999999996
1500.0	5.555555555555556E-4	500.0	0.32499999999999996
2000.0	6.153846153846154E-4	500.0	0.22499999999999998
2500.0	4.4444444444444447E-4	500.0	0.17500000000000004
3000.0	2.8571428571428574E-4	500.0	0.15000000000000002
3500.0	3.333333333333333E-4	500.0	0.125
4000.0	8.0E-4	500.0	0.07499999999999996
4500.0	0.0013333333333333333	500.0	0.025000000000000022
5000.0	0.002	500.0	0.0

At the bottom of the interface, there is a panel with:

- 7**: A large empty area below the table.
- 8**: 'EMA' dropdown, 'K:' input field, 'α:' input field, and 'Suavizar dados!' button.

Fonte: Próprio Autor.

O Aplicativo foi nomeado, apropriadamente, de Identificador de Degradação (IDeg). Suas seleções foram numeradas na Figura 38 e serão explicadas a seguir:

- 1- Seleção de entrada de dados: Abre uma janela de explorador Windows para seleção do arquivo *txt* contendo os dados na formatação correta;
- 2- Opção para dados de Equipamento único: Deve ser marcada afim de tratar os dados como dados de equipamento único. Contém a opção de seleção de agrupamento de falhas n e da escala de tempo a ser utilizada nos cálculos;
- 3- Opção para dados de um Conjunto de Equipamentos: Deve ser marcada afim de tratar os dados como dados de um conjunto de equipamentos. Contém a caixa de entrada do ΔT utilizado nos cálculos;
- 4- Botão de Início de Teste: Deve ser selecionado após todas as devidas configurações serem feitas;
- 5- Marcador de Carta de Controle: Deve ser selecionado caso o usuário queira realizar uma filtragem de dados por carta de controle;
- 6- Abas de resultados: Contém os resultados de saída, sendo estes gráficos e numéricos;
- 7- Dados calculados: Apresenta as variáveis calculadas e seus índices (de cima para baixo, começando de 1);
- 8- Opção de suavização de dados: Conta com a janela de seleção do método de suavização (Médias Móveis Simples ou Médias Móveis Exponenciais) junto com as caixas de texto para entrada dos parâmetros. Deve-se clicar em “*Suavizar dados!*” se o usuário notar que há uma grande dispersão dos resultados.

O padrão de entrada de dados se dá de duas maneiras diferentes, uma para um único equipamento e outra para conjunto de equipamentos. Para um único equipamento, a entrada de dados pode se dar em formato de datas e horários da ocorrência de falha e do reparo, separados por uma vírgula, como mostra o exemplo da Figura 39, ou através dos valores de TBF em horas, iniciando a primeira linha com a palavra *tbf*, como pode ser visto na Figura 40.

Figura 39 - Exemplo do Formato da Entrada de Dados em Formato de Datas, para um Único Equipamento (arquivo *txt*).

27/01/1991 01:20	,	21/06/1991 19:18
30/06/1991 16:34	,	30/06/1991 23:50
09/09/1991 17:30	,	13/09/1991 17:14
03/01/1992 05:44	,	03/01/1992 16:25
09/03/1992 09:22	,	09/03/1992 11:35
30/03/1992 13:43	,	30/03/1992 15:30
15/10/1992 11:29	,	15/10/1992 16:20
26/12/1992 15:02	,	28/12/1992 17:33
17/02/1993 08:06	,	17/02/1993 16:21
10/05/1993 07:48	,	10/05/1993 17:03
02/09/1993 09:11	,	02/09/1993 17:11
16/09/1993 07:32	,	16/09/1993 11:21
20/09/1993 08:03	,	22/09/1993 16:41
29/09/1993 07:48	,	29/09/1993 15:43
23/12/1993 06:05	,	23/12/1993 13:59
24/01/1994 07:37	,	20/02/1994 19:33
24/04/1994 10:52	,	24/04/1994 14:42
04/07/1994 07:25	,	04/07/1994 12:22
12/07/1994 08:00	,	16/07/1994 16:07
20/07/1996 11:49	,	20/07/1996 17:15
20/07/1996 22:23	,	22/07/1996 16:43
19/08/1996 09:08	,	19/08/1996 15:00
16/10/1996 13:50	,	21/10/1996 16:17
22/10/1996 07:22	,	14/11/1996 16:45
19/02/1997 09:07	,	19/02/1997 16:10

— **Datas de término do reparo**
— **Datas de Ocorrência de Falha**

Fonte: Próprio Autor.

Figura 40 - Exemplo do Formato da Entrada de Dados em Formato de TBFs, para um Único Equipamento (arquivo *txt*).

tbf
154
351
414
122
516
874
567
853
413
612
125
422
518
485
267
215
346
125
673
734
923
122
231
511
621

— **Indicador de Tipo de Entrada**
— **Dados de TBF (ou TTF)**

Fonte: Próprio Autor.

Já para um conjunto de equipamentos, o padrão de entrada de dados é composto por uma primeira linha contendo o tamanho do lote (N_0) e as demais os tempos de falha de cada unidade. A figura a seguir ilustra este padrão:

Figura 41 - Exemplo do Formato da Entrada de Dados de um Conjunto de Equipamentos (arquivo *txt*).

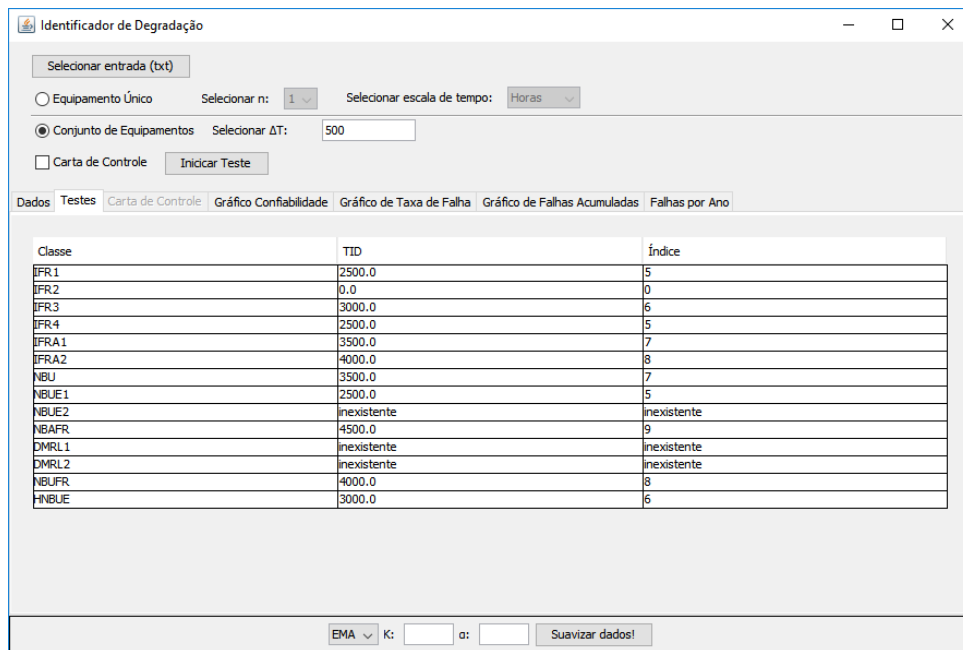
40	Tamanho do Lote
93.2	Tempos de Falha de Cada Unidade
131.7	
163.5	
202.9	
240.6	
289.0	
347.4	
362.8	
383.7	
412.9	
449.7	
473.2	
494.1	
533.0	
569.4	
583.1	
682.2	
730.1	
881.0	
924.5	
936.5	
961.9	
1135.0	
1282.1	
1368.3	

Fonte: Próprio Autor.

O aplicativo foi programado com uma primeira barreira contra dados anormais, que consta de desconsiderar todos os TBFs (ou TTFs) que sejam menores do que 5% do MTBF (ou MTTF) do banco de dados, pois geram componentes de taxa de falha elevados, provocando o deslocamento da média da carta de controle para cima, podendo prejudicar a funcionalidade da mesma.

Para fim de demonstração do aplicativo, se os dados da Tabela 6, para um $\Delta t = 500$, obtemos o seguinte resultado para análise de degradação:

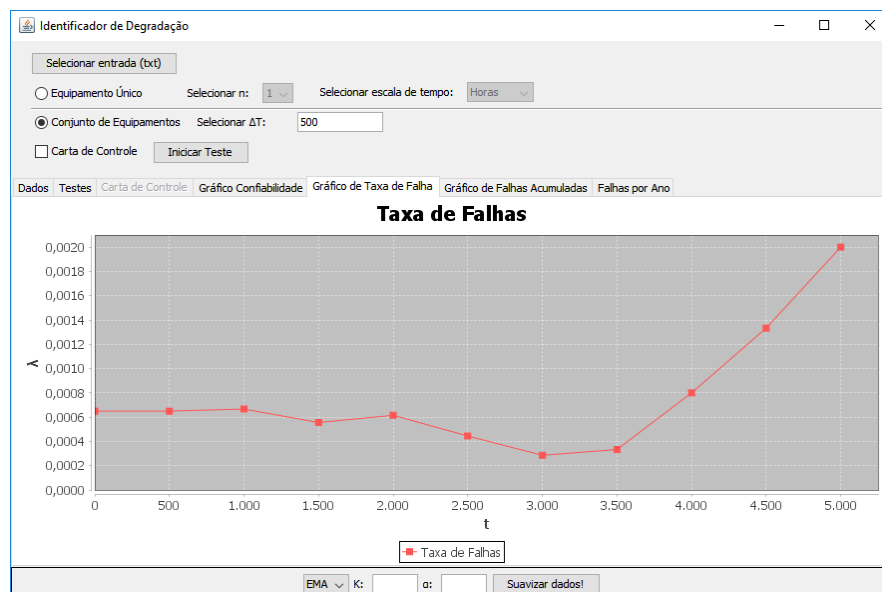
Figura 42 - Testes para Classes de Funções com Características de Envelhecimento para o lote da Tabela 6.



Fonte: Próprio Autor.

Pela Figura 42, é possível ver os resultados de TID encontrados para cada tipo de classe, podemos checar no gráfico de taxa de falhas onde tais pontos se localizam na curva, clicando na aba *Gráfico de Taxa de Falha*:

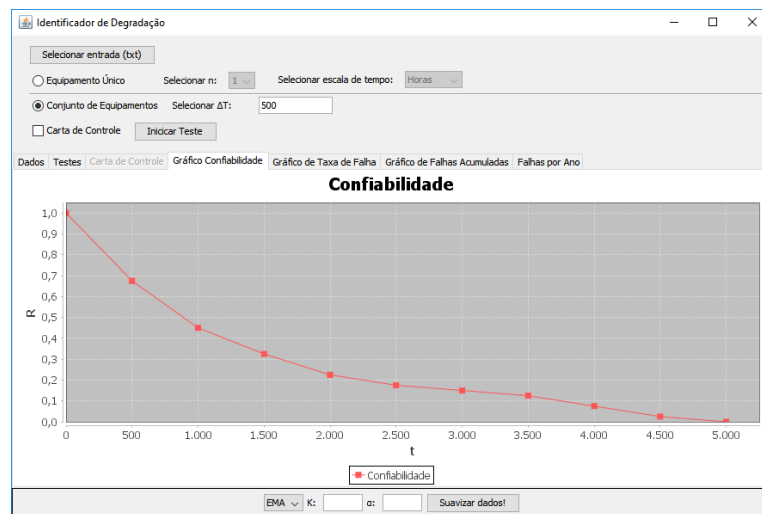
Figura 43 - Gráfico de Taxa de Falhas Gerado pelo Aplicativo a Partir dos Dados do Lote da Tabela 6.



Fonte: Próprio Autor.

Se for realizada uma comparação entre a Figura 15 (gráfico gerado pelos dados calculados um a um) e a Figura 43 (gráfico gerado pelo aplicativo), pode ser comprovado a precisão do aplicativo em relação ao resultado obtido. O mesmo pode ser visto se for realizada uma comparação entre a Figura 16 e a figura a seguir, para os gráficos de confiabilidade (aba *Gráfico Confiabilidade*).

Figura 44 - Gráfico da Confiabilidade Gerado pelo Aplicativo a Partir dos Dados do Lote da Tabela 6.



Fonte: Próprio Autor.

O Aplicativo, ainda, possibilita a visualização do gráfico de falhas acumuladas:

Figura 45 - Gráfico de Falhas Acumuladas Gerado pelo Aplicativo a Partir dos Dados do Lote da Tabela 6.

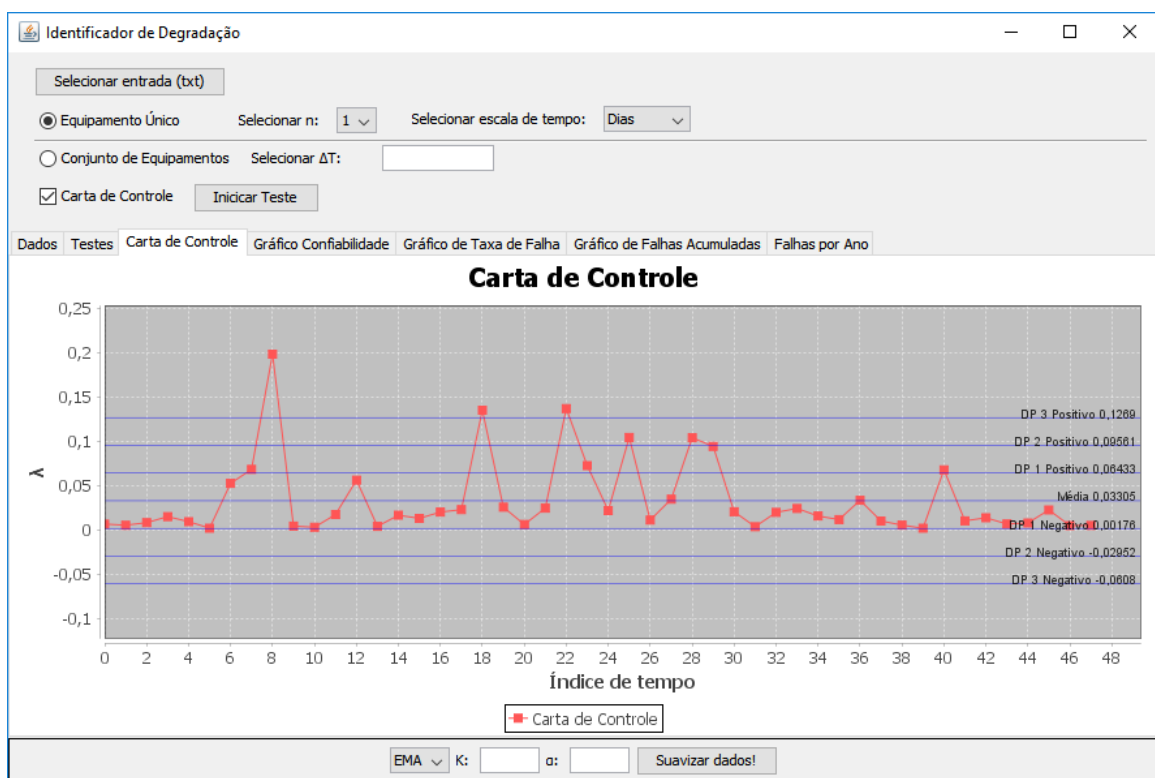


Fonte: Próprio Autor.

Caso seja preferível exportar os dados, o aplicativo gera documentos de texto para cada variável. Para salvar as imagens, basta clicar com o botão direito do “mouse” e selecionar a opção de *salvar imagem*.

Afim de mostrar o gráfico da carta de controle (implementada no aplicativo com todas as regras apresentadas na seção 5.2.2), foi feito o teste para um conjunto aleatório de dados de um único equipamento, com a opção *Carta de Controle* ativa, e então mostrado a seguir na Figura 46 (na aba *Carta de Controle*).

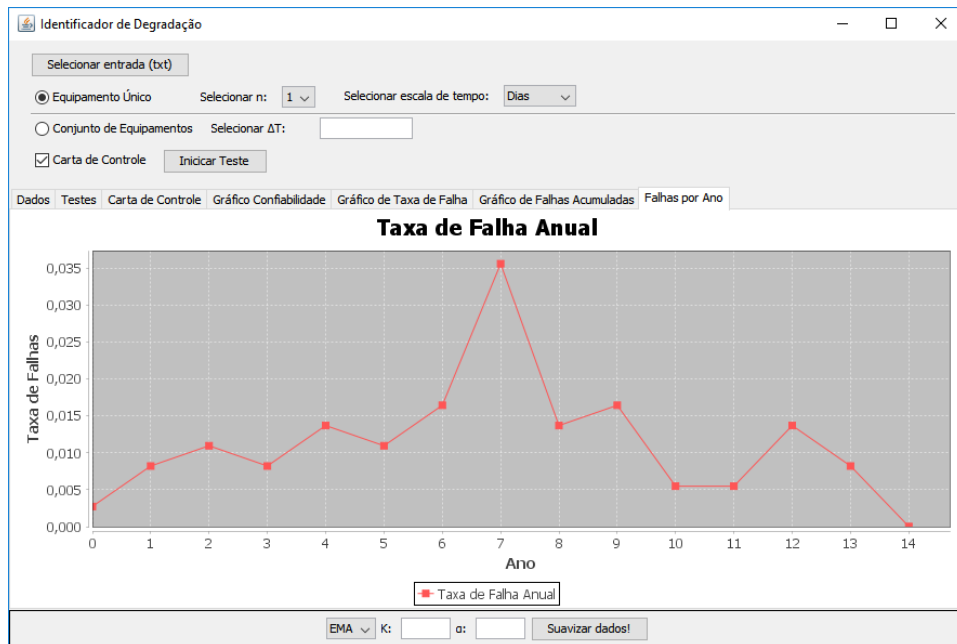
Figura 46 - Exemplo de Visualização de uma Carta de Controle no Aplicativo.



Fonte: Próprio Autor.

No aplicativo é possível ver também o gráfico de falhas por ano (selecionando a aba *Falhas por Ano*), exemplificado a seguir para um exemplo genérico.

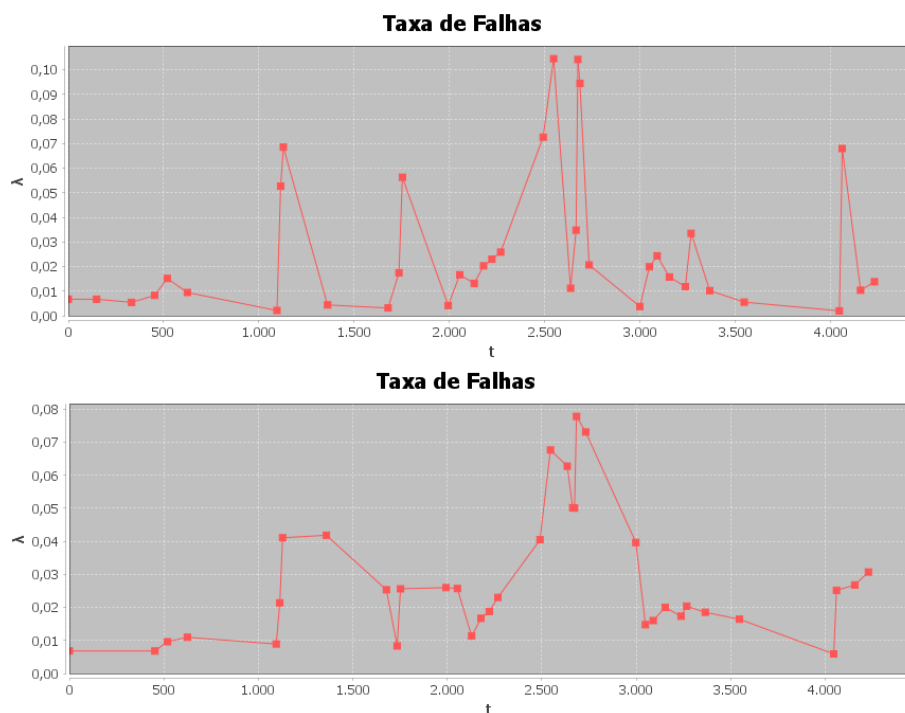
Figura 47 - Exemplo de Visualização de um Gráfico de Taxa de Falha Anual.



Fonte: Próprio Autor.

E para encerrar a apresentação do aplicativo, a Figura 48 mostra o efeito de suavização por médias móveis simples, para um $k=3$, somente para título de visualização.

Figura 48 - Exemplo Genérico do Efeito de Suavização por Médias Móveis Simples com $k = 3$.



Fonte: Próprio Autor.

É importante notar na Figura 48 a diminuição das escalas máxima e mínima.

O capítulo seguinte irá apresentar resultados obtidos através do aplicativo *Identificador de Degradação* (IDeg) utilizando dados de situações reais, apresentando os devidos comentários de acordo com os resultados.

8 RESULTADOS OBTIDOS

O presente capítulo introduz a utilização de dados coletados e referenciados devidamente. Serão apresentados dois diferentes estudos de caso relativos a degradação: Geradores térmicos e hidrelétricos. O primeiro caso possui dados de TBF já tratados e o segundo caso, dados de falha em formato de datas (não tratados).

8.1 PRIMEIRO CASO: GERADORES TÉRMICOS

SCHILLING et al (1987) realizam um estudo sobre a importância da análise do envelhecimento de itens reparáveis que consta na detecção do envelhecimento em geradores térmicos. As três tabelas a seguir mostram os TBFs coletados para três diferentes máquinas da Usina Termelétrica de Santa Cruz (FURNAS), que constam na pesquisa de SCHILLING et al (1987), com os dados originais devidamente convertidos para dias.

Tabela 18 - Dados de TBF (dias) da Máquina 1.

i	TBF	i	TBF	i	TBF	i	TBF
1	488,38	14	4,35	27	0,64	40	0,93
2	731,23	15	11,44	28	0,93	41	10,05
3	253,36	16	8,72	29	5,38	42	0,65
4	2,95	17	13,57	30	3,44	43	0,51
5	4,94	18	12,99	31	0,50	44	0,87
6	1,17	19	8,47	32	1,34	45	4,41
7	7,11	20	0,55	33	41,19	46	6,19
8	5,58	21	5,70	34	12,14	47	7,58
9	0,93	22	2,96	35	4,74	48	1,42
10	7,55	23	0,16	36	0,04	49	8,19
11	2,55	24	13,28	37	1,61	50	17,75
12	10,26	25	1,78	38	1,55	51	0,34
13	17,02	26	2,47	39	0,61	52	1,05

Fonte: Adaptado de SCHILLING et al, 1987.

Tabela 19 - Dados de TBF (dias) da Máquina 2.

i	TBF	i	TBF	i	TBF	i	TBF
1	524,13	18	0,29	35	2,42	52	0,71
2	476,63	19	0,08	36	4,99	53	6,08
3	145,23	20	1,92	37	11,79	54	3,10
4	3,58	21	0,02	38	8,97	55	51,66
5	175,56	22	0,06	39	4,72	56	3,83
6	44,83	23	1,25	40	0,41	57	0,10
7	16,85	24	2,05	41	2,50	58	2,65
8	46,36	25	2,81	42	0,20	59	0,25
9	4,25	26	3,99	43	23,13	60	0,36
10	1,38	27	0,18	44	0,04	61	10,63
11	1,73	28	1,64	45	1,33	62	0,73
12	0,57	29	2,17	46	4,21	63	2,29
13	2,65	30	3,13	47	22,58	64	2,32
14	3,32	31	3,81	48	4,92	65	61,14
15	0,15	32	21,17	49	17,74	66	2,04
16	2,17	33	0,10	50	2,77	67	14,66
17	0,87	34	20,04	51	1,12	68	4,40

Fonte: Adaptado de SCHILLING et al, 1987.

Tabela 20 - Dados de TBF (dias) da Máquina 3.

i	TBF	i	TBF	i	TBF	i	TBF
1	11,50	20	48,22	39	0,46	58	13,52
2	18,97	21	13,66	40	5,08	59	1,78
3	8,55	22	9,59	41	5,33	60	2,35
4	11,66	23	12,52	42	3,40	61	4,68
5	0,25	24	2,01	43	0,61	62	0,03
6	4,90	25	23,59	44	19,33	63	3,10
7	22,79	26	2,15	45	0,91	64	0,43
8	31,97	27	15,95	46	26,11	65	5,52
9	52,07	28	35,62	47	0,58	66	1,29
10	1,73	29	71,64	48	2,99	67	25,88
11	16,08	30	45,75	49	18,68	68	9,32
12	18,27	31	6,31	50	0,35	69	13,14
13	5,62	32	0,19	51	0,80	70	37,32
14	0,99	33	2,19	52	4,75	71	5,45
15	37,33	34	5,12	53	9,08	72	3,30
16	0,08	35	1,34	54	1,54	73	6,43
17	0,01	36	16,73	55	8,49	74	5,20
18	13,80	37	18,02	56	0,05	75	15,13
19	12,31	38	28,05	57	10,95	76	0,59

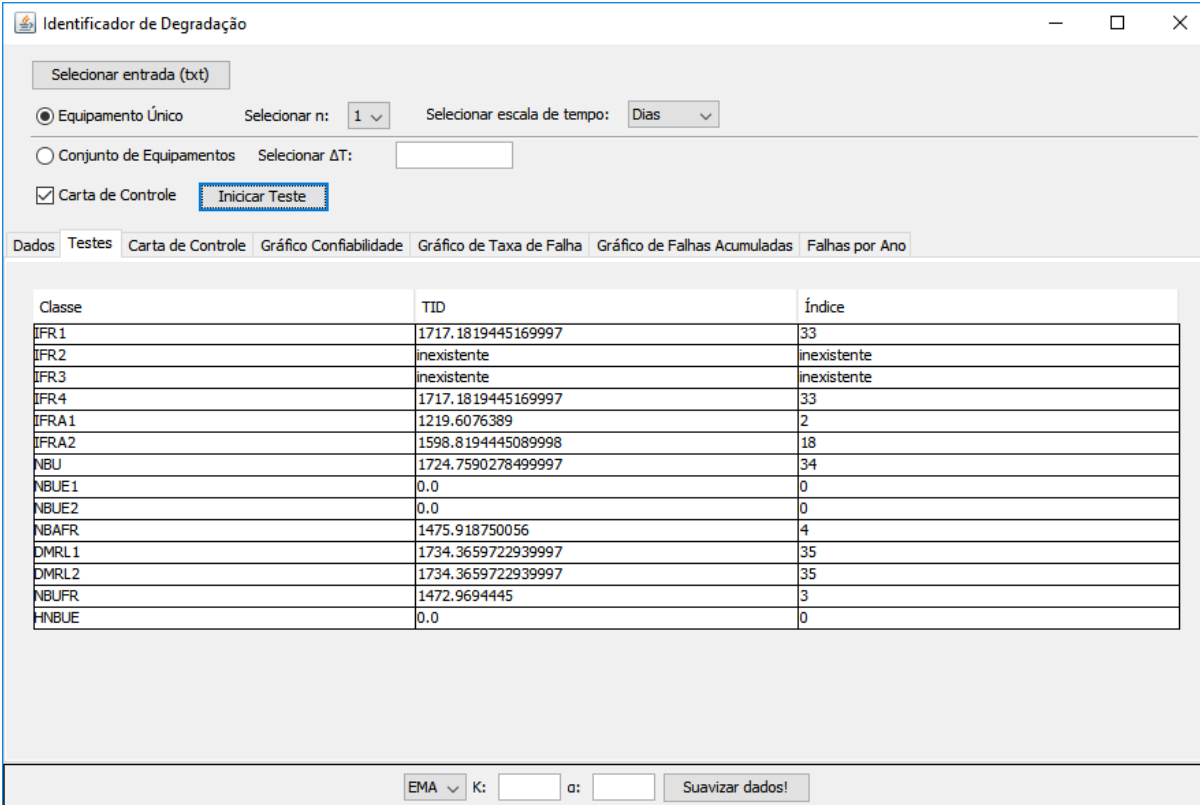
Fonte: Adaptado de SCHILLING et al, 1987.

Com os dados de TBF já tratados e preparados, os mesmos podem ser lidos pelo aplicativo *Identificador de Degradação* através de um arquivo de extensão *txt* na formatação apresentada na Figura 40. A seções a seguir mostrar os resultados numéricos e gráficos, apresentados pelo aplicativo, para cada uma das três máquinas.

8.1.1 Gerador Térmico 1

É dito em SCHILLING et al (1987) que a máquina 1 possuía uma idade de 15.92 anos no começo do estudo, dentre os quais se totalizou um tempo ativo de 4,85 anos, ou seja, durante todo o período vivido, a máquina permaneceu ativa somente 30,46% do tempo, aproximadamente. Porém, os mecanismos de degradação agem mesmo com a máquina em estado inoperante, tornando então o banco de dados válido para análise. Ao entrar com os dados da Tabela 8.1 no aplicativo *IDeg*, são obtidos os seguintes resultados para os testes comparativos com base nas classes de funções com características de envelhecimento, ilustrados na Figura 49.

Figura 49 - Resultados dos TIDs das Classes para Máquina 1.

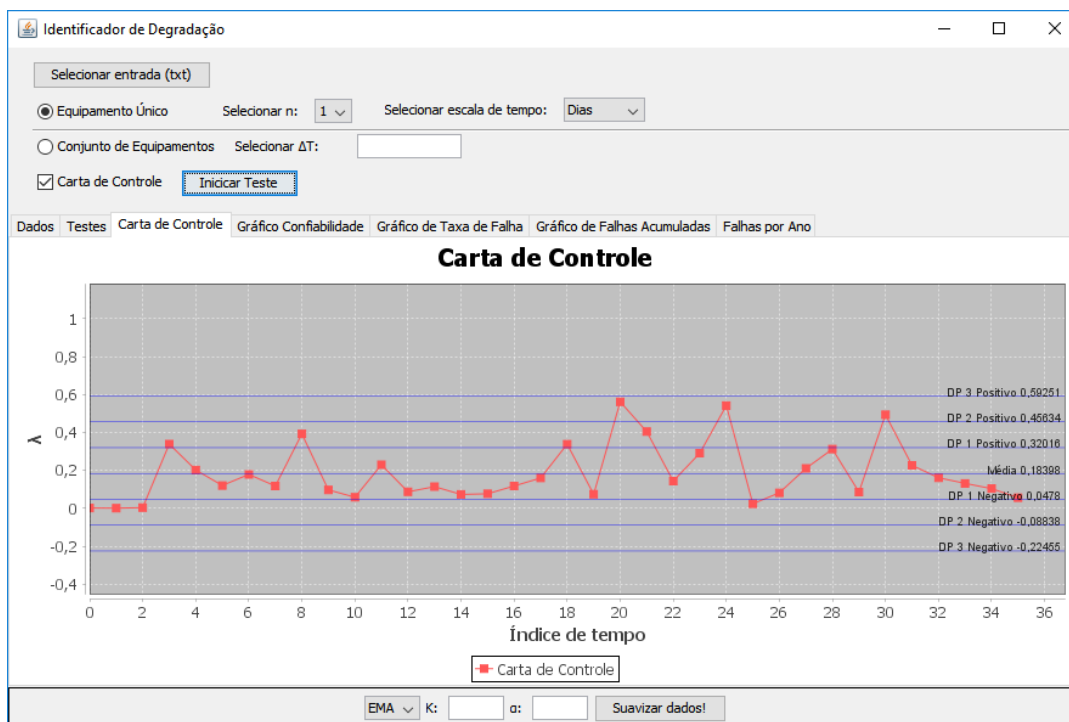


Classe	TID	Índice
IFR 1	1717.1819445169997	33
IFR 2	inexistente	inexistente
IFR 3	inexistente	inexistente
IFR 4	1717.1819445169997	33
IFRA 1	1219.6076389	2
IFRA 2	1598.8194445089998	18
NBU	1724.7590278499997	34
NBUE 1	0.0	0
NBUE 2	0.0	0
NBAFR	1475.918750056	4
DMRL 1	1734.3659722939997	35
DMRL 2	1734.3659722939997	35
NBUFR	1472.9694445	3
HNBU	0.0	0

Fonte: Próprio Autor.

Os gráficos da Carta de Controle e o Gráfico de Falhas Acumuladas obtidos podem ser visualizados, respectivamente, nas Figuras 50 e 51.

Figura 50 - Aplicação da Carta de Controle para os Dados da Máquina 1.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 51 - Gráfico de Número de Falhas Acumuladas para Máquina 1.



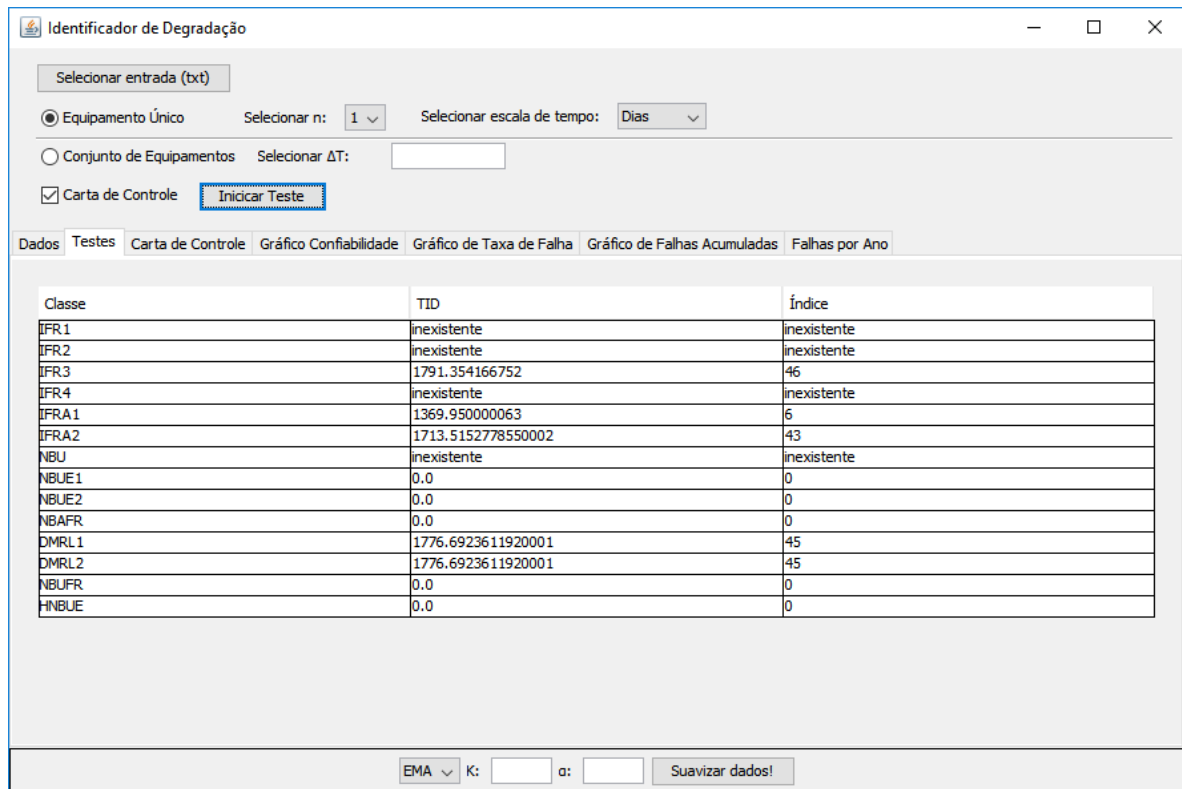
Fonte: Próprio Autor.

Primeiramente, é possível ver que nenhum dos pontos foi considerado anormal (expurgado) pela carta de controle, vide regras da seção 5.2.2. Todavia, alguns pontos anormais foram removidos pela proteção inicial do aplicativo contra TBFs muito pequenos ($< 5\%$ MTBF), que resultariam em um deslocamento ascendente da média da carta de controle, contudo, este fato não acarreta em diferença em relação as observações feitas por SCHILLING et al (1987). Outro ponto importante é que SCHILLING et al (1987) comenta que a presença de concavidade no gráfico de falhas acumuladas sugere a presença de deterioração. Isto pode ser verificado na Figura 8.3, no período aproximado entre o dia 1630 até o dia 1750, e confirmado por parte da maioria dos testes de classes na Figura 8.1, que indicam em sua maioria uma deterioração a partir de aproximadamente 1700 dias, que corresponde a 4,66 anos. Somando o resultado obtido com a idade anterior da máquina (15,92 anos), é chegada a conclusão que a máquina entra em um período de degradação a partir de 20,58 anos de vida. Note que este TID seria menor caso a máquina fosse requisitada com maior frequência, uma vez que itens com maior nível de utilização tendem a degradar mais rapidamente.

8.1.2 Gerador Térmico 2

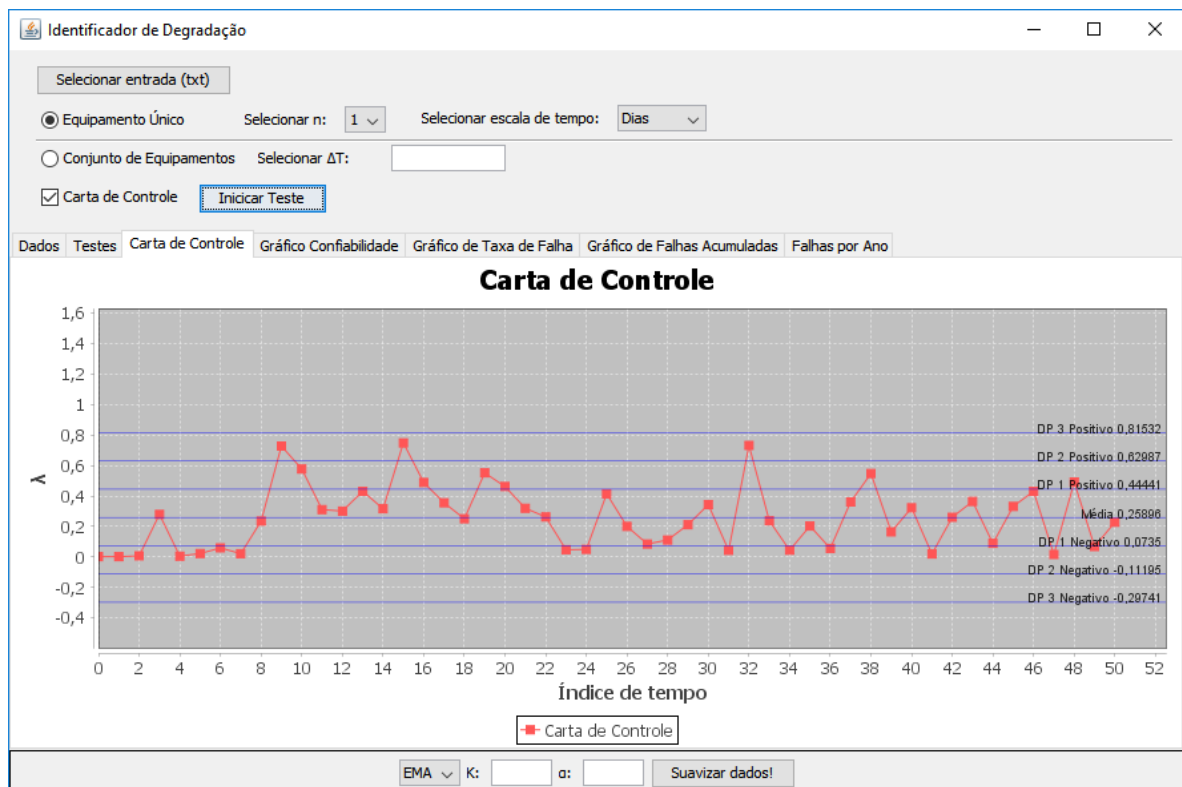
A segunda máquina analisada possuía uma idade de 15,25 anos ao início do período de observação, dos quais trabalhou ativamente 4,92 anos (SCHILLING et al, 1987). Sendo assim, a máquina 2 possuiu um nível de utilização de, aproximadamente, 32,26%. Fazendo a análise através do aplicativo (Tabela 20), apresentam-se os seguintes resultados.

Figura 52 - Resultados dos TIDs das Classes para Máquina 2.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 53 - Aplicação da Carta de Controle para os Dados da Máquina 2.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 54 - Gráfico de Número de Falhas Acumuladas para Máquina 2.



Fonte: Próprio Autor.

De acordo com a carta de controle (Figura 53), podemos ver uma mudança na tendência no início do período (deslocamento para cima), a qual se estabiliza logo depois. Tomando como referência o gráfico de falhas acumuladas, é possível comprovar que há uma degradação mais suave na máquina 2 em relação à máquina 1, notada na curvatura. Os resultados dos testes de classe (Figura 52) indicam que já ocorre um processo de degradação desde o início ($TID=0$), que se justifica pelo comportamento da função vida residual média, que tem seu maior valor em zero (NBUE), oscila muito e que é puramente decrescente só no final do período de observação (DMRL). Já as funções NBAFR e NBUFR acusam $TID = 0$ devido à primeira taxa de falha, pela condição inicial $\lambda_0 = \lambda_1$ ser não-decrescente ao longo de todo o tempo. Uma conclusão plausível seria considerar apenas os resultados das classes que apresentaram $TID \neq 0$, pois tais classes são influenciadas pelo fato de haver um espaçamento muito grande entre os intervalos de tempos das primeiras ocorrências de falhas e das últimas (Figura 54). Assim, 1713 dias é uma escolha razoável (IFRA2), que equivale a um período de 4,69 anos. Adicionando à idade inicial, temos $TID = 19,94$ anos.

8.1.3 Gerador Térmico 3

O último gerador térmico à óleo analisado possui uma idade de 10,58 anos e uma taxa de utilização de 23,3%, vide dados fornecidos por SCHILLING et al (1987). Então, dos três geradores térmicos, é o que possui menor idade e menor nível de utilização. Realizando a análise pelo aplicativo identificador de degradação, da Tabela 21, são obtidas as figuras que seguem.

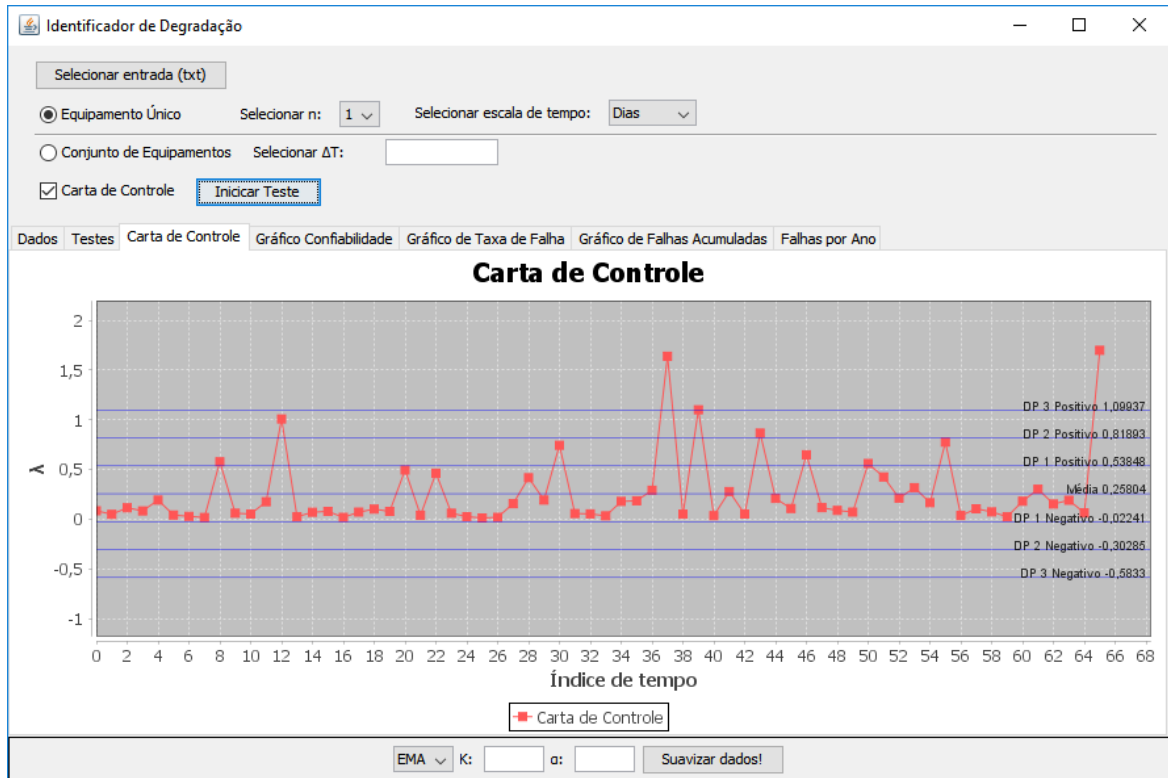
Figura 55 - Resultados dos TIDs das Classes para Máquina 3.

The screenshot shows the 'Identificador de Degradação' application window. It includes a header with a title bar, a 'Selecionar entrada (txt)' button, and radio buttons for 'Equipamento Único' (selected) and 'Conjunto de Equipamentos'. There are dropdown menus for 'Selecionar n:' (value 1) and 'Selecionar escala de tempo:' (value Dias). A checkbox for 'Carta de Controle' is checked, with an 'Iniciar Teste' button next to it. Below the controls are several tabs: 'Dados', 'Testes', 'Carta de Controle', 'Gráfico Confiabilidade', 'Gráfico de Taxa de Falha', 'Gráfico de Falhas Acumuladas', and 'Falhas por Ano'. The main area displays a table with three columns: 'Classe', 'TID', and 'Índice'. At the bottom, there are input fields for 'EMA', 'K', and 'α', along with a 'Suavizar dados!' button.

Classe	TID	Índice
IFR1	880.996527803	52
IFR2	inexistente	inexistente
IFR3	inexistente	inexistente
IFR4	880.996527803	52
IFRA1	886.192361136	53
IFRA2	772.917361136	43
NBU	886.192361136	53
NBUE1	865.811805581	49
NBUE2	865.811805581	49
NBAFR	180.906250012	10
DMRL1	886.192361136	53
DMRL2	886.192361136	53
NBUFR	inexistente	inexistente
HNBUE	180.906250012	10

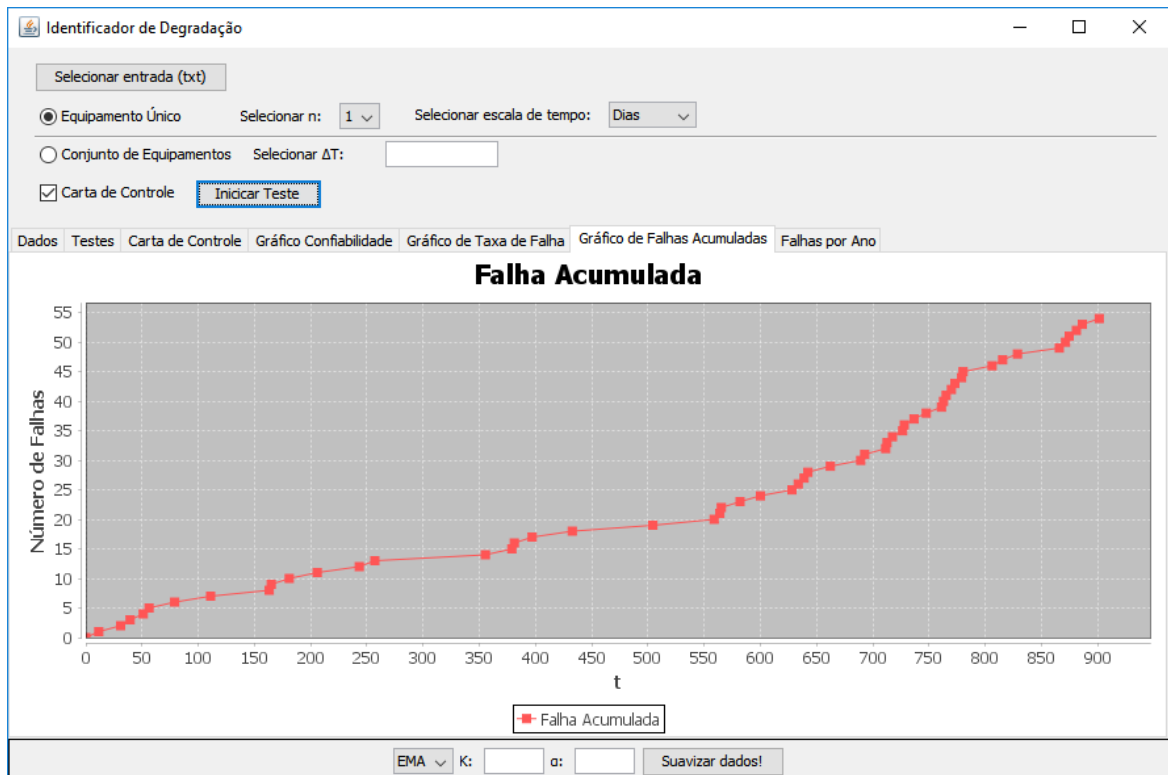
Fonte: Próprio Autor.

Figura 56 - Aplicação da Carta de Controle para os Dados da Máquina 3.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 57 - Gráfico de Número de Falhas Acumuladas para Máquina 3.



Fonte: Próprio Autor.

A carta de controle da Figura 56 consegue remover alguns picos indesejados para a presente análise. A Figura 57 representa um resultado interessante: Pode ser visto claramente uma convexidade na curva, que é um indicador de degradação (SCHILLING et al, 1987). A comprovação do resultado pode ser realizada através da análise dos TIDs encontrados, mostrado na Figura 55. A maioria dos valores de TID giram em torno do índice de tempo 51, que representa 871,26 dias, conforme mostrado na aba *Dados*. Convertendo para anos, temos um tempo de 2,39 anos após o início do período de observação. Se tal valor for somado à idade inicial de 10,58 anos, encontra-se um TID = 12,97 anos. Embora a máquina 3 seja mais nova do que as máquinas 1 e 2, e tenha sido menos requisitada ao longo do tempo, apresenta uma degradação mais evidente, resultado que se assemelha ao encontrado pela análise não parametrizada feita por SCHILLING et al (1987).

8.2 SEGUNDO CASO: MÁQUINAS ELÉTRICAS

Um banco de dados de campo foi obtido, acerca de falhas em geradores elétricos, afim de ser utilizado no diagnóstico de degradação, após feito o devido tratamento prévio dos dados coletados. Por motivos de sigilo, não serão fornecidas informações sobre os dados obtidos e sobre a empresa.

O banco de dados adquirido é formado por dados de 67 diferentes máquinas, de diferentes especificações, resultando em 40957 dados de ocorrências, sendo estas de diversas naturezas. Os dados que interessam na análise de confiabilidade e manutenibilidade são apenas os gerados por ocorrências de falhas, ou seja, paradas forçadas para realização de manutenção, objetivando a realização de reparos/serviços que possibilitassem o retorno da unidade geradora junto a geração. Além disto, as máquinas possuíam idades diferentes, então a metodologia, em princípio, não deve diagnosticar degradação em máquinas jovens. Observando estas considerações, foi realizado um árduo trabalho de filtragem e limpeza manual de dados, onde, no final, restassem apenas dados de ocorrência de falhas nas partes componentes das unidades geradoras. O resultado desta limpeza resultou em uma diminuição de 2/3 do tamanho do banco de dados total e o destaque para 19 máquinas, que apresentavam idade cronológica avançada. Destas 19, serão apresentadas aqui somente 2 máquinas, que serão nomeadas de Máquina A e Máquina B.

As tabelas a seguir mostram os TBFs destas máquinas, após a referida filtragem.

Tabela 21 - Dados de TBF (horas) da Máquina A.

i	TBF	i	TBF	i	TBF	i	TBF
1	5446,9	29	136,0833	57	774,25	85	3792,383
2	134,2833	30	583,3	58	341,0333	86	743,3333
3	150,9667	31	1660,417	59	526,4833	87	951,3167
4	419,3667	32	2153,433	60	797,7	88	2,25
5	6404,417	33	1013,217	61	136,2	89	336,95
6	5593,217	34	338,1	62	48,98333	90	2802,5
7	38,61667	35	71,38333	63	88,08333	91	281,7
8	5307,9	36	3669,467	64	359,0333	92	117,1333
9	1072,283	37	333,85	65	55,05	93	1076
10	2350,717	38	690,9167	66	3472,183	94	16,41667
11	2421,217	39	443,6667	67	1474,367	95	2187,667
12	166,6	40	449,9667	68	19,75	96	132,4
13	2949,717	41	298,6333	69	86,95	97	1034,55
14	3094,25	42	278,75	70	644,8167	98	723
15	617,4167	43	149,5167	71	1312,6	99	94,13333
16	191,65	44	17,33333	72	7,583333	100	1547,417
17	692,7167	45	46,01667	73	4648,167	101	1339,883
18	1148,75	46	1394,317	74	279,7667	102	329,2167
19	327,0833	47	185,05	75	1269,667	103	3,2
20	1069,267	48	61,11667	76	1214,833	104	539,75
21	3588,017	49	299	77	301,9	105	30,81667
22	1272,25	50	1310,233	78	127,9	106	3,016667
23	1603,817	51	77,35	79	88,66667	107	21,85
24	2923,283	52	1970,5	80	296,3	108	13,78333
25	1363,7	53	2870,85	81	215,3833	109	336,3167
26	1504,4	54	883,15	82	437,55	110	729,7667
27	2382,867	55	10762,7	83	1704,05	111	16,21667
28	281,6667	56	1493,167	84	207,5833	112	-

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 22 - Dados de TBF (horas) da Máquina B.

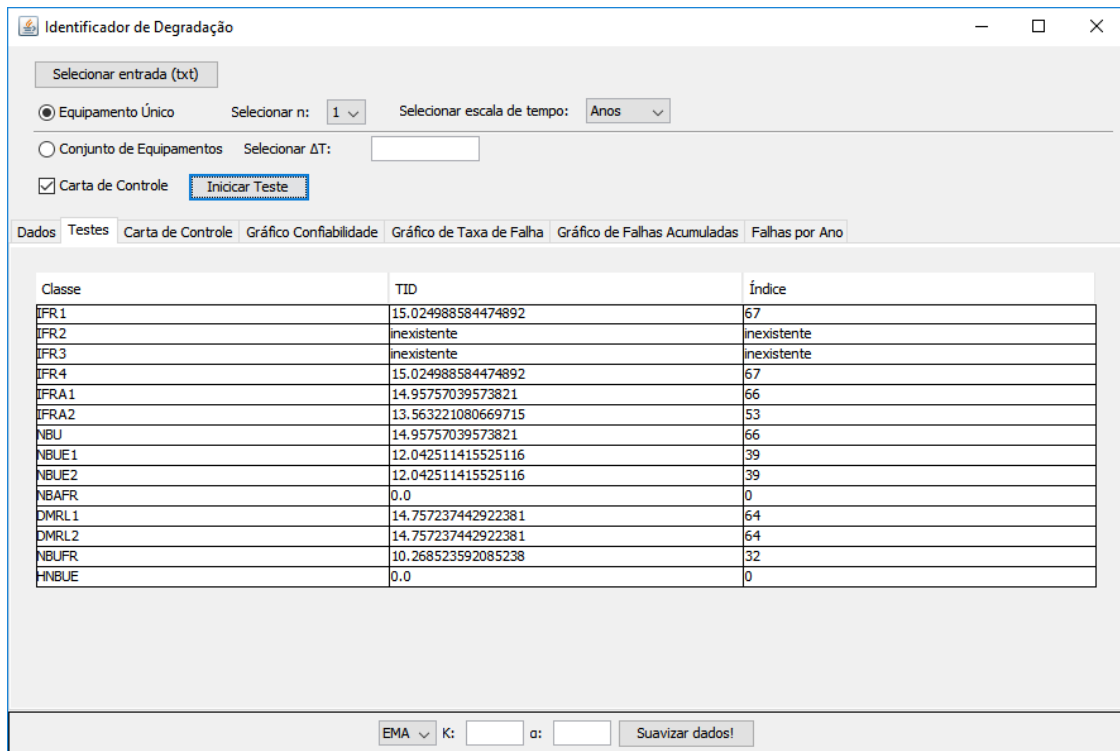
i	TBF	i	TBF	i	TBF	i	TBF
1	2976	27	622,0667	53	13420,33	79	344,6333
2	1593,567	28	96,66667	54	420,3	80	611,0833
3	3196,567	29	2367,717	55	664,6167	81	87,91667
4	3362,95	30	189,4833	56	72,61667	82	117,5167
5	3650,95	31	605,25	57	1436,433	83	2441,533
6	13627,75	32	702,85	58	902,9167	84	258,0667
7	9618,483	33	86,85	59	1388,117	85	239,25
8	805,5167	34	231,6667	60	210,6833	86	641,6667
9	2616,85	35	14,3	61	302,25	87	1816,283
10	647,0667	36	17,8	62	1278,867	88	1441,217
11	2082,333	37	41,81667	63	276,3833	89	285,2667
12	91,58333	38	20,53333	64	1552,433	90	313,35
13	1124,65	39	15,21667	65	164,6	91	4167,033
14	186,1833	40	16,8	66	4469,417	92	589,85
15	1056,333	41	17,13333	67	18,98333	93	430,5
16	379,3833	42	1002,067	68	291,3167	94	2123,083
17	1129,5	43	39,88333	69	17,5	95	491,4167
18	45,16667	44	4311,133	70	684	96	1006,067
19	527,4	45	14,26667	71	1253,9	97	1424,167
20	138	46	550,3167	72	592,3667	98	929,7667
21	381,1167	47	591,7333	73	503,5333	99	61,38333
22	149,8333	48	990,25	74	93,4	100	622,65
23	1095,083	49	21,05	75	883,7167	101	711,2667
24	436,2833	50	88,35	76	526,45	102	27,21667
25	577,7833	51	1096	77	143,2667	103	707,4333
26	160,8333	52	4988,167	78	1271,267	104	0,6

Fonte: Próprio Autor.

8.2.1 Máquina A

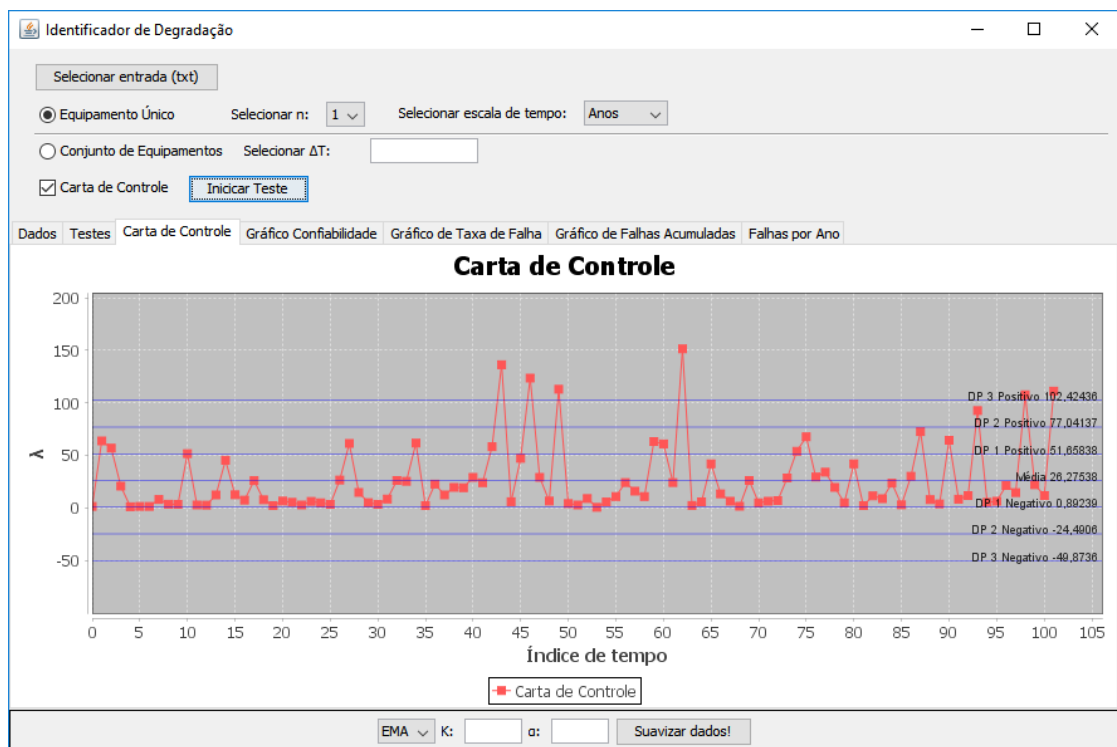
A informação que se tem sobre a primeira máquina é que a mesma possuía 13 anos de idade ao início do período de observação, que durou 15 anos, acarretando assim em 28 anos de idade ao fim do período de observação. Os resultados da utilização dos dados coletados (Tabela 22) no aplicativo *IDeg* são mostrados nas figuras em sequência.

Figura 58 - Resultados dos TIDs das Classes para Máquina A.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 59 - Aplicação da Carta de Controle para os Dados da Máquina A.



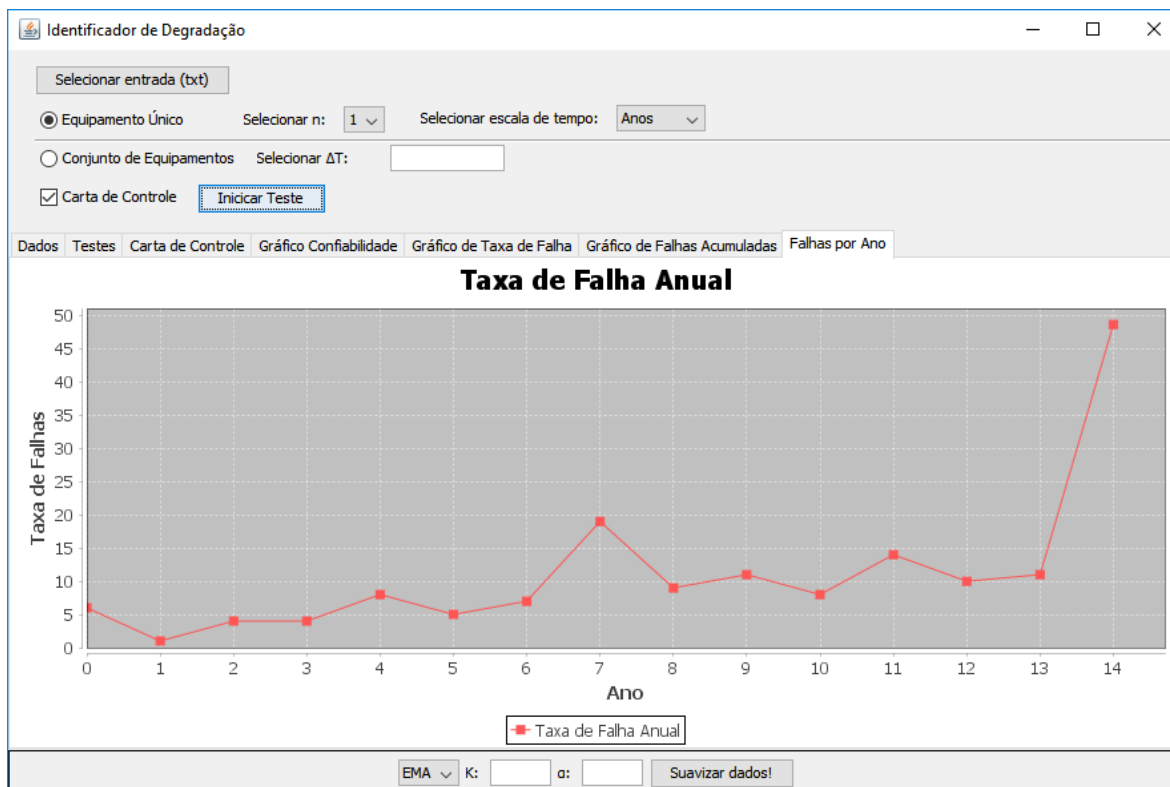
Fonte: Próprio Autor.

Figura 60 - Gráfico de Número de Falhas Acumuladas para Máquina A.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 61 - Gráfico de Taxa de Falha Anual da Máquina A.



Fonte: Próprio Autor.

É possível ver no gráfico de taxa de falhas anual (Figura 61) uma tendência crescente ao longo dos anos, como primeiro indicativo de degradação. Outro indicativo pode ser visto na convexidade da curva de falhas acumuladas (Figura 60). Ao observar os TIDs (Figura 58), é notável que a maioria das classes acusa degradação a partir do 11º ano. Porém, uma estimativa que pode ser utilizada no caso de discordância entre as classes é a obtenção da média aritmética entre os valores. Feito isto, é indicado um TID médio estimado de 11,45 anos e, ao se somar a idade inicial da máquina, tem-se um TID total de 24,5 anos.

8.2.2 Máquina B

A máquina se encontrava na idade de 21 anos ao início do período de observação. Os resultados obtidos pela análise do aplicativo, dos dados da Tabela 23, são apresentados a seguir.

Figura 62 - Resultados dos TIDs das Classes para Máquina B.

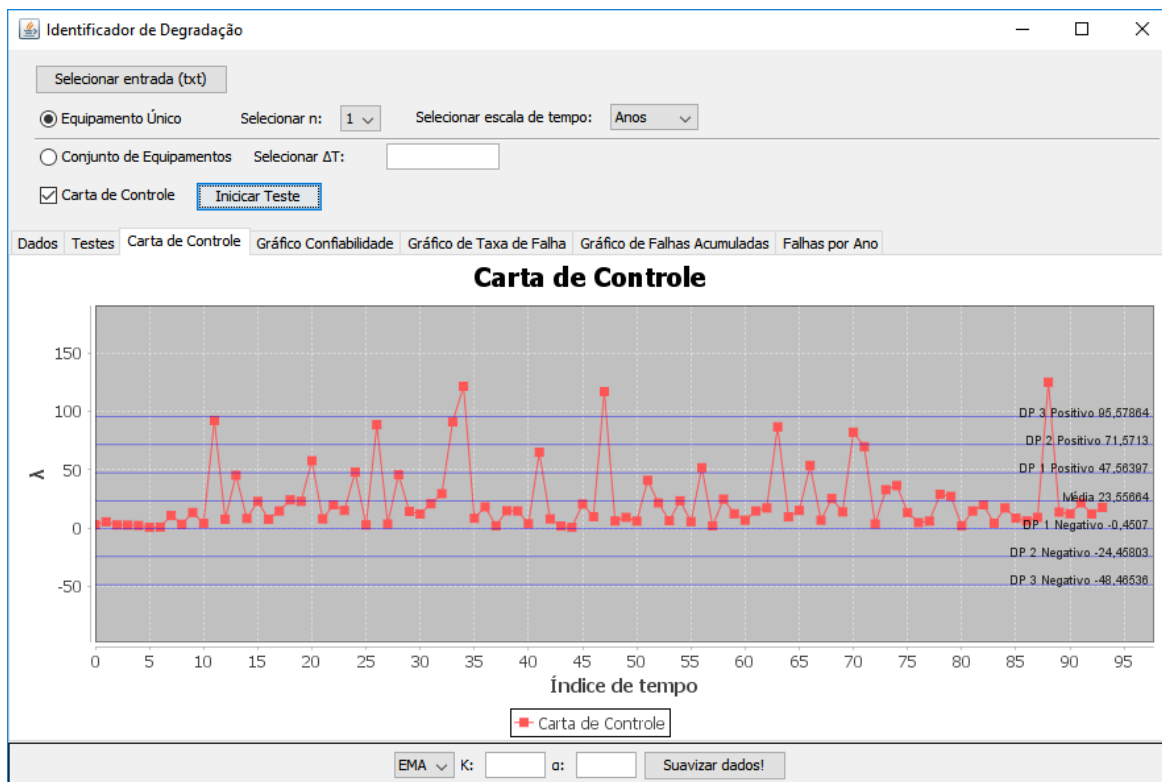
The screenshot shows the 'Identificador de Degradação' application window. The interface includes a 'Selecionar entrada (txt)' field, radio buttons for 'Equipamento Único' (selected), 'Conjunto de Equipamentos', and 'Carta de Controle' (checked). There are dropdown menus for 'Selecionar n:' (set to 1) and 'Selecionar escala de tempo:' (set to Anos). A table with tabs 'Dados', 'Testes', 'Carta de Controle', 'Gráfico Confiabilidade', 'Gráfico de Taxa de Falha', 'Gráfico de Falhas Acumuladas', and 'Falhas por Ano' is displayed. The table contains the following data:

Classe	TID	Índice
IFR 1	inexistente	inexistente
IFR 2	14.493925038051751	67
IFR 3	14.65662100456621	68
IFR 4	inexistente	inexistente
IFRA 1	14.65662100456621	68
IFRA 2	12.964469178082195	56
NBU	inexistente	inexistente
NBUE 1	10.181516362252665	35
NBUE 2	10.181516362252665	35
NBAFR	5.216630517503805	11
DMRL 1	14.493925038051751	67
DMRL 2	14.493925038051751	67
NBUFR	14.02666476407915	63
HNBU	5.216630517503805	11

At the bottom of the window, there are input fields for 'EMA', 'K:', and 'σ:', along with a 'Suavizar dados!' button.

Fonte: Próprio Autor.

Figura 63 - Aplicação da Carta de Controle para os Dados da Máquina B.



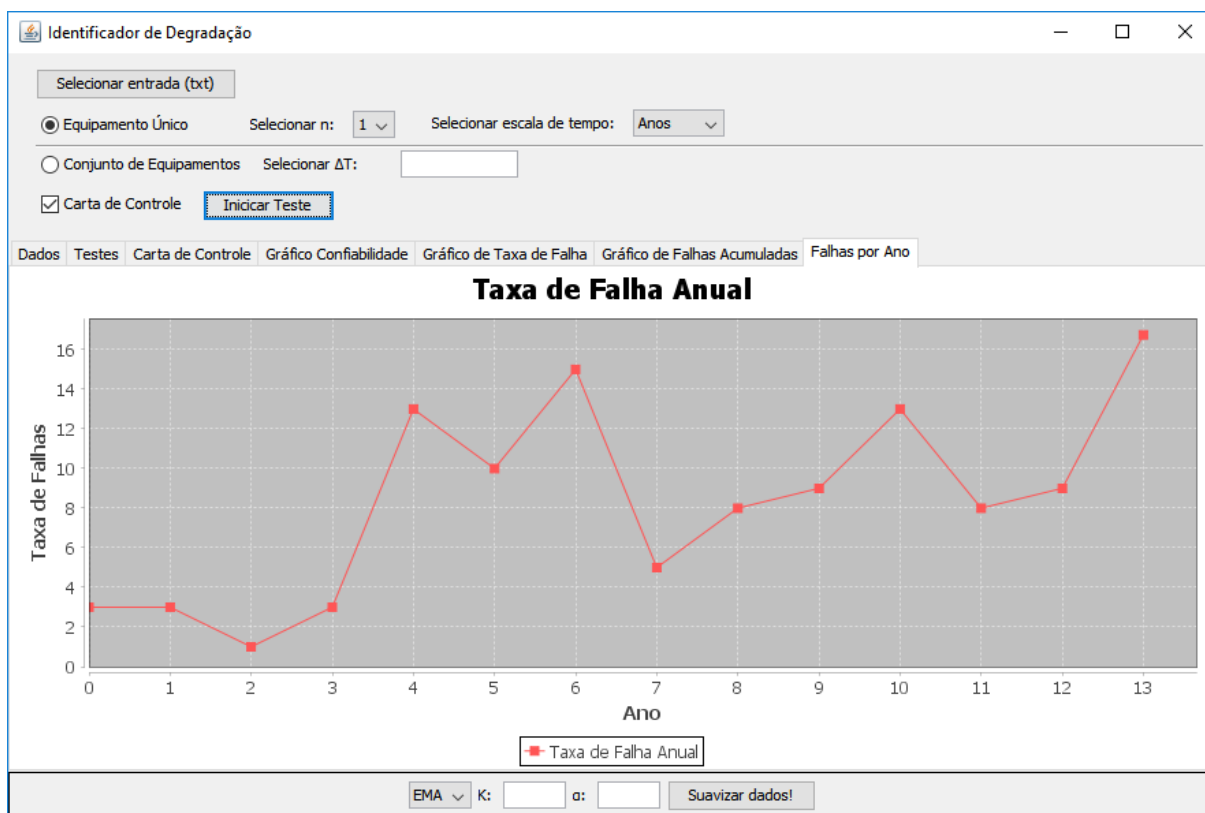
Fonte: Próprio Autor.

Figura 64 - Gráfico de Número de Falhas Acumuladas para Máquina B.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 65 - Gráfico de Taxa de Falha Anual da Máquina B.



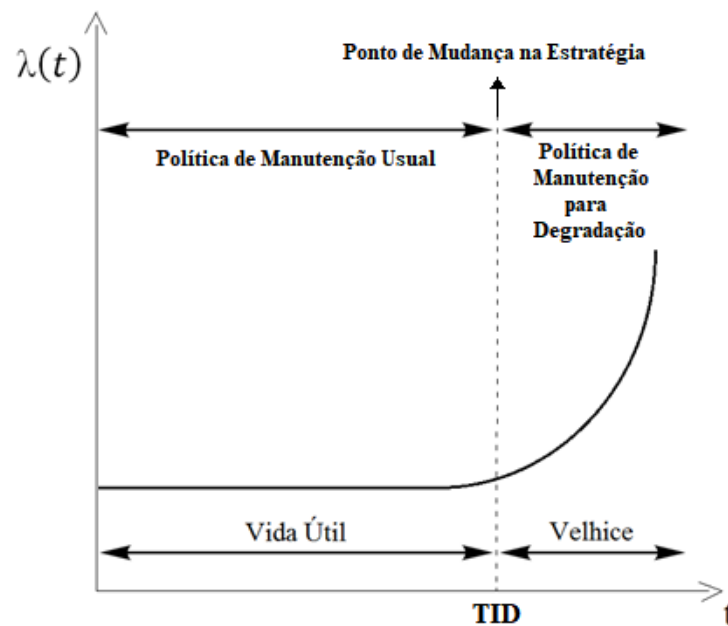
Fonte: Próprio Autor.

Assim como na Máquina A, o gráfico de taxa de falhas anual da Máquina B (Figura 65) apresenta indícios de presença de degradação, junto com a convexidade acentuada do gráfico de falhas acumuladas (Figura 64). Os testes de classes (Figura 62) apontam diferentes valores de TID, sendo assim, caso seja feita uma média aritmética entre os valores que não deram como inexistentes, encontramos o tempo de 11,86 anos. Somando este valor com a idade inicial, tem-se um TID total de 32,86 anos.

9 APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO BASEADA NA CONDIÇÃO

Uma vez identificado o TID (Tempo até Início da Degradação), é importante saber quais providências se tomar em relação ao item em degradação, mas a princípio já se sabe que deve haver uma mudança na estratégia de manutenção adotada. A figura a seguir ilustra esse o processo de mudança referido.

Figura 66 - Ponto para Mudança na Política de Manutenção.



Fonte: Próprio Autor.

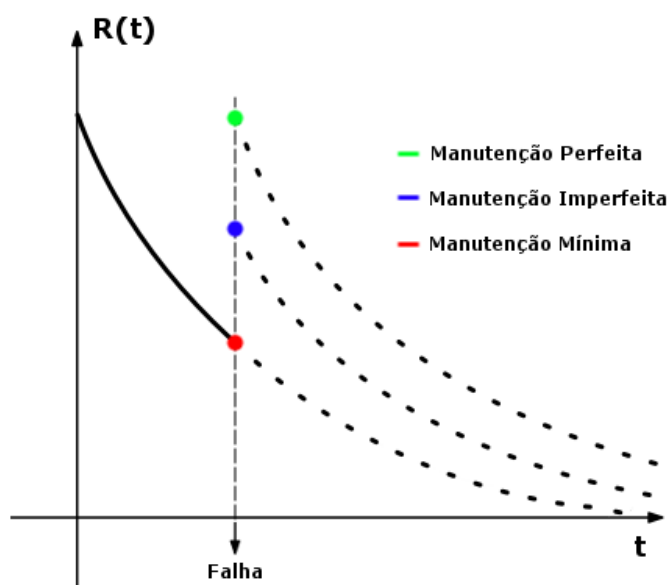
Os modelos de manutenção tratam reparos como mínimos, perfeitos ou imperfeitos. NAKAGAWA (1979) modela a Manutenção Preventiva (MP) imperfeita desta maneira: Após uma manutenção preventiva, um item retorna ao estado “Tão Bom Quanto Novo” (MP perfeita), com probabilidade p , ou retorna ao estado “Tão Ruim Quanto Antigo” (MP Mínima), com probabilidade $q=1-p$. Claramente se $p=1$, a manutenção é classificada como perfeita, se $p=0$, corresponde a uma manutenção mínima e se $0 < p < 1$, a manutenção é considerada imperfeita. Assim, manutenções mínimas e perfeitas são casos especiais da manutenção imperfeita.

Complementarmente, WHANG & PHAM (2006) definem os tipos de manutenção (ou reparo) como:

- **Reparo ou Manutenção Perfeita:** Ações de manutenção que restauram a condição de funcionamento do sistema para "Tão Bom Quanto Novo". Ou seja, após uma manutenção perfeita, um sistema possui a mesma função de tempo de vida e distribuição de falhas de um item novo. A revisão completa de um motor com uma biela quebrada é um exemplo de reparo perfeito. Geralmente, a substituição de um sistema falhado por um novo é um reparo perfeito.
- **Reparo ou Manutenção Mínima:** Ações de manutenção que restauram um sistema para a mesma taxa de falha que tinha quando falhou. O reparo mínimo foi estudado pela primeira vez por BARLOW & HUNTER (1960). O estado operacional do sistema após o reparo mínimo geralmente é conhecido como "Tão Ruim Quanto Antigo" na literatura. Trocar um pneu furado em um carro é um exemplo de reparo mínimo porque a taxa geral de falha do carro é essencialmente inalterada.
- **Reparo ou Manutenção Imperfeita:** Ações de manutenção que melhoram o estado de um sistema, porém não o torna um sistema "Tão Bom Quanto Novo". Normalmente, presume-se que a manutenção imperfeita restaura o estado operacional do sistema em algum lugar entre "Tão Bom Quanto Novo" e "Tão Ruim Quanto Antigo". Claramente, o reparo (manutenção) imperfeito (a) é um reparo (manutenção) geral que pode incluir os dois casos extremos: reparo (manutenção) mínimo (a) e perfeito (a). O ajuste de um motor é um exemplo de manutenção imperfeita.
- **Reparo ou Manutenção Pior:** Ações de manutenção que fazem com que a taxa de falha do sistema ou a idade atual aumentem. Assim, após o reparo pior, a condição de funcionamento do sistema torna-se pior do que antes da sua falha.
- **Reparo ou Manutenção Pior de Todas:** Ações de manutenção que fazem com que o sistema falhe ou quebre.

Os dois últimos tipos de manutenção tendem a ser expurgados na presença de uma equipe de manutenção bem treinada e equipada, e não serão considerados e tratados aqui. A ilustração a seguir fornece o impacto destes conceitos de manutenção na confiabilidade.

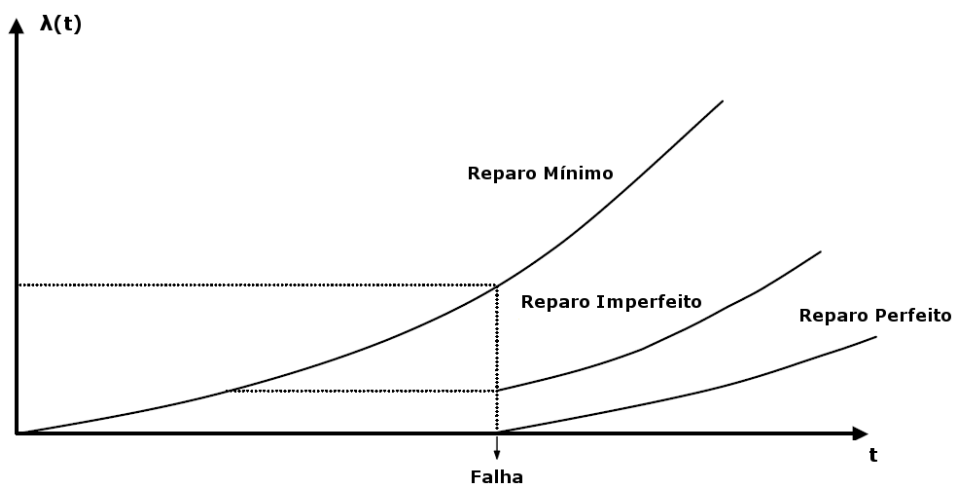
Figura 67 - Comportamento da Confiabilidade de Acordo com o Tipo de Manutenção Realizada.



Fonte: Próprio Autor.

De maneira alternativa, a Figura 68 mostra o comportamento da taxa de falhas de acordo com a manutenção empregada.

Figura 68 - Reparo Mínimo, Imperfeito e Perfeito versus Mudanças na Taxa de Falhas.



Fonte: Adaptado de PHAM & WANG, pg. 17.

DO VAN et al (2012) explica que as ações de manutenção perfeitas restauram o sistema para o estado “Tão Bom Quanto Novo”, porém, os custos relacionados são frequentemente altos, enquanto que as ações de manutenção imperfeita restauram parcialmente o sistema a um custo reduzido, com o ônus de tornar o sistema mais susceptível a uma futura deterioração. Uma política de manutenção otimizada combina a utilização de manutenções perfeitas e imperfeitas. O trabalho de DO VAN et al (2012) foca na proposta de modelos de manutenção baseada na condição através da construção de políticas de manutenção otimizada.

WANG (2002) apresenta uma pesquisa bastante interessante sobre políticas de manutenção para sistemas em processo de deterioração. Seu documento classifica os modelos de manutenção de forma que facilite a escolha do modelo apropriado para determinado caso. As políticas, que são inúmeras, são divididas em categorias, de acordo com a proposta oferecida. As categorias base são: Um único equipamento e um conjunto de equipamentos. WANG (2002) mantém seu foco em políticas válidas para um único equipamento, uma vez que elas servem como base para elaboração de políticas para um conjunto de equipamentos, e as classifica em seis subcategorias:

- Política de Manutenção Preventiva Dependente da Idade;
- Política de Manutenção Preventiva Periódica;
- Política de Limite de Falhas;
- Política de Manutenção Preventiva Sequencial;
- Política de Limite de Reparos;
- Política de Contagem de Número de Reparos e Tempo de Referência;

É importante salientar cada política apresenta vantagens e desvantagens em sua concepção e diferenciam entre si em suas variáveis de decisão e em seu horizonte de planejamento. As seções que seguem constam de uma breve apresentação de cada uma das categorias, afim de citar suas características, vantagens e desvantagens, concluindo então quais são consideradas mais adequadas para utilização em período de degradação de um item.

9.1 POLÍTICA DE MP DEPENDENTE DA IDADE

Provavelmente é o tipo de política mais comum e popular. Sua nomenclatura se dá ao fato de os tempos das Manutenções Preventivas (MP) desta categoria serem baseados na idade do item. WANG & PHAM (2006) explicam que “Sob este tipo de política, uma unidade é preventivamente mantida até certa idade predeterminada T , ou reparada em caso de falha, até receber uma manutenção perfeita, preventiva ou corretiva. Note que a MP em T , ou a MC em caso de falha, pode ser mínima, imperfeita ou perfeita. Assim, para esta classe de políticas, vários modelos de manutenção podem ser construídos de acordo com diferentes tipos de MPs (mínimas, imperfeitas, perfeitas), MCs (mínimas, imperfeitas, perfeitas), estruturas de custos, etc.”. Ou seja, é estabelecido uma idade T para que, após atingida, seja feita a manutenção perfeita, que geralmente significa a substituição do equipamento. Caso antes do tempo T ocorra algum evento de falha, ações de manutenção corretiva são realizadas, podendo estas serem mínimas, imperfeitas ou perfeitas, dependendo do modelo estabelecido. A base desta classe, conhecida como *Substituição pela Idade*, onde o equipamento é substituído no tempo T ou na ocorrência de falha (o que vier primeiro), é descrita em BARLOW & HUNTER (1960).

Baseado nesta premissa, várias combinações foram criadas ao longo do tempo, como por exemplo a apresentada por TAHARA & NISHIDA (1975) que estabelece que uma unidade substituída caso ocorra falha após um tempo de referência t_0 ou quando atingir a idade T , ou seja, $0 < t_0 < T$. É importante observar que caso $t_0 = 0$, a política se torna a política de *Substituição pela Idade*. Já o modelo de NAKAGAWA (1984) consta em substituir um item em uma idade T ou na ocorrência de um número N de falhas (o que vier primeiro), assim, as variáveis de decisão desta política são T e N . Mais uma vez é possível ver que esta política também tem como caso especial a política de *Substituição pela Idade*, quando $N = 1$.

Os principais modelos de políticas dependentes da idade encontrados na literatura podem ser vistos na tabela a seguir.

Tabela 23 - Principais Políticas de MP Dependentes da Idade, suas Referências e Características.

Política de Manutenção	Referência	Tempo da MP	Variáveis de Decisão
Substituição pela Idade	BARLOW & HUNTER (1960)	Idade fixa T	T
Substituição por Reparo	BLOCK et al (1993)	Tempo desde a última manutenção	Tempo fixo
T-N	NAKAGAWA (1984)	Idade fixa T ou tempo	T, N
(T, t)	SHEU et al (1993)	Idade fixa T ou tempo	T, t
(t_0 , T)	TAHARA & NISHIDA (1975)	Idade fixa T	t_0 , T
Idade Mista	WANG & PHAM (1999)	Idade fixa T ou tempo	k, T
(T, n)	SHEU et al. (1995)	Idade fixa T	T, n

Fonte: Adaptado de WANG & PHAM, 2006, pg. 35.

9.2 POLÍTICA DE MP PERIÓDICA

Esta classe de políticas trata de manter o item preventivamente em determinados intervalos de tempo fixos kT ($k=1,2,3\dots$) independentemente de seu histórico de falhas, e reparado no caso de falha entre eles. BARLOW & HUNTER (1960), por exemplo, consideram a seguinte política de MP periódica: “Um item é substituído periodicamente em tempos programados kT ($k=1,2,3\dots$). Depois de cada falha, apenas reparos mínimos são realizados, afim de não perturbar a trajetória da taxa de falhas através de tais reparos entre os tempos programados”. Este tipo de política é comumente utilizado em sistemas complexos, como computadores e aeronaves (NAKAGAWA, 1981). Outra política deste tipo é a Política de Substituição de Bloco, na qual o item é substituído nos períodos kT e também na ocorrência de falha. Uma terceira variante básica desta classe de políticas é a Sem Substituição na Falha, onde o item é sempre substituído nos períodos kT , porém não na ocorrência de falha. Um sumário com as principais literaturas acerca da classe de Políticas de MP Periódica é mostrado, a título informativo, na Tabela 25.

Tabela 24 - Principais Políticas de MP Periódicas, suas Referências e Características.

Política de Manutenção	Referência	Tempo da MP	Variáveis de Decisão
Substituição de Bloco	BARLOW & HUNTER (1960)	Periódico	Tempo Periódico
Substituição Periódica com Reparo Mínimo	BARLOW & HUNTER (1960)	Periódico	Tempo Periódico
Revisão e Reparo Mínimo	LIU et al (1995)	Periódico e seus Múltiplos	Número Fixo de MPs / Tempo Periódico
Políticas (T_0 , T^*) I, II e III	NAKAGAWA (1981)	Periódico	Tempo Periódico / Tempo Referência
(n, T)	NAKAGAWA (1986)	Periódico	Tempo Periódico / Número de Falhas
(r, T)	TANGO (1978)	Periódico	Tempo Periódico / Idade Referência
(N, T)	WANG & PHAM (1999)	Periódico e seus Múltiplos	Tempo Periódico / Número de Reparos
(δ , T)	COX (1962)	Periódico	Tempo Periódico / Idade Referência
(t_0 , T)	BERG & EPSTEIN (1976)	Periódico	Tempo Periódico / Idade Referência

Fonte: Adaptado de WANG & PHAM, 2006, pg. 37.

9.3 POLÍTICA DE LIMITE DE FALHAS

WANG & PHAM (2006) citam que “Na classe de Políticas de Limite de Falhas, as manutenções preventivas são realizadas apenas quando a taxa de falha, ou algum outro indicador de confiabilidade, ultrapassa um nível predeterminado, onde as falhas interventoras, neste meio tempo, são corrigidas por reparos”. Ou seja, nesta classe, um item trabalha no limite mínimo de confiabilidade permitido, ou acima dele. Em suas variações, o custo é considerado como o critério de otimização da política, ao invés, ou além da confiabilidade. Assim critérios que podem ser adotados são a maximização da confiabilidade e a minimização do custo, associados as ações de manutenção. Geralmente o problema com tal classe de políticas é que as mesmas requerem muito esforço computacional para determinação dos esquemas de manutenção (WANG & PHAM, 2002). A Tabela 26 mostra as principais políticas de limite de falhas, suas extensões para otimização, onde pode ser visto que o custo aqui é tratado como prioridade muitas vezes, e seus respectivos horizontes de planejamento.

Tabela 25 - Principais Políticas de Limite de Falhas, suas Referências e Características.

Referência	Indicador de Confiabilidade	Critério de Otimização	Horizonte de Planejamento
BERGMAN (1978)	Taxa de Falhas por Desgastes, Dano Acumulado ou Estresse	Taxa de Custo	Infinito
MALIK (1979)	Confiabilidade	Confiabilidade	Infinito
CANFIELD (1986)	Taxa de Falha	Taxa de Custo	Infinito
ZHENG & FARD (1991)	Taxas de Falha	Taxa de Custo	Infinito
LIE & CHUN (1986)	Taxa de Falha	Taxa de Custo	Infinito
JAYABALAN & CHAUDIHURI (1992a)	Taxa de Falha	Custo Total	Finito
JAYABALAN & CHAUDIHURI (1992b)	Idade ou Outros	Taxa de Custo	Infinito
JAYABALAN & CHAUDIHURI (1992c)	Idade	Custo Total	Finito
CHAN & SHAW (1993)	Taxa de Falha	Disponibilidade	Infinito
SURESH & SHAUDIHURI (1994)	Confiabilidade e Taxa de Falha	Custo Total	Finito
JAYABALAN & CHAUDIHURI (1995)	Idade	Custo Total	Finito
MONGA et al (1997)	Redução (Idade e Taxa de Falha)	Taxa de Custo	Infinito
LOVE & GUO (1996)	Taxa de Falha Weibull	Taxa de Custo	Infinito

Fonte: Adaptado de WANG & PHAM, 2006, pg. 39.

9.4 POLÍTICA DE MP SEQUENCIAL

Diferentemente da classe de políticas de MP periódica, os tempos de manutenção da classe de políticas de MP sequencial são realizadas em intervalos de tempo diferentemente espaçados, geralmente cada vez menores, baseando-se na premissa de que quanto mais velho o item for, mais ações de manutenção ele necessitará. Um exemplo é a política mostrada em BARLOW & PROSCHAN (1962), a qual não especifica no início do período cada intervalo de

MP futuro, ao invés disto, após cada MP, é especificado apenas o próximo intervalo de MP. Este ganho em flexibilidade resulta em uma diminuição no custo esperado (WANG & PHAM, 2002). A tabela a seguir mostra os principais trabalhos sobre esta classe.

Tabela 26 - Principais Políticas de MP Sequencial, suas Referências e Características.

Política de Manutenção	Referência	Tempo da MP	Variáveis de Decisão
Tempo Remanescente	BARLOW & PROSCHAN (1962)	Variável	Tempo Restante
(t_i, k)	NGUYEN & MURTHY (1981)	Variável / Falha	Tempo Referência / Número de Falhas
(x, N)	NAKAGAWA (1988)	Variável	Número de MPs
(τ, n)	WU & CLEMENTS-CROOME (2005)	Variável	Custo
(N^*, x^*)	KIJIMA & NAKAGAWA (1992)	Variável	Número de MPs

Fonte: Adaptado de WANG & PHAM, 2006.

Estas políticas sequenciais são práticas, porque a maioria dos itens necessita mais frequentemente de manutenção com o avanço da idade, fazendo-se, contudo, as ressalvas para os estudos realizados para a Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), conforme SANTOS (2013) e MOUBRAY (1997).

9.5 POLÍTICA DE LIMITE DE REPAROS

Na classe de políticas de Limite de Reparos, quando uma unidade falha, o custo de reparo é estimado e o reparo é realizado se o custo estimado for inferior a um limite predeterminado, caso contrário, o item é substituído. Esta classe foi apresentada na literatura por GARDENT & NONANT (1963), e DRINKWATER & HASTINGS (1967). Uma desvantagem da política apresentada por eles é que a decisão sobre um reparo ou uma substituição se baseia somente no custo de um único reparo (WANG & PHAM, 2002). Ou seja, situações prolongadas onde hajam sucessivos reparos, os quais singularmente não atingem o limite de custo, não influenciam na tomada de decisão. Tendo isto em mente, a consideração da taxa de custo ao longo do tempo tende a oferecer uma melhor diminuição de custo, uma vez que depende do histórico completo de reparos. Baseado nesta ideia, BEICHELT (1982) toma como base a taxa de custo (custo por unidade de tempo) como tipo de limite, sendo critério para justificar uma substituição ou um reparo, onde um item é substituído assim que a taxa de custo

atinge um limite fixo, caso contrário o item é reparado. Um sumário de políticas de limites de reparo é apresentado na Tabela 28, lembrando que uma MC perfeita significa uma substituição do item avariado.

Tabela 27 - Principais Políticas de Limites de Reparos, suas Referências e Características.

Referência	MC Antes do Limite	MC Depois do Limite	Tipo de Limite	Critério de Otimização	Horizonte de Planejamento
HASTINGS (1969)	Mínimo	Perfeito	Custo	Taxa de Custo	Infinito
KAPUR et al (1989)	Mínimo	Perfeito	Custo	Taxa de Custo	Infinito
BEICHELT (1982)	Perfeito	Perfeito	Taxa de Custo	Taxa de Custo	Infinito
BEICHELT (1978, 1981)	Mínimo	Perfeito	Taxa de Custo	Taxa de Custo	Infinito
NGUYEN & MURTHY (1981)	Imperfeito	Perfeito	Tempo	Taxa de Custo	Infinito
YUN & BAI (1988)	Mínimo	Perfeito	Custo	Taxa de Custo	Infinito
KOSHIMAE et al (1996)	Perfeito	Perfeito	Tempo	Taxa de Custo	Infinito
NGUYEN & MURTHY (1980)	Mínimo	Perfeito	Tempo	Taxa de Custo	Infinito
DOHI et al (1997)	Mínimo	Imperfeito	Tempo	Taxa de Custo	Infinito
PARK (1983)	Mínimo	Perfeito	Custo	Taxa de Custo	Infinito
NAKAGAWA & OSAKI (1974)	Mínimo	Perfeito	Tempo	Taxa de Custo	Infinito
YUN & BAI (1987)	Imperfeito	Perfeito	Custo	Taxa de Custo	Infinito
WANG & PHAM (1996)	Imperfeito	Imperfeito	Custo	Disponibilidade / Taxa de Custo	Infinito

Fonte: Adaptado de WANG & PHAM, 2006, pg. 41.

9.6 POLÍTICA DE CONTAGEM DE NÚMERO DE REPAROS E TEMPO DE REFERÊNCIA

Como a nomenclatura sugere, esta classe de políticas combinam a ideia de contagem de número de reparos e/ou registro de tempo decorrido. Geralmente não há agendamento de MP neste tipo de classe, e diferentemente das políticas de MP, onde o tempo da MP é uma variável

de decisão, aqui o número de falhas e/ou tempo de referência são as variáveis de decisão. Algumas políticas desta classe são citadas na tabela que segue.

Tabela 28 - Principais Políticas de Contagem de Número de Reparos e Tempo de Referência, suas Referências e Características.

Política de Manutenção	Referência	Variáveis de Decisão
Contagem de Número de Reparos	MORIMURA & MAKABE (1963a)	Número de Reparos
Contagem de Número de Reparos e Tempo de Referência	MORIMURA (1970)	Número de Reparos e Tempo de Referência
Substituição na Enésima Falha	MAKIS & JARDINE (1992)	Número de Falhas
Política de Tempo de Referência	MUTH (1977)	Tempo de Referência

Fonte: Adaptado de WANG & PHAM, 2006.

Uma vez que todas as classes de políticas de manutenção de substituição foram apresentadas, o tópico a seguir apresenta sugestões do autor deste documento para utilização em equipamentos em degradação.

9.7 SUGESTÕES DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PARA DEGRADAÇÃO

É fato que não existe uma política que serve para tudo eficientemente, ela depende, por exemplo, do equipamento, do custo de suas peças, do custo de uma unidade nova, da aplicação, da segurança necessária (leia-se confiança) e do nível de requerimento (disponibilidade), por exemplo. Deve-se considerar ainda políticas como a Manutenção Produtiva Total (TPM), estudadas em SANTOS (2013) e NAKAJIMA (1988), e a Manutenção Centrada na Confiabilidade, estudadas em SANTOS (2013) e MOUBRAY (1997). As seções a seguir mostram sugestões para políticas a serem utilizadas nos itens apresentados nesta dissertação, quando os mesmos atingirem a velhice.

9.7.1 Itens Reparáveis

Tomando como exemplo os dois casos do capítulo 8, é possível ver que como são máquinas de alto custo e que trabalham em regime de operação interligado ao sistema elétrico nacional, é impraticável aplicar uma política de MP dependente da idade simples, uma vez que atingir a idade T predeterminada implicaria na substituição do item. Para ambos os casos (máquinas 1, 2, 3, A e B), como se tratam de geradores e sua indisponibilidade pode resultar em grandes perdas em relação ao custo, uma política de manutenção adequada deve monitorar a taxa de falhas e o tempo de reparo, caso a taxa de falhas ultrapasse um limite λ_m , ou o tempo médio de reparo ultrapasse um valor predeterminado t_m , o que ocorrer primeiro, então a unidade deve ser substituída. Falhas interventoras anteriores a estes limites são resolvidas por meio de reparos imperfeitos ou mínimos. O cálculo dos valores de λ_m e t_m devem ser realizados obedecendo critérios de otimização de custos, levando em consideração os custos: Valor homem/hora, valor de peças de reposição, valor de penalidade por indisponibilidade e o valor de um produto novo. A teoria de critérios de minimização pode ser estudada em TORRES (2001).

Em suma, os geradores após atingirem seus respectivos TIDs, estimados no Capítulo 8, passariam a receber uma nova política de manutenção, independente da política previamente utilizada. Nesta política, através de cálculos de otimização, seria estimado o par de valores limites (λ_m , t_m), visando a minimização de custos, onde falhas que ocorressem antes dos limites seriam sanadas com reparos imperfeitos, ou mínimos.

9.7.2 Itens Não-Reparáveis

Supondo que o item cujo TTFs de um lote de 40 foi mostrado na Tabela 6 se trate de um item não reparável. Pela Figura 42, o TID deste lote pode ser estimado como sendo 3000 horas (fazendo as médias entre os TIDs das classes). Uma política de manutenção (substituição) ideal para este item depende do risco que sua falha pode acarretar e do seu valor. Julgando ser um item no qual sua falha possa acarretar em risco à saúde humana, custos não devem ser poupados, então uma política plausível é a de substituição pela idade. A idade limite pode ser definida como por exemplo 10% a mais do TID, assim, itens que atingissem uma idade de 3300 horas, seriam substituídos, ou, obviamente, na ocorrência de falha.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As seguintes considerações podem ser tomadas em relação a dissertação como um todo:

- A metodologia apresentada não é aplicável para a maioria dos itens de natureza eletrônica, devido ao fato das curvas de taxa de falha destes serem insensíveis a variável tempo, diferentemente dos itens de natureza eletromecânica, tornando a metodologia ineficaz;
- A aplicação da metodologia em itens que possuem variações bruscas na taxa de falha tende a causar discordância entre os resultados das classes de funções, tornando uma alternativa melhor aplicável o cálculo da média entre os valores TID fornecidos por cada uma das classes que não apresentaram resultado como *Inexistente*;
- O preparo inicial dos dados necessita de conhecimento especializado, como por exemplo a filtragem dos dados dos geradores elétricos aqui apresentados, podendo ser uma tarefa decisiva com relação aos resultados obtidos;
- A fonte dos dados analisados deve ser limpa e confiável, para que se possa haver uma avaliação do real estado do item, uma vez que, mesmo com as filtrações realizadas, alguns dados viciados possam passar e prejudicar o resultado obtido.
- Se não houverem informações sobre as datas das ocorrências, o aplicativo não tem como calcular o gráfico de falhas por ano, não apresentando resultado na respectiva aba.
- Para as conversões de grandezas de tempo foram utilizados os valores:
 - 1 ano = 365 dias;
 - 1 mês = 30 dias;

Como consideração final, a implementação de uma análise de custos à metodologia pode ser tomada como sugestão para trabalho futuro, assim como a implementação computacional de outras funções testes não tratadas nesta dissertação, como por exemplo, algumas contidas na Tabela 4.1.

11 CONCLUSÃO

O estudo da degradação de equipamentos se mostra algo indispensável para um planejamento de custos e tomada de decisão. Com base nesta premissa, a presente dissertação tratou de apresentar uma metodologia para identificar tempos até início da degradação de itens, a partir da comparação de curvas não-parametrizadas, geradas por estes, com classes de funções que apresentam comportamento de envelhecimento. Baseado na metodologia, foi criado um aplicativo, na linguagem de programação JAVA, que conta com uma interface capaz de apresentar resultados numéricos e gráficos, resultados da aplicação da metodologia, além de fornecer opções de tratamento e visualização de dados. Com os resultados obtidos, foi possível estabelecer sugestões de tomada de decisão para política de manutenção ideal a ser empregada após a entrada do item no período da velhice.

Foi realizada a aplicação da metodologia através do aplicativo em casos reais, demonstrando sua funcionalidade e versatilidade. Sobre os resultados das comparações com as classes de funções com características de envelhecimento, foi possível notar que em caso de divergência entre resultados, poderia ser realizada uma média aritmética para estimativa do TID médio, porém o ideal seria a aplicação de conhecimento especialista para hierarquização de importância das classes, a depender do item analisado. Foi concluído que a metodologia é eficiente na identificação da degradação, assim como a aplicabilidade do tratamento por médias móveis e por carta de controle, que se mostraram capazes de suavizar e eliminar anormalidades nos dados, respectivamente.

Uma das dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento da dissertação foi a obtenção de bancos de dados para testes, pois os mesmos são tratados como sigilosos em muitas empresas e não são fornecidos facilmente, uma vez que podem expor problemas internos e vulnerabilidades da mesma.

A apresentação das classes de políticas de manutenção utilizadas na degradação, ou políticas de substituição, se mostrou necessária para um desfecho conclusivo sobre as opções disponíveis de tomada de decisão após identificação do período de início da degradação. Tal escolha pode ser otimizada utilizando métodos matemáticos de minimização de custos. Em suma, toda metodologia e informações encontradas nesta dissertação podem servir como ferramenta de auxílio na tomada de decisões e recomenda-se sua utilização em conjunto com outras ferramentas, como sistema de informação associados a monitoração contínua, e/ou Teoria da Decisão em ambiente de multicritérios, na busca por atenuar as incertezas na decisão e conseqüentemente obter melhores resultados.

Em suma, a utilização do aplicativo desenvolvido (IDeg) tem a capacidade de contribuir no diagnóstico de degradação, sendo possível o estabelecimento da devida política de manutenção cabível para cada situação, ao invés da utilização de políticas genéricas.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “**NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**”. Rio de Janeiro, 1994.

BAGAI, I.; JAIN, K.; “**Improvement, Deterioration, and Optimal Replacement under Age-Replacement with Minimal Repair**”. IEEE Transactions on Reliability, 1994, vol. 43, N° 1.

BARLOW, R. E.; PROSCHAN, F.; “**Planned Replacement**”. *Studies in Applied Probability and Management Science*, 1962, pp. 63-87.

BARLOW, R. E.; PROSCHAN, F.; “**Statistical Theory of Reliability and Life Testing**”. To Begin With, Silver Spring, 1981.

BARLOW, R. E.; HUNTER, L. C.; “**Optimum Preventive Maintenance Policies**”. *Operations Research*, 1960, vol. 8, pp. 90-100.

BASU, S. K.; BHATTACHARJ, M. C.; “**On Weak Convergence Within the HNBUE Family of Life Distributions**”. *Journal of Applied Probability*, 1984, vol. 21, pp. 654-660.

BEICHELT, F.; “**A New Approach to Repair Limit Replacement Policies**”. *Transactions of the Eighth Prague Conference on Information Theory, Statistical Decision Functions, Random Processes*, Prague, 1978, vol. C, pp. 31-37.

BEICHELT, F.; “**Replacement Policies Based on System Age and Maintenance Cost Limits**”. *Mathematische Operationsforschung und Statistik Series, Statistics*, 1981, vol. 12, N° 4, pp. 621-627.

BEICHELT, F.; “**A Replacement Policy Based on Limits for the Repair Cost Rate**”. IEEE Transactions on Reliability, 1982, vol. 31, pp. 401-403.

BERG, M.; EPSTEIN, B.; “**A Modified Block Replacement Policy**”. *Naval research Logistics*, 1976, vol. 23, pp. 15-24.

BERGMAN, B.; “**Optimal Replacement Under a General Failure Model**”. *Advances in Applied Probability*, 1978, vol. 10, N° 2, pp. 431-451.

BLOCK, H. W.; LANGBERG, N. A.; SAVITS, T. H.; “**Repair Replacement Policies**”. *Journal of Applied Probability*, 1993, vol. 30, N° 1, pp. 194-206.

BRYSON, M. C.; SIDDIQUI M. M.; “**Some Criteria for Aging**”. *J. American Statistical Assoc*, vol. 64, 1969, pp 1472-1483.

CAI, J.; “**Structures of Systems with Exponential Life and HNBUE Components**”. *IEEE Transactions on Reability*, vol. 43, N°1, 1994.

CANFIELD, R. V.; “**Cost Optimization of Periodic Preventive Maintenance**”. *IEEE Transactions on Reliability*, 1986, vol. 35, N° 1, pp. 78-81.

CAO, J.; WANG, Y.; “**The NBUC and NWUC Classes of Life Distribution**”, *J. Applied Probability*, 1991, vol. 28, pp 473-479.

CHAN, J. K.; SHAW, L.; “**Modeling Repairable Systems with Failure Rates that Depend on Age & Maintenance**”. *IEEE Transactions on Reliability*, 1993, vol. 42, pp. 566-570.

CHENG, K.; LAM, Y.; “**Reliability Bounds on HNBUE Life Distributions with Known First Two Moments**”. *European Journal of Operational Research*, 2001, vol. 132, pp. 163-175.

COX, D. R.; “**Renewal Theory**”. Methuen, Londres, 1962.

DEVORE, J. L.; “**Probability and Statistics for Engineering and the Sciences**”, 8ª Edição, 2011.

DESHPANDE, J. V.; “**A Class of Tests for Exponentiality against Increasing Failure Rate Average Alternatives**”, *Biomerrika*, 1983, vol. 70, pp 514-518.

DESHPANDE, J. V.; KOCHAR, S. C.; SINGH, H.; “**Aspects of Positive Ageing**”, *Journal of Applied Probability*, 1986, vol. 23, pp 748–758.

DO VAN, P.; VOISIN, A.; LEVRAT, E.; IUNG, B.; “**Condition-Based Maintenance with both Perfect and Imperfect Maintenance Actions**”. *Proceedings of Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, 2012.

DOHI, T.; MATSUSHIMA, N.; KAIO, N.; OSAKI, S.; “**Nonparametric Repair-Limit Replacement Policies with Imperfect Repair**”. *European Journal of Operational Research*, 1997, vol. 96, N° 2, pp. 260-273.

DRINKWATER, R. W.; HASTINGS, N. V. J.; “**An Economic Replacement Model**”. *Oper. Res. Quart.*, 1967, vol. 18, pp. 121-138.

EBRAHIMI, N.; “**Two New Replacement Policies**”. *IEEE Transactions on Reability*, 1993, vol. 42, N° 1, pp. 141-147.

FOGLIATTO, F. S.; FALCÃO A. S. G.; KRUMMENAUER, L. A.; MULLER, A. F.; “**Procedimento de Monitoramento do Desempenho de Equipes de Eletricistas e do Custo de Atividades em Redes de Transmissão Elétrica Através de Cartas de Controle Estatístico de Processo**”. XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção, 2003.

GARDENT, P.; NONANT, L.; “**Entretien et renouvellement d’un parc de machines**”. *Revue Franc. Rech. Operat.*, 1963, vol. 7, pp. 5-19.

GUESS, F.; PROSCHAN, F.; “**Mean Residual Life: Theory and Applications**”. Air Force Office of Scientific Research, Technical Report, 1985.

HASTINGS, C.; “**The Repair Limit Replacement Method**”. *Oper. Res. Quart.*, 1969, vol. 20, pp. 337-350.

HANSUN, S.; “**A New Approach of Moving Average Method in Time Series Analysis**”. Conference on New Media Studies (CoNMedia), 2013.

HAQUE, E.; KHAN, N. S.; SHEIKH, R. I.; “**Smoothing Control of Wind Farm Output Fluctuations by Proposed Low Pass Filter, and Moving Averages**”. 1st International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE), 2015.

HENZ, L.; “**Metodologia para Caracterização do Envelhecimento de Equipamentos**”. Florianópolis, *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)*, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

HOLLANDER, M.; PARK, H. D.; PROSCHAN, F.; “**A Class of Life Distributions for Aging**”, *J. American Statistical Assoc.*, 1986, vol. 81, pp 91-95.

JAYABALAN, V.; CHAUDHURI, D.; “**Optimal Maintenance and Replacement Policy for a Deteriorating system with Increased Mean Downtime**”. *Naval Research Logistics*, 1992a, vol. 39, pp. 67-78.

JAYABALAN, V.; CHAUDHURI, D.; “**Sequential Imperfect Preventive Maintenance Policies: A Case Study**”. *Microelectronics and Reliability*, 1992b, vol. 32, Nº 9, pp. 1223-1229.

JAYABALAN, V.; CHAUDHURI, D.; “**Optimal Maintenance - Replacement Policy Under Imperfect Maintenance**”. *Reliability Engineering & System Safety*, 1992c, vol. 36, Nº 2, pp. 165-169.

JAYABALAN, V.; CHAUDHURI, D.; “**Replacement Policies: A Near Optimal Algorithm**”. *IIE Transactions*, 1995, vol. 27, pp. 784-788.

JIANG, R.; “**Degradation Change Point and Its Application in CBM Decision**”. *IEEE Prognostics & System Health Management Conference*, 2011.

JOE, H.; PROSCHAN, F.; “**Percentile Residual Life Functions**”, *Operations Research*, 1984, vol. 32, pp 668-678.

KANE, P. J.; COOKINGHAM, R. E.; “**Cleaning Up Noise Power Measurements Using Control Charts**”. *IS&T's PICS Conference*, 1999.

KAPUR, P. K.; GARG R. B.; BUTANI, N. L.; “**Some Replacement Policies with Minimal Repairs and Repair Cost Limit**”. *International Journal of Systems Science*, 1989, vol. 20, Nº 2, pp. 267- 279.

KARDEC, A.; NASCIF, J.; “**Manutenção Função Estratégica**”. *Qualitymark*, 3ª edição, 2010.

KIJIMA, M.; NAKAGAWA, T.; “**Replacement Policies of a Shock Model with Imperfect Preventive Maintenance**”. *European Journal of Operations Research*, 1992, vol. 57, pp. 100-110.

KLEFSJÖ, B.; “**A Useful Ageing Property Based On The Laplace Transform**”. *J. Applied Probability*, 1983, vol. 20, pp 457-481.

KLEFSJÖ, B.; “**The HNBUE and HNWUE Classes of Life Distributions**”. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1982, vol. 29, pp. 331-344.

KOCHAR, S. C.; WIENS, D. D.; “**Partial Orderings of Life Distributions with Respect to Their Ageing Properties**”, *Naval Research Logistics*, 1987, vol. 34, pp 823-829.

KOSHIMAE, H.; DOHI, T.; KAIO, N.; OSAKI, S.; “**Graphical/Statistical Approach to Repair Limit Replacement Problem**”. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 1996, vol. 39, pp. 230-246.

KULASEKER, K. B.; PARK, H. D.; “**The Class of Better Mean Residual Life at Age t_0** ”. *Microelectronics & Reliability*, 1987, vol. 27, pp. 725-735.

KUNCAR, A.; “**Basic Techniques for Filtering Noise Out of Accelerometer Data**”. *26th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, 2016, pp. 1122-1128.

KVAN, P. H.; VIDAKOVIC, B.; “**Nonparametric Statistics with Applications to Science and Engineering**”. *A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc.*, 2007.

LAI, C. D. “**Tests of Univariate & Bivariate Stochastic Ageing**”. *IEEE Transactions On Reliability*, 1994, vol. 43, no. 2.

LAI, C. D.; XIE, M.; “**Stochastic Ageing and Dependence for Reability**”. *Springer Science+Business Media, Inc.*, 2006.

LAUNER, R. L.; “**Inequalities for NBUE and NWUE Life Distributions**”, *Operations Research*, 1984, vol. 32, pp. 660-667.

LAVANGNANANDA, K.; KHAMCHAI, S.; “**Capability of Control Chart Patterns Classifiers on Various Noise Levels**”. *7th International Conference on Advances in Information Technology*, 2015, pp. 26-35.

LIE, C. H.; CHUN, Y. H.; “**An Algorithm for Preventive Maintenance Policy**”. *IEEE Trans. Reliability*, 1986, vol. 35, N°1, pp. 71-75.

LIM, J. H.; PARK, H. D.; “**Trend Change in Mean Residual Life**”. *IEEE Transactions on Reliability*, 1995, vol. 44, N° 2.

LIU, X. G.; MAKIS, V.; JARDINE, A. K. S.; “**A Replacement Model with Overhauls and Repairs**”. *Naval Research Logistics*, 1995, vol. 42, pp. 1063-1079.

LOH, W.Y.; “**A new generalization of NBU distributions**”, *IEEE Trans. Reliability*, 1984a, vol. 33, pp. 419-422.

LOH, W.Y.; “**Bounds on ARES for Restricted Classes of Distributions Defined via Tail Orderings**”, *Annals of Statistics*, 1984b, vol. 12, pp. 685-701.

LOVE, C. E.; GUO, R.; “**Utilizing Weibull Failure Rates in Repair Limit Analysis for Equipment Replacement/Preventive Maintenance Decisions**”. *Journal of the Operational Research Society*, 1996, vol. 47, N° 11, pp. 1366-1376.

MOUBRAY, J.; “**Reliability-Centered Maintenance**”. Industrial Press Inc, Second Edition, 1997.

MALIK, M. A. K.; “**Reliable Preventive Maintenance Policy**”. *AIIE Transactions*, 1979, vol. 11, N° 3, pp. 221-228.

MANN, H. B.; “**Nonparametric Tests Against Trend**”. *Econometrica*, 1945, vol. 13, pp. 245-259.

MONCHY, François; “**A Função Manutenção**”, *Formação para a Gerência da Manutenção Industrial*, São Paulo, 1989.

MONGA, A.; ZUO, M. J.; TOOGOOD, R.; “**Reliability Based Design of Systems Considering Preventive Maintenance and Minimal Repair**”. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 1997, vol. 4, N° 1, pp. 55-71.

NAKAGAWA, T.; OSAKI, S.; “**Optimum Preventive Maintenance Policies Maximizing the Mean Time to the First System Failure for a Two-Unit Standby Redundant System**”. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1974, vol. 14, N° 1, pp. 115-129.

NAKAGAWA, T.; “**A Summary of Periodic Replacement with Minimal Repair at Failure**”. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 1981, vol. 24, N° 3, pp. 213-227.

NAKAGAWA, T.; “**Optimal Policy of Continuous and Discrete Replacement with Minimal Repair at Failure**”. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1984, vol. 31, N° 4, pp. 543-550.

NAKAGAWA, T.; “**Periodic and Sequential Preventive Maintenance Policies**”. *Journal of Applied Probability*, 1986, vol. 23, N° 2, pp. 536-542.

NAKAGAWA, T.; “**Sequential Imperfect Preventive Maintenance Policies**”. *IEEE Trans. Relia.*, 1988, vol. 37, N° 3, pp. 295-298.

NAKAJIMA, S.; “Introduction to TPM”. Productivity Press, 1988.

NGUYEN, D. G.; MURTHY, D. N. G.; “**A Note on the Repair Limit Replacement Policy**”. *Journal of the Operation Research Society*, 1980, vol. 31, pp. 1103-1104.

NGUYEN, D. G.; MURTHY, D. N. G.; “**Optimal Maintenance Policy with Imperfect Preventive Maintenance**”. *IEEE Trans. Reliability*, 1981, vol. 30, N° 5, pp. 496-497.

NUDURUPATI, S. S.; BITITCI, U. S.; KUMAR, V.; CHAN, F. T. S.; “**State of the Art Literature Review on Performance Measurement**”. *Computers & Industrial Engineering*, 2010.

PARK, K. S.; “**Cost Limit Replacement Policy Under Minimal Repairs**”. *Microelectronics and Reliability*, 1983, vol. 23, pp. 347-349.

PEREIRA, S. S.; LOUREIRO, L. D.; MARTINS, F. R. G. S. P.; CLEMENTINO, A.; TUBINO, D. F.; “**Estudo Comparativo entre Modelos de Previsão de Demanda: Ensaio em um Produto Classe A de uma Empresa de Perfumes e Cosméticos**”. XXVI ENEGEP, 2006.

PORTALACTION, *Estatcamp*. Disponível em <http://www.portalaction.com.br/1418-Probabilidades>. Acesso em 25 de fevereiro de 2017, às 15:32.

ROJO, J.; “**Characterization of Some Concepts of Aging**”. *IEEE Transactions on Reability*, 1995, vol. 44, N° 2, pp. 285-290.

ROLSKI, T.; “**Mean Residual Life**”. *Bulletin of the International Statistical Institute*, 1975, vol. 46, pp 266-270.

SALEEM, A.; FORBES, D.; LUM, C.; “Ageing - Can We Delay the Process?”. *ESReDA 31st seminar on Ageing*, 2006.

SANTOS, C. M. P.; **Notas de aula da disciplina *Mantenabilidade de Equipamentos*, Disponível em <http://gsemufpe.wordpress.com>**, 2013.

SCHILLING, M. T.; PRACA, J. C. G.; QUEIROZ, J. F.; SINGH, C.; ASCHER, H.; “**Detection of Ageing in the Reliability Analysis of Thermal Generators**”. *IEEE Transactions in Power Systems*, 1988, vol. 3, N° 2, pp. 490-499.

SENGUPTA, D.; CHATTERJEE, A.; CHAKRABORTY, B.; “**Reliability Bounds and Other Inequalities for Discrete Life Distributions**”. *Microeletronic Reliability*, 1995, vol. 35, N° 12, pp. 1473-1478.

SHEU, S. H.; KUO, C. M.; NAKAGAWA, T.; “**Extended Optimal Age Replacement Policy with Minimal Repair**”. *RAIRO Recherche Operationnelle*, 1993, vol. 27, N° 3, pp. 337-351.

SHEU, S. H.; GRIFFITH, W. S.; NAKAGAWA, T.; “**Extended Optimal Replacement Model with Random Minimal Repair Costs**”. *European Journal of Operational Research*, 1995, vol. 85, pp. 636-649.

SI, X. S.; ZHOU, D.; “**A Generalized Result for Degradation Model-Based Reliability Estimation**”. *IEEE Transactions on automation science and engineering*, 2014, vol. 11, N° 2.

SINGH, H.; DESHPANDE, J. V.; “**On Some New Ageing Properties**”, *Scan-dinavian J. Statistics*, 1985, vol. 12, pp. 213-320.

SURESH, P.V.; CHAUDHURI, D.; “**Preventive Maintenance Scheduling for a System with Assured Reliability Using Fuzzy Set Theory**”. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 1994, vol. 1, N° 4, pp. 497-513.

TAHARA, A.; NISHIDA, T.; “**Optimal Replacement Policy for Minimal Repair Model**”. *Journal of Operations Research Society of Japan*, 1975, vol. 18, N° 3-4, pp.113-124.

TANGO, T.; “**Extended Block Replacement Policy with Used Items**”. *Journal of Applied Probability*, 1978, vol. 15, pp. 560-572.

TIWARI, R. C.; ZALKIKAR, J. N.; “**Testing Constant Failure Rate Against NBAFR Alternatives with Randomly Right-Censored Data**”. *IEEE Transactions on Reliability*, 1994, vol. 43, N° 4.

TORRES, G. L.; “**Métodos Práticos de Otimização**”. *Material do Laboratório Digital de Sistemas de Potência*, 2001.

WANG, H. Z.; PHAM, H.; “**Optimal Maintenance Policies for Several Imperfect Maintenance Models**”. *International Journal of Systems Science*, 1996, vol. 27, N° 6, pp. 543-549.

WANG, H. Z.; PHAM, H.; “**Some Maintenance Models and Availability with Imperfect Maintenance in Production Systems**”. *Annals of Operations Research*, 1999, vol. 91, pp. 305-318.

WANG, H.; “**A Survey of Maintenance Policies of Deteriorating Systems**”. *European Journal of Operational Research*, 2002, vol. 139, pp. 469-489.

WANG, H.; PHAM, H.; “**Reliability and Optimal Maintenance**”. *Springer Science+Business Media*, Londres-Inglaterra, 2006.

WU, S.; CLEMENTS-CROOME, D.; “**Optimal Maintenance Policies Under Different Operational Schedules**”. *IEEE Transactions on Reliability*, 2005, vol. 54, N° 2, pp. 338-346.

YUN, W. Y.; BAI, D. S.; “**Cost Limit Replacement Policy Under Imperfect Repair**”. *Reliability Engineering*, 1987, vol. 19, N° 1, pp. 23-28.

YUN, W. Y.; BAI, D. S.; “**Repair cost limit replacement policy under imperfect inspection**”. *Reliability Engineering & System Safety*, 1988, vol. 23, N° 1, pp. 59-64.

ZHENG, X.; FARD, N.; “**A Maintenance Policy for Repairable Systems Based on Opportunistic Failure-Rate Tolerance**”. *IEEE Transactions on Reliability*, 1991, vol. 40, N° 2, pp. 237-244.