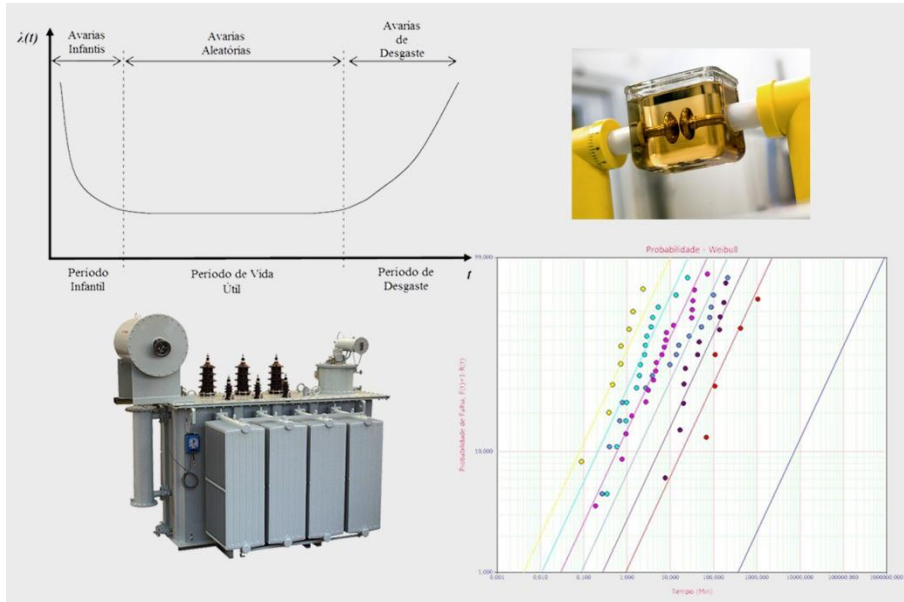




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Mecânica



Determinação de Dados Fiabilísticos Baseados em Testes Acelerados de Vida

FRANCISCO MIGUEL CHELMIK OLIVEIRA
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientador:

Professor Doutor José Augusto da Silva Sobral

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Carlos Quaresma Dias

Vogais:

Prof. Doutor José António Mendonça Dias

Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral

Setembro de 2012

Aos meus Pais.

A todos os familiares.

Aos amigos.

“O projecto é o rascunho do Futuro”

Jules Renard

Resumo

Os testes acelerados de vida são realizados com o objectivo de estimar determinados parâmetros fiabilísticos, referentes a um determinado tipo de bem, despoletando a ocorrência de um dado modo de falha específico, num período de tempo mais reduzido do que aquele em que, em condições de normal operação se verificaria.

Torna-se assim possível, através da utilização dos testes acelerados de vida e dos modelos matemáticos de extrapolação de dados, prever a ocorrência de falhas e dos seus modos, permitindo assim realizar alterações aos projectos em estudo, antes mesmo de estes serem disponibilizados no mercado.

O emprego deste tipo de metodologia possibilita às organizações uma economia de tempo na determinação dos dados de vida dos bens, o que se reflecte numa grande vantagem face aos testes realizados para normais condições de operação.

No presente documento é feita uma abordagem muito objectiva dos conceitos de fiabilidade de modo a poder perceber os conceitos teóricos em que assentam as metodologias relacionadas com os testes acelerados de vida, bem como o estudo e análise das teorias que servem por base aos testes acelerados.

No presente documento são analisados os modelos matemáticos de extrapolação de dados dos testes acelerados de vida, tais como o modelo de Arrhenius, o modelo de Eyring, o modelo da Lei da Potência Inversa e o modelo de Bazovsky. Para uma melhor compreensão dos conceitos é feita uma análise às distribuições mais utilizadas em fiabilidade, caso da distribuição de Weibull, da distribuição Normal e da distribuição Lognormal.

Para implementar os conceitos e metodologias estudadas, obtiveram-se dados referentes a testes acelerados de vida de um óleo isolante de um transformador eléctrico, implementou-se a metodologia relacionada com o modelo da Lei da Potência Inversa através do software ALTA 8 e determinaram-se os parâmetros fiabilísticos correspondentes. De outro modo, foi ainda utilizado um método detalhado de resolução, utilizando o software Weibull++ 8, para posterior comparação de resultados.

Palavras-chave: Fiabilidade, Testes Acelerados de Vida, Óleos Isolantes.

Abstract

The accelerated life tests are developed in order to estimate some of reliability parameters, in a particular type of material, warning us for the occurrence of a specific failure mode, in a small time of period compared with the normal lifetime conditions.

Nowadays, it can be possible because of accelerated life tests and mathematical models of data extrapolate that allows us to predict not only the occurrence of failures but also its modes. Consequently, we can correct the particular changes or anomalies in design phase before sending the item to the market.

Using this type of methodology allow the organizations to save time in determination of the lifetime data materials. It offers a time advantage in comparison with the traditional tests performed for usual operational conditions.

This paper demonstrate a very objective approach of reliability concepts in order to understand, on the one hand, the theoretical concepts of the methodologies related to accelerated life tests, on the other hand, the theoretical analysis which are the foundation of accelerated tests.

Moreover, in this document we analyse the mathematical models to extrapolate data from accelerated life testing, such as The Arrhenius Model, The Eyring Model, The Inverse Power Law Model and The Bazovsky Model. For a better understanding of the concepts, some reliability distributions were studied such as the Weibull Distribution, The Normal Distribution and The Lognormal Distributions.

In conclusion, to implement the concepts and methods studied, it was obtained data from accelerated life testing of an insulating oil of an electrical transformer, was implementing the methodology relates to The Inverse Power Law Model through software ALTA 8 and corresponding reliability parameters results were determined. However, it was also used a detailed method of resolution, using the Weibull++ 8 for consequent data comparison.

Keywords: Reliability, Accelerated Life Testing, Insulating Oils.

Agradecimentos

Dirijo-me com a maior estima, deixando os meus sinceros agradecimentos a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização do presente documento.

Primeiramente gostaria de expressar os meus agradecimentos ao Professor Doutor José Augusto da Silva Sobral, orientador da presente dissertação, pela sua dedicação, disponibilidade e interesse que demonstrou para comigo nas várias fases de concepção da dissertação.

Expresso também os meus agradecimentos à empresa Reliasoft por disponibilizar o software sob a forma de uma licença académica no qual foram implementadas as análises fiabilísticas realizadas.

Deixo ainda um agradecimento à Área Departamental de Engenharia Mecânica do I.S.E.L. por disponibilizar um espaço onde pude conceber e desenvolver a presente dissertação.

Por último gostaria de deixar um agradecimento aos meus pais, família e amigos, que ao longo do percurso académico me acompanharam. Agradeço toda a motivação, força e apoio que me prestaram.

Índice Geral

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas.....	xix
1. Introdução	1
1.1 Aspectos Gerais	1
1.2 Objectivo do Trabalho	2
1.3 Estrutura e organização da Dissertação	2
2. Conceitos de Fiabilidade	5
2.1 Evolução do Conceito de Fiabilidade	5
2.2 Definição de Fiabilidade	9
2.3 Definição de Falha	10
2.3.1 Principais Causas da Falha	10
2.3.1.1 Deficiente Projecto, Produção e Operação.....	10
2.3.1.2 Complexidade do Sistema.....	11
2.3.1.3 Deficiente Manutenção	11
2.3.1.4 Comunicação e Coordenação.....	12
2.3.1.5 Fiabilidade Humana	12
2.3.2 Tipos de Falha	13
2.4 Definição de Avaria	14
2.5 Medição da Fiabilidade.....	14
2.5.1 Função Densidade de Probabilidade de Falha.....	15
2.5.2 Taxa Instantânea de Avarias.....	17
2.5.3 Função Geral de Fiabilidade.....	18

2.5.4	Tempo Médio até à Avaria (MTTF).....	18
2.6	Curva de Mortalidade (Curva da Banheira).....	19
2.7	Distribuições de Probabilidade	22
2.7.1	Distribuição de Weibull.....	22
2.7.1.1	Distribuição de Weibull Tri-paramétrica	23
2.7.1.2	Distribuição de Weibull Bi-paramétrica	24
2.7.1.3	Distribuição de Weibull Mono-paramétrica (Exponencial).....	24
2.7.2	Distribuição Normal	25
2.7.3	Distribuição Lognormal.....	26
3.	Testes Acelerados de Vida	29
3.1	Introdução Teórica.....	29
3.2	Métodos de Aceleração.....	33
3.2.1	Aumento da Taxa de Operação	34
3.2.2	Aumento da Taxa de Degradação.....	35
3.2.3	Aumento da Carga	35
3.2.3.1	Solicitação Constante	36
3.2.3.2	Solicitação por Patamares	37
3.2.3.3	Solicitação Progressiva	38
3.2.3.4	Solicitação Cíclica.....	39
3.2.3.5	Solicitação Aleatória	40
3.3	Tipologia dos testes Acelerados de Vida.....	40
3.3.1	Testes Acelerados de Vida em Componentes.....	41
3.3.2	Testes Acelerados de Vida em Equipamentos/Sistemas	42
3.4	Modelos de Aceleração.....	43
3.4.1	Modelo de Arrhenius	46
3.4.1.1	Abordagem Histórica	46
3.4.1.2	Aplicabilidade	47

3.4.1.3	O modelo	47
3.4.2	Modelo de Eyring	51
3.4.2.1	Abordagem Histórica	51
3.4.2.2	Aplicabilidade	51
3.4.2.3	O modelo	51
3.4.3	Modelo da Lei da Potência Inversa	54
3.4.3.1	Abordagem Histórica	54
3.4.3.2	Aplicabilidade	54
3.4.3.3	O modelo	55
3.4.4	Modelo de Bazovsky	57
3.4.4.1	Abordagem Histórica	57
3.4.4.2	Aplicabilidade	57
3.4.4.3	O modelo	57
4.	Transformadores Eléctricos	61
4.1	Introdução à teoria dos Transformadores	61
4.1.1	Tipos de transformadores	63
4.1.1.1	Classificação do Transformador quanto à Finalidade	63
4.1.1.2	Classificação do Transformador quanto aos Enrolamentos	64
4.1.1.3	Classificação do Transformador quanto ao Tipo de Construção	64
4.1.2	Componentes dos Transformadores arrefecidos por óleo	65
4.1.2.1	Isolador de Alta Tensão (AT) e Baixa Tensão (BT)	66
4.1.2.2	Reservatório de Óleo Isolante	66
4.1.2.3	Óleo Isolante	66
4.1.2.4	Tubos de Arrefecimento ou Radiadores	67
4.1.2.5	Núcleo	67
4.1.2.6	Enrolamentos de Alta e Baixa Tensão	68
4.2	Óleos Isolantes	68

4.2.1	Introdução histórica e sua evolução.....	68
4.2.2	Principais funções e propriedades	70
4.2.3	Tipos de ensaios utilizados na análise dos óleos isolantes	70
4.2.3.1	Resistência Dielétrica (Dielectric Breakdown)	71
4.2.3.2	Número de Neutralização (Neutralization Number)	72
4.2.3.3	Tensão Superficial (Interfacial Tension).....	72
4.2.3.4	Factor de Potência (Power Factor).....	72
4.2.3.5	Análise da coloração (Color Test).....	73
4.2.3.6	Análise da Densidade Relativa (Density Test).....	73
4.2.3.7	Ponto de Inflamação (Flashpoint)	73
4.2.3.8	Medição do teor de água (Water content)	74
5.	Caso de Estudo	75
5.1	Introdução	75
5.2	Ensaio de Resistência Dielétrica.....	76
5.3	Metodologia.....	78
5.4	Desenvolvimento do Trabalho.....	79
5.4.1	Método Detalhado	79
5.4.1.1	Ajuste à Distribuição Estatística	80
5.4.1.1.1	Teste de Aderência para 28 [kV].....	80
5.4.1.1.2	Teste de Aderência para 30 [kV].....	81
5.4.1.1.3	Teste de Aderência para 32 [kV].....	81
5.4.1.1.4	Teste de Aderência para 34 [kV].....	82
5.4.1.1.5	Teste de Aderência para 36 [kV].....	82
5.4.1.1.6	Teste de Aderência para 38 [kV].....	83
5.4.1.1.7	Escolha da distribuição a utilizar	83
5.4.1.2	Determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull bi-paramétrica para cada ensaio	84
5.4.1.2.1	Parâmetros β e η para 28 [kV]	85
5.4.1.2.2	Parâmetros β e η para 30 [kV]	85

5.4.1.2.3	Parâmetros β e η para 32 [kV]	85
5.4.1.2.4	Parâmetros β e η para 34 [kV]	86
5.4.1.2.5	Parâmetros β e η para 36 [kV]	86
5.4.1.2.6	Parâmetros β e η para 38 [kV]	86
5.4.1.2.7	Síntese de resultados dos parâmetros da distribuição	86
5.4.1.3	Determinação do valor médio do parâmetro de forma β	88
5.4.1.4	Determinação dos novos valores do parâmetro η para cada ensaio..	89
5.4.1.5	Determinação dos parâmetros n e K do modelo da Lei da Potência Inversa	91
5.4.1.6	Determinação dos valores correspondentes à vida característica η para as várias tensões de teste acelerado e para condições de normal operação	93
5.4.1.7	Determinação dos tempos correspondentes às diferentes percentagens de probabilidade de falha para condições aceleradas e de normal operação.....	95
5.4.1.8	Determinação dos factores de aceleração.....	96
5.4.2	Análise realizada no software ALTA 8	97
5.4.2.1	Inserção dos dados dos testes acelerados relativos às diferentes Tensões	98
5.4.2.2	Escolha do modelo de extrapolação	98
5.4.2.3	Determinação dos diversos parâmetros do modelo da Lei da Potência Inversa	99
5.4.2.4	Determinação dos tempos correspondentes às diferentes percentagens de probabilidade de falha para condições aceleradas e de normal operação.....	100
5.4.2.5	Determinação dos factores de aceleração no software ALTA 8	102
5.4.3	Comparação de resultados entre as duas metodologias de análise	103
6.	Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros	107
6.1	Conclusões Gerais.....	107
6.2	Síntese dos objectivos atingidos	109
6.3	Principais Dificuldades ou Problemas	110
6.4	Trabalhos Futuros	111

7. Bibliografia	113
ANEXO I – Determinação da Vida Característica Ajustada ao Valor de β_{med}	117
ANEXO II – Determinação dos Parâmetros n e K do Modelo da Lei da Potência Inversa	123

Índice de Figuras

Figura 2.1. Falha catastrófica. Fonte: (Assis, 1997).....	13
Figura 2.2. Falha por degradação. Fonte: (Assis, 1997).....	14
Figura 2.3. Representação das funções $F(t)$ e $R(t)$. Adaptado de: (Assis, 1997).....	15
Figura 2.4. Representação de $F(t)$, $R(t)$ e $f(t)$. Adaptado de: (Assis, 1997).....	16
Figura 2.5. Complementaridade das funções $R(t)$ e $F(t)$. Adaptado de: (Assis, 1997) ..	17
Figura 2.6. Representação da função $\lambda(t)$. Fonte: (Assis, 1997)	18
Figura 2.7. Curva de mortalidade (Curva da Banheira). Adaptado de: (Felix, 2006)	20
Figura 2.8. Curvas de mortalidade características de cada tipo de componente. Fonte: (Assis, 1997).....	22
Figura 2.9. Curvas de mortalidade características de Software e Hardware. Fonte: (Assis, 1997).....	22
Figura 2.10. Função densidade de probabilidade de falha para diferentes valores de β . Fonte: (Sobral, 2010).....	24
Figura 2.11. Função densidade de probabilidade de falha para a distribuição Normal. Fonte: (Sobral, 2010).....	26
Figura 2.12. Função densidade de probabilidade de falha para a distribuição Lognormal. Fonte: (Sobral, 2010).....	27
Figura 3.1. Solicitação Constante	37
Figura 3.2. Solicitação por patamares de magnitude.....	38
Figura 3.3. Representação das diversas taxas de crescimento da magnitude de solicitação para comportamento progressivo.....	39
Figura 3.4. Solicitação Cíclica.....	39
Figura 3.5. Solicitação Aleatória.	40
Figura 3.6. Energia de activação e o processo de avaria. Adaptado de: (Kececioglu e Sun, 2003).....	50

Figura 4.1. Inventores do transformador eléctrico. Fonte: (Halacsy e Von Fuchs, 1961)	61
Figura 4.2. Primeiro transformador. Fonte: (Sándor, 2004).....	62
Figura 4.3. Esquema de componentes de um Transformador Eléctrico. Adaptado de: (http://www.physics.sjsu.edu/becker/physics51/ac_circuits.htm).....	65
Figura 4.4. Radiador do óleo isolante. Fonte: (http://www.ctr.in/Radiators_Prod.html) 67	
Figura 4.5. Medidor de Resistência Dieléctrica. Fonte: (http://www.baur.at/en/products/isolieroelpruefung/dta-100-c.html)	71
Figura 5.1. Teste de Aderência para 28 [kV].	80
Figura 5.2. Teste de Aderência para 30 [kV].	81
Figura 5.3. Teste de Aderência para 32 [kV].	81
Figura 5.4. Teste de Aderência para 34 [kV].	82
Figura 5.5. Teste de Aderência para 36 [kV].	82
Figura 5.6. Teste de Aderência para 38 [kV].	83
Figura 5.7. Parâmetros β e η para 28 [kV].	85
Figura 5.8. Parâmetros β e η para 30 [kV].	85
Figura 5.9. Parâmetros β e η para 32 [kV].	85
Figura 5.10. Parâmetros β e η para 34 [kV].	86
Figura 5.11. Parâmetros β e η para 36 [kV].	86
Figura 5.12. Parâmetros β e η para 38 [kV].	86
Figura 5.13. Gráfico de probabilidade de Weibull dos dados dos ensaios acelerados... 87	
Figura 5.14. Gráfico de probabilidade de Weibull dos dados dos ensaios acelerados para o valor de β_{med} e η actuais.....	91
Figura 5.15. Gráfico de probabilidade de Weibull da implementação do modelo da Lei da Potência Inversa.	94
Figura 5.16. Inserção dos dados dos testes acelerados no software ALTA 8.....	98
Figura 5.17. Escolha do modelo de extrapolação na análise realizada no software ALTA 8.	99

Figura 5.18. Parâmetros característicos do modelo da Lei da Potência Inversa obtidos no software ALTA 8.....	99
Figura 5.19. Gráfico de probabilidade de falha de Weibull obtido no software ALTA 8.	100
Figura 5.20. Tempo correspondente a 95% de probabilidade de falha para normais condições de operação.	101
Figura 5.21. Factor de aceleração correspondente ao teste acelerado realizado a 28 [kV].	102

Índice de Tabelas

Tabela 3.1. Tabela de classes de complexidade dos sistemas electrónicos. Adaptado de: (MIL- HDBK-781A, 1996)	33
Tabela 3.2. Tabela descritiva dos principais modelos matemáticos de extrapolação. Adaptado de: (Elsayed, 1996).....	44
Tabela 5.1. Tempos até à Falha do Ensaio Acelerado de Resistência Dielétrica. Adaptado de: (Nelson, 1972).....	77
Tabela 5.2. Síntese de resultados dos parâmetros da distribuição Weibull tri-paramétrica relativos a cada ensaio.	84
Tabela 5.3. Síntese de resultados dos parâmetros da distribuição de Weibull relativos a cada ensaio.....	87
Tabela 5.4. Valores de N_i de cada ensaio.	88
Tabela 5.5. Valores de η ajustados ao valor de β_{med}	90
Tabela 5.6. Valores de η_i e V_i para determinação dos parâmetros n e K	92
Tabela 5.7. Valores da vida característica η para condições aceleradas e de normal operação.....	93
Tabela 5.8. Tempos correspondentes para cada valor de probabilidade de falha analisado.	96
Tabela 5.9. Factores de Aceleração dos diversos testes acelerados.	97
Tabela 5.10. Tempos correspondentes para cada valor de probabilidade de falha analisados.....	101
Tabela 5.11. Factores de Aceleração dos diversos testes acelerados determinados no software ALTA 8.....	103
Tabela 5.12. Síntese de resultados obtidos dos parâmetros característicos do modelo da Lei da Potência Inversa.....	103
Tabela 5.13. Síntese de resultados obtidos dos factores de aceleração do modelo da Lei da Potência Inversa.	104

Tabela 5.14. Síntese de resultados obtidos dos tempos correspondentes às diferentes probabilidades de falha analisadas.....	105
Tabela 5.15. Comparação de resultados para os valores determinados da vida característica do óleo isolante.....	106

Lista de Abreviaturas

ADEM	- Área Departamental de Engenharia Mecânica
AGREE	- Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment
ASTM	- American Society for Testing and Materials
EN	- European Norm
ESS	- Environmental Stress Screening
IEEE	- Institute of Electrical and Electronic Engineers
ISEL	- Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
MIL-HDBK	- Military Handbook
MIL-STD	- Military Standard
MTBF	- Mean Time Between Failures
MTTF	- Mean Time To Failure
NP	- Norma Portuguesa
QCP	- Quick Calculation Pad
RADC	- Rome Air Development Center
SAE	- Society of Automotive Engineers
TM	- Technical Manual
E.U.A	- Estados Unidos da América

Lista de Símbolos

$I_{m\acute{a}x}$	- Intensidade de perturbação máxima
t	- Tempo
N_0	- Número de componentes do ensaio
$F(t)$	- Função de Probabilidade de Falha Acumulada
$R(t)$	- Função de Probabilidade de Sobrevivência (Fiabilidade)
N_S	- Número de componentes sobreviventes do ensaio
N_F	- Número de componentes que falharam no ensaio
$f(t)$	- Função Densidade de Probabilidade de Falha
t_1	- Período de tempo t_1
t_{final}	- Período de tempo t_{final}
λ	- Taxa Instantânea de Avarias
$MTTF$	- Tempo Médio até à Avaria (“ <i>Mean Time To Failure</i> ”)
$MTBF$	- Tempo Médio entre Avarias (“ <i>Mean Time Between Failures</i> ”)
t_i	- Período de tempo t_i
t_n	- Período de tempo t_n
β	- Factor de forma da distribuição de Weibull
η	- Factor de escala da distribuição de Weibull
γ	- Factor de posição da distribuição de Weibull
σ	- Desvio padrão dos tempos até à avaria
σ'	- Desvio padrão do logaritmo natural dos tempos até à avaria
μ	- Valor médio dos tempos até à avaria
μ'	- Valor médio do logaritmo natural dos tempos até à avaria
V_{Reac}	- Velocidade de Reacção ou Taxa de Processo
A	- Factor Não térmico (Constante)
B	- Quociente entre Energia de Activação e Constante de Boltzman
E_A	- Energia de Activação
$K_{Boltzman}$	- Constante de Boltzman
L_T	- Vida do Componente
C	- Constante

L_{TU}	- Vida do componente em condições de normal operação
L_{TA}	- Vida do componente em condições de ensaio acelerado
T_U	- Temperatura de normal operação
T_A	- Temperatura de ensaio acelerado
A_F	- Factor de Aceleração
D	- Constante
λ_U	- Taxa de avarias para as condições de normal operação
λ_A	- Taxa de avarias para as condições de teste acelerado
A_{Eyring}	- Parâmetro determinado através dos dados acelerados para modelo de Eyring
B_{Eyring}	- Parâmetro determinado através dos dados acelerados para modelo de Eyring
T^*	- Temperatura Absoluta de teste acelerado de vida
T	- Temperatura desejada
$MTTF_A$	- Tempo médio até à avaria à temperatura de teste acelerado
$MTTF_U$	- Tempo médio até à avaria à temperatura de normal operação
V	- Variável de aceleração do teste acelerado de vida
K	- Constante característica do teste acelerado de vida para o modelo da Lei da Potência Inversa
n	- Constante característica do teste acelerado de vida para o modelo da Lei da Potência Inversa
V_U	- Variável de solicitação para condições de normal operação
V_A	- Variável de solicitação para condições aceleradas de teste
η_A	- Vida característica do bem para condições de normal operação
η_U	- Vida característica do bem para condições aceleradas de teste
$n_{Arrhenius}$	- Parâmetro característico do teste acelerado de vida para o modelo de Arrhenius
$K_{Arrhenius}$	- Parâmetro característico do teste acelerado de vida para o modelo de Arrhenius
β_{med}	- Valor médio do factor de forma β
β_i	- Valor do factor de forma β de cada ensaio
N_i	- Tamanho da amostra de cada ensaio acelerado
T_{ij}	- Tempo decorrido até à falha, correspondente a cada rank do ensaio

- MR_{ij} - Rank médio para cada ensaio, determinado pela aproximação de Bernard
- i - Posição do respectivo rank ($i = 1; 2; \dots; N_i$)
- \hat{n} - Estimador da constante característica n do modelo da Lei da Potência Inversa
- \hat{K} - Estimador da constante característica K do modelo da Lei da Potência Inversa

Capítulo 1

Introdução

1.1 Aspectos Gerais

A análise da fiabilidade dos bens passou a ser objecto de estudo após a Segunda Guerra Mundial, motivada pela incessante vontade de melhoria e desenvolvimento de novos meios bélicos. Para isso, as grandes empresas ligadas ao comércio e desenvolvimento de tecnologias bélicas, juntamente com universidades e laboratórios, realizaram um enorme esforço para conceber e implementar modelos analíticos de previsão e medição dos parâmetros fiabilísticos.

A partir daí, as técnicas utilizadas têm vindo a ser melhoradas, o que levou a que a maioria dos sectores industriais as tenham implementado nos seus processos de desenvolvimento de produtos e serviços. Nesse conjunto inserem-se logicamente as indústrias que utilizam tecnologias de topo, tais como a indústria aeronáutica e a indústria electrónica.

A determinação dos parâmetros fiabilísticos dos bens tem vindo a revelar-se uma área em franca expansão, conotando-se com um cariz essencial no desenvolvimento e concepção de novos projectos, bem como na determinação e melhoria de projectos já existentes.

Para essa determinação são então utilizadas diversas metodologias, como por exemplo os testes acelerados de vida. Os testes acelerados de vida devem posteriormente servir de base à implementação dos modelos matemáticos conhecidos, caso dos modelos estudados no presente documento (Arrhenius, Eyring, Lei da Potência Inversa e Bazovsky), permitindo a determinação dos parâmetros fiabilísticos.

Ao implementar os testes acelerados de vida num dado bem, para além da determinação dos dados fiabilísticos, pode ainda ser realizada uma análise aos seus modos de falha característicos.

O grande objectivo da implementação dos testes acelerados de vida prende-se com o facto de obtermos muito mais celeremente o tempo de ocorrência de falhas do bem, utilizando para isso níveis de solicitação mais elevados, ou seja, utilização de condições de serviço mais severas do que as encontradas em normal operação. Essas condições aceleradas não podem de modo algum modificar os modos de falha associados ao bem em estudo, sob pena de inviabilizar toda a análise do mesmo.

Deste modo, embora à primeira vista a ideia de reduzir o tempo necessário ao desenvolvimento de novos projectos seja um factor deveras aliciante, a utilização dos testes acelerados de vida devem envolver um complexo estudo de definição dos modos de falha dos bens e a maneira pelas quais os mesmos podem ter a sua frequência de ocorrência acelerada, função da alteração das condições de operação.

1.2 Objectivo do Trabalho

O objectivo principal do presente documento é aprofundar o estudo das metodologias e conceitos associados ao tema dos testes acelerados de vida, mostrando de uma forma clara as vantagens associadas a este tipo de testes, assim como os vários modelos existentes. No presente documento complementa-se a teoria com um caso de estudo onde se aplicam dois métodos de análise distintos, um método detalhado (com uma maior componente manual) e outro método que recorre à utilização de um programa informático específico para tratamento de dados resultantes de testes acelerados de vida. Finaliza-se o documento com uma comparação crítica entre os dois métodos utilizados.

1.3 Estrutura e organização da Dissertação

A presente dissertação é composta por seis capítulos, sendo que o primeiro e o sexto capítulo se destinam à introdução e às conclusões e trabalhos futuros, respectivamente.

O primeiro capítulo destina-se à introdução ao tema que serve de motivação à concepção da presente dissertação e à enumeração dos objectivos que se pretendem alcançar.

No segundo capítulo é feita uma abordagem aos conceitos gerais de fiabilidade, permitindo consolidar definições, evolução dos conceitos ao longo do tempo e metodologias da sua medição.

No terceiro capítulo descrevem-se todos os conceitos e metodologias aplicadas ao tema dos testes acelerados de vida. Neste capítulo é abordada toda a evolução verificada nesta área, bem como realizada uma exposição dos principais modelos matemáticos utilizados na extrapolação de dados dos testes.

No quarto capítulo é abordada a teoria dos transformadores eléctricos, motivada pelo caso de estudo que irá ser alvo de análise no presente documento.

No quinto capítulo é abordado o caso de estudo que irá ser motivo da análise fiabilística. Neste capítulo são utilizados dados de testes acelerados de vida realizados num óleo isolante de um transformador eléctrico para proceder à respectiva análise, sendo posteriormente comparados dois métodos de análise dos dados a utilizar.

No sexto capítulo, por último, são apresentadas algumas conclusões consideradas pertinentes ao entendimento da análise realizada, descrição de alguns resultados obtidos e dificuldades sentidas na realização do presente documento. Serão ainda mencionados alguns trabalhos a realizar no futuro, bem como alguns reparos ao modo como foram abordados alguns dos pontos.

Capítulo 2

Conceitos de Fiabilidade

2.1 Evolução do Conceito de Fiabilidade

O termo fiabilidade, ou “*Reliability*”, remonta ao ano de 1816, onde o escritor Samuel T. Coleridge o empregou num dos seus poemas. Nessa época, o termo fiabilidade era utilizado na caracterização de pessoas ou artefactos, conferindo-lhes assim um perfil idóneo, credível. A partir daí, o conceito de fiabilidade sofreu uma notável transformação, sendo-lhe associado atributos qualitativos e quantitativos passíveis de caracterizar o mundo tecnologicamente avançado onde vivemos (Saleh & Marais, 2006).

Nas últimas décadas notou-se um aumento muito significativo da utilização do termo fiabilidade, quer sendo empregue em artigos técnicos e científicos, quer simplesmente utilizados em pesquisas feitas nos principais motores de busca da internet. Dando como exemplo, desde 1973, a utilização do termo “*Reliability*” pode verificar-se em cerca de dez mil artigos científicos, bem como em cerca de três mil livros (Saleh & Marais, 2006).

O conceito de Fiabilidade foi amplamente desenvolvido durante o período relativo à 2ª Guerra Mundial, compreendido entre 1939 e 1945. Com a desenfreada procura e desenvolvimento de mais complexas tecnologias de armamento, as grandes indústrias bélicas existentes, apoiadas pelas superpotências mundiais, sentiram necessidade de utilizarem novas ferramentas, nomeadamente, processos técnicos e analíticos. Esses processos tinham como principal objectivo a determinação do período de vida útil e probabilidade de sucesso de um determinado componente militar em utilização.

Os componentes electrónicos utilizados nos equipamentos militares desenvolvidos no decorrer da década de 40 e consequentemente utilizados na 2ª Guerra Mundial, utilizavam a tecnologia de válvulas. Essa tecnologia apresentava um número considerado elevado de avarias, pelo que se desencadearam inúmeros estudos visando a obtenção de melhores fiabilidades desses componentes, sendo por isso considerada a motivação existente nessa década para os desenvolvimentos realizados na área (Denson, 1998).

Como refere Ebel (1998), na década de 50, houve por parte do sector militar dos Estados Unidos da América (E.U.A) uma grande preocupação no desenvolvimento de documentação técnica, normas e directrizes relacionadas com a fiabilidade e correspondente disponibilidade dos componentes electrónicos utilizados. Com vista a esse desenvolvimento foi fomentada a criação de comissões de desenvolvimento, grupos de trabalho, entre outros organismos. Um dos vários grupos criados para o efeito foi o “Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment” (AGREE), fundado em 1950, e que rapidamente concluiu que as ideias fundamentais para que se conseguissem componentes com melhores fiabilidades eram:

- A necessidade de desenvolvimento de componentes com melhores características.
- O estabelecimento de requisitos quantitativos quanto à fiabilidade dos componentes produzidos.
- Recolha de dados no terreno, dos actuais modos de falha dos componentes para a determinação da razão pela qual a falha ocorreu.

Citando Denson (1998), o autor indica que ainda nesta década foram tecidas mais algumas considerações, por parte de algumas conferências e grupos de trabalho, tendo em vista o aumento da fiabilidade dos componentes:

- A necessidade da fiabilidade ser verificada segundo a implementação de testes antes da produção em grandes séries do componente analisado.
- A necessidade de criação de um comité de avaliação e orientação de todos os assuntos relacionados com a fiabilidade.

Ainda no decorrer da década de 50, foram realizados diversos estudos, sendo que em alguns deles se destacava que as avarias em sistemas complexos, ou seja, sistemas constituídos por diferentes tipos de componentes, eram na sua maioria causadas pelos componentes electrónicos que os constituíam. Por esta razão, a indústria electrónica da época foi a que mais investiu no estabelecimento dos padrões de fiabilidade pretendidos. Segundo Lusser (1957 apud Ebel, 1998), no artigo intitulado “*Unreliability of Electronics – Cause and Cure*”, o estudo realizado a um sistema de míssil militar determinou que 60% das avarias verificadas se deviam aos inadequados padrões de fiabilidade dos componentes electrónicos, revelando que os conceitos de qualidade e fiabilidade dos componentes electrónicos utilizados eram geralmente inadequados ao serviço a que se destinavam.

Na década de 60, foi desenvolvido um novo campo da fiabilidade, a física da fiabilidade ou “*Reliability physics*”. Esta nova vertente de estudo da fiabilidade de componentes, pretende analisar o processo que desencadeia a avaria através da análise física e química do processo desencadeador, sendo desenvolvida pelo Rome Air Development Center (RADC), na base da força aérea americana “Griffiss”, situada em Nova Iorque, E.U.A. Este mesmo organismo lançou posteriormente um programa intitulado “Física da Avaria” ou “*Physics of Failure*” (Ebel, 1998).

O estudo e desenvolvimento dos aspectos relacionados com a fiabilidade dos componentes, verificados no decorrer das décadas de 50 e 60, culminaram, segundo Denson (1998), no desenvolvimento e implementação das normas das séries ER e TX, bem como da norma MH-217, sendo esta última publicada sob alçada da Marinha dos Estados Unidos da América.

De acordo com Denson (1998), nos anos 70, a norma MH-217 tornou-se de tal maneira um guia para a determinação da fiabilidade em componentes electrónicos que começou a despertar grandes interesses noutros sectores da indústria, passando o Rome Air Development Center (RADC) a ser responsável pelas sucessivas revisões e alterações da norma.

Na década de 80, alguns dos sectores da indústria, tais como a automóvel, através da Society of Automotive Engineers (SAE), desenvolveram modelos específicos de determinação das fiabilidades dos componentes electrónicos que utilizavam. Outro dos

casos foi o desenvolvimento por parte da indústria das telecomunicações da norma Bellcore para a determinação da fiabilidade de sistemas aplicados nas telecomunicações, sendo hoje em dia utilizada em muitas outras áreas da indústria. Esta última sendo uma modificação realizada na norma MH-217, de modo a reproduzir as condições a que os componentes electrónicos dos equipamentos de telecomunicações estão sujeitos. Durante a presente década, praticamente todos os desenvolvimentos nesta área foram realizados tendo em conta a norma MH-217, procedendo-se às alterações necessárias (Denson, 1998).

Na década de 90, o departamento da defesa dos Estados Unidos da América decidiu criar dois projectos com o intuito de desenvolver um pouco mais todo o tema da determinação da fiabilidade de componentes dos dispositivos que utilizavam nos seus equipamentos. Os dois projectos criados foram: o programa “*Electronic Equipment Physics-of-Failure*” e o programa “*Computer-Aided Design of Microelectronic Packages*”. Todo esse empenho deveu-se à forte crença na melhoria contínua dos processos, ou seja, garantir que cada vez mais os componentes fabricados apresentassem melhores qualidades e menores taxas de avaria, utilizando para isso novas metodologias (Ebel, 1998).

Actualmente existe uma crescente exigência do mercado consumidor por produtos que apresentem o melhor desempenho possível e ao menor preço. Devido a este facto, bem como à necessidade de reorganização e redução de custos, as empresas tentam ao máximo aumentar a fiabilidade dos produtos que desenvolvem, tendo como principal objectivo a total satisfação do cliente. Esse aumento de fiabilidade pode ser traduzido devido ao avanço dos processos tecnológicos de fabrico, utilização de melhores matérias-primas ou simplesmente pela utilização de mão-de-obra mais qualificada.

Quando um determinado componente apresenta uma avaria, existe um acréscimo de custos, quer para o cliente quer para a organização que o concebeu. Em casos extremos, esse custo pode ser traduzido por quebras de segurança ou perda de vidas humanas.

Pode então enunciar-se que a fiabilidade de um órgão refere-se ao conceito de “operação bem-sucedida” ou a “ausência de avarias”, ou ainda à ideia de “disponibilidade”.

Em Engenharia é necessário que a fiabilidade seja traduzida num valor de probabilidade. Deste modo, pode afirmar-se que a fiabilidade é a probabilidade de um produto, sistema ou equipamento operar sem falhas, dentro dos parâmetros e especificações para as quais foi desenvolvido, projectado e construído, por um certo período de tempo determinado (Assis, 1997).

Neste caso sugere-se que seja necessário o estabelecimento de um critério de avaria, ou seja, um critério que possibilite determinar a partir de que momento é que o equipamento que está sob análise se considera estar com um desempenho abaixo do exigido, ou aceitável. Podem ser tidos como exemplos, o insuficiente nível de fluido lubrificante numa chumaceira, impossibilitando-a de operar em condições de utilização ditas normais, ou a excessiva quantidade de impurezas num dado fluido lubrificante.

2.2 Definição de Fiabilidade

Existem várias definições que caracterizam o conceito de fiabilidade, dadas pelas diversas organizações, pelos diversos autores e institutos reguladores.

Segundo a norma MIL-STD-721C a fiabilidade é a probabilidade que um determinado item tem para realizar a sua função durante um intervalo de tempo especificado e sob determinadas condições.

De acordo Naresky (1970), o comité IEEE considera que a definição de fiabilidade pode ser dada de duas formas diferentes. A primeira refere que a fiabilidade é a habilidade de um item executar a sua função sob determinadas condições especificadas, durante um determinado período de tempo, já a segunda refere que a fiabilidade é a característica de um item, expressa por uma probabilidade, que este apresenta ao desempenhar uma determinada função sob determinadas condições e durante um período de tempo pré-determinado. Segundo o autor, esta última é a definição mais utilizada em aplicações de engenharia.

No entanto, para evitar possíveis indefinições e más interpretações das definições dos conceitos, a norma portuguesa NP EN 13306 (2007) define a fiabilidade como a *“Aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo.”*, ressaltando que o termo fiabilidade também

poderá ser utilizado como uma medida de desempenho da fiabilidade, sendo caracterizada como uma probabilidade.

2.3 Definição de Falha

Segundo Assis (1997), em fiabilidade, considera-se que a “falha da função requerida”, ou simplesmente a “falha”, caracteriza um estado em que o equipamento ou componente cessa o seu normal funcionamento, ou simplesmente caracteriza a degradação de um determinado parâmetro de funcionamento até um nível que se considere insatisfatório para o componente em questão.

De acordo com a norma NP EN 13306 (2007), a falha é considerado um estado do bem, sendo a sua definição dada por: *“Estado de um bem inapto para cumprir uma função requerida, excluindo a inaptidão devida à manutenção preventiva ou outras acções programadas, ou devida à falta de recursos externos”*.

De notar que, segundo a norma NP EN 13306 (2007), o conceito de falha está associado ao termo *“fault”*.

2.3.1 Principais Causas da Falha

De acordo com Aggarwal (1993), as causas relativas às falhas verificadas em componentes e equipamentos de um determinado sistema podem ter diversas origens. Essas causas podem estar perfeitamente detalhadas, ou por outro lado, não serem totalmente conhecidas, dependendo do tipo e complexidade do sistema, bem como do tipo de ambiente de operação. De seguida descrevem-se algumas das principais causas de falha dos bens.

2.3.1.1 Deficiente Projecto, Produção e Operação

As falhas originadas por uma deficiente fase de projecto e produção afectam a fiabilidade do sistema logo no período inicial de operação. São devidas maioritariamente à não actualização e modernização de processos de fabrico e à não implementação de testes, visando estudar o comportamento de determinado sistema nas

condições de operação para as quais foi concebido. Podem ainda ser causadas por uma deficiente escolha dos materiais utilizados na concepção do componente.

Quando as causas da falha derivam de uma comprovada má utilização, deverá ser feita uma recolha de todos os dados relativos à mesma. Deve-se por isso garantir que o componente ou equipamento opera nas condições para as quais foi projectado, tornando-se assim necessário que os agentes responsáveis tenham total conhecimento das características específicas de cada componente, de modo a serem bem definidos os limites de aplicação e utilização do mesmo, permitindo assim uma redução significativa da possibilidade de ser verificada uma falha desta natureza (Aggarwal, 1993).

2.3.1.2 Complexidade do Sistema

Normalmente os sistemas mais complexos possuem fiabilidades mais baixas devido ao elevado número de componentes que possuem. Nas diversas aplicações os sistemas devem ser tão complexos quanto o necessário para cumprir com os requisitos impostos, não devendo ser de extrema complexidade se assim não se justificar.

Em muitas situações os sistemas são demasiadamente sofisticados, ou complexos, que excedem em muito o que seria necessário para cumprir com determinada função. Cumprindo assim a regra de que o sistema indicado para uma determinada função seja aquele que possibilite a sua realização dentro dos parâmetros definidos como óptimos, não devendo exceder essas características, sob pena de se desperdiçarem assim recursos e aumentarem os custos de eventuais intervenções de manutenção (Aggarwal, 1993).

2.3.1.3 Deficiente Manutenção

Uma das causas mais comuns nas falhas verificadas é a deficiente manutenção realizada nos equipamentos, pelo que a implementação de programas de manutenção preventiva são benéficos à redução da possibilidade de falha dos equipamentos. Caso os planos de manutenção dos equipamentos sejam cumpridos a possibilidade de falha dos mesmos reduz-se significativamente (Aggarwal, 1993).

2.3.1.4 Comunicação e Coordenação

As falhas podem ser derivadas de má comunicação e coordenação dos vários departamentos da organização. A fiabilidade de um determinado componente é conseguida conjugando todos os departamentos, quer de projecto, produção e qualidade, pelo que é necessário proporcionar meios capazes de trocar informações entre todos os intervenientes de modo a reduzir o número de falhas, bem como permitindo a análise das causas que lhe deram origem e sua caracterização (Aggarwal, 1993).

2.3.1.5 Fiabilidade Humana

Apesar do crescente uso da automação nos processos utilizados nas principais indústrias e outras organizações, é deveras impossível eliminar o factor de interacção humano que existe entre os colaboradores e os diversos componentes ou equipamentos constituintes dos processos. Constata-se que a contribuição dos erros humanos nos fenómenos de falha de um determinado componente, equipamento ou sistema pode ser verificada nos diversos períodos da vida deste, devendo-se sobretudo à falta de compreensão do funcionamento dos equipamentos e processos, à falta de rigor nas acções, baixa capacidade de tomada de decisão, ausência de procedimentos operacionais e inadequada formação por parte dos colaboradores.

Numa perspectiva de melhoria da fiabilidade, os erros humanos não podendo ser totalmente eliminados, podem ser significativamente reduzidos, aplicando para isso, algumas medidas, tais como: selecção adequada e respectiva qualificação da mão-de-obra, simplificação e estandardização dos processos, simplificação e objectividade dos manuais de operação, entre outras.

Nas diversas fases de operação dos componentes, equipamentos ou sistemas, deverão ser cumpridas algumas regras, no âmbito das boas práticas de operação, de modo a diminuir o risco de ocorrência de erro humano, como por exemplo: se a posição do operador é adequada e confortável; se as acções de operação não exigem demasiado esforço físico por parte do operador; se o ambiente é convenientemente insonorizado, iluminado e mantém a temperatura indicada; diminuir ao máximo as escolhas na tomada de decisão do operador; garantir que o operador não efectua movimentos desnecessários e considerados excessivos.

Consideradas as medidas anteriormente apresentadas, será portanto necessário salientar que os erros humanos podem não significar a ocorrência efectiva da falha, no entanto, deverá existir uma medição e controle da fiabilidade da mão-de-obra, visando a minimização desses mesmos erros (Aggarwal, 1993).

2.3.2 Tipos de Falha

Segundo Assis (1997), a falha de um componente, equipamento ou sistema pode acontecer súbita e brutalmente, ou por outro lado, acontecer lenta e progressivamente, sendo respectivamente denominadas de falha “catastrófica” e de falha “por degradação”.

A falha catastrófica é caracterizada pela variação súbita e imprevisível de uma ou mais propriedades do componente. Essa variação é de tal forma repentina e grosseira que impede uma antecipação da falha, como evidenciado na Figura 2.1 (Assis, 1997).

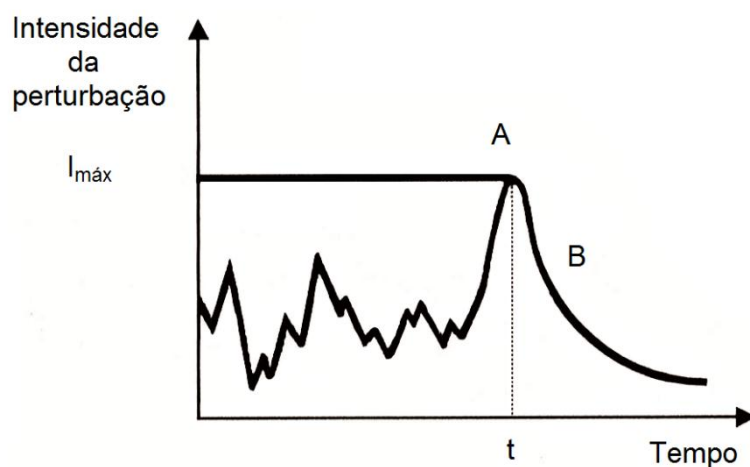


Figura 2.1. Falha catastrófica. Fonte: (Assis, 1997)

Na figura anterior, o ponto A indica o momento em que ocorreu a falha, representando a curva B a diminuição de resistência.

Por outro lado, a falha por degradação é caracterizada pela variação progressiva de uma ou mais propriedades do componente, sendo possível evitá-la através da prática de manutenção preventiva. Na Figura 2.2 pode ser verificado o fenómeno anteriormente enunciado (Assis, 1997; Aggarwal, 1993).

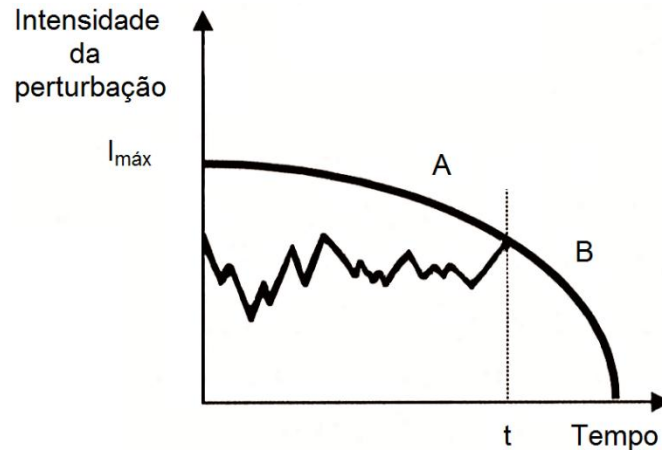


Figura 2.2. Falha por degradação. Fonte: (Assis, 1997)

2.4 Definição de Avaria

Segundo a norma NP EN 13306 (2007), a definição de avaria pode ser dada como: “Cessação da aptidão de um bem para cumprir uma função requerida”. De notar que a presente norma faz uma clara distinção entre avaria e falha. A avaria é caracterizada por ser um acontecimento, já por outro lado, a falha ou “em falha” é um estado do bem. Depois de a avaria acontecer o bem poderá entrar em falha, total ou parcial, ou simplesmente estar avariado.

2.5 Medição da Fiabilidade

De acordo com Assis (1997), considerando um ensaio de um grande número de componentes N_0 , todos iguais, nas mesmas condições de operação, durante um intervalo de tempo t , os componentes apresentam ao longo do ensaio um valor de probabilidade de falha $F(t)$ e de sobrevivência $R(t)$, tendo sempre em conta que $F(t)$ tende a aumentar e $R(t)$ a diminuir.

Considerando que num dado momento t , existem N_S componentes que sobreviveram e N_F componentes que falharam, as respectivas expressões referentes à probabilidade de falha $F(t)$ e de sobrevivência $R(t)$ podem ser dadas por:

$$F(t) = \frac{N_F(t)}{N_0} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$R(t) = \frac{N_S(t)}{N_0} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

De notar que as equações anteriormente apresentadas são aplicáveis quando todos os componentes seguem a mesma distribuição de probabilidade.

Sabe-se que as duas funções de probabilidade anteriormente apresentadas são complementares, pelo que se verifica a seguinte expressão:

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (\text{Eq. 2.3})$$

De seguida é apresentada uma figura onde são representadas as curvas referentes às funções $F(t)$ e $R(t)$, verificando-se assim a sua complementaridade:

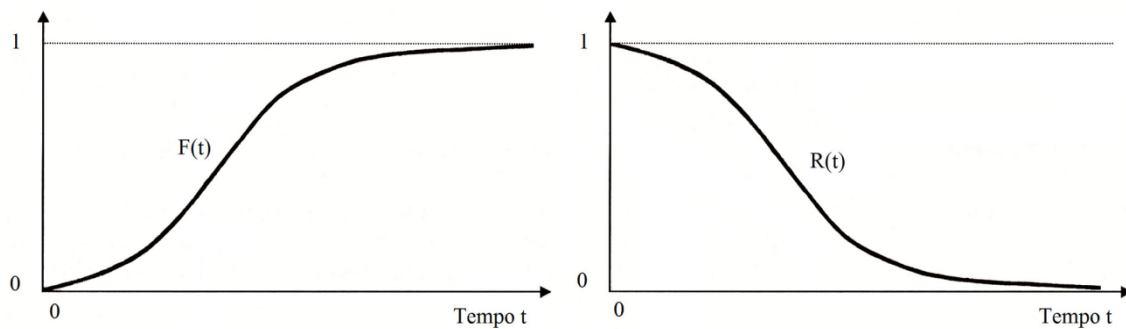


Figura 2.3. Representação das funções $F(t)$ e $R(t)$. Adaptado de: (Assis, 1997)

De acordo com a figura apresentada anteriormente, verifica-se que a função $F(t)$ tende para o valor 1 quando t tende para infinito, assim como a função $R(t)$ tende para o valor 0 quando t tende para infinito. Se por outro lado fosse realizada a soma dos valores de cada instante das duas funções, a soma daria o valor 1, comprovando assim a relação apresentada na equação 2.3.

2.5.1 Função Densidade de Probabilidade de Falha

Segundo Assis (1997), a função densidade de probabilidade de falha $f(t)$ é determinada derivando a função de probabilidade de falha $F(t)$ em ordem ao tempo t , obtendo-se a seguinte expressão:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{1}{N_0} \times \frac{dN_F(t)}{dt} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

A função $f(t)$ representa uma função de probabilidade instantânea que usualmente é denominada de “função densidade de probabilidade”, no entanto quando aplicada na

área da fiabilidade a função $f(t)$ toma a designação de “função densidade de probabilidade de falha”, ou ainda de “função de mortalidade”.

Esta função representa a percentagem de componentes que estão a falhar por unidade de tempo, tendo em consideração a amostra N_0 , no momento t .

Caso seja considerado apenas um componente, ao invés de N_0 componentes, $f(t)$ representará a probabilidade de o componente falhar no instante t pretendido.

Ao integrar a equação 2.4 entre o instante $t = 0$, ou seja, o momento em que os componentes começaram a funcionar, e um instante t genérico, obtém-se a função de probabilidade de falha até esse momento. Apresenta-se assim a expressão referida anteriormente:

$$F(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt \quad (\text{Eq. 2.5})$$

De seguida apresenta-se um gráfico onde se representam as curvas referentes a função de probabilidade de falha $F(t)$, a função densidade de probabilidade de falha $f(t)$, bem como as áreas referentes a $F(t)$ e a $R(t)$ para um dado tempo genérico t_1 e t_{final} :

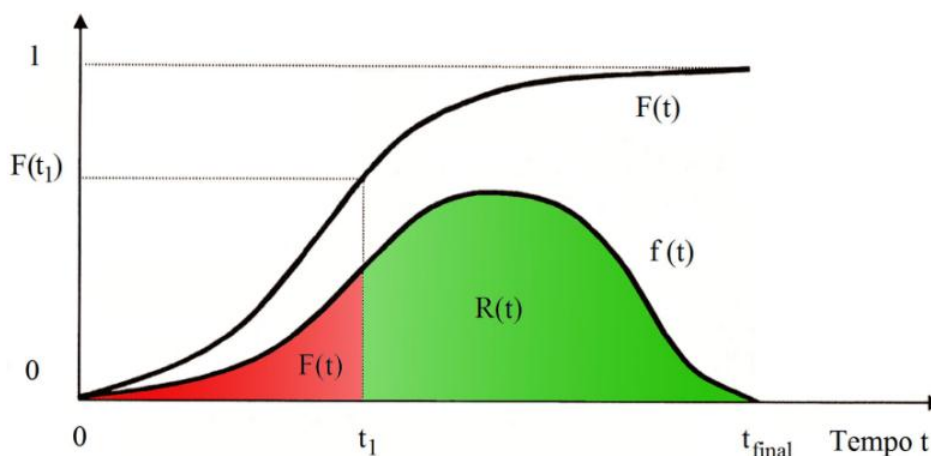


Figura 2.4. Representação de $F(t)$, $R(t)$ e $f(t)$. Adaptado de: (Assis, 1997)

Analisando a figura anterior constata-se que no momento t_{final} todos os componentes, ou seja, a amostra N_0 , terão falhado, pelo que, logicamente, a função $f(t_{final})$ toma o valor 0, a função $F(t_{final})$ toma o valor 1 e a função $R(t_{final})$ o valor 0.

Utilizando as equações 2.3 e 2.5 obtém-se a expressão referente a $R(t)$, como evidenciada de seguida:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t). dt \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Observando a equação 2.6 é de notar que $R(t)$ caracteriza a probabilidade do componente operar sem falhas até ao momento pretendido t , assim como $F(t)$ caracteriza a probabilidade do componente falhar até ao momento pretendido t . Utilizando ainda a expressão 2.6 como mote de discussão, apresenta-se uma figura representativa da complementaridade entre as funções $R(t)$ e $F(t)$:

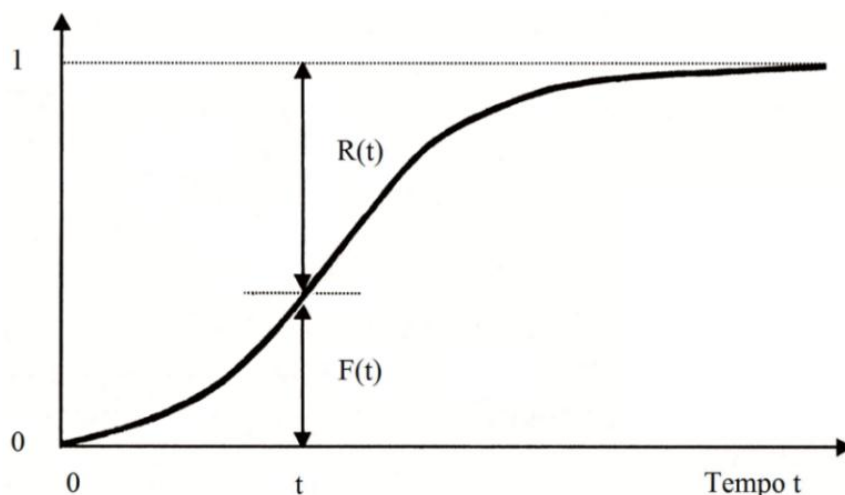


Figura 2.5. Complementaridade das funções $R(t)$ e $F(t)$. Adaptado de: (Assis, 1997)

2.5.2 Taxa Instantânea de Avarias

A função taxa instantânea de avarias $\lambda(t)$, muitas vezes referenciada como função de risco (“Hazard Rate”) ou $h(t)$, representa uma função de densidade de probabilidade que traduz a taxa pela qual se verifica a avaria por unidade de tempo dos componentes em operação, no momento t , em relação ao número de componentes que sobreviveram N_S até esse mesmo momento.

A expressão da taxa instantânea pode ser determinada através da manipulação matemática das equações 2.4 e 2.5. Combinando entre si as duas equações mencionadas anteriormente e posteriormente dividindo ambos os membros por $N_S(t)$, resulta que:

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_S(t)} \times \frac{dN_F(t)}{dt} = -\frac{N_0}{N_S(t)} \times \frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Utilizando a expressão 2.7 e rearranjando-a, obtém-se a seguinte equação:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \times \frac{dR(t)}{dt} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

De seguida apresenta-se uma representação da função $\lambda(t)$:

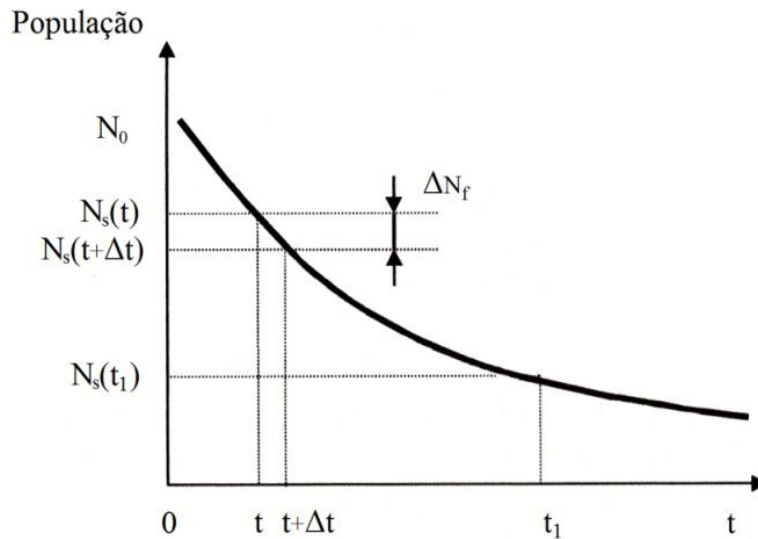


Figura 2.6. Representação da função $\lambda(t)$. Fonte: (Assis, 1997)

2.5.3 Função Geral de Fiabilidade

De acordo com Assis (1997), ao resolver a expressão 2.8 em ordem a $R(t)$ e integrar o seu resultado entre o valor 0 e t , obtém-se a expressão denominada “Função geral de fiabilidade”, apresentada de seguida:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t).dt} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

De notar que a expressão relativa à “Função geral de fiabilidade” é independente da forma específica da função de falha, admitindo-se por isso essa mesma designação.

2.5.4 Tempo Médio até à Avaria (MTTF)

Segundo Assis (1997), o tempo médio até à avaria é vulgarmente conhecido pelo acrónimo anglo-saxónico MTTF, que quer dizer “*Mean Time To Failure*”. Este parâmetro é então caracterizado pelo tempo médio correspondente entre o início da operação de um determinado componente e o momento em que ocorre a avaria.

Nas palavras de Aggarwal (1993), a expressão genérica que determina o MTTF pode ser caracterizada por:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t).dt \quad (\text{Eq. 2.10})$$

De notar que a equação anterior pode ser denominada de duas formas, são elas MTTF e MTBF (“*Mean Time Between Failures*”), ou tempo médio entre avarias. Designa-se como MTTF no caso em que os componentes da amostra N_0 (amostra inicial) não são reparáveis, sendo posteriormente substituídos por componentes novos à medida que vão apresentando avarias, servindo como exemplo o caso de lâmpadas e rolamentos. Aplica-se o termo MTBF no caso em que os componentes da amostra N_0 (amostra inicial), à medida que vão apresentando avarias, são desmontados, reparados e são novamente colocados em operação, sendo apelidados de “Rotáveis”, caso dos redutores, motores eléctricos, entre outros (Assis, 1997).

2.6 Curva de Mortalidade (Curva da Banheira)

Anteriormente foi descrito que durante a vida útil de um determinado equipamento, ou componente, este apresenta geralmente três tipos de avarias, caracterizando-as pelo período de tempo onde são verificadas. No período inicial da vida do componente, ou período infantil, as avarias são denominadas de “avarias infantis”, no período imediatamente seguinte, ou seja, no período denominado de vida útil do componente, as avarias são descritas como “avarias aleatórias” e no último período de vida do componente, ou período de desgaste e envelhecimento, as avarias são descritas como “avarias de desgaste”.

De acordo com Assis (1997), ao traçar a curva característica da taxa de avarias $\lambda(t)$ a bens reparáveis (sistemas) obtém-se uma representação que é geralmente conhecida como “Curva de Mortalidade” ou ainda por “Curva da Banheira”, sendo internacionalmente designada por “*Bathtub Curve*”. Na figura Figura 2.7 evidencia-se a curva característica da taxa de avarias $\lambda(t)$:

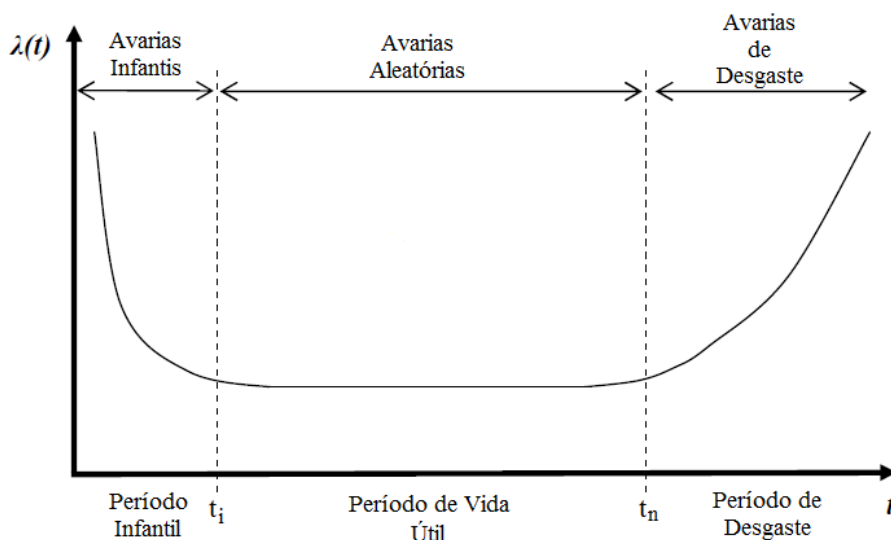


Figura 2.7. Curva de mortalidade (Curva da Banheira). Adaptado de: (Felix, 2006)

Ao analisar a figura anterior verifica-se a distinção entre os três períodos relativos à vida do componente, sendo eles o período “Infantil”, o período de “Vida Útil” e o período de “Desgaste”.

O primeiro período relativo à vida de um componente é caracterizado por uma elevada taxa de avarias $\lambda(t)$, devido ao elevado número de defeitos, mas que decresce rapidamente até atingir o momento t_i . A partir do momento t_i a taxa de avarias $\lambda(t)$ apresenta um valor que se considera quase constante. Este período é então denominado de período “Infantil”, ou ainda de período de “Mortalidade Infantil”.

O elevado número de defeitos verificados no período infantil pode ser originado por inúmeras causas, sendo algumas delas: deficiente concepção do projecto, defeitos originados no processo de fabrico, deficiente controlo de qualidade dos produtos, montagem incorrecta, rodagem deficiente, entre outros. De modo a minimizar potenciais perdas originadas pelas avarias ocorridas no período infantil, deverão ser tidos em conta os necessários cuidados no desenvolvimento do projecto e no rigor do fabrico do mesmo, bem como a utilização de ensaios que simulem as condições de serviço (rodagem) dos componentes antes destes entrarem em condições de serviço efectivo (Assis, 1997).

A partir do momento t_i a taxa de avarias $\lambda(t)$ mantém um valor considerado constante, devendo-se ao facto de todos os componentes originalmente deficientes já terem avariado. Este período é então denominado de período de “Vida Útil”, ou ainda de

período de “Maturidade”, verificando-se pela Figura 2.7 que representa uma parte muito significativa da vida do componente.

No período de vida útil do componente as avarias verificadas são na sua grande maioria devidas às sucessivas solicitações de operação que excedem as condições para as quais os componentes foram inicialmente projectados. Essas avarias verificam-se de um modo aleatório e podem originar graves acidentes.

Quando a duração da vida do componente atinge o momento t_n , que usualmente é denominada por “vida nominal”, diz-se que se entrou no período de “Desgaste” ou de “Envelhecimento”. Nesta fase verifica-se que a taxa de avarias $\lambda(t)$ cresce notavelmente, tendo como causa os consequentes fenómenos de degradação e fragilização provocados pelo desgaste e/ou fadiga dos materiais. Este período pode ser precavido fazendo uma substituição do componente antes que se atinja o momento t_n , ou por outro lado procedendo à beneficiação do estado do componente tendo como objectivo prolongar a vida útil do mesmo, aumentando assim o tempo para o qual se atingirá o momento t_n .

Segundo Assis (1997), nos componentes electrónicos, as causas que maioritariamente contribuem para o aparecimento de avarias são: a temperatura excessiva e suas variações repentinas, a sobretensão, a humidade, as vibrações e eventuais choques mecânicos. Os componentes electrónicos apresentam uma curva de mortalidade um pouco diferente face aos componentes mecânicos. Os componentes electrónicos apresentam ao longo da sua vida útil uma taxa de avarias $\lambda(t)$ tendencialmente constante, ao invés disso, os componentes mecânicos apresentam uma curva de mortalidade que se verifica ser gradualmente crescente, provocado pelos fenómenos de desgaste e envelhecimento. De seguida apresenta-se uma figura representativa das curvas de mortalidade características de cada tipo de componente:

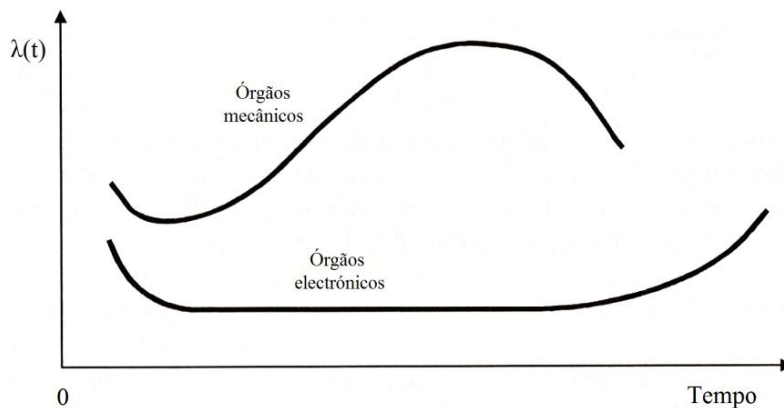


Figura 2.8. Curvas de mortalidade características de cada tipo de componente. Fonte: (Assis, 1997)

Analisando agora os casos de software e hardware, os mesmos apresentam genericamente as seguintes curvas de mortalidade:

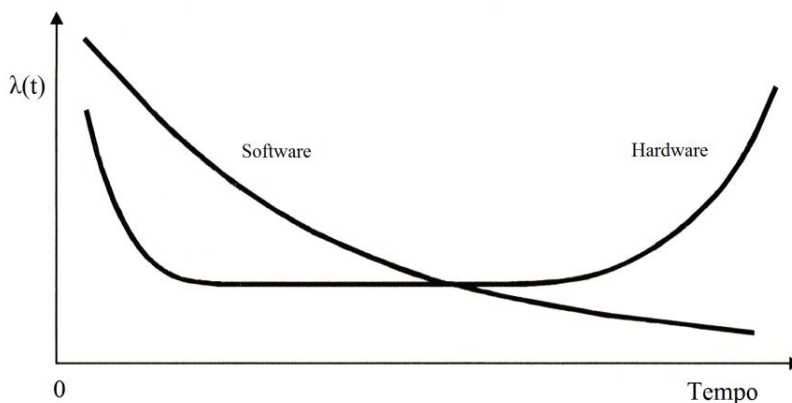


Figura 2.9. Curvas de mortalidade características de Software e Hardware. Fonte: (Assis, 1997)

2.7 Distribuições de Probabilidade

As características de falha dos equipamentos em operação são diferentes, mesmo tratando-se de equipamentos idênticos. De modo a descrever convenientemente as características das falhas dos diversos tipos de bens, são utilizadas algumas distribuições estatísticas que permitem um ajuste aos tipos de dados de falha a tratar. Nos tópicos seguintes são abordadas as distribuições estatísticas mais utilizadas em fiabilidade.

2.7.1 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é uma das mais utilizadas devido à sua mutabilidade, ajustando-se à maioria dos casos práticos referentes a bens, com razoável precisão.

Permite caracterizar as falhas ou avarias durante os três períodos característicos da vida de um bem típico, ou seja, período infantil, período de vida útil e período de desgaste ou envelhecimento. Verifica-se que a taxa de avarias é decrescente no primeiro, constante no segundo e crescente no último. Esta distribuição pode apresentar-se em três formas: tri-paramétrica, bi-paramétrica e mono-paramétrica.

A influência de cada um dos seus parâmetros na fiabilidade do bem pode ser estudada mais em pormenor, quando tal se justifique. Os outros tipos de distribuições apresentados posteriormente como a distribuição Exponencial, a distribuição Normal e a distribuição Lognormal acabam por ser casos particulares da distribuição de Weibull, verificando-se a sua origem na adopção de valores para os diversos parâmetros da distribuição de Weibull.

2.7.1.1 Distribuição de Weibull Tri-paramétrica

A função de densidade de probabilidade de falha da distribuição de Weibull na sua forma tri-paramétrica é expressa por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

onde:

- t = Variável referente à grandeza que mede a extensão da utilização do bem (tempo, número de ciclos, distância percorrida, operações, etc...)
- γ = Parâmetro ou factor de posição ou vida inicial (pode ser positivo, negativo ou nulo);
- β = Parâmetro ou factor de forma, que define a variação da fiabilidade ao longo da vida do bem;
- η = Parâmetro ou factor de escala ou vida característica, referida a $R=e^{-1}$ ou $R=0,367879$ ($\eta=1/\lambda_0$)

A figura 2.10 mostra a função densidade de probabilidade de falha para a forma tri-paramétrica da distribuição de Weibull para diversos valores do factor de forma (β).

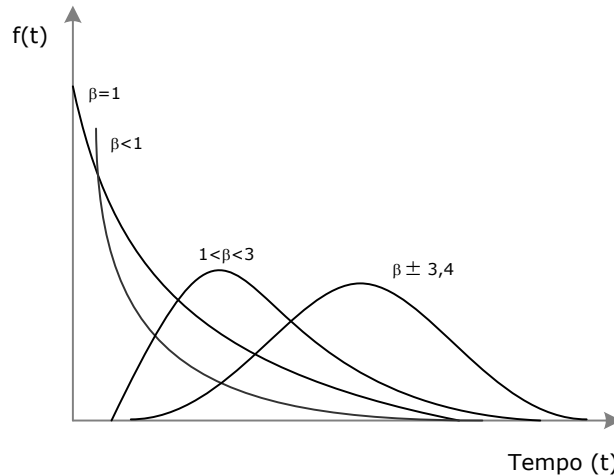


Figura 2.10. Função densidade de probabilidade de falha para diferentes valores de β . Fonte: (Sobral, 2010)

Esta distribuição pode ser ajustada à expressão geral de fiabilidade, resultando daí a correspondente expressão para a sua determinação, como apresentada de seguida.

$$R(t) = e^{-\left[\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

2.7.1.2 Distribuição de Weibull Bi-paramétrica

A forma bi-paramétrica da distribuição de Weibull resulta do ponto anterior, quando o parâmetro de posição (γ) é nulo. Este caso aplica-se a bens novos ou seja, bens que não tenham tido início de operação.

Deste modo, a função de densidade de probabilidade de falha é caracterizada pela seguinte expressão:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

Analogamente, a equação de fiabilidade para esta mesma distribuição é dada por:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{Eq. 2.14})$$

2.7.1.3 Distribuição de Weibull Mono-paramétrica (Exponencial)

A distribuição de Weibull torna-se mono-paramétrica se, para além de ter um parâmetro de posição nulo, também o seu parâmetro de forma (β) assumir o valor unitário (1), o que exprime possuir uma taxa de avarias constante ($\lambda_0=\lambda$), e daí podermos afirmar que

se trata de uma distribuição semelhante à convencional distribuição exponencial. A função densidade de probabilidade de falha é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\eta} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)} = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Apresentando a função de fiabilidade a seguinte expressão:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

2.7.2 Distribuição Normal

Um bem cujos dados referentes aos tempos de ocorrência de avarias se ajustem a uma distribuição Normal significa que existe um valor médio (μ) para o tempo de avaria, em relação ao qual, a distribuição é simétrica. Indica também que existem poucas avarias no início e no fim dos tempos de vida do bem.

O segundo parâmetro da distribuição Normal é o desvio padrão (σ). Quanto menor for o seu valor, maiores são os períodos inicial e final de vida do bem com poucas avarias. Na distribuição Normal, o valor médio ou média coincide com a mediana e com a moda.

Esta distribuição é característica de bens que apresentam um valor médio para a avaria bem definido, distribuindo-se as avarias de forma simétrica em torno desse valor, como é o caso das escovas de motores eléctricos, baterias de automóveis, pneus, lâmpadas, entre outros. A distribuição Normal ajusta-se à maior parte dos casos de bens cujo principal modo de falha está relacionado com a degradação e consequente envelhecimento característico do mesmo com a idade.

Ao utilizar a distribuição normal em análises de fiabilidade deve haver algum cuidado em truncar a distribuição em $t = 0$ para que não se considerem valores negativos para os respectivos tempos.

Uma variável aleatória – seja o tempo de avaria “t” - é normalmente distribuída quando a sua função densidade de probabilidade de falha obedece à seguinte expressão:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(t-\mu)}{\sigma} \right]^2} \quad (\text{Eq. 2.17})$$

onde:

μ = Valor médio dos tempos até à avaria;

σ = Desvio padrão dos tempos até à avaria;

A função densidade de probabilidade de falha característica da distribuição Normal pode ser representada graficamente, conforme a figura 2.11, onde se pode verificar a influência da média (μ) - figura 2.11(a) e a influência do desvio-padrão (σ) – Figura 2.11(b).

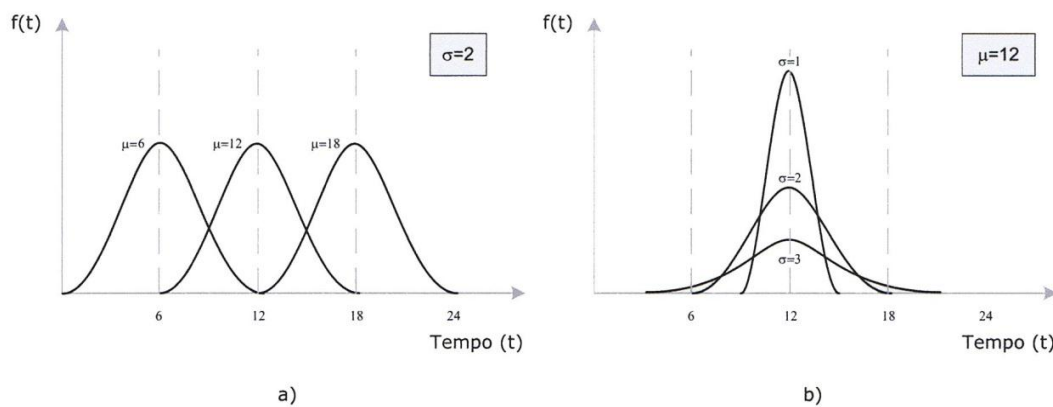


Figura 2.11. Função densidade de probabilidade de falha para a distribuição Normal. Fonte: (Sobral, 2010)

A determinação da fiabilidade na distribuição Normal é realizada através da expressão seguinte:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(t-\mu)}{\sigma} \right]^2} \cdot dt \quad (\text{Eq. 2.18})$$

De salientar que a expressão anterior não possui uma solução directa, podendo ser determinada através de tabelas obtidas por cálculo numérico ou com o recurso a programas informáticos específicos.

2.7.3 Distribuição Lognormal

Uma variável aleatória (t) é Lognormalmente distribuída se o seu logaritmo natural ou neperiano ($t'=\ln t$) é normalmente distribuído. A distribuição Lognormal trata-se de uma distribuição assimétrica, tendendo para uma simetria para baixos valores de desvio padrão. As principais aplicações práticas que podem ser ajustadas com esta distribuição são as avarias de rolamentos, motores eléctricos, geradores eléctricos, isoladores

eléctricos, entre outras. De um modo geral, esta distribuição ajusta-se a casos onde os bens apresentem como modo de falha principal a fadiga.

A função densidade de probabilidade de falha para a distribuição Lognormal é dada por:

$$f(t') = \frac{1}{\sigma' \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(t' - \mu')}{\sigma'} \right]^2} \quad (\text{Eq. 2.19})$$

onde:

μ' = Valor médio do logaritmo natural dos tempos até à avaria;

σ' = Desvio padrão do logaritmo natural dos tempos até à avaria;

A função densidade de probabilidade de falha referente à distribuição Lognormal pode ser representada graficamente, conforme 2.12, verificando-se a influência da média (μ') - figura 2.12(a) e a influência do desvio-padrão (σ') - figura 2.12(b).

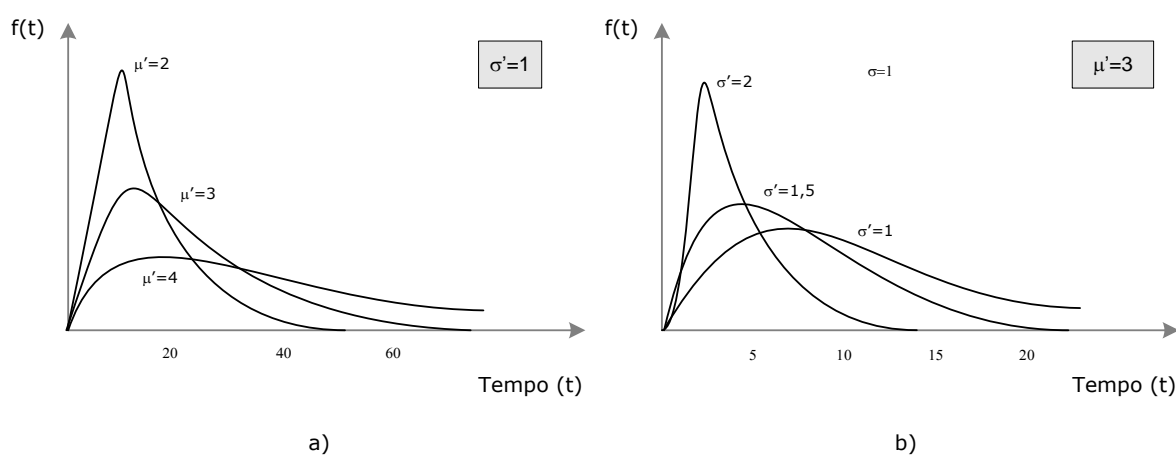


Figura 2.12. Função densidade de probabilidade de falha para a distribuição Lognormal. Fonte: (Sobral, 2010)

A fiabilidade pode ser expressa por:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma' \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(t - \mu')}{\sigma'} \right]^2} \cdot dt \quad (\text{Eq. 2.20})$$

À semelhança da distribuição normal, esta expressão também não possui uma solução directa, pelo que poderá ser calculada através de tabelas obtidas por cálculo numérico ou utilizando programas informáticos específicos.

Capítulo 3

Testes Acelerados de Vida

3.1 Introdução Teórica

Segundo Kececioglu (2002), um teste acelerado de vida consiste na realização de um ensaio de elevada solitação, com o objectivo de diminuir o tempo de vida do componente ou de acelerar a degradação do seu desempenho. À expressão “elevada solitação” está associada a utilização de condições mais severas do que as encontradas em normal operação, sendo que à solitação imposta está associada uma variável de aceleração.

Para Nelson (2005), o objectivo de utilizar tais níveis de solitação é o de permitir estimar os parâmetros relativos à vida do componente ou à sua degradação em condições ditas de normal operação. Para isso são utilizados modelos matemáticos que permitem a introdução dos dados referentes aos ensaios realizados, possibilitando assim a extrapolação dos resultados obtidos através do modelo matemático utilizado, para as condições de normal operação, o que irá permitir estimar a duração da vida do componente ou a sua taxa de degradação.

De acordo com Kececioglu (2002), os testes acelerados de vida permitem obter uma significativa redução do tempo e custos necessários à obtenção dos dados pretendidos, face à utilização de testes não acelerados, ou seja, testes onde os níveis de solitação são idênticos aos verificados em normal operação.

Se as solitações impostas fossem idênticas às verificadas em normal operação, os componentes poderiam durar indefinidamente ou não se degradarem num tempo de ensaio razoável (ex. muitos anos), o que inviabilizaria os resultados a obter através dos ensaios, impossibilitando todo o processo de estimativa dos parâmetros desejados.

Este tipo de teste utiliza níveis de solicitação muito superiores aos encontrados em condições de normal operação, o que provoca uma antecipação de um mecanismo de falha característico do componente testado. Na realização do teste, são alteradas uma ou várias variáveis de solicitação do componente, tais como: a temperatura, a tensão eléctrica, a carga de solicitação, a pressão, a humidade, número de ciclos de arranque/paragem, entre outras.

Os testes acelerados de vida são geralmente realizados em componentes, equipamentos ou sistemas onde o tempo reservado para os testes é relativamente curto e a previsão de vida útil é relativamente elevada, pelo que a metodologia de aceleração da degradação dos mesmos se ajusta perfeitamente.

Segundo Nelson (2005), o primeiro plano de testes acelerados de vida (“*accelerated life test plans*”) foi desenvolvido na década de 60, mais concretamente em 1962 por Chernoff. O plano desenvolvido utilizava somente distribuições exponenciais, apenas duas variáveis de aceleração e dados censurados.

De acordo com Reliawiki (2012), empregam-se os termos “dados censurados” quando por exemplo, a vida de um componente está a ser estudada e uma das unidades da amostra não se comporta de maneira similar às restantes, não se obtendo assim todos os tempos até a avaria do componente. Referencia-se então que o acontecimento esperado não se verificou.

Ao longo de toda a década de 70, Wayne B. Nelson e os seus colaboradores desenvolveram planos de testes acelerados de vida para distribuições Lognormal e Weibull, aperfeiçoando assim a sua aplicabilidade ao método. Desde então, diversos autores têm estudado os vários modelos e a sua aplicabilidade aos diversos cenários.

Actualmente todos os produtos desenvolvidos são projectados para operar durante vários anos sem que apresentem avarias que comprometam o seu desempenho. Assim sendo, é de extrema dificuldade, estimar a distribuição dos tempos até à avaria ou o desempenho de componentes de elevada fiabilidade, utilizando as condições de normal operação na realização dos testes acelerados, sendo um dos factores condicionantes o tempo de duração do teste ou o número reduzido de avarias, o que aumenta significativamente o nível de incerteza na estimativa da fiabilidade do componente.

Desta forma, os testes acelerados de vida revelam-se, cada vez mais uma ferramenta importante, quer na análise e determinação das características dos produtos já existentes, quer no desenvolvimento de novos produtos e projectos. São ainda bastante úteis em contextos de certificação de novos produtos/equipamentos, avaliação de desempenho de projectos em execução, análise e detecção de modos de falha dos componentes testados, validação dos dados fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos testados.

A implementação deste tipo de técnica na análise e desenvolvimento de novos produtos, permite detectar, diagnosticar e caracterizar novos modos de falha, bem como perspectivar eventuais melhorias nos projectos antes mesmo de serem postos em circulação nos mercados, permitindo assim, cada vez mais, que os produtos detenham superiores níveis de fiabilidade.

De acordo com a norma MIL-HDBK-338B (1998), as principais razões que levam à realização de um teste acelerado de vida são:

- Determinação da vida;
- Identificação, correcção ou confirmação de defeitos e anomalias;

Sendo que a mesma norma remete como principal foco de atenção na realização deste tipo de teste, a determinação da vida do componente para normais condições de operação, baseada nos dados recolhidos para as condições aceleradas, deixa-se assim para segundo plano a identificação, documentação e estudo do mecanismo de falha verificado no teste.

Segundo a norma MIL-HDBK-338B (1998), os testes acelerados de vida devem sempre ser implementados com extrema cautela. São testes únicos para cada componente, verificando-se que existem limitações básicas para as técnicas utilizadas nos testes. Os testes realizados deverão ser implementados de modo a não divergirem entre si, sob pena de todos os resultados e conclusões alcançados serem invalidados.

Para que os dados recolhidos durante o teste, bem como todas as conclusões retiradas sejam consideradas inválidas, pode por exemplo suceder que a gama de extrapolação válida seja excedida para um determinado modelo, ou que por exemplo o tipo de ensaio ou modelo seja inadequado ao caso em estudo, sem que esse mesmo modelo seja posto em causa.

Como referido na norma MIL-HDBK-338B (1998), de modo a evitar a situação anterior, deverá ser desenvolvido um teste acelerado preliminar de modo a verificar a validade e aplicabilidade do ensaio acelerado a uma dada aplicação específica, ou por outro lado, calcular a relação a ser aplicada entre as condições de normal operação e as condições aceleradas que se pretendem ensaiar, caso ainda não tenha sido objecto de estudo em literatura já disponível. Este teste acelerado preliminar geralmente é denominado de “*sanity check*”.

Dadas as limitações evidenciadas anteriormente, vários factores de aceleração dos mecanismos de falha podem ser utilizados, quer individualmente quer em conjunto. De seguida apresentam-se os factores de aceleração mais comuns nos testes acelerados de vida em componentes, equipamentos e sistemas:

- Aumento do número de ciclos de solicitação;
- Temperaturas mais elevadas;
- Ciclos de temperatura mais severos;
- Aumento dos níveis de vibração;
- Aumento dos níveis de humidade;

Outro factor bastante importante nos testes acelerados de vida é a complexidade para a qual o teste está parametrizado, ou seja, algumas das técnicas utilizadas são aplicáveis somente a componentes, outras a sistemas, e muito poucas são aplicáveis a componentes e sistemas independentemente do tipo de complexidade associada ao produto a testar. Os resultados obtidos podem portanto ser considerados inválidos caso se tenha utilizado uma técnica ou modelo específico para um dado tipo de produto que não o que se pretende testar.

Deste modo torna-se intuitivo que a dificuldade associada à determinação da fiabilidade e do tempo de vida útil varia consoante a complexidade do sistema que se pretende testar, ou seja, quanto maior o número de componentes de um dado sistema, mais difícil será estimar os dados relativos à fiabilidade e tempo de vida útil.

O conceito de complexidade pode ser expresso de acordo com o número de componentes de um dado sistema. De acordo com a norma MIL-HDBK-781A (1996), os sistemas electrónicos são separados em várias classes de complexidade, dependendo

essa caracterização do número de componentes do sistema, como evidenciado na tabela 3.1, apresentada de seguida:

Tabela 3.1. Tabela de classes de complexidade dos sistemas electrónicos. Adaptado de: (MIL- HDBK-781A, 1996)

Classe de Complexidade	Número de Componentes Electrónicos
Simples	≤ 100
Moderadamente Complexo	101 a 500
Complexo	501 a 2000
Muito Complexo	>2000

Segundo a norma MIL-HDBK-338B (1998), os testes acelerados de vida podem ainda ser uma ferramenta muito útil na identificação de problemas relacionados com a fiabilidade de um determinado tipo de projecto aplicado a um produto, na comparação e análise de projectos de concorrentes, como ferramenta de aceitação de um dado projecto, ou simplesmente como teste de verificação de alterações feitas nos projectos.

De acordo com Meeker e Escobar (1998), um outro factor muito importante na implementação dos testes acelerados de vida são as variáveis de aceleração que são utilizadas no ensaio. As variáveis deverão ser escolhidas de modo a, unicamente despoletarem o modo de falha pretendido. Se a escolha for feita de uma forma incorrecta poderá acontecer que um outro modo de falha seja activado, inviabilizando todos os dados recolhidos. Posteriormente deverá ser realizado análises “*post mortem*”, ou seja, deverá ser realizada uma análise ao componente depois de este avariar de modo a verificar qual o modo de falha que está a ocorrer, garantindo assim que o modo é identificado e comparado com o modo de falha esperado.

De seguida serão abordados os principais métodos de aceleração utilizados nos testes acelerados de vida.

3.2 Métodos de Aceleração

De acordo com Elsayed (1996), os testes acelerados de vida podem ser implementados de dois modos distintos, ambos visando a avaria do componente, equipamento ou sistema. Um dos modos é caracterizado pelo aumento da magnitude das solicitações,

face às verificadas em normal utilização. O outro modo caracteriza-se, não pelo aumento da magnitude das solicitações, mas por um uso intensivo (geralmente uso contínuo), não modificando as condições de operação. Em literatura, os modos apresentados anteriormente denominam-se, respectivamente por: “*Accelerated Stress*” e “*Accelerated failure time*”.

Segundo Nelson (1990) e Souza (2003 apud Felix ,2007), existem vários métodos de aceleração utilizados nos testes acelerados de vida, sendo os principais detalhados nos pontos seguintes.

3.2.1 Aumento da Taxa de Operação

A taxa de operação pode ser caracterizada pelo número de vezes que o bem é utilizado ao longo de um determinado período de tempo.

Utilizando esta metodologia de teste, a aceleração da taxa de operação reflecte-se na redução do tempo necessário para executar um determinado número de ciclos de operação. Ao ser aplicado este tipo de teste, deverá ser totalmente conhecido o mecanismo característico da falha que irá ser acelerado, garantindo também que este só depende da taxa de operação.

Neste tipo de teste as cargas aplicadas são idênticas às verificadas em normal operação, pelo que se verifica que só será acelerado a frequência com que actuam.

De notar que, especialmente em componentes mecânicos, a taxa de operação deverá ser especificada com enorme cautela. Em componentes mecânicos existe uma tendência de aumento da temperatura quando a taxa de operação utilizada é excessivamente elevada, pelo que, neste caso, todos os resultados obtidos no teste são considerados inválidos. Por esta razão a taxa de operação a utilizar não deverá permitir a ocorrência de aumentos na temperatura do componente a testar, evitando assim a influência de outros mecanismos de falha indesejados.

Existem dois tipos de teste acelerado que podem ser executados quando o objectivo é o aumento da taxa de operação, são eles: o “*Faster*” e o “*Reduced off time*”, sendo cada um deles caracterizado se seguida.

- **Faster:** A taxa de operação do bem é acelerada, caso por exemplo dos rolamentos, onde estes são testados a velocidades de cerca de três vezes a velocidade normal de utilização. Este tipo de teste possibilita a utilização em simultâneo de uma outra solicitação, caso por exemplo de uma força de carga.
- **Reduced off time:** O bem é operado a uma taxa de operação superior à que é verificada em normal utilização. No caso de um compressor de um frigorífico doméstico, está previsto que este funcione em média 15 horas por dia, aplicando esta metodologia o compressor passaria a operar durante 24 horas por dia continuamente. Este tipo de teste é mais utilizado em bens que operam um número reduzido de vezes, ou durante um período muito curto.

3.2.2 Aumento da Taxa de Degradação

Utilizando esta técnica de aceleração no teste acelerado de vida pretende-se o aumento da intensidade das solicitações, tais como a temperatura e a humidade, fazendo com que se verifique o aumento de aceleração do processo químico do modo de degradação característico do componente. O processo de degradação pode ser caracterizado como a perda de operacionalidade do componente, equipamento ou sistema abaixo de um nível considerado mínimo.

Este tipo de teste é geralmente implementado em aplicações electrónicas, com vista à análise do isolamento dos diversos componentes.

Uma das maiores dificuldades deste tipo de teste é a fase de extrapolação dos resultados do teste para as condições de normal operação, isto é, determinar a relação existente entre os tempos verificados no teste e a vida esperada do componente ensaiado, para normais condições de operação. De modo a contornar um pouco estas adversidades, é necessário um profundo conhecimento do comportamento dos materiais constituintes dos componentes em teste, bem como total conhecimento dos fenómenos físicos e químicos em análise.

3.2.3 Aumento da Carga

Utilizando esta técnica de aceleração no teste acelerado de vida pretende-se o aumento da magnitude da carga, antecipando assim a ocorrência de um determinado modo de falha do componente, equipamento ou sistema, ou seja, provoca-se a ocorrência do

fenómeno de falha num tempo mais reduzido do que o que se verificaria em condições de normal operação, utilizando para isso um aumento da intensidade da carga. Como exemplos de carregamento podem ser evidenciados: a tensão eléctrica, esforços mecânicos, pressões de operação, temperatura, entre outros.

Neste tipo de teste, podem ser combinadas várias técnicas de aceleração, desde que se garanta que os efeitos característicos de cada uma sejam independentes e que sejam convenientemente controlados.

Na implementação desta metodologia de teste acelerado deverá ser prestada especial atenção à escolha do factor de aceleração, permitindo a redução do tempo da ocorrência de um modo de falha característico, evitando assim o aparecimento de outros modos de falha não desejados. Caso o factor de aceleração não seja o adequado, podem surgir modos de falha que não são característicos das condições de normal operação, pelo que são unicamente verificados quando o componente, equipamento ou sistema está a ser sujeito a carregamentos de magnitude superior. A escolha do factor de aceleração irá depender muito do tipo de componente, equipamento ou sistema testado, bem como do conhecimento e caracterização do modo de falha que se pretende analisar. Para isso torna-se bastante importante que exista uma vasta experiência na implementação deste tipo de teste por parte da pessoa que o supervisiona.

Um dos factores preponderantes na implementação de um teste acelerado de vida que utilize esta metodologia é o tipo de carregamento/solicitação que se pretende aplicar. Estas solicitações podem ser do tipo constante, por patamares, progressivas, cíclicas e aleatórias. De seguida são caracterizadas cada tipo de solicitação (carga) possível de ser aplicada no teste.

3.2.3.1 Solicitação Constante

Segundo Nelson (1990), a utilização de solicitações de magnitude constante é o tipo de teste acelerado mais comum. Neste teste cada bem é operado com um nível de solicitação constante, verificando-se assim uma maior facilidade na implementação da metodologia.

Desta metodologia surgem algumas vantagens, como por exemplo a maior facilidade com que se conseguem manter as solicitações em níveis constantes, face às variáveis, os

materiais são mais facilmente analisados e os cálculos para a determinação das características desejadas são simplificados face a testes com patamares de solicitação. Na figura 3.1 apresenta-se o comportamento característico da solicitação neste tipo de teste.

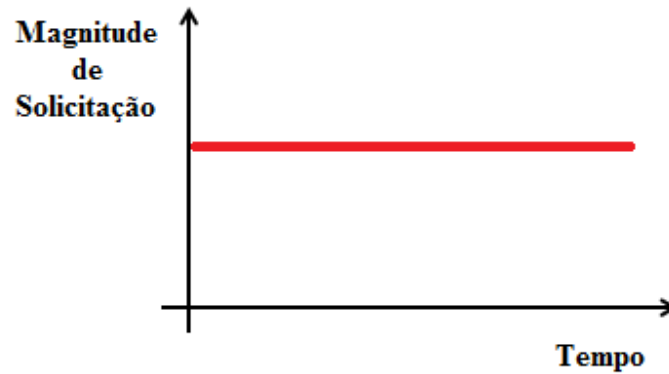


Figura 3.1. Solicitação Constante

3.2.3.2 *Solicitação por Patamares*

De acordo com Nelson (1990), a utilização de solicitações por patamares permite que o bem seja testado com magnitudes de solicitação cada vez mais elevadas.

No início do teste o bem é sujeito a uma solicitação constante durante um determinado período de tempo. Caso o bem não avarie, a magnitude da solicitação é aumentada e aplicada novamente durante um determinado período de tempo. Caso não se verifique a avaria, este procedimento é repetido até que o bem avarie.

Uma das vantagens inerentes ao método é que a avaria surge naturalmente com o aumento da magnitude da solicitação. No entanto, para níveis muito elevados de solicitação, ou seja, para valores muito superiores face aos verificados em normal operação, verifica-se uma maior dificuldade na extrapolação dos resultados. Uma outra desvantagem é o facto de este método não contemplar a utilização de vários tipos de solicitação, face a outros métodos.

Na figura 3.2 apresenta-se o comportamento característico da solicitação neste tipo de teste.

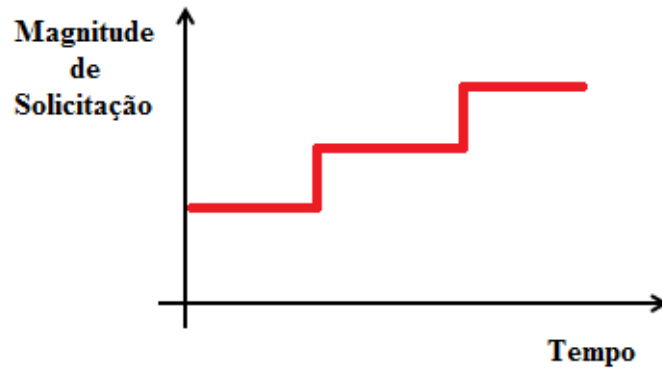


Figura 3.2. Solicitação por patamares de magnitude.

3.2.3.3 *Solicitação Progressiva*

Segundo Nelson (1990), a utilização de níveis de solicitação progressiva permite que o bem seja sujeito instantaneamente a níveis de solicitação crescentes, pelo que com o avançar do tempo de ensaio a magnitude da solicitação vai aumentando.

Neste tipo de teste podem ser caracterizadas três taxas de solicitação: alta, média e baixa. Dependendo do tipo de evolução da magnitude da solicitação. Para uma taxa elevada de crescimento do nível de solicitação, verifica-se uma elevada tendência para que o bem avarie num curto período de tempo. Para as restantes taxas, ou seja, média e baixa taxa de crescimento do nível de solicitação, os bens têm tendência a avariarem num maior período de tempo, como seria de esperar, pelo facto do crescimento da magnitude ser um pouco mais suave.

Como vantagem pode enunciar-se que é uma metodologia que permite um enorme número de bens que apresentam avarias, devido à tendência crescente do nível de solicitação verificado. As desvantagens associadas a esta metodologia são idênticas às referidas para os testes realizados com patamares de solicitação.

Na figura 3.3 apresenta-se o comportamento característico da solicitação neste tipo de teste.

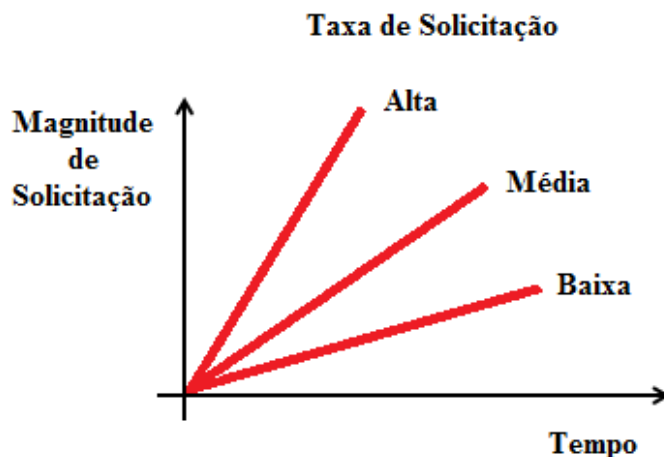


Figura 3.3. Representação das diversas taxas de crescimento da magnitude de solicitação para comportamento progressivo.

3.2.3.4 *Solicitação Cíclica*

De acordo com Nelson (1990), a utilização de uma carga cíclica permite que o bem seja testado numa gama de valores compreendida entre dois máximos.

Neste tipo de teste é necessário definir alguns parâmetros da solicitação, tais como: a frequência, amplitude e o valor de referência para a qual a solicitação irá estar a oscilar.

De notar, especialmente para materiais metálicos, que o valor de referência, ou seja, o valor para o qual a amplitude da solicitação tem valor zero, pode não ser nulo.

Na figura 3.4 apresenta-se o comportamento característico da solicitação neste tipo de teste.

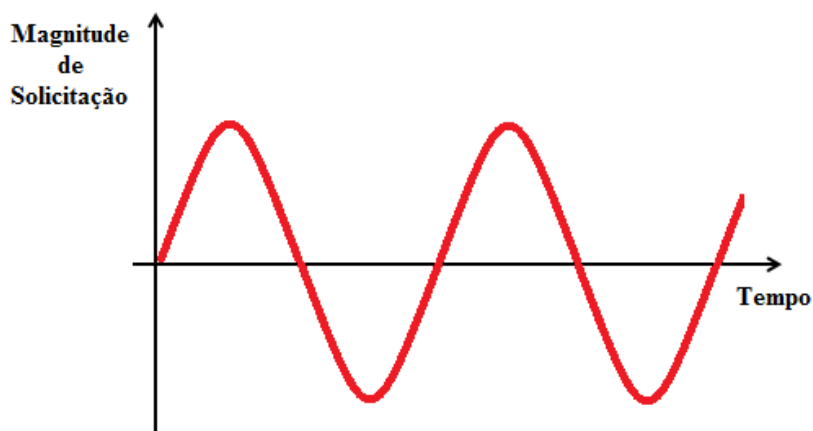


Figura 3.4. Solicitação Cíclica.

3.2.3.5 *Solicitação Aleatória*

Segundo Nelson (1990), a utilização de solicitações aleatórias é frequentemente verificada em testes acelerados realizados em estruturas sujeitas ao meio ambiente, tais como pontes, edifícios ou outros componentes de estruturas móveis. Este tipo de carregamento caracteriza-se por um comportamento aleatório, ou seja, em cada instante a amplitude (magnitude), bem como a frequência vão sofrendo alterações.

Este tipo de teste pode ainda ser realizado aplicando uma solicitação constante que reflecta um valor médio da solicitação aleatória. Neste caso simplifica-se bastante a implementação e posterior análise dos resultados obtidos.

Na figura 3.5 apresenta-se o comportamento característico da solicitação neste tipo de teste.

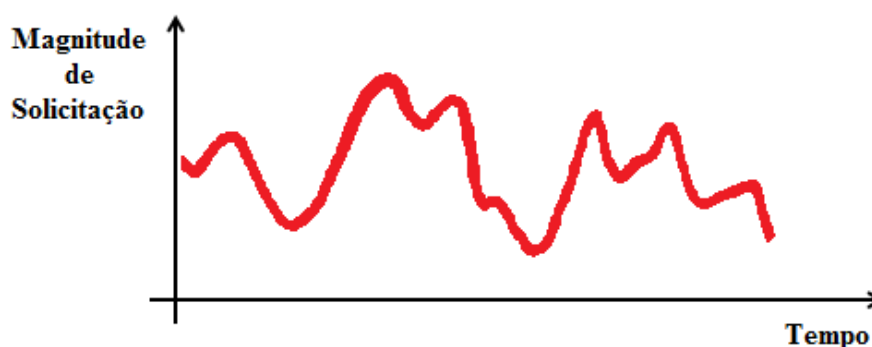


Figura 3.5. Solicitação Aleatória.

3.3 Tipologia dos testes Acelerados de Vida

Na implementação de um teste acelerado de vida é fundamental realizar um estudo prévio do modelo que irá ser utilizado. O modelo utilizado deverá relacionar as condições aceleradas com as condições de normal operação, pelo que será necessário garantir um total conhecimento do mecanismo de falha que se pretende activar, bem como a relação existente entre a variável de aceleração e a respectiva influência verificada no mecanismo de falha.

Para definir as características dos ensaios, ou seja, modelo utilizado, variável de aceleração utilizada e respectivo factor de aceleração, pode-se recorrer à literatura existente. Actualmente existem muitos autores preocupados com o tema, pelo que

sucessivamente vai existindo uma actualização e desenvolvimento de novos modelos e técnicas.

Os testes acelerados de vida podem ser divididos em duas categorias tendo em conta o objecto de estudo. Os testes acelerados de vida podem ser implementados em componentes e em equipamentos ou sistemas. Por outras palavras, podem caracterizar-se testes acelerados de vida realizados em componentes e em conjuntos de componentes, caso dos equipamentos e de sistemas. De seguida procede-se à caracterização dos mesmos.

3.3.1 Testes Acelerados de Vida em Componentes

Segundo a norma MIL-HDBK-338B (1998), nos testes realizados em componentes (“*Parts*”) são geralmente observados muito menos modos de falha comparativamente com testes realizados em equipamentos. Verifica-se assim maiores facilidades na identificação do tipo de solicitação que é eficaz no processo de aceleração do modo de falha que se pretende estudar.

Nos componentes existem diversos modos de falha, todos eles despoletados pela solicitação correspondente. Como exemplo tem-se a corrosão que é função da humidade (solicitação) e a ruptura de componentes eléctricos função da tensão de alimentação, entre outros. A implementação deste tipo de testes em componentes revela alguma facilidade na determinação do respectivo modelo de aceleração, bem como da taxa de avarias função da magnitude das solicitações impostas. Este facto deve-se a que num componente existe uma maior facilidade em distinguir e caracterizar os modos de falha, e o tipo de solicitação que lhe deu origem, o que não acontece em testes realizados em equipamentos e sistemas.

De acordo com a norma MIL-HDBK-338B (1998), pelas razões anteriormente mencionadas, os testes acelerados de vida realizados em componentes são amplamente usados, verificando-se a sua implementação na maioria dos componentes, bem como em quase todo o tipo de aplicações.

3.3.2 Testes Acelerados de Vida em Equipamentos/Sistemas

De acordo com a norma MIL-HDBK-338B (1998) e com Nelson (1990), a realização de testes acelerados de vida em equipamentos ou sistemas é geralmente muito limitada, não sendo usual a aplicação deste tipo de metodologia.

Segundo Nelson (1990), não são geralmente aplicados testes acelerados de vida em equipamentos ou sistemas, principalmente os de concepção electromecânica, devido ao facto de apresentarem diversos modos de falha, podendo fazer com que a aceleração de um determinado tipo de solicitação (variável de aceleração) possa despoletar mais do que um modo de falha. Esse tipo de incerteza na verificação de um modo de falha específico causa sérias dificuldades na análise da fiabilidade e respectivos parâmetros associados. Para equipamentos de grande porte, tenta-se acelerar um tipo de solicitação que desencadeie o principal modo de falha, considerado crítico.

Deste modo torna-se muito difícil a determinação de um modelo válido que relacione a taxa de avarias do equipamento às condições aceleradas de operação com as condições de normal operação (MIL- HDBK-338B, 1998).

Como referido na norma MIL-HDBK-338B (1998), um exemplo de um tipo de teste acelerado de vida que pode ser utilizado em equipamentos ou sistemas é o de aumentar a taxa de operação. Como exemplo de equipamentos passíveis de serem submetidos a este teste, tem-se equipamentos de aeronaves que normalmente operam durante apenas algumas horas por dia, equipamentos industriais que operam durante um turno de laboração por dia, entre outros. De acordo com os exemplos anteriormente enunciados verifica-se que facilmente o aumento da taxa de operação pode ser traduzido na operação contínua do equipamento da aeronave, salvo paragens de estabilização da temperatura, bem como a operação por parte do equipamento industrial de 2, 3 ou mais turnos de laboração contínuos. Constatou-se que a taxa de avarias por hora não sofre alterações, no entanto verifica-se um maior número de avarias acumuladas no total de ciclos ou horas de operação do teste.

Um outro exemplo de teste acelerado de vida realizado em equipamentos, referido na norma MIL-HDBK-338B (1998), é o da utilização da metodologia “*Environmental Stress Screening*” ou ESS. No teste o equipamento é sujeito a solicitações cíclicas de temperatura e vibração. A finalidade será a detecção de defeitos no equipamento decorridos no processo de fabrico, tais como por exemplo: soldaduras com defeito,

microfissuras, entre outros. Depois de detectados eventuais defeitos, esses são corrigidos, não sendo por isso necessário a utilização de um modelo de correlação entre as solicitações e as avarias verificadas.

De acordo com Felix (2006), no caso de equipamentos electrónicos, as variáveis de aceleração dos modos de falha que mais são utilizadas é a humidade e a temperatura.

Na generalidade os testes acelerados de vida não são utilizados em equipamentos, à excepção dos exemplos anteriormente enunciados.

3.4 Modelos de Aceleração

Elsayed (1996) afirma que os parâmetros relativos à fiabilidade de componentes, equipamentos e sistemas podem ser determinados tendo em conta os dados recolhidos em condições de normal operação. No entanto esta prática não pode ser aplicada, por exemplo, no caso do desenvolvimento de um novo componente ou produto, onde não existem dados relativos a condições de normal operação, tornando-se assim muito difícil, ou praticamente impossível determinar os parâmetros fiabilísticos.

Existe ainda o caso onde se verifica que a fiabilidade do componente é muito alta e que a avaria, para condições de normal operação (“*Design Conditions*”), não irá ser atingida durante o período de vida útil. Neste caso, a utilização de testes acelerados de vida, ou seja, aplicação de solicitações mais severas (condições aceleradas) irá induzir a ocorrência da avaria do componente, fazendo com que, utilizando os dados recolhidos do teste acelerado, se consiga estimar os parâmetros fiabilísticos para as condições de normal operação, utilizando-se modelos matemáticos de extrapolação.

Segundo Elsayed (1996), existem três categorias de modelos que relacionam os dados fiabilísticos recolhidos nas condições aceleradas com os dados fiabilísticos que se pretendem estimar para as condições de normal operação (“*Design Conditions*”). Uma das considerações que é feita na utilização dos modelos matemáticos de extrapolação é de que o modo de falha (mecanismo de falha) verificado para as condições aceleradas de operação é o mesmo que iria ser verificado para as condições de normal operação, pelo que é necessário parametrizar todo o teste acelerado de vida de modo a permitir simular o mesmo mecanismo de falha.

Na tabela 3.2 são apresentadas as três categorias de modelos de extrapolação ou previsão existentes, bem como os principais modelos matemáticos utilizados para cada uma.

Tabela 3.2. Tabela descritiva dos principais modelos matemáticos de extrapolação. Adaptado de: (Elsayed, 1996)

Tipo de modelo	Designação do modelo
Modelos Estatísticos Paramétricos	Modelo de aceleração para distribuição Exponencial
	Modelo de aceleração para distribuição Weibull
	Modelo de aceleração para distribuição Rayleigh
	Modelo de aceleração para distribuição Lognormal
Modelos Estatísticos Não Paramétricos	Modelo Linear
	Modelo do Risco Proporcional
Modelos Físico-Estatísticos	Modelo de Arrhenius
	Modelo de Eyring
	Modelo da Lei da Potência Inversa
	Modelo de Combinação
Modelos Físico-Experimentais	Modelo de Electro-Migração
	Modelo de Falhas por Humidade
	Modelo de Falhas por Fadiga

Tal como Elsayed (1996) enuncia, os modelos utilizados na extrapolação dos dados recolhidos durante os testes acelerados de vida podem ser classificados como modelos estatísticos (paramétricos e não paramétricos), modelos físico-estatísticos e modelos físico-experimentais. Em todos estes modelos assume-se que as solicitações aplicadas nas condições aceleradas estão dentro de um limite aceitável de aceleração. Depois de conhecidos os diversos parâmetros fiabilísticos, bem como o factor de aceleração (A_F), os parâmetros relativos às condições de normal operação podem ser estimados.

Os modelos Estatísticos Paramétricos são geralmente utilizados quando a relação entre as solicitações aplicadas (temperatura, humidade, tensão, pressão, entre outras) e o tempo até à avaria (MTTF) do componente, equipamento ou sistema é de difícil determinação, verificando-se a dificuldade de implementação de modelos baseados nos princípios da física e química das reacções. Neste tipo de modelos os componentes são testados para vários níveis de solicitação, ou seja, diferentes valores de factor de aceleração. Os vários valores de MTTF que vão sendo recolhidos de cada teste (nível de solicitação), vão ser utilizados na determinação da função densidade de probabilidade de falha $f(t)$ que mais se adequa, bem como todos os seus parâmetros. Espera-se que os factores de forma da função $f(t)$ sejam idênticos para os vários níveis de solicitação, bem como para as condições de normal operação, devido à linearidade que se verifica entre o MTTF e o nível de solicitação utilizado, por outro lado os factores de escala da distribuição podem variar. Consta-se assim que a função densidade de probabilidade de falha é idêntica para todas as condições do teste, para um determinado componente (Elsayed, 1996).

Quando os dados relativos à avaria do componente sugerem formas mais complexas para as distribuições e estas não são conhecidas na sua totalidade, ou caso o número de observações seja insuficiente para estimar a distribuição dos tempos até à avaria e realizar conseqüentemente uma análise fiável dos dados recolhidos, utilizam-se geralmente os modelos Estatísticos Não Paramétricos (Elsayed, 1996).

Os modelos Físico-Estatísticos são baseados no efeito provocado pelas solicitações aplicadas na taxa de avarias dos componentes testados. Por exemplo, a taxa de avarias de muitos circuitos electrónicos integrados é acelerada por factores como a temperatura, logo o modelo que relaciona a taxa de avarias com o factor de aceleração, neste caso a temperatura, deverá ter em conta as propriedades físicas e químicas dos componentes testados (Elsayed, 1996).

Os modelos Físico-Experimentais são aplicações especificamente desenvolvidas para vários tipos de mecanismos de falha. Neste tipo de modelo, são realizados ensaios com vista a determinação de propriedades dos diferentes mecanismos de falha ocorridos num dado componente, equipamento ou sistema, para vários níveis de magnitude das solicitações. Este tipo de modelo pode ser utilizado em circuitos electrónicos,

componentes plásticos, ou quando se tratam de mecanismos de falha majoritariamente provocados por fenômenos de fadiga cíclica (Elsayed, 1996).

Segundo Elsayed (1996), existem ainda modelos de Degradação, os quais não se inserem nas categorias anteriormente enunciadas. Estes modelos retractam, como o próprio nome sugere, a degradação dos componentes testados e não o fenômeno de avaria do componente. Este tipo de modelo é utilizado quando não se verifica a falha ou avaria do componente, mas sim uma diminuição do seu desempenho. Segundo Tobias e Trindade (1986 apud Elsayed, 1996), um caso da aplicabilidade destes modelos pode ser considerado quando, por exemplo, um componente começa o teste acelerado de vida com um valor de resistência considerado aceitável, mas durante o teste o valor da resistência sofre flutuações que influenciam o bom funcionamento do componente.

No presente documento, os modelos Físico-Estatísticos serão alvo de uma análise e explicação mais detalhada, nomeadamente os modelos de Arrhenius, o modelo de Eyring, o modelo da Lei da Potência Inversa e o modelo de Bazovsky, fazendo-se de seguida a sua caracterização.

3.4.1 Modelo de Arrhenius

3.4.1.1 Abordagem Histórica

Svante August Arrhenius (1859-1927) foi um cientista sueco que se dedicou ao estudo e desenvolvimento da física e da química, sendo por isso um dos chamados “pais” da físico-química moderna. Arrhenius estudou e concebeu diversas teorias bastante importantes no desenvolvimento da ciência, sendo as que mais se destacam as seguintes: Equação de Arrhenius; Teoria da Dissociação Iónica; Teoria Ácido-Base. Todos os seus estudos e desenvolvimentos culminaram com a atribuição do prémio Nobel da química em 1903 (Arrhenius et al., 2008).

De todas as teorias desenvolvidas por Arrhenius, a denominada “Equação de Arrhenius” tem particular interesse e revela-se importante no desenvolvimento do presente texto, sendo que a explicação da formulação da equação será realizada convenientemente no tópico seguinte.

3.4.1.2 Aplicabilidade

O modelo de Arrhenius é utilizado quando a variável de aceleração do teste é a temperatura. Com este modelo é possível estimar a vida do componente testado, tendo por base os dados obtidos do teste de elevada temperatura, aquando do fenómeno de colapso do componente. Quando a curva de vida do componente é exponencial, o modelo de Arrhenius permite ainda determinar a taxa de avaria (Kececioglu, 2002).

3.4.1.3 O modelo

O modelo de Arrhenius utiliza a temperatura como variável de aceleração, tendo por isso o conceito de reacção química elevada importância no desenvolvimento do modelo matemático em estudo.

A velocidade com que uma determinada reacção química se desencadeia normalmente aumenta com o aumento da temperatura. Ao se expor os componentes em estudo a elevadas temperaturas e a diferentes propriedades de medição (medições intermitentes ao longo do tempo), a relação entre a taxa de reacção dos mecanismos de degradação e temperatura podem ser estimados (Woo e Park, 2011).

Segundo Kececioglu (2002), a Equação de Arrhenius exprime-se do seguinte modo:

$$V_{Reac} = A \times e^{-B/T^*} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Sabendo que a constante B é dada pela seguinte equação:

$$B = \frac{E_A}{K_{Boltzman}} = \frac{\text{Energia de activação (eV)}}{\text{Constante de Boltzman (8,617} \times 10^{-5} \text{ eV/K)}} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Substituindo a equação 3.2 na equação 3.1 verifica-se que:

$$V_{Reac} = A \times e^{E_A/K_{Boltzman}T^*} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Das equações anteriores verifica-se que: V_{Reac} exprime a velocidade da reacção ou taxa de processo; T^* representa a temperatura absoluta do teste em graus Kelvin ($^{\circ}\text{K}$); A representa um factor não térmico ou constante; B exprime o quociente entre a energia de activação do processo e a constante de Boltzman.

Assumindo que a vida do componente é inversamente proporcional à taxa de avarias do teste acelerado de vida, a equação 3.1 poderá ser escrita da seguinte forma:

$$L_{T^*} = C \times e^{B/T^*} = C \times e^{E_A/(K_{Boltzman} \times T^*)} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

A variável L_T da equação anterior exprime a vida do componente, sendo que a constante C é referente a uma estimativa realizada utilizando os dados da vida do componente.

Para determinar a vida do componente L_{T^*} referente às temperaturas de operação (L_{T_U}) e de ensaio acelerado (L_{T_A}) utilizam-se as seguintes equações:

$$L_{T_U} = C \times e^{E_A/(K_{Boltzman} \times T_U)} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

e,

$$L_{T_A} = C \times e^{E_A/(K_{Boltzman} \times T_A)} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

De notar que T_U e T_A correspondem respectivamente às temperaturas de operação e de ensaio acelerado.

Um outro factor importante na teoria de Arrhenius é o conceito de factor de aceleração, designado pela sigla A_F (Acceleration Factor), que é dado pela seguinte expressão:

$$A_F = \frac{L_{T_U}}{L_{T_A}} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Substituindo na equação anterior as equações 3.5 e 3.6, resulta a seguinte expressão para o factor de aceleração:

$$A_F = e^{\frac{E_A}{K_{Boltzman}} \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right)} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Utilizando as expressões 3.7 e 3.8 determina-se a expressão da vida do componente em condições de normal operação função do factor de aceleração e da vida do componente no teste acelerado:

$$L_{T_U} = L_{T_A} \times e^{\frac{E_A}{K_{Boltzman}} \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right)} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Assumindo que a taxa de avarias do componente é directamente proporcional à taxa de processo ou velocidade da reacção, define-se como taxa de avarias (λ) para o modelo de Arrhenius a seguinte expressão:

$$\lambda = D \times e^{-E_A/K_{Boltzman} T^*} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Na expressão anterior a variável D representa uma constante.

Utilizando uma abordagem semelhante à anterior representa-se de seguida as expressões referentes à taxa de avarias para a temperatura de normal operação e para a temperatura de ensaio acelerado, respectivamente:

$$\lambda_U = D \times e^{-E_A/K_{Boltzman}T_U} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

e,

$$\lambda_A = D \times e^{-E_A/K_{Boltzman}T_A} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

De seguida determina-se a expressão referente à taxa de avarias para temperatura de normal operação, tendo para isso de dividir a equação 3.11 pela 3.12:

$$\lambda_U = \lambda_A \times e^{\frac{-E_A}{K_{Boltzman}} \times \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right)} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

De acordo com Kececioglu e Sun (2003), a energia de activação (E_A) é a energia requerida que uma molécula de um determinado corpo tem que possuir para que possa participar na reacção química/física de um qualquer processo. Na figura 3.6, o eixo das abcissas corresponde ao progresso das avarias (reacção) e o eixo das ordenadas corresponde ao nível de energia da reacção. De notar que o fenómeno de progressão das avarias está associado ao espaço temporal. Os valores de energia de activação representam as energias internas de um qualquer defeito à temperatura ambiente, sendo estes valores passíveis de alteração mediante certas condições, tais como: o tipo de defeito verificado, a sua natureza (mecanismo de falha), tamanho, forma, localização na estrutura do componente, potencial eléctrico da estrutura do componente, e naturalmente, com a temperatura ambiente verificada. Os valores de energia de activação de um determinado mecanismo de falha deverão ser sempre finitos e superiores ao valor zero.

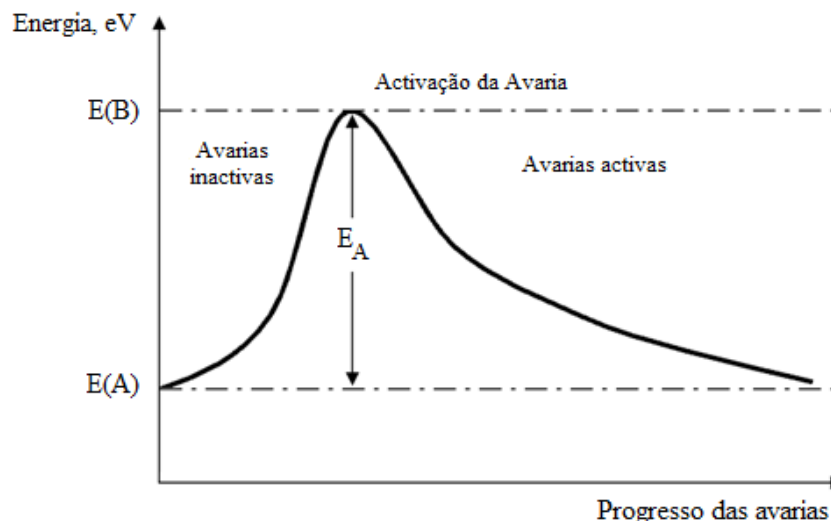


Figura 3.6. Energia de activação e o processo de avaria. Adaptado de: (Kececioglu e Sun, 2003)

Tomando como exemplo o caso em que o componente recepcionado está num nível de energia de activação de $E_A = E(A)$. Quando se verifica tal nível de energia de activação, espera-se que o componente tenha sido testado e aprovado, tendo no entanto a possibilidade de ter algumas avarias. As avarias consideradas neste nível de energia são denominadas avarias latentes ou inactivas, devido à possibilidade de não serem facilmente detectáveis.

Para que a avaria seja detectável, o nível de energia de activação deverá ser no mínimo de $E_A = E(B)$, significando que para se atingir tal nível de energia, ou seja, para activar o mecanismo de falha correspondente, será necessário fornecer energia, como por exemplo sob a forma de calor. Verifica-se então que a avaria que outrora se considerava latente (inactiva) passa agora a denominar-se detectável ou activa.

Poderá então enunciar-se que a energia de activação é a energia requerida para que se passe a barreira que separa as avarias inactivas das avarias activas, o que significa que a condição $E_A \geq E(B)$ deverá ser verificada, possibilitando assim a activação do mecanismo de falha esperado.

Os ensaios realizados para a determinação da energia de activação de um determinado mecanismo de falha de um determinado componente utilizam procedimentos específicos. Normalmente os componentes são ensaiados individualmente e utilizam-se medições a diversas temperaturas, possibilitando assim a estimativa do valor da energia de activação de um dado mecanismo de falha característico desse componente.

3.4.2 Modelo de Eyring

3.4.2.1 Abordagem Histórica

Henry Eyring (1901-1981) foi um cientista americano (nascido em Colonia Juárez, México) muito conceituado, que se dedicou ao estudo e desenvolvimento da química. Eyring estudou e concebeu diversas teorias, sendo considerado por muitos o cientista que mais contribuiu para o desenvolvimento da ciência no século XX. Das teorias e estudos que mais se destacaram, foram a título de exemplo, os estudos relacionados com as reacções químicas e as velocidades com que essas reacções são verificadas. Todos os seus estudos e desenvolvimentos culminaram com a atribuição de vários prémios bastante conceituados na comunidade científica, tendo como exemplos a atribuição do prémio “National Medal of Science” em 1966 atribuído pelo presidente dos Estados Unidos da América, o prémio “Berzelius Medal” em 1977 atribuído pela Royal Swedish Academy e o prémio “Wolf Prize” em 1980 atribuído pela Wolf Foundation (Kauffman, 2001).

Dos vários estudos realizados, Eyring concebeu algumas teorias muito utilizadas hoje em dia, sendo uma delas objecto de estudo do presente texto.

3.4.2.2 Aplicabilidade

O modelo de Eyring é utilizado quando a variável de aceleração do teste é a temperatura. Este modelo foi desenvolvido tendo como base a teoria da mecânica quântica. Com este modelo é possível estimar a vida do componente testado, tendo por base os dados obtidos do teste de elevada temperatura, logo que os componentes atinjam a falha. Este modelo pode ser aplicado quando a curva característica de distribuição de vida do componente é exponencial, utilizando o parâmetro de localização da distribuição com valor nulo ($\gamma = 0$) (Kececioglu, 2002).

3.4.2.3 O modelo

Segundo Kececioglu (2002), o modelo de Eyring utiliza a temperatura como variável de aceleração, relacionando os diversos factores segundo uma distribuição exponencial. Na distribuição exponencial utilizada o parâmetro de localização toma o valor zero, o que significa que existe possibilidade de ocorrência de falha logo que o teste acelerado se inicia, sendo ainda de ressaltar que o parâmetro de localização γ é usualmente expresso

em horas de utilização. Caso o parâmetro de localização assumisse um valor maior que zero, significaria que só depois desse momento é que se poderia verificar a falha do componente.

De acordo com Kececioglu (2002), a relação entre o tempo médio até à avaria ($MTTF$) e a temperatura (T^*), considerando $\gamma = 0$ é dada por:

$$MTTF = \frac{1}{T^*} \times e^{-\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{T^*}\right)} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Na equação anterior, os parâmetros A_{Eyring} e B_{Eyring} são calculados mediante a utilização dos dados obtidos no teste acelerado de vida. A variável T^* representa a temperatura absoluta do teste em graus Kelvin ($^{\circ}\text{K}$).

O modelo permite ainda estimar a taxa com que o componente se degrada, em função da temperatura. Como o tipo de distribuição utilizado é exponencial, sabendo que:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

e que:

$$f(T) = \frac{1}{MTTF} \times e^{-\left(\frac{T}{MTTF}\right)} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Combinando as equações 3.14 e 3.16, obtém-se a função densidade de probabilidade conjunta para o modelo de Eyring, como se apresenta de seguida:

$$f(T; T^*) = T^* \times e^{\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{T^*}\right)} \times e^{-\left[T \times T^* \times e^{\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{T^*}\right)}\right]} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

Analisando as expressões anteriores, observa-se que existem duas variáveis de temperatura, sendo que a variável T representa a temperatura à qual queremos calcular a função e a variável T^* a temperatura à qual se realizou o teste acelerado de vida.

A função de fiabilidade $R(T; T^*)$ poderá ser calculada resolvendo o seguinte integral:

$$R(T; T^*) = \int_T^{\infty} f(T; T^*) \, dT \quad (\text{Eq. 3.18})$$

Resolvendo a equação anterior, verifica-se que:

$$R(T; T^*) = e^{-\left[T \times T^* \times e^{\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{T^*}\right)}\right]} \quad (\text{Eq. 3.19})$$

Observando a equação anterior verifica-se que ao introduzir os diversos factores, o valor da fiabilidade é calculado directamente, sendo ainda assim uma probabilidade condicionada às duas temperaturas em jogo.

Utilizando a equação 3.14, obtêm-se as expressões que caracterizam o tempo médio até à avaria à temperatura do teste acelerado ($MTBF_A$) e o tempo médio até à avaria à temperatura de normal operação ($MTTF_U$), respectivamente:

$$MTTF_A = \frac{1}{T_A} \times e^{-\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{T_A}\right)} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

e,

$$MTTF_U = \frac{1}{T_U} \times e^{-\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{T_U}\right)} \quad (\text{Eq. 3.21})$$

Consequentemente, ao dividir a equação 3.21 pela equação 3.20 obtém-se a expressão que expressa o tempo médio até à avaria para as condições de uso em função da temperatura do teste acelerado, da temperatura das condições normais de utilização, do tempo médio até à avaria do teste acelerado e do parâmetro B. De seguida apresenta-se a expressão:

$$MTTF_U = MTTF_A \times \frac{T_A}{T_U} \times e^{B_{Eyring} \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A}\right)} \quad (\text{Eq. 3.22})$$

Depois de encontradas as expressões relativas ao tempo médio até à avaria para os dois cenários, ou seja, para normais condições de utilização e para condições relativas ao teste acelerado de vida, define-se agora a expressão do factor de aceleração.

O factor de aceleração é dado pela divisão dos dois tempos médios até à avaria ($MTTF_U$ e $MTTF_A$), como apresentado de seguida:

$$A_F = \frac{MTTF_U}{MTTF_A} \quad (\text{Eq. 3.23})$$

Substituindo as equações 3.20 e 3.21 na equação anterior, obtém-se a seguinte expressão:

$$A_F = \frac{T_A}{T_U} \times e^{B_{Eyring} \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A}\right)} \quad (\text{Eq. 3.24})$$

3.4.3 Modelo da Lei da Potência Inversa

3.4.3.1 Abordagem Histórica

De acordo com Clauset et al. (2009), a distribuição tipo potência tem atraído particular atenção ao longo dos anos devido às suas propriedades matemáticas. A distribuição da potência, segundo Clauset et al. (2009) e Newman (2005) pode descrever vários fenómenos naturais, bem como não naturais, tais como: descrever o crescimento das populações de cidades, descrever intensidades de terremotos, descrever falhas nos equipamentos, entre outras.

Tendo por base o conceito anteriormente enunciado, muitos cientistas utilizaram um modelo de potência inversa nos seus estudos e desenvolvimentos com vista ao cálculo da fiabilidade de bens.

3.4.3.2 Aplicabilidade

Segundo Kececioglu (2002), o modelo da Lei da Potência Inversa é utilizado quando a vida característica do componente se comporta como uma função do tipo potência inversa do tipo de solicitação aplicada.

A solicitação deverá ser do tipo não térmica, ou seja, a solicitação utilizada no teste acelerado de vida como variável de aceleração não poderá ser a temperatura. O modelo permite assim a determinação do tempo ou número de ciclos a que um componente poderá estar sujeito mediante determinadas solicitações, funções de densidade de probabilidade, fiabilidades e taxas de avaria. (Kececioglu, 2002).

Uma das variáveis de aceleração que mais é utilizada é a tensão eléctrica. Este tipo de solicitação é amplamente utilizado em testes acelerados de vida realizados em equipamento electrónico, obtendo-se bons resultados (Nelson, 1972).

De acordo com Kececioglu (2002), o modelo da Lei da Potência inversa é bastante utilizado na análise de dados provenientes de testes acelerados de vida realizados em fluidos, condensadores, rolamentos e dispositivos electrónicos.

De seguida será apresentada toda a formulação e considerações realizadas na dedução do modelo em análise.

3.4.3.3 O modelo

Segundo Kececioglu (2002), a expressão que representa a vida característica do componente para o modelo da Lei da Potência Inversa é:

$$\eta(V) = \frac{1}{K \times V^n} \quad (\text{Eq. 3.25})$$

Analisando a expressão anterior verifica-se que $\eta(V)$ representa a vida do componente e é função da variável de aceleração do teste acelerado de vida (V). As variáveis representadas por K e n são parâmetros sempre positivos característicos de cada componente e do tipo de teste realizado.

Segundo Kececioglu (2002), o tipo de distribuição utilizada neste método é a distribuição de Weibull, sendo a sua função de densidade de probabilidade $f(T; V)$ função do tempo decorrido até à falha (t) e de outra variável de aceleração (V). Essa função é ainda afectada pelo parâmetro de forma β , característico da distribuição de Weibull. De seguida apresenta-se a equação relativa a função de Densidade de Probabilidade de Falha:

$$f(t; V) = \frac{\beta}{\eta(V)} \times \left[\frac{t}{\eta(V)} \right]^{\beta-1} \times e^{-\left[\frac{t}{\eta(V)} \right]^\beta} \quad (\text{Eq. 3.26})$$

A expressão que permite o cálculo da Fiabilidade do componente é apresentada de seguida:

$$R(t; V) = e^{-\left[\frac{t}{\eta(V)} \right]^\beta} \quad (\text{Eq. 3.27})$$

Como se sabe a taxa de avarias é dada pelo quociente entre a função de Densidade de Probabilidade de Falha e a função de Fiabilidade, de seguida é apresentada essa dedução:

$$\lambda(t; V) = \frac{f(t; V)}{R(t; V)} \quad (\text{Eq. 3.28})$$

Onde substituindo as equações 3.26 e 3.27 resulta que:

$$\lambda(t; V) = \frac{\beta}{\eta(V)} \times \left[\frac{t}{\eta(V)} \right]^{\beta-1} \quad (\text{Eq. 3.29})$$

Utilizando a equação 3.25 e substituindo-a na equação anterior, verifica-se que existe uma simplificação considerável, como se apresenta de seguida:

$$\lambda(t; V) = \beta \times K \times V^n \times (t \times K \times V^n)^{\beta-1} \quad (\text{Eq. 3.30})$$

De acordo com a equação anterior, é possível substituir as variáveis λ_A , λ_U , V_A , V_U , de modo a ser possível determinar as expressões relativas à taxa de avarias para as condições do teste acelerado (λ_A e V_A) e para as condições de normal operação (λ_U e V_U), sendo respectivamente:

$$\lambda_A = \beta \times K \times (V_A)^n \times [t_A \times K \times (V_A)^n]^{\beta-1} \quad (\text{Eq. 3.31})$$

e,

$$\lambda_U = \beta \times K \times (V_U)^n \times [t_U \times K \times (V_U)^n]^{\beta-1} \quad (\text{Eq. 3.32})$$

De notar que a equação 3.31 é referente às condições de teste acelerado e a equação 3.32 referente às condições de normal operação. A taxa de avarias em condições de normal operação pode ainda ser expressa de outra forma, bastando para isso fazer o quociente da equação 3.32 pela 3.31, resolvendo em ordem a λ_U , como apresentado de seguida:

$$\lambda_U = \lambda_A \times \left(\frac{V_U}{V_A}\right)^n \times \left[\left(\frac{V_U}{V_A}\right)^n \times \left(\frac{t_U}{t_A}\right)\right]^{\beta-1} \quad (\text{Eq. 3.33})$$

Utilizando a mesma metodologia aplicada anteriormente, substitui-se na expressão 3.25 as variáveis de modo a representar-se as expressões que permitem calcular directamente a vida característica do componente para as condições de teste acelerado e de normal utilização, são respectivamente:

$$\eta_A = \frac{1}{K \times (V_A)^n} \quad (\text{Eq. 3.34})$$

e,

$$\eta_U = \frac{1}{K \times (V_U)^n} \quad (\text{Eq. 3.35})$$

Dividindo a equação 3.35 pela equação 3.34 obtém-se a expressão da vida característica do componente para condições de normal utilização em função da vida característica referente as condições de teste acelerado de vida, com apresentado de seguida:

$$\eta_U = \eta_A \times \left(\frac{V_A}{V_U}\right)^n \quad (\text{Eq. 3.36})$$

A expressão do factor de aceleração do modelo é obtida bastando simplesmente realizar um quociente entre o valor determinado para a vida característica do componente em

condições de normal utilização e o valor para as condições do teste acelerado de vida, sendo respectivamente:

$$A_F = \frac{\eta_U}{\eta_A} \quad (\text{Eq. 3.37})$$

3.4.4 Modelo de Bazovsky

3.4.4.1 Abordagem Histórica

Igor Bazovsky foi um cientista muito conceituado, pioneiro no desenvolvimento de métodos de fiabilidade, aplicáveis em sistemas simples e complexos, tais como: sistemas eléctricos, sistemas mecânicos e equipamentos aeronáuticos. De entre os seus estudos e desenvolvimentos resultaram alguns artigos científicos muito referenciados, bem como alguns livros, tal como por exemplo a obra “*Reliability Theory and Practice*”.

3.4.4.2 Aplicabilidade

Segundo Kececioglu (2002), o modelo de Bazovsky é baseado no modelo de Arrhenius e no modelo da Lei Potência Inversa. O modelo deve ser aplicado quando se utilizam duas variáveis de aceleração, sendo uma de cariz térmico e outra não térmico. Este modelo pode ser aplicado quando a curva característica de distribuição de vida do componente é exponencial.

A variável de aceleração não térmica pode ser representada por um qualquer tipo de solicitação, sendo a voltagem umas das mais utilizadas, pelo que se utilizou para a explicação do modelo.

De seguida será apresentada toda a formulação e considerações realizadas na dedução do modelo em análise.

3.4.4.3 O modelo

De acordo com Grange (1971) e Kececioglu (2002), a expressão que permite a determinação da vida característica do componente em condições de normal utilização,

tendo em consideração os dois tipos de solicitação verificados no teste acelerado de vida, é respectivamente:

$$\eta_U = \eta_A \times \left(\frac{V_A}{V_U}\right)^{n_{Arrhenius}} \times K_{Arrhenius}^{(T_A - T_U)} \quad (\text{Eq. 3.38})$$

De notar que a equação anterior relaciona a vida característica do componente para normais condições de utilização em função da vida característica determinada no teste acelerado de vida, ou seja, em condições aceleradas de degradação, bem como, função das condições do teste acelerado de vida ($V_A; T_A$), das condições de normal utilização ($V_U; T_U$) e de duas constantes características, $n_{Arrhenius}$ e $K_{Arrhenius}$, de cada componente. As variáveis V_A e V_U caracterizam as condições de solicitação dos componentes, sendo expressas nas unidades correspondentes. As temperaturas T_A e T_U são expressas em graus centígrados ($^{\circ}\text{C}$).

Segundo Kececioglu (2002), o factor $K_{Arrhenius}$ é dependente da temperatura do teste acelerado. Para determinar o factor $K_{Arrhenius}$ de um determinado componente realizam-se dois testes acelerados de vida para uma determinada magnitude de solicitação, fazendo-se variar somente a temperatura do teste, ou seja, temperaturas T_1 e T_2 . De seguida aplica-se a equação 3.39 para os dados recolhidos nos testes e determina-se o factor $K_{Arrhenius}$.

$$\ln(K_{Arrhenius}) = \frac{\ln\left(\frac{L_1}{L_2}\right)}{T_2 - T_1} \quad (\text{Eq. 3.39})$$

Para determinar o factor $n_{Arrhenius}$, utiliza-se uma metodologia semelhante à anterior. Neste caso realizam-se também dois testes acelerados de vida, em que a temperatura do teste é mantida constante, fazendo-se variar a magnitude da solicitação, obtendo-se dos testes as vidas características do componente para as duas condições aceleradas.

De seguida aplica-se a equação 3.40 para os dados recolhidos nos testes e determina-se o factor $n_{Arrhenius}$.

$$n_{Arrhenius} = \frac{\ln\left(\frac{L_2}{L_1}\right)}{\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)} \quad (\text{Eq. 3.40})$$

De modo a simplificar um pouco a obtenção de alguns dos parâmetros possíveis de serem determinados apresenta-se uma simplificação da equação 3.38:

$$(\eta_U) \times (V_U)^{n_{Arrhenius}} \times K_{Arrhenius}^{*(T^*U)} = (\eta_A) \times (V_A)^{n_{Arrhenius}} \times K_{Arrhenius}^{*(T^*A)} = Cte \text{ (Eq. 3.41)}$$

No capítulo seguinte será realizada a análise dos dados recolhidos dos testes acelerados de vida a um caso de estudo a ser realizado.

Capítulo 4

Transformadores Eléctricos

4.1 Introdução à teoria dos Transformadores

De acordo com Halacsy e Von Fuchs (1961) e Pansini (1998), o transformador eléctrico, vulgo “*Transformer*” na literatura de índole anglo-saxónica, foi inventado no século dezanove, mais propriamente em 1884, pelos engenheiros Max Déri, Otto Bláthy e Karl Zipernowsky, que faziam parte dos quadros do departamento de electricidade e inovação de uma fábrica chamada “Ganz”, situada em Budapeste, Hungria.

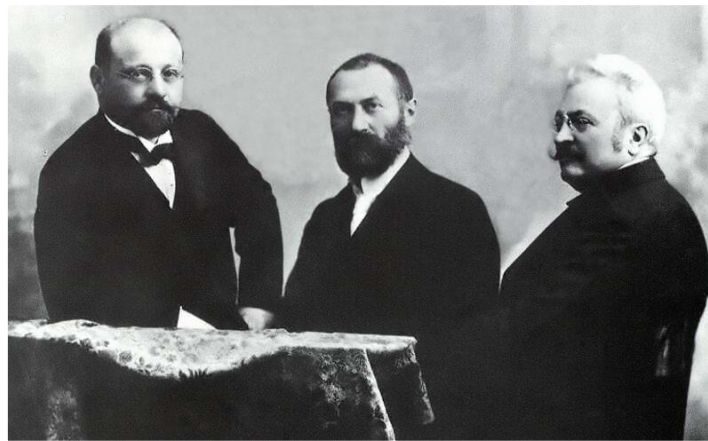


Figura 4.1. Inventores do transformador eléctrico. Fonte: (Halacsy e Von Fuchs, 1961)

Ainda nesse mesmo ano, vários transformadores foram construídos e expedidos na Hungria e Rússia, para que pudessem ser testados, visando a obtenção de dados relativos ao seu funcionamento.

A invenção do transformador, por parte de Déri, Bláthy e Zipernowsky (figura 4.2) permitiu superar as limitações técnicas e económicas associadas aos sistemas que eram utilizados na época, nomeadamente o sistema de corrente contínua. Este avanço

possibilitou que praticamente todos os estabelecimentos, habitações e fábricas possuíssem energia eléctrica, facilitando assim o crescimento e desenvolvimento da indústria da época, perspectivando-se até aos dias de hoje (Pansini, 1998).



Figura 4.2. Primeiro transformador. Fonte: (Sándor, 2004)

O primeiro circuito de distribuição de corrente alternada que utilizava transformadores foi posto em utilização no ano de 1886 em Great Barrington, no estado de Massachusetts, E.U.A. Nesse mesmo ano, outro circuito de distribuição de corrente alternada foi posto em funcionamento em Cerchi, Itália. Esse circuito permitia o abastecimento de cerca de 2000 Volts ao longo de mais de 30 quilómetros. Através destes pequenos avanços, a indústria de fornecimento de energia eléctrica, bem como todas as demais indústrias afectadas directamente pelo seu desenvolvimento, puderam desenvolver-se e dar início aos processos de desenvolvimento tecnológico. Na actualidade, a grande maioria das indústrias, salvo alguns nichos tecnológicos, utilizam a corrente alternada, devendo-se este facto à invenção e respectivo desenvolvimento da tecnologia associada aos transformadores eléctricos (Pansini, 1998). Ainda no século dezanove, mais propriamente no ano de 1890, Brown inventou o primeiro transformador arrefecido e isolado por óleo. Este transformador operava em duas fases, sendo que este sistema de arrefecimento permitiu o aumento muito significativo das potências de operação (Vishal et al., 2011).

Para Winders (2002), o transformador eléctrico é um dispositivo estático que consiste na utilização de um, dois ou mais enrolamentos acoplados, com ou sem núcleo magnético, que possibilita a transferência de energia entre circuitos através do efeito de indução electromagnética. Actualmente existem vários tipos de transformadores, que

são utilizados nos mais variados tipos de aplicação, como por exemplo no áudio, na rádio, na instrumentação e no transporte de potência eléctrica.

De ressaltar que o presente documento apenas foca o tratamento de dados alusivos aos transformadores relativos a aplicações de transporte de potência, nomeadamente os que utilizam sistema de arrefecimento recorrendo a fluidos de refrigeração.

Segundo Pansini (1998), o transformador eléctrico é um dispositivo que não possui partes móveis, capaz de transferir potência eléctrica de um circuito para outro através de indução electromagnética. Nessa transferência tanto a voltagem como a intensidade de corrente do primeiro circuito podem ser alteradas e transmitidas ao segundo, daí resultando a sua enorme utilidade. Um determinado transformador pode ser utilizado no aumento da tensão do circuito primário (“*Step-up Transformer*”), ou por outro lado ser utilizado para diminuir a tensão do circuito primário (“*Step-down Transformer*”).

4.1.1 Tipos de transformadores

De acordo com WEG (s.d.), o transformador é um elemento activo no sistema eléctrico, pelo que poderá desempenhar vários papéis, função do tipo de aplicação desejado. O transformador eléctrico, em sistemas eléctricos e electromecânicos, poderá ser necessário para ajustar a tensão de saída de um estágio do sistema à tensão de entrada do estágio seguinte, isolar electricamente os diversos circuitos entre si, entre outras. Desta forma é perceptível a quantidade de soluções que podem ser adaptadas às aplicações, pelo que de seguida se apresenta uma breve descrição do modo como, hoje em dia, os transformadores são classificados, nomeadamente quanto à sua finalidade, enrolamentos e tipo de construção.

4.1.1.1 Classificação do Transformador quanto à Finalidade

Os transformadores eléctricos podem ter finalidades completamente distintas, pelo que para cada tipo de finalidade, toda a sua concepção pode variar. Podem portanto ser classificados do seguinte modo:

- a) Transformadores de Corrente;
- b) Transformadores de Potência;

- c) Transformadores de Distribuição;
- d) Transformadores de Força;

4.1.1.2 Classificação do Transformador quanto aos Enrolamentos

Quanto ao tipo e quantidade de enrolamentos, os transformadores podem ser classificados do seguinte modo:

- a) Transformadores de dois ou mais enrolamentos;
- b) Autotransformadores;

4.1.1.3 Classificação do Transformador quanto ao Tipo de Construção

Actualmente os transformadores podem apresentar diferentes formas e materiais, pelo que são normalmente classificados do seguinte modo:

- a) Quanto ao material do núcleo:
 - Núcleo ferromagnético;
 - Núcleo de ar;

- b) Quanto à forma do núcleo:
 - Shell;
 - Core;

- c) Quanto ao número de fases:
 - Monofásico
 - Polifásico

- d) Quanto ao tipo de refrigeração (dissipação de calor):
 - Transformador imerso/húmido (parte activa imersa em liquido isolante);
 - Transformador seco (parte activa envolta pelo ar ambiente);

De notar que no seguimento do presente documento será levada a cabo uma análise que culminará na obtenção de dados fiabilísticos de um determinado óleo isolante, utilizado

num determinado transformador imerso, ou húmido. Devido a este facto, será deveras conveniente, especificar os principais componentes encontrados nesse tipo de transformador, permitindo assim uma melhor percepção do caso de estudo. No tópico seguinte é apresentada essa descrição.

4.1.2 Componentes dos Transformadores arrefecidos por óleo

Como abordado anteriormente, existem dois tipos de transformador, transformadores húmidos e secos. Como a base do caso de estudo que se pretende analisar é a utilização de dados recolhidos de um teste acelerado de vida feito a um óleo isolante de um transformador, o tipo de transformador a abordar será logicamente o tipo húmido, sendo de todo o interesse caracterizar os seus principais componentes.

Na figura 4.3 são apresentados os principais componentes de um transformador de potência, um dos exemplos de aplicação do óleo isolante que será alvo do estudo fiabilístico.

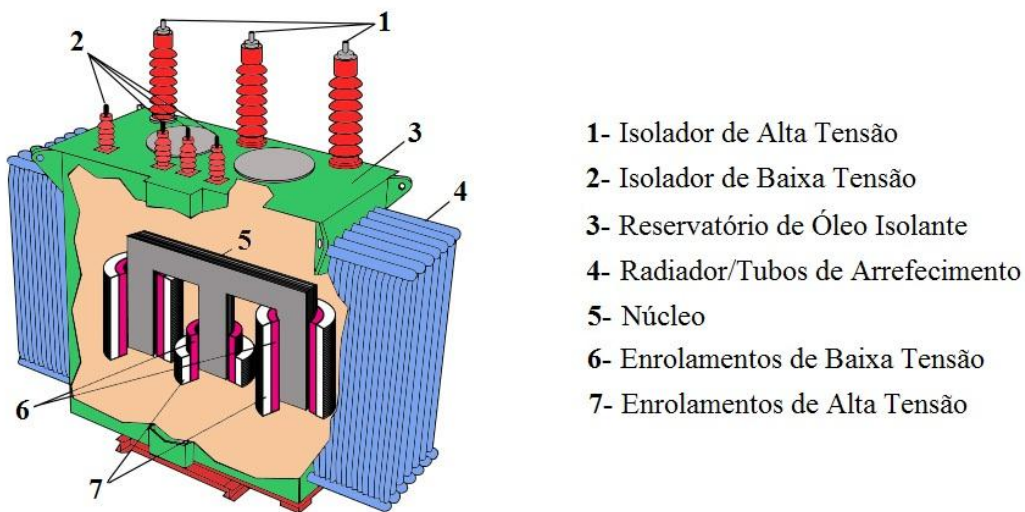


Figura 4.3. Esquema de componentes de um Transformador Eléctrico. Adaptado de: (http://www.physics.sjsu.edu/becker/physics51/ac_circuits.htm)

Nos pontos seguintes caracterizar-se-á cada um dos componentes apresentados anteriormente.

4.1.2.1 Isolador de Alta Tensão (AT) e Baixa Tensão (BT)

Os isoladores de alta e baixa tensão, vulgarmente denominadas por buchas, são os dispositivos que permitem a passagem dos condutores dos enrolamentos para o meio externo, ou seja, para o circuito de saída (Winders, 2002; WEG, s.d.).

As buchas são constituídas essencialmente por um corpo isolante, feito de um material cerâmico, de um condutor passante em cobre electrolítico ou em latão, de um terminal em latão ou bronze e de um isolador em borracha e/ou papel específico. Na figura seguinte podem ser observados os componentes atrás indicados (WEG, s.d.).

4.1.2.2 Reservatório de Óleo Isolante

De acordo com Pansini (1998), o reservatório de óleo isolante tem como função, não só armazenar o mesmo, bem como desempenhar a função de corpo do transformador, fazendo o suporte de todos os elementos activos do transformador.

O reservatório pode variar em forma e tamanho, sendo função da finalidade a que se destina, ano de fabrico e construtor. Os reservatórios dos transformadores mais antigos eram geralmente feitos de ferro-fundido, no entanto os mais recentes, fruto do desenvolvimento tecnológico, são fabricados com chapas soldadas, advindo daí algumas vantagens. O reservatório pode ser dividido em três partes, o fundo, as paredes laterais e a tampa.

No reservatório de óleo isolante encontram-se ainda os suportes para fixação, os olhais de suspensão, sistema de fecho da tampa, eventualmente uma janela de inspecção, dispositivos de amostragem e drenagem do óleo isolante, radiadores, visor de nível do óleo isolante e a placa de identificação do transformador.

4.1.2.3 Óleo Isolante

Os óleos isolantes têm a finalidade de garantir um conveniente isolamento entre os componentes do transformador e dissipar para o exterior o calor gerado nos enrolamentos e no núcleo (parte activa). Para que cumpra apropriadamente a sua função deverá estar em perfeitas condições, pelo que não poderá apresentar humidade nem tão pouco sinais de presença de impurezas (WEG, s.d.).

O tema relativo aos óleos isolantes, suas características e propriedades será posteriormente abordado no tópico 4.2.

4.1.2.4 Tubos de Arrefecimento ou Radiadores

A maioria do calor gerado pelo transformador propaga-se no óleo isolante e é dissipado pelo corpo do transformador, vulgarmente denominada de carcaça do transformador. Caso a gama de temperaturas de utilização do óleo isolante seja tal, que se verifique o perigo da sua deterioração, será necessário utilizar outro tipo de sistemas que visem a permuta de calor entre o óleo isolante e o ambiente, pelo que se utilizam sistemas do tipo radiador ou tubos de arrefecimento. Os tubos de arrefecimento ou os radiadores são utilizados para aumentarem a área de permuta de calor, permitindo assim a diminuição da temperatura do óleo isolante, como representado na figura seguinte.



Figura 4.4. Radiador do óleo isolante. Fonte: (http://www.ctr.in/Radiators_Prod.html)

4.1.2.5 Núcleo

O núcleo do transformador tem a função de assegurar a ligação magnética entre os enrolamentos do primário e secundário, dando origem ao circuito magnético do transformador, tem ainda a função de suporte mecânico das bobinas que constituem os enrolamentos (Teves, 1999).

Em transformadores de pequenas dimensões, as secções das lâminas do núcleo são normalmente constantes, por outro lado, em transformadores de grandes dimensões, ou elevadas potências, as secções das lâminas do núcleo são escalonadas (Teves, 1999).

O núcleo deverá ser constituído por um empilhamento de chapas fabricadas a partir de uma liga ferro-siliciosa, designada por chapa magnética, permitindo assim associar uma elevada permeabilidade magnética e reduzidas perdas no ferro, provocando estes dois aspectos uma redução das perdas verificadas no núcleo (Teves, 1999).

4.1.2.6 Enrolamentos de Alta e Baixa Tensão

Os enrolamentos são, regra geral, executados em fio ou barra, normalmente de cobre, isolado com material apropriado, possuindo o número de espiras e a secção adequada às tensões e potência desejadas, podendo ainda ser constituídos por uma ou mais bobinas ligadas em série (Teves, 1999).

Os enrolamentos em barra são mais utilizados quando as correntes eléctricas que estão em jogo são elevadas, devido ao facto de a barra permitir a execução do enrolamento com menor atravancamento, para a mesma secção do condutor (Teves, 1999).

Os condutores utilizados no fabrico dos enrolamentos podem ser isolados com fio, esmalte, fita de algodão, papel, fibra de vidro, entre outros. Caso seja necessário, o isolamento pode ser aumentado, utilizando para isso a imersão do conjunto em óleo isolante, como o caso dos transformadores trifásicos. De notar que este aspecto será alvo de estudo no presente documento, sendo posteriormente detalhado convenientemente (Teves, 1999).

No caso de transformadores de pequenas dimensões, é comum a utilização de verniz isolante na protecção dos enrolamentos. Padece de um tratamento em estufa de modo a conferir robustez mecânica e rigidez dieléctrica (Teves, 1999).

4.2 Óleos Isolantes

4.2.1 Introdução histórica e sua evolução

A utilização de óleo isolante, proveniente do petróleo, tendo como objectivo o arrefecimento e isolamento de transformadores remonta ao ano de 1887. De início, a sua utilização era combinada com um meio físico dieléctrico, como por exemplo o papel, o que aliado à baixa viscosidade apresentada neste tipo de óleos os fazia bons isoladores (Vishal et al., 2011).

Na época eram utilizados dois tipos distintos de óleo isolante, os óleos de origem parafínica e os de origem nafténica, sendo os últimos mais utilizados devido à sua capacidade de operarem a temperaturas mais baixas e terem uma menor viscosidade. Uma das desvantagens da utilização dos óleos nafténicos face aos parafínicos verificava-se em uma maior tendência à oxidação, traduzindo-se numa maior velocidade de degradação. Os óleos parafínicos, por outro lado, apresentavam fenómenos de formação de lamas, fruto da oxidação, que fazia com que aumentasse a sua viscosidade e consequentemente diminuísse drasticamente a capacidade de permuta de calor do óleo. Uma das grandes preocupações que advinham da utilização dos óleos derivados do petróleo era a sua tendência para se inflamarem a partir de certas temperaturas (Vishal et al., 2011).

Durante a década de 1930, surgiu a necessidade de conceber um fluido dieléctrico que permitisse ser utilizado em situações onde os óleos convencionais não fossem alternativa, caso de altas temperaturas e de necessidade de melhores propriedades requeridas ao fluido isolante. Surgiram então os denominados PCB (bifenilospoliclorados), que eram fabricados por diversas marcas e apresentavam boas características dieléctricas, boa estabilidade química e elevado ponto de inflamação, sendo esta última a justificação para a sua elevada utilização como fluido dieléctrico (Teves, 1999).

Na década de 60 descobriu-se que os óleos PCB eram nocivos para o homem e para o meio ambiente, devido a não serem biodegradáveis e à sua capacidade de provocar lesões quando inalados os seus vapores ou quando em contacto directo com a pele. Na década de 70 a sua utilização foi proibida e foi criada legislação com vista a sua substituição nos aparelhos em operação (Teves, 1999).

Posteriormente foram desenvolvidos óleos sintéticos (silicones, ésteres), que apresentavam boas capacidades isolantes, elevado ponto de inflamabilidade, reduzida tendência à oxidação e boa estabilidade térmica (Vishal et al., 2011).

Hoje em dia os óleos isolantes mais utilizados continuam a ser os derivados do petróleo, tendo como vantagem o custo e a sua gama de aplicabilidade. No entanto em aplicações especiais, os óleos sintéticos poderão ser uma opção a considerar (Vishal et al., 2011).

4.2.2 Principais funções e propriedades

As duas principais funções do óleo isolante são as de isolar a parte activa do transformador das restantes e de proporcionar uma conveniente refrigeração do transformador. Para que estas funções sejam realizadas convenientemente é necessário que se verifiquem certas propriedades do óleo isolante (Vishal, 2011; WEG, s.d.).

De seguida apresentam-se as propriedades mais importantes que devem ser verificadas no óleo isolante:

- Boa característica dieléctrica;
- Alta condutividade térmica;
- Boa estabilidade química e eléctrica;
- Capacidade de absorção de gases;
- Fluidez a baixa temperatura;
- Alto ponto de inflamabilidade;
- Boa volatilidade;
- Não inflamável;
- Não tóxico;
- Biodegradável;
- Baixo poder solvente;

4.2.3 Tipos de ensaios utilizados na análise dos óleos isolantes

Os óleos isolantes, quer sejam óleos minerais, silicões, óleos vegetais ou óleos sintéticos (ésteres) garantem um correcto funcionamento dos transformadores, no entanto vão perdendo as suas propriedades isolantes e térmicas devido a fenómenos relacionados com o aumento das concentrações de impurezas e à oxidação.

De acordo com o manual técnico TM 5-686 (1998), a ASTM (American Society for Testing and Materials) desenvolveu um conjunto de normas que visam especificar os testes que se realizam aos óleos isolantes dos transformadores, com o objectivo de verificar as condições de operacionalidade dos mesmos.

Nos tópicos seguintes são abordados os testes anteriormente enunciados, sendo que o que estará sob maior atenção será o do ponto 4.2.3.1, o qual foi utilizado na

determinação dos dados que irão ser utilizados na análise fiabilística que posteriormente será realizada.

4.2.3.1 Resistência Dielétrica (*Dielectric Breakdown*)

Neste tipo de teste é medida a resistência dielétrica do óleo, que se caracteriza por ser a medida de tensão mínima à qual se verifica a formação de arcos eléctricos no seio do óleo isolante. É a medida de resistência que o óleo isolante apresenta a tensões eléctricas. Quando o óleo apresenta um baixo valor de resistência dielétrica, este facto pode indicar a presença de contaminantes, tais como água, partículas provenientes de desgaste ou oxidação.

Neste tipo de teste são utilizados aparelhos que fazem passar uma determinada tensão na amostra de óleo. Essa amostra está posicionada entre dois eléctrodos, que fazem a passagem da tensão aplicada. O valor dessa tensão vai aumentando e quando se verifica o aparecimento de um arco eléctrico o teste é interrompido e medido a resistência dielétrica.

De acordo com o manual técnico TM 5-686 (1998), as normas mais utilizadas na implementação deste tipo de teste é a ASTM D-877 e a ASTM D-1816.

No caso de estudo que será apresentado posteriormente, os dados que foram utilizados na análise fiabilística foram obtidos através de um teste deste tipo, em que para além de se ter sujeitado a amostra de óleo isolante a uma determinada tensão, sempre crescente de ensaio em ensaio, se mediu o tempo até ao aparecimento do arco eléctrico, ou seja, até à falha. Na figura seguinte apresenta-se uma caracterização dos equipamentos utilizados nestes ensaios.



Figura 4.5. Medidor de Resistência Dielétrica. Fonte: (<http://www.baur.at/en/products/isolieroelpruefung/dta-100-c.html>)

4.2.3.2 *Número de Neutralização (Neutralization Number)*

É a medida da concentração de ácidos presentes no óleo isolante. Essa concentração aumenta com o aumento dos níveis de oxidação do óleo, fruto do envelhecimento em serviço, o que faz com que o número de neutralização do óleo aumente. Ao verificar-se um elevado número de neutralização, pode concluir-se que o óleo está oxidado ou foi contaminado por algum material com que tenha estado em contacto (TM 5-686, 1998; WEG , s.d.).

De acordo com o manual técnico TM 5-686 (1998), a norma mais utilizada na implementação deste tipo de teste é a ASTM D-974.

4.2.3.3 *Tensão Superficial (Interfacial Tension)*

É a medida da tensão necessária à ruptura da película de óleo existente numa interface entre o óleo e outro fluido. Quando certos contaminantes, tais como sabões, vernizes, produtos de corrosão e oxidação estão presentes no óleo, a resistência à ruptura da película diminui consideravelmente, o que faz com que seja necessária menos tensão aplicada (TM 5-686, 1998; WEG , s.d.).

De acordo com o manual técnico TM 5-686 (1998), as normas mais utilizadas na implementação deste tipo de teste é a ASTM D-971 e a ASTM D-2285.

4.2.3.4 *Factor de Potência (Power Factor)*

O factor de potência indica a perda das propriedades dieléctricas por parte do óleo isolante. Um elevado factor de potência é uma indicação da presença de contaminantes ou produtos de corrosão no seio do óleo, que fazem com que mais energia seja perdida sob a forma de calor. O factor de potência é a medida do co-seno do ângulo de fase entre uma tensão aplicada e a corrente resultante (TM 5-686, 1998; WEG , s.d.).

De acordo com o manual técnico TM 5-686 (1998), a norma mais utilizada na implementação deste tipo de teste é a ASTM D-924.

4.2.3.5 *Análise da coloração (Color Test)*

O teste de cor é feito periodicamente sob a forma de consecutivas amostras retiradas ao longo do tempo em que o óleo está em operação. Para óleos em serviço, o aumento do índice de coloração, ou seja, o aparecimento de tonalidades mais escuras significa a presença de contaminantes ou agentes deterioradores. A análise é feita comparando a coloração das amostras colhidas com cartas normalizadas (TM 5-686, 1998; WEG , s.d.).

De acordo com o manual técnico TM 5-686 (1998), a norma mais utilizada na implementação deste tipo de teste é a ASTM D-1500.

4.2.3.6 *Análise da Densidade Relativa (Density Test)*

É a relação dos pesos de iguais volumes de óleo e água. Neste contexto tem uma limitada capacidade de determinação da qualidade de um óleo.

Em regiões muito frias, este parâmetro é utilizado para determinar o eventual aparecimento de gelo e se este ficará alojado sob a superfície do óleo isolante, fazendo com que existam micro arcos eléctricos criados entre os condutores do transformador, não sendo esta situação de todo desejável.

De acordo com o manual técnico TM 5-686 (1998), a norma mais utilizada na implementação deste tipo de teste é a ASTM D-1533.

4.2.3.7 *Ponto de Inflamação (Flashpoint)*

É a medida da temperatura mais baixa para a qual os vapores do óleo formam uma mistura inflamável com o ar. É um indicador da volatilidade do óleo isolante (TM 5-686, 1998; WEG , s.d.).

De acordo com o manual técnico TM 5-686 (1998), a norma mais utilizada na implementação deste tipo de teste é a ASTM D-1533.

4.2.3.8 Medição do teor de água (Water content)

É a medida da percentagem de água que se encontra na mistura água-óleo isolante. Um baixo teor de água é necessário á obtenção de uma adequada medida de resistência dieléctrica, bem como a manutenção das perdas dieléctricas em níveis aceitáveis (TM 5-686, 1998; WEG , s.d.).

De acordo com o manual técnico TM 5-686 (1998), a norma mais utilizada na implementação deste tipo de teste é a ASTM D-1533.

Capítulo 5

Caso de Estudo

5.1 Introdução

No presente capítulo pretende-se realizar uma demonstração de um caso de estudo com recurso a uma aplicação prática relacionada com o teste de resistência dieléctrica a óleos de transformadores, tal como referido no capítulo anterior como sendo um dos ensaios utilizados na análise de óleos isolantes.

Este tipo de testes ou ensaios pretende verificar o grau de contaminação dos óleos utilizados para arrefecimento e isolamento dos transformadores. Um dos objectivos é verificar a sua característica dieléctrica ou isolante, sendo para tal medida e verificada a tensão eléctrica mínima à qual se verifica a formação de arcos eléctricos no seio do óleo isolante.

Se o óleo testado apresenta um baixo valor de resistência dieléctrica, este facto pode indicar a presença de contaminantes, tais como água, partículas provenientes de desgaste ou oxidação, sendo considerado o óleo como “em falha”, exigindo-se a sua substituição.

No presente caso de estudo os dados utilizados na análise fiabilística foram obtidos através de um teste deste tipo, em que para além de se ter sujeitado a amostra de óleo isolante a uma determinada tensão, sempre crescente de ensaio em ensaio, se mediu o tempo até ao aparecimento do arco eléctrico, ou seja, até à falha.

Como nas aplicações reais este tempo até à falha pode significar na maioria dos casos uma grande quantidade de anos, não faria sentido realizar estes ensaios sujeitando o

óleo a uma tensão eléctrica idêntica à tensão de serviço, esperando obter dados relativamente à sua falha.

Assim, surge a necessidade de utilizar os ensaios acelerados de vida promovendo o surgimento da falha em tempos muito mais reduzidos. A partir dos resultados obtidos nos ensaios acelerados com tensões eléctricas mais elevadas será possível extrapolar o tempo até à falha em condições normais e assim conhecer a distribuição probabilística e estimar a distribuição de vida em condições normais de operação do óleo em causa. Estes testes de vida acelerados fornecem um ganho de tempo e uma redução de custos relativamente a ensaios normais.

5.2 Ensaios de Resistência Dielétrica

No presente caso de estudo, ao invés de serem utilizados dados reais, correspondentes ao tempo até à falha de um determinado óleo isolante de um transformador, serão utilizados dados referenciados num estudo semelhante, publicados em 1972 no artigo “*Graphical Analysis of Accelerated life Test Data with the Inverse Power Law Model*” de Wayne Nelson.

De notar que ao referir que os dados utilizados não são reais, quer transmitir-se a ideia de que os dados não foram obtidos por ensaios realizados propositadamente para a presente dissertação, mas sim utilizados dados já obtidos em ensaios acelerados realizados pelo autor anteriormente enunciado.

A não utilização de dados reais na presente análise fiabilística foi motivada pela incapacidade de meios na Área Departamental de Engenharia Mecânica do ISEL e por não se ter tido acesso a informação por parte de outras entidades. Optou-se então pela pesquisa e utilização de dados obtidos através de ensaios acelerados publicados em literatura especializada, nomeadamente em artigos da especialidade, aproveitando apenas a informação relativa aos testes para desenvolver a metodologia a aplicar.

Na análise fiabilística a realizar, o modelo que irá ser utilizado no cálculo dos vários parâmetros será o Modelo da Lei da Potência Inversa, acompanhando assim a metodologia apresentada no artigo de Wayne Nelson.

De acordo com Nelson (1972), o conjunto de dados foi obtido mediante a realização de diversos testes acelerados de vida, sujeitando um óleo isolante de um transformador eléctrico a várias tensões, até que se verificasse a falha, ou seja, aparecimento de arcos eléctricos no seio do óleo, como explicado no ponto anterior. Na tabela seguinte evidenciam-se os dados utilizados na presente análise fiabilística.

Tabela 5.1. Tempos até à Falha do Ensaio Acelerado de Resistência Dielétrica. Adaptado de: (Nelson, 1972)

Tempos até à Falha do Ensaio Acelerado de Resistência Dielétrica [min]						
26 [kV]	28 [kV]	30 [kV]	32 [kV]	34 [kV]	36 [kV]	38 [kV]
5,79	68,85	7,74	0,27	0,19	0,35	0,09
1579,52	108,29	17,05	0,40	0,78	0,59	0,39
2323,70	110,29	20,46	0,69	0,96	0,96	0,47
	426,07	21,02	0,79	1,31	0,99	0,73
	1067,50	22,66	2,75	2,78	1,69	0,74
		43,40	3,91	3,16	1,97	1,13
		47,30	9,88	4,15	2,07	1,40
		139,07	13,95	4,67	2,58	2,38
		144,12	15,93	4,85	2,71	
		175,88	27,80	6,50	2,90	
		194,90	53,24	7,35	3,67	
			82,85	8,01	3,99	
			89,29	8,27	5,35	
			100,58	12,06	13,77	
			215,10	31,75	25,50	
				32,52		
				33,91		
				36,71		
				72,89		

De referir que os dados anteriormente apresentados são relativos a tempos até à falha, ou seja, esperou-se efectivamente o aparecimento da falha.

Da tabela 5.1 descartou-se o conjunto de dados relativo ao ensaio efectuado a uma tensão eléctrica de 26 [kV] por apresentar um número pouco significativo de resultados, bem como uma gama de valores com alguma discrepância.

5.3 Metodologia

A metodologia usada no presente caso de estudo passa por utilizar os dados de tempo até à falha de óleos de transformadores e assenta no modelo matemático de extrapolação da Lei da Potência Inversa onde a variável de aceleração utilizada é a tensão eléctrica.

Como objectivo do presente trabalho pretende-se realizar a análise fiabilística utilizando duas abordagens distintas. A primeira abordagem visa a implementação de um método detalhado de análise, onde se utiliza o software Weibull++ 8 para ajustar a distribuição estatística que mais se adequa aos dados dos testes acelerados, calculando os respectivos parâmetros da distribuição, sendo de seguida implementadas as expressões características do modelo de extrapolação da Lei da Potência Inversa. Posteriormente utiliza-se metodologias gráficas para obtenção dos parâmetros fiabilísticos desejados. Por outro lado a segunda abordagem visa o estudo e análise do caso de estudo recorrendo exclusivamente ao software ALTA 8, onde são inseridos directamente os dados dos testes acelerados e utilizado directamente o modelo da Lei da Potência Inversa, obtendo-se directamente os valores pretendidos.

De seguida é apresentada a metodologia implementada em cada método de análise utilizado.

- **Método Detalhado**

- 1- Para cada conjunto de dados, referente ao teste acelerado do óleo isolante a uma determinada tensão eléctrica, verificar qual a distribuição estatística que melhor se adequa;
- 2- Determinar os parâmetros da distribuição estatística (factor de forma β e factor de escala η);
- 3- Determinar o valor médio do factor de forma β (β_{med});
- 4- Determinar os valores do factor de escala η ajustados ao valor médio de β (β_{med});
- 5- Determinar os parâmetros n e K característicos do modelo da Lei da Potência Inversa;
- 6- Determinar os valores correspondentes à vida característica η para as várias tensões eléctricas de teste acelerado e para normal operação;

- 7- Determinar os tempos correspondentes às diferentes percentagens de probabilidade de falha para as condições aceleradas de teste e de normal operação;
 - 8- Determinar os diversos factores de aceleração;
- **Análise realizada no software ALTA 8**
 - 1- Inserir os dados dos testes acelerados relativos às diferentes tensões eléctricas;
 - 2- Escolha do modelo de extrapolação (Modelo da Lei da Potência Inversa);
 - 3- Determinar os diversos parâmetros característicos do modelo da Lei da Potência Inversa;
 - 4- Determinar os tempos correspondentes às diferentes percentagens de probabilidade de falha para as condições aceleradas de teste e de normal operação;
 - 5- Determinar os diversos factores de aceleração;

De seguida são desenvolvidas e implementadas as metodologias anteriormente explicitadas.

5.4 Desenvolvimento do Trabalho

5.4.1 Método Detalhado

No presente ponto pretende-se implementar um método detalhado de análise de dados de testes acelerados de vida, utilizando para isso a distribuição que melhor se ajusta empregando-se posteriormente as expressões características do modelo da Lei da Potência Inversa que foram descritas no ponto 3.4.3 do presente documento.

No desenvolvimento do método é utilizado o software Weibull++ 8 da Reliasoft na determinação dos vários parâmetros da distribuição, evitando assim a utilização de tabelas e folhas já concebidas para a implementação e determinação manual dos mesmos parâmetros, evitando-se assim a propagação de erros.

Nos pontos seguintes são apresentados as diversas etapas de cálculo necessárias à determinação dos vários parâmetros e constantes a determinar.

5.4.1.1 Ajuste à Distribuição Estatística

Para determinar qual a distribuição estatística que melhor caracteriza os dados utilizados, utilizou-se o software Weibull++ 8 da Reliasoft.

De acordo com Reliability HotWire 56 (2009), o programa permite realizar um teste de aderência para determinar qual o tipo de distribuição que melhor se adequa aos dados inseridos, apoiando-se na implementação de três testes estatísticos, sendo eles: o Teste de Kolmogorov-Smirnov, o Teste do Coeficiente de Correlação Normalizado e o Teste do Valor de Máxima Verossimilhança, representados nas colunas das figuras seguintes por: AVGOF, AVPLOT e LKV, respectivamente.

O software procede à classificação das distribuições que melhor se adequam, utilizando para isso uma escala numérica crescente. Essa escala é determinada utilizando um método matemático assente em factores de ponderação, definidos por defeito pelo sistema.

Para facilitar a compreensão da metodologia implementada, os diversos grupos de dados serão denominados respectivamente por: Ensaio a 28 kV; Ensaio a 30 kV; Ensaio a 32 kV; Ensaio a 34 kV; Ensaio a 36 kV; Ensaio a 38 kV.

De seguida serão apresentados os resultados obtidos no teste de aderência à distribuição estatística realizados no software.

5.4.1.1.1 Teste de Aderência para 28 [kV]

Depois de introduzidos os dados relativos ao teste acelerado para 28 [kV] no software Weibull++ 8, obteve-se os seguintes resultados do Teste de Aderência.

Distribuições e Ranqueamento		Distribuição	RAVGOF	RAVPLOT	RLKV	DESV
<input checked="" type="checkbox"/> Exponencial-1P	6	1 Exponencial-1P	5	4	6	540
<input checked="" type="checkbox"/> Exponencial-2P	3	2 Exponencial-2P	6	7	2	410
<input checked="" type="checkbox"/> Normal	5	3 Normal	3	6	7	530
<input checked="" type="checkbox"/> Lognormal	2	4 Lognormal	2	2	3	250
<input checked="" type="checkbox"/> Weibull-2P	4	5 Weibull-2P	4	3	5	440
<input checked="" type="checkbox"/> Weibull-3P	1	6 Weibull-3P	1	1	1	100
<input checked="" type="checkbox"/> Gama	5	7 Gama	7	5	4	530

Figura 5.1. Teste de Aderência para 28 [kV].

Observando a figura anterior constata-se que o resultado do teste de aderência determina que a distribuição de Weibull tri-paramétrica é a que melhor se adequa ao conjunto de dados do ensaio realizado a 28 [kV].

5.4.1.1.2 Teste de Aderência para 30 [kV]

Depois de introduzidos os dados relativos ao teste acelerado para 30 [kV] no software Weibull++ 8, obteve-se os seguintes resultados do Teste de Aderência.

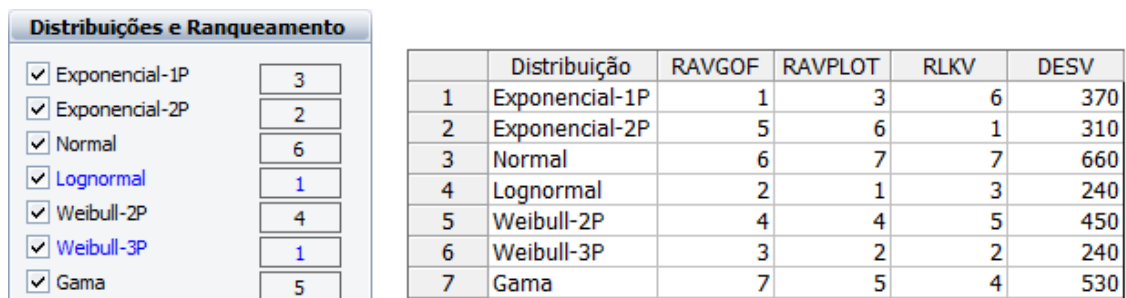


Figura 5.2. Teste de Aderência para 30 [kV].

Observando a figura anterior constata-se que o resultado do teste de aderência determina que a distribuição de Weibull tri-paramétrica e a distribuição Lognormal são as que melhor se adequam ao conjunto de dados do ensaio realizado a 30 [kV].

5.4.1.1.3 Teste de Aderência para 32 [kV]

Depois de introduzidos os dados relativos ao teste acelerado para 32 [kV] no software Weibull++ 8, obteve-se os seguintes resultados do Teste de Aderência.



Figura 5.3. Teste de Aderência para 32 [kV].

Observando a figura anterior constata-se que o resultado do teste de aderência determina que a distribuição de Weibull tri-paramétrica é a que melhor se adequa ao conjunto de dados do ensaio realizado a 32 [kV].

5.4.1.1.4 Teste de Aderência para 34 [kV]

Depois de introduzidos os dados relativos ao teste acelerado para 34 [kV] no software Weibull++ 8, obteve-se os seguintes resultados do Teste de Aderência.



Figura 5.4. Teste de Aderência para 34 [kV].

Observando a figura anterior constata-se que o resultado do teste de aderência determina que a distribuição Weibull tri-paramétrica é a que melhor se adequa ao conjunto de dados do ensaio realizado a 34 [kV].

5.4.1.1.5 Teste de Aderência para 36 [kV]

Depois de introduzidos os dados relativos ao teste acelerado para 36 [kV] no software Weibull++ 8, obteve-se os seguintes resultados do Teste de Aderência.



Figura 5.5. Teste de Aderência para 36 [kV].

Observando a figura anterior constata-se que o resultado do teste de aderência determina que a distribuição Lognormal é a que melhor se adequa ao conjunto de dados do ensaio realizado a 36 [kV].

5.4.1.1.6 Teste de Aderência para 38 [kV]

Depois de introduzidos os dados relativos ao teste acelerado para 38 [kV] no software Weibull++ 8, obteve-se os seguintes resultados do Teste de Aderência.

Distribuições e Ranqueamento		Distribuição	RAVGOF	RAVPLOT	RLKV	DESV
<input checked="" type="checkbox"/> Exponencial-1P	5	1 Exponencial-1P	5	5	5	500
<input checked="" type="checkbox"/> Exponencial-2P	2	2 Exponencial-2P	2	6	1	190
<input checked="" type="checkbox"/> Normal	6	3 Normal	6	7	7	660
<input checked="" type="checkbox"/> Lognormal	4	4 Lognormal	3	4	6	460
<input checked="" type="checkbox"/> Weibull-2P	1	5 Weibull-2P	1	2	2	160
<input checked="" type="checkbox"/> Weibull-3P	3	6 Weibull-3P	4	1	4	370
<input checked="" type="checkbox"/> Gama	4	7 Gama	7	3	3	460

Figura 5.6. Teste de Aderência para 38 [kV].

Observando a figura anterior constata-se que o resultado do teste de aderência determina que a distribuição de Weibull bi-paramétrica é a que melhor se adequa ao conjunto de dados do ensaio realizado a 38 [kV].

5.4.1.1.7 Escolha da distribuição a utilizar

De acordo com a análise realizada às informações apresentadas nas figuras anteriores, verifica-se que a maior parte dos testes de aderência aponta a distribuição de Weibull tri-paramétrica como aquela que melhor se ajusta aos dados apresentados. No caso dos ensaios realizados com uma tensão de 30 [kV] e 36 [kV], o teste de aderência indica como mais adequada a distribuição Lognormal. No entanto, para estes casos, analisando mais em pormenor os testes estatísticos que sustentam essa decisão, os mesmos mostram que o valor de desvio da adequação relativamente à distribuição de Weibull tri-paramétrica é muito reduzido, pelo que se pode optar por ajustar a esta última sem incorrer num erro com impacto significativo nos resultados. No caso do ensaio para 30 [kV] o desvio apresenta o valor zero, pelo que se verifica que o mesmo pode ser ajustado quer à distribuição de Weibull tri-paramétrica quer à distribuição Lognormal.

Utilizando o software Weibull++ 8, aplicou-se a distribuição Weibull tri-paramétrica aos diversos conjuntos de dados dos ensaios e determinou-se os três parâmetros característicos dessa distribuição, ou seja, factor de forma (β), factor de escala (η) e o factor de posição (γ). Os resultados são apresentados na tabela seguinte:

Tabela 5.2. Síntese de resultados dos parâmetros da distribuição Weibull tri-paramétrica relativos a cada ensaio.

Parâmetros da Distribuição	28 [kV]	30 [kV]	32 [kV]	34 [kV]	36 [kV]	38 [kV]
β	0,5691	0,8698	0,4928	0,7567	0,7934	1,6730
η [min]	186,2001	65,0608	22,6897	12,0137	3,7253	1,1985
γ [min]	66,7124	6,1439	0,2555	0,0618	0,2679	-0,1489

Observando a tabela 5.2 verifica-se que na maioria dos ensaios (ensaios a 32 [kV], 34 [kV], 36 [kV] e 38 [kV]), o parâmetro de localização (γ) apresenta valores muito próximos de zero, o que permite simplificar a análise assumindo este valor como nulo, permitindo desta forma adoptar a distribuição de Weibull bi-paramétrica nos desenvolvimentos futuros do presente trabalho.

5.4.1.2 Determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull bi-paramétrica para cada ensaio

Depois de seleccionada a distribuição de Weibull bi-paramétrica como a distribuição a utilizar na análise fiabilística, procede-se para cada ensaio à determinação dos dois parâmetros β e η , representando respectivamente o factor de forma e o factor de escala desta distribuição.

O parâmetro β é um factor adimensional e pode também ser caracterizado por ser o declive da recta traçada no gráfico de probabilidade de Weibull, pelo que se verifica que com o seu aumento o declive da recta também aumenta. Este parâmetro é normalmente dividido em três grupos, nomeadamente para β menor que um ($\beta < 1$), β igual a um ($\beta = 1$) e β maior do que um ($\beta > 1$).

Para $\beta < 1$, as avarias são caracterizadas por serem do tipo infantil, tendo a sua origem em defeitos relacionados com o projecto, instalação ou na operação. No gráfico da

função de probabilidade de falha, verifica-se uma maior densidade na parte inicial da vida do componente. Para $\beta = 1$, a distribuição de Weibull assume a relação da distribuição exponencial, verificando-se uma taxa de avarias constante ao longo do tempo, o que significa que as avarias são verificadas aleatoriamente no período de vida útil. Para $\beta > 1$, as avarias são características do período de desgaste ou envelhecimento aproximando-se a uma distribuição normal quando o valor do factor de forma é próximo de 3,4 (Reliability Hotwire 14, 2002).

A determinação dos parâmetros é realizada directamente no software Weibull++ 8, sendo apresentados os resultados obtidos de seguida.

5.4.1.2.1 Parâmetros β e η para 28 [kV]

Os valores referentes aos parâmetros β e η determinados pelo software para o ensaio de 28 [kV] são apresentados na figura seguinte.

Resumo da Análise	
Parâmetros	
Beta	0,978756
Eta (Min)	352,477489

Figura 5.7. Parâmetros β e η para 28 [kV].

5.4.1.2.2 Parâmetros β e η para 30 [kV]

Os valores referentes aos parâmetros β e η determinados pelo software para o ensaio de 30 [kV] são apresentados na figura seguinte.

Resumo da Análise	
Parâmetros	
Beta	1,058843
Eta (Min)	77,582570

Figura 5.8. Parâmetros β e η para 30 [kV].

5.4.1.2.3 Parâmetros β e η para 32 [kV]

Os valores referentes aos parâmetros β e η determinados pelo software para o ensaio de 32 [kV] são apresentados na figura seguinte.

Resumo da Análise	
Parâmetros	
Beta	0,561428
Eta (Min)	25,937171

Figura 5.9. Parâmetros β e η para 32 [kV].

5.4.1.2.4 Parâmetros β e η para 34 [kV]

Os valores referentes aos parâmetros β e η determinados pelo software para o ensaio de 34 [kV] são apresentados na figura seguinte.

Resumo da Análise	
Parâmetros	
Beta	0,770855
Eta (Min)	12,222529

Figura 5.10. Parâmetros β e η para 34 [kV].

5.4.1.2.5 Parâmetros β e η para 36 [kV]

Os valores referentes aos parâmetros β e η determinados pelo software para o ensaio de 36 [kV] são apresentados na figura seguinte.

Resumo da Análise	
Parâmetros	
Beta	0,889111
Eta (Min)	4,291830

Figura 5.11. Parâmetros β e η para 36 [kV].

5.4.1.2.6 Parâmetros β e η para 38 [kV]

Os valores referentes aos parâmetros β e η determinados pelo software para o ensaio de 38 [kV] são apresentados na figura seguinte.

Resumo da Análise	
Parâmetros	
Beta	1,363087
Eta (Min)	1,000947

Figura 5.12. Parâmetros β e η para 38 [kV].

5.4.1.2.7 Síntese de resultados dos parâmetros da distribuição

Calculados os parâmetros β e η da distribuição de Weibull bi-paramétrica de cada ensaio, apresenta-se de seguida o gráfico de probabilidade de Weibull que contém todas as rectas relativas a cada ensaio.

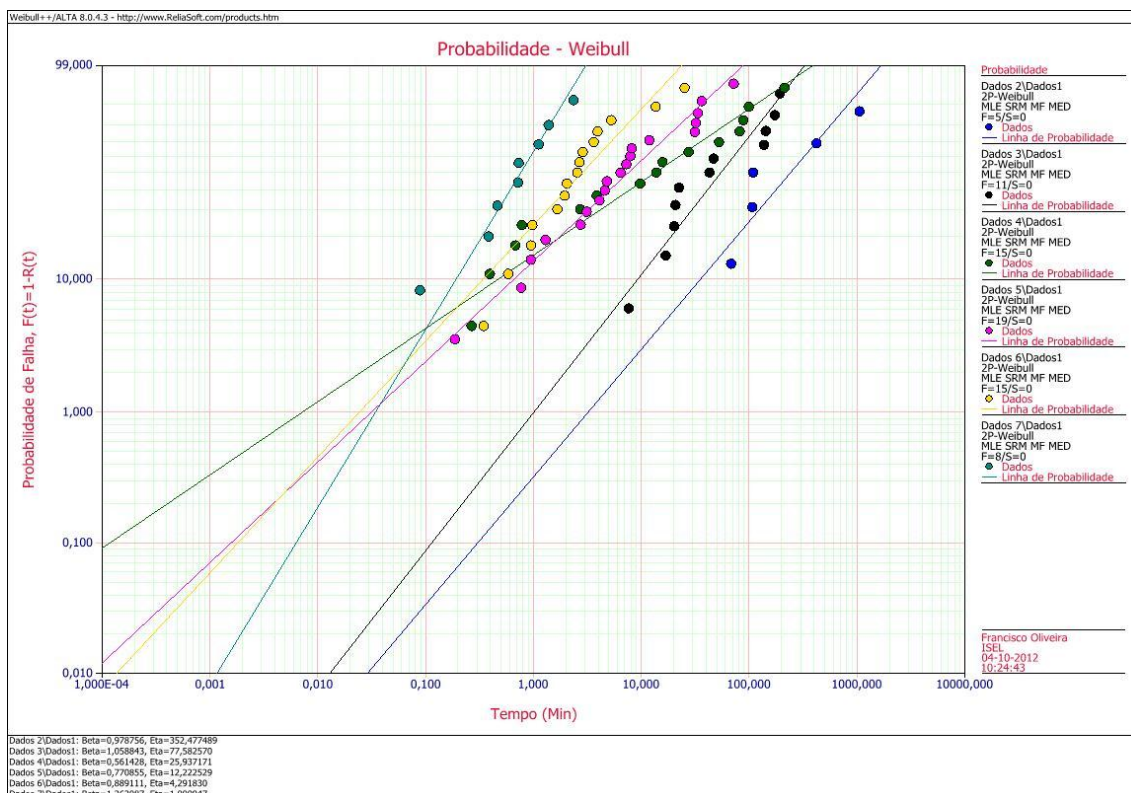


Figura 5.13. Gráfico de probabilidade de Weibull dos dados dos ensaios acelerados.

De acordo com Nelson (1972), o modelo da Lei da Potência Inversa estipula que o parâmetro β , ou seja, o factor de forma, tem de ser constante, o que significa que as rectas representadas no gráfico de probabilidade de Weibull tenham um declive muito semelhante entre si. Esta premissa possibilitará que os vários testes acelerados possam ser comparados entre si, permitindo assim a extrapolação dos parâmetros para condições de normal operação.

Observando a figura 5.13 constata-se que efectivamente as rectas representadas possuem um declive aproximado entre si, excepção feita à recta que caracteriza o ensaio a 32 [kV]. Na tabela seguinte podem ser consultados os parâmetros determinados anteriormente, relativos a cada recta que caracteriza o respectivo ensaio.

Tabela 5.3. Síntese de resultados dos parâmetros da distribuição de Weibull relativos a cada ensaio.

Parâmetros da Distribuição	28 [kV]	30 [kV]	32 [kV]	34 [kV]	36 [kV]	38 [kV]
β	0,9788	1,0588	0,5614	0,7709	0,8891	1,3631
η [min]	352,4775	77,5826	25,9372	12,2225	4,2918	1,0009

Como se sabe, o parâmetro β na distribuição de Weibull é denominado de parâmetro de forma, pelo que influencia directamente a forma da curva de probabilidade, sendo possível verificar na figura 2.10. Observando a tabela anterior, verifica-se que o valor de β para as várias gamas de tensão de ensaio se encontra em torno do valor 1. Caso se admitisse que o valor genérico de β era de 1, a distribuição passaria de uma distribuição de Weibull para uma distribuição Exponencial, no entanto, no ponto seguinte, será determinado um valor médio para o parâmetro β .

5.4.1.3 Determinação do valor médio do parâmetro de forma β

De acordo com Kececioglu (2002), o valor médio do parâmetro β é determinado recorrendo ao cálculo de uma média ponderada. Essa metodologia de cálculo é implementada devido ao número divergente de amostras entre cada ensaio, pelo que terá de ser tido em conta o peso que cada grupo de amostras tem no parâmetro β . A equação que permite a determinação do valor médio do parâmetro β (β_{med}) é apresentada de seguida.

$$\beta_{med} = \frac{\sum_{i=1}^6 N_i \cdot \beta_i}{\sum_{i=1}^6 N_i} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

onde:

N_i = Tamanho da amostra de cada ensaio;

β_i = Valor do parâmetro de forma β de cada ensaio;

Na tabela 5.4 apresentam-se os valores de N_i correspondentes a cada ensaio:

Tabela 5.4. Valores de N_i de cada ensaio.

	28 [kV]	30 [kV]	32 [kV]	34 [kV]	36 [kV]	38 [kV]
N_i	5	11	15	19	15	8

Substituindo na equação 5.1 os valores de β da tabela 5.3 e os valores de N_i da tabela 5.4 obtém-se o seguinte valor para β_{med} :

$$\beta_{med} = \frac{5 \times 0,9788 + 11 \times 1,0588 + 15 \times 0,5614 + 19 \times 0,7709 + 15 \times 0,8891 + 8 \times 1,3631}{5 + 11 + 15 + 19 + 15 + 8} (=)$$

$$(\Rightarrow) \beta_{med} = \frac{63,8502}{73} = 0,8747$$

De acordo com os cálculos realizados anteriormente verifica-se que o valor médio de β , tendo em conta o peso de cada ensaio acelerado, é de 0,8747.

Segundo Kececioglu (2002), ao calcular o novo valor de β_{med} , será necessário determinar os novos valores do parâmetro de escala (η) correspondentes. Essa determinação é apresentada no ponto seguinte.

5.4.1.4 Determinação dos novos valores do parâmetro η para cada ensaio

De acordo com Kececioglu (2002), o parâmetro η , ou factor de escala, caracteriza o tempo correspondente a uma probabilidade de falha de 63,2%. Os novos valores de η são determinados através do método dos mínimos quadrados, que permite determinar a recta que melhor se ajusta aos dados dos ensaios acelerados. Indica-se de seguida as expressões utilizadas na sua determinação.

$$\bar{y}_i = \beta_{med} \cdot \bar{x}_i - \beta_{med} \cdot \ln(\eta_i) \quad (\Rightarrow) \quad \ln(\eta_i) = \bar{x}_i - \frac{\bar{y}_i}{\beta_{med}} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{N_i} \cdot \sum_{j=1}^{N_i} \ln[-\ln(1 - MR_{ij})] \quad (\text{Eq. 5.3})$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N_i} \cdot \sum_{j=1}^{N_i} \ln[T_{ij}] \quad (\text{Eq. 5.4})$$

onde:

N_i = Tamanho da amostra de cada ensaio;

T_{ij} = Tempo decorrido até à falha, correspondente a cada rank do ensaio;

MR_{ij} = Rank médio para cada ensaio, determinado pela aproximação de Bernard;

Para determinar o respectivo valor de η de cada ensaio é necessário trabalhar matematicamente a expressão 5.2, aplicando logaritmos. A expressão que resulta é apresentada de seguida.

$$\eta_i = e^{\bar{x}_i - \frac{\bar{y}_i}{\beta_{med}}} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

A determinação dos respectivos valores de MR_{ij} é feita recorrendo à aproximação de Bernard para o cálculo dos rank's medianos da distribuição de Weibull. Essa aproximação pode ser caracterizada pela seguinte expressão:

$$MR_{ij} = \frac{i-0,3}{N_i+0,4} \quad (\text{Eq. 5.6})$$

onde:

N_i = Tamanho da amostra de cada ensaio;

i = Posição do respectivo rank ($i = 1; 2; \dots; N_i$);

A determinação dos novos valores de η de cada ensaio foi realizada por intermédio de uma folha de cálculo automática, evitando assim a apresentação de todos os valores associados aos diversos passos, podendo no entanto serem consultados no ANEXO I do presente documento. Sendo assim, na tabela 5.5 serão apresentados somente os resultados obtidos para os novos parâmetros η .

Tabela 5.5. Valores de η ajustados ao valor de β_{med} .

	28 [kV]	30 [kV]	32 [kV]	34 [kV]	36 [kV]	38 [kV]
η	361,6631	83,4346	17,1522	11,1049	4,5533	1,1775

Utilizando o software Weibull++ 8, construiu-se um novo gráfico de probabilidade de Weibull referente aos dados de cada ensaio acelerado, forçando os parâmetros β e η a assumirem os valores de β_{med} , bem como os novos valores de η calculados anteriormente. De seguida apresenta-se o gráfico de probabilidade de Weibull obtido.

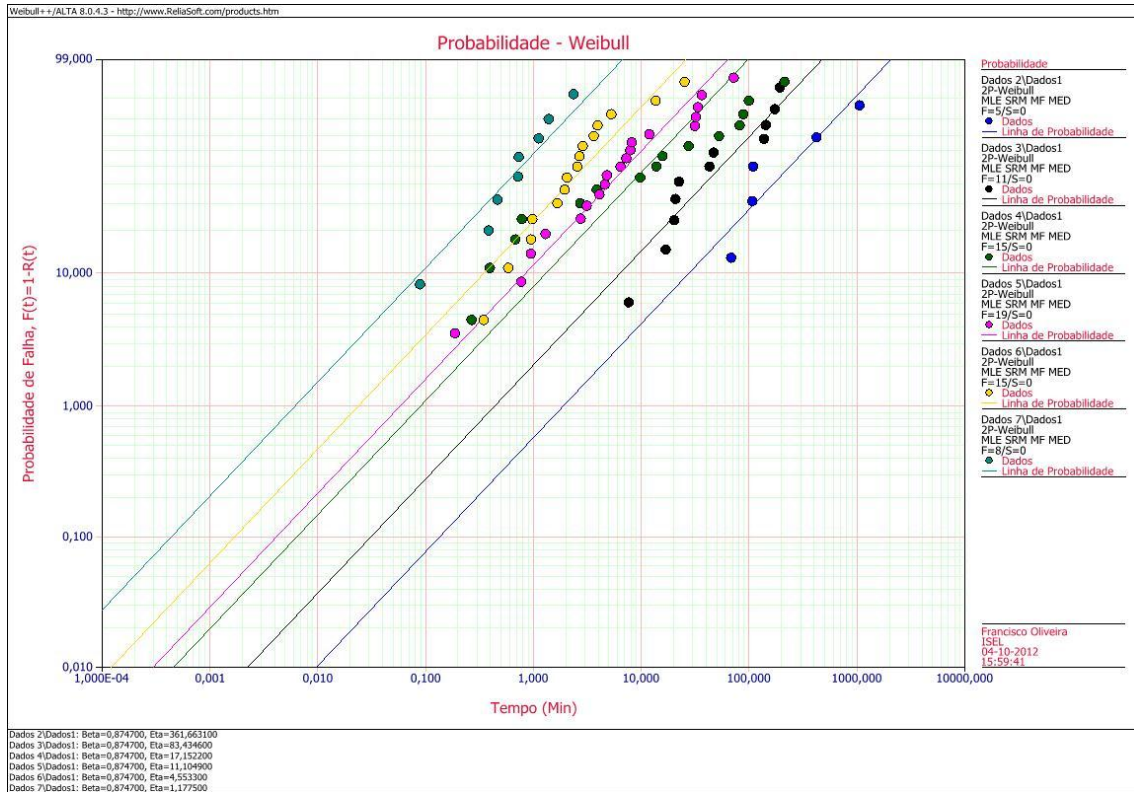


Figura 5.14. Gráfico de probabilidade de Weibull dos dados dos ensaios acelerados para o valor de β_{med} e η actuais.

De acordo com a figura 5.14 constata-se que efectivamente o declive das rectas passou a ser igual.

De seguida irá proceder-se à determinação das constantes n e K características do modelo matemático de extrapolação da Lei da Potência Inversa.

5.4.1.5 Determinação dos parâmetros n e K do modelo da Lei da Potência Inversa

Segundo Kececioglu (2002), os parâmetros n e K característicos do modelo da Lei da Potência Inversa são determinados recorrendo à utilização do método dos mínimos quadrados nos valores do parâmetro η anteriormente calculados, bem como nos valores de tensão característicos de cada ensaio. Para isso começou por linearizar-se os pontos correspondentes, aplicando logaritmos na equação 3.25, como evidenciado na equação 5.7.

$$\ln(\eta_i) = -\ln(K) - n \ln(V_i) \quad (\text{Eq. 5.7})$$

Por outro lado sabe-se que a equação de uma recta genérica num plano é caracterizada pela expressão 5.8.

$$y_i = a + bx_i \quad (\text{Eq. 5.8})$$

Num gráfico que relacione o parâmetro η e os valores de tensão de cada teste acelerado, temos que:

$$y_i = \ln \eta_i \quad (\text{Eq. 5.9})$$

$$x_i = \ln V_i \quad (\text{Eq. 5.10})$$

$$a = -\ln K \quad (\text{Eq. 5.11})$$

$$b = -n \quad (\text{Eq. 5.12})$$

Ao aplicar o método dos mínimos quadrados na determinação dos estimadores dos valores de b e a resultam as seguintes expressões que possibilitam o seu cálculo directamente.

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^6 [(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Eq. 5.13})$$

$$\hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \quad (\text{Eq. 5.14})$$

De um modo análogo, os respectivos parâmetros K e n característicos do modelo da Lei da Potência Inversa são determinados utilizando as equações 5.15. e 5.16, respectivamente.

$$\hat{K} = e^{-\hat{a}} \quad (\text{Eq. 5.15})$$

$$\hat{n} = -\hat{b} \quad (\text{Eq. 5.16})$$

Na tabela 5.6 são apresentados os valores de η_i e V_i utilizados no cálculo dos parâmetros anteriormente explicitados.

Tabela 5.6. Valores de η_i e V_i para determinação dos parâmetros n e K .

V_i [kV]	28	30	32	34	36	38
η_i [min]	361,6631	83,4346	17,1522	11,1049	4,5533	1,1775

Todos os passos de cálculo relativos à determinação dos parâmetros n e K foram realizados por intermédio de uma folha de cálculo automática, presente no ANEXO II do presente documento, evitando assim a apresentação de todos os valores associados

aos diversos passos. De seguida apresentam-se os valores obtidos para os referidos factores.

$$\hat{n} = n = 17,7398$$

$$\hat{K} = K = 7,1675 \times 10^{-29}$$

Substituindo os valores anteriormente determinados na expressão 3.25, obtém-se a equação 5.17, que modela os dados dos testes acelerados de vida segundo o modelo da Lei da Potência Inversa.

$$\eta(V) = \frac{1}{7,1675 \times 10^{-29} \times V^{17,7398}} \quad (\text{Eq. 5.17})$$

Com a expressão anterior, visto já estarem definidas as constantes características dos testes acelerados realizados e que tiveram origem nos dados utilizados no presente caso de estudo, podem agora ser determinados os valores da vida característica para as várias tensões de ensaio, segundo o modelo da Lei da Potência Inversa, bem como extrapolar um valor de vida característica para as condições de normal operação, ou seja, para uma tensão de 20 [kV].

5.4.1.6 Determinação dos valores correspondentes à vida característica η para as várias tensões de teste acelerado e para condições de normal operação

Após determinar os parâmetros n e K que parametrizam a equação 5.17, estão reunidos todos os dados que possibilitam a implementação do modelo da Lei da Potência Inversa ao conjunto de dados utilizado.

Substituindo na equação 5.17 os valores correspondentes às diversas tensões de teste acelerado, bem como a tensão característica de normal operação, obtêm-se os seguintes valores correspondentes à vida característica do óleo isolante para as diversas situações. Os valores são apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.7. Valores da vida característica η para condições aceleradas e de normal operação.

V [kV]	20	28	30	32	34	36	38
η [min]	116037,2408	296,6965	87,2510	27,7681	9,4727	3,4364	1,3169

De acordo com a tabela anterior constata-se que o valor da vida característica do óleo isolante nas condições normais de utilização será de cerca de 116037 minutos, o que corresponde sensivelmente a 1934 horas de operação. Idealizando que o óleo isolante opera 24 horas por dia e 7 dias por semana, o tempo correspondente a uma probabilidade de falha de 63,2% corresponderia a sensivelmente 12 semanas de operação contínua.

Utilizando o software Weibull++ 8, construiu-se um novo gráfico de probabilidade de Weibull para os valores de η anteriormente calculados a partir da expressão característica do modelo da Lei da Potência Inversa. De notar que o parâmetro β assume o valor de β_{med} calculado no ponto 5.4.1.3. Essa representação é evidenciada de seguida.

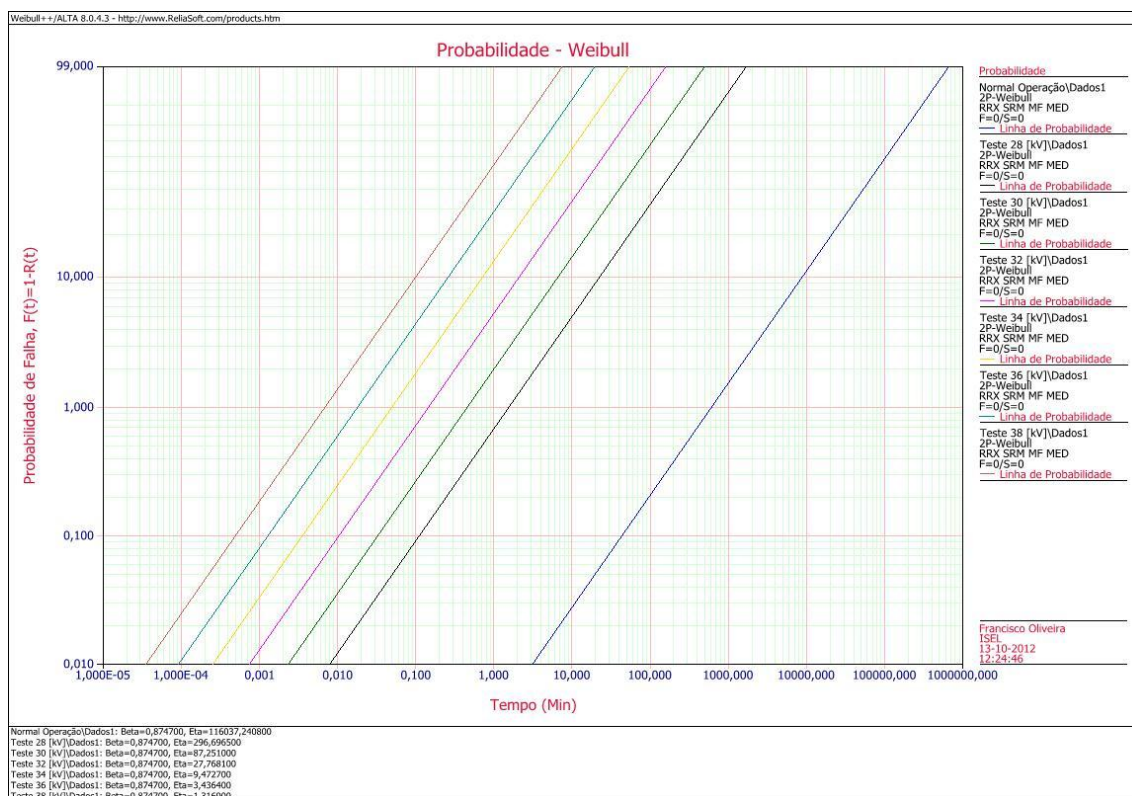


Figura 5.15. Gráfico de probabilidade de Weibull da implementação do modelo da Lei da Potência Inversa.

Observando a figura 5.15 visualiza-se a extrapolação que é feita através do modelo da Lei da Potência Inversa, passando dos dados obtidos nos testes acelerados de vida para as condições que se verificam em normal operação, sendo notório o aumento muito significativo do tempo que corresponde aos diversos valores de probabilidades de falha para as condições de normal operação.

No tópico seguinte serão determinados os tempos que correspondem às diferentes percentagens de probabilidade de falha, nomeadamente 5%, 10%, 50%, 63,2%, 90% e 95%, recorrendo às equações 2.3 e 3.27.

5.4.1.7 Determinação dos tempos correspondentes às diferentes percentagens de probabilidade de falha para condições aceleradas e de normal operação.

De modo a permitir a determinação dos tempos correspondentes às diferentes percentagens de probabilidade de falha para as condições aceleradas e de normal operação, combinaram-se as equações 2.3 e 3.27, resolvendo-as em ordem a t . De seguida apresenta-se a expressão resultante.

$$t = 1 - \left[-\eta(V) \times (\ln(R(t)))^{\frac{1}{\beta_{med}}} \right] \quad (\text{Eq. 5.18})$$

Pretende-se assim calcular os tempos correspondentes a 5%, 10%, 50%, 63,2%, 90% e 95% de probabilidade de falha para as diversas condições de ensaio.

De notar que na expressão são introduzidos os valores da fiabilidade, ou seja, para se determinar uma probabilidade de falha de 95% (0,95) terá de se introduzir o valor de fiabilidade correspondente que é de 5% (0,05). Para os restantes casos o procedimento é semelhante, sendo necessária sempre a introdução do respectivo valor complementar de probabilidade (fiabilidade) para determinar o valor do tempo correspondente à probabilidade de falha desejada.

Substituindo os valores correspondentes ao valor médio do parâmetro β calculado no tópico 5.4.1.3, os valores da vida característica para cada ensaio determinados no tópico 5.4.1.6 e os vários valores correspondentes à probabilidade de falha obtêm-se os valores de tempo a que correspondem.

Na tabela 5.8 são apresentados os respectivos tempos associados aos vários ensaios e valores de probabilidade de falha.

Tabela 5.8. Tempos correspondentes para cada valor de probabilidade de falha analisado.

F(t)	20 [kV] [min]	28 [kV] [min]	30 [kV] [min]	32 [kV] [min]	34 [kV] [min]	36 [kV] [min]	38 [kV] [min]
0,05	3890,3346	10,9447	3,9245	1,9307	1,3175	1,1152	1,0441
0,10	8857,7575	23,6459	7,6596	3,1195	1,7230	1,2623	1,1005
0,50	76317,9917	196,1355	58,3845	19,2629	7,2301	3,2601	1,8661
0,632	115994,7747	297,5854	88,2183	28,7577	10,4692	4,4351	2,3164
0,90	301093,6532	770,8661	227,3983	73,0525	25,5797	9,9167	4,4171
0,95	406780,4680	1041,0975	306,8666	98,3437	34,2074	13,0466	5,6165

Observando a tabela anterior constata-se que os valores correspondentes a uma percentagem de probabilidade de falha de 95% são muito superiores aos valores correspondentes das outras percentagens de probabilidade de falha, o que era o esperado, visto representar o tempo para o qual se estima uma probabilidade de 95% dos bens estarem avariados. O complementar se passa para a percentagem de 5%, onde os tempos esperados são os mínimos apresentados.

No ponto seguinte são determinados os valores correspondentes aos diversos factores de aceleração verificados entre as condições de normal operação e os testes acelerados de vida realizados.

5.4.1.8 Determinação dos factores de aceleração

No modelo de extrapolação da Lei da Potência Inversa o valor do factor de aceleração de um determinado teste acelerado face ao valor de normal operação é obtido através da aplicação da equação 3.37. O factor de aceleração exprime o número de vezes que a vida característica de determinado teste acelerado é menor que a vida característica desse bem para normais condições de operação, tornando-se assim um importante dado.

Sabe-se que a vida característica do óleo isolante para as normais condições de operação é de cerca de 116037 minutos, sendo os valores correspondentes à vida característica do óleo isolante nos vários testes acelerados apresentados na tabela 5.7. Na tabela seguinte apresentam-se os resultados dos diversos factores de aceleração de cada teste acelerado face às condições de normal operação.

Tabela 5.9. Factores de Aceleração dos diversos testes acelerados.

$A_{F_{[20/28]}}$	$A_{F_{[20/30]}}$	$A_{F_{[20/32]}}$	$A_{F_{[20/34]}}$	$A_{F_{[20/36]}}$	$A_{F_{[20/38]}}$
391	1330	4179	12250	33767	88114

De acordo com a tabela 5.9 verifica-se que os valores correspondentes aos factores de aceleração aumentam com o aumento do nível de solicitação verificado no teste acelerado, repercutindo-se no número de vezes que a vida característica obtida no teste acelerado é menor que a verificada para normal operação.

5.4.2 Análise realizada no software ALTA 8

Como referido no ponto 5.3 do presente documento, realiza-se a análise fiabilística recorrendo ao software ALTA 8.

Este programa permite a introdução de diversos tipos de dados obtidos através de testes acelerados de vida, tais como conjuntos de tempos até à falha de um determinado bem, conjuntos de dados de suspensão de testes acelerados de vida, ou de ambos. Permite ainda escolher uma ou diversas variáveis de aceleração utilizadas nos testes, caso da tensão eléctrica, humidade, carga, entre outras. Antes de realizada a análise propriamente dita é necessário escolher o modelo de extrapolação para as condições de normal operação que se pretende utilizar, notando que alguns deles são específicos de certas variáveis de solicitação, como abordado no Capítulo 3 do presente documento.

Uma das desvantagens da utilização directa do software é a falta de percepção para os diferentes passos de cálculo dos diferentes parâmetros, no entanto, rapidamente se torna uma vantagem quando o número de dados dos testes acelerados aumenta significativamente.

O programa utiliza na determinação dos diversos parâmetros e constantes o método da máxima verosimilhança, pelo que divergem um pouco da metodologia implementada no método detalhado apresentado no ponto 5.4.1.

De seguida seguem-se os diferentes passos na determinação dos parâmetros e constantes necessárias à análise fiabilística.

5.4.2.1 Inserção dos dados dos testes acelerados relativos às diferentes Tensões

Um dos primeiros passos necessários à realização da análise dos dados acelerados de vida é a sua introdução no software. Para que seja possível introduzir correctamente os dados é indispensável a personalização do software face ao tipo de dados que se pretende analisar. Neste caso, os dados utilizados são relativos a tempos até à falha, pelo que o software associará que não existem suspensões ou outro tipo de dados de ensaio. É também necessário definir que os dados foram obtidos recorrendo a uma só variável de solicitação, a tensão eléctrica. Define-se ainda o valor da solicitação considerado como característico de normal operação, que se considerou ser de 20 [kV].

A inserção dos dados é feita recorrendo à tabela disponibilizada para o efeito e que serve de ambiente de trabalho no referido software. Na figura seguinte apresenta-se um excerto dos dados inseridos no ALTA 8.

C22			
	Tempo Falha (Min)	Tensão V	Subconjunto ID 1
1	68,85	28	
2	108,29	28	
3	110,29	28	
4	426,07	28	
5	1067,5	28	
6	7,74	30	
7	17,05	30	
8	20,46	30	
9	21,02	30	
10	22,66	30	
11	43,4	30	
12	47,3	30	

Figura 5.16. Inserção dos dados dos testes acelerados no software ALTA 8.

De notar que a figura anterior apenas exemplifica alguns dos dados introduzidos no software, pelo que no total existem 73 linhas de dados introduzidos na tabela, correspondentes ao número de amostras dos dados dos testes acelerados.

5.4.2.2 Escolha do modelo de extrapolação

De um modo análogo à abordagem realizada através do método detalhado, no software ALTA 8 foi escolhido o modelo da Lei da Potência Inversa, que utiliza a distribuição de Weibull, sendo a aplicação do modelo por parte do software de forma automática. De seguida na figura 5.17 evidencia-se o campo onde o modelo de extrapolação é introduzido.

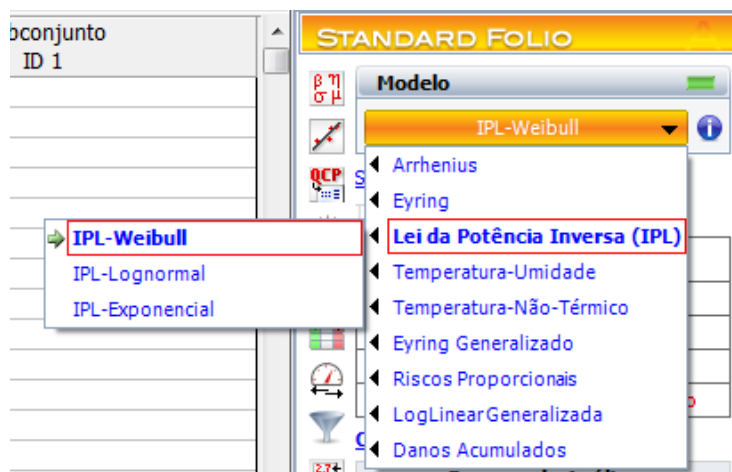


Figura 5.17. Escolha do modelo de extrapolação na análise realizada no software ALTA 8.

5.4.2.3 Determinação dos diversos parâmetros do modelo da Lei da Potência Inversa

O software ALTA 8 disponibiliza um painel onde apresenta os parâmetros característicos do modelo, tais como o parâmetro n , o parâmetro de forma β , o parâmetro de escala ou vida característica η e o parâmetro K . Para que esses parâmetros sejam calculados é necessário que, depois de especificado o modelo utilizado, o modelo da Lei da Potência Inversa, se prima o botão referente à função “Calcular”, posicionada na barra de menu principal no canto superior esquerdo.

Na figura 5.18 são apresentados os dados obtidos para os referidos parâmetros característicos.

Resumo da Análise	
Parâmetros	
Beta	0,785940
K (Min)	5,876099E-29
n	17,772079
Parâmetro de Escala (Estresse em U)	
Eta (Min)	128499,953304
Outras	
Valor da LK	-276,837811

Figura 5.18. Parâmetros característicos do modelo da Lei da Potência Inversa obtidos no software ALTA 8.

De acordo com a figura 5.18 o valor do parâmetro β toma o valor de 0,7859, sendo possível verificar o mesmo na figura 5.19, onde os declives de todas as rectas do gráfico, correspondentes aos dados de ensaio acelerado e às condições de normal operação são iguais, constatando-se assim a aplicação do valor de β a cada uma delas.

O parâmetro η apresenta o valor de 128499 minutos, representando o valor da vida característica para as condições de normal operação, o que corresponde sensivelmente a 2142 horas de operação. Idealizando que o óleo isolante opera 24 horas por dia e 7 dias por semana, o tempo correspondente a uma probabilidade de falha de 63,2% corresponderia a sensivelmente a 13 semanas de operação contínua.

O valor de n será igual a 17,7721 e o valor de K será de $5,8761 \times 10^{-29}$, determinando os parâmetros característicos do modelo da Lei da Potência Inversa.

De um modo análogo à abordagem realizada no método detalhado, apresenta-se o gráfico de probabilidade de falha de Weibull, evidenciado na figura 5.19.

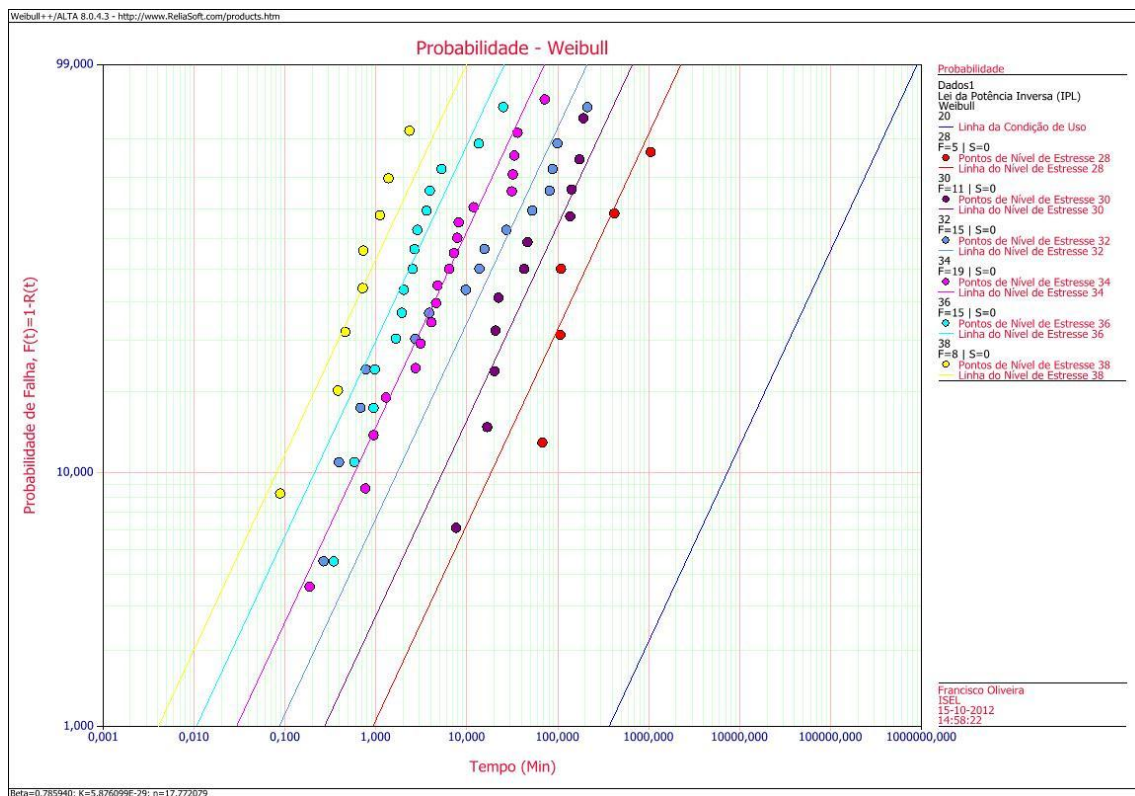


Figura 5.19. Gráfico de probabilidade de falha de Weibull obtido no software ALTA 8.

5.4.2.4 Determinação dos tempos correspondentes às diferentes percentagens de probabilidade de falha para condições aceleradas e de normal operação.

De forma semelhante ao ponto 5.4.1.7, realiza-se no presente tópico a determinação dos tempos correspondentes às diferentes percentagens de probabilidade de falha, nomeadamente para 5%, 10%, 50%, 63,2%, 90 e 95%, para as condições aceleradas e de normal operação.

Para determinar os referidos tempos utilizou-se a ferramenta do software ALTA 8 denominada de “QCP” ou “*Quick Calculation Pad*”. Essa ferramenta permite a determinação de vários resultados referentes aos dados dos ensaios acelerados que se utilizaram, quer nas condições aceleradas quer nas condições de normal operação. De notar que os valores dos parâmetros utilizados na obtenção dos referidos tempos será os que foram automaticamente calculados pelo software.

Na figura 5.20 exemplifica-se a determinação do tempo correspondente a 95% de probabilidade de falha para as condições de normal operação.

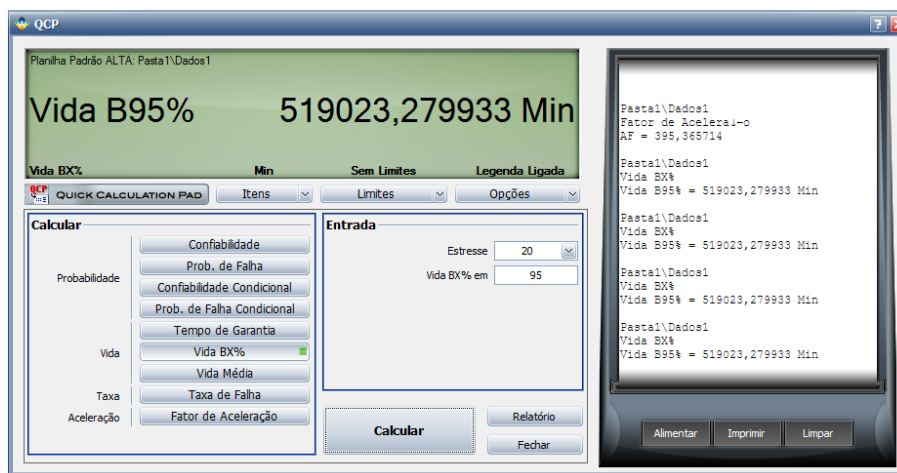


Figura 5.20. Tempo correspondente a 95% de probabilidade de falha para normais condições de operação.

Na tabela 5.10 são apresentados os respectivos tempos associados aos vários ensaios e valores de probabilidade de falha determinados na ferramenta “QCP” do ALTA 8.

Tabela 5.10. Tempos correspondentes para cada valor de probabilidade de falha analisados.

F(t)	20 [kV] [min]	28 [kV] [min]	30 [kV] [min]	32 [kV] [min]	34 [kV] [min]	36 [kV] [min]	38 [kV] [min]
0,05	2935,1769	7,4240	2,1783	0,6918	0,2355	0,0853	0,0326
0,10	7334,9364	18,5523	5,4436	1,7289	0,5886	0,2131	0,0815
0,50	80607,5056	203,8809	59,8230	18,9999	6,4687	2,3424	0,8961
0,632	128446,3240	324,8799	95,3266	30,2751	10,3078	3,7325	1,4279
0,90	371340,3254	939,2325	275,5906	87,5257	29,7999	10,7907	4,1280
0,95	519023,2799	1312,7676	385,1936	122,3349	41,6515	15,0822	5,7697

Observando a tabela 5.10 constata-se que os valores correspondentes a uma percentagem de probabilidade de falha de 95% são muito superiores aos valores correspondentes das outras percentagens de probabilidade de falha, o que era o esperado, visto representar o tempo para o qual se estima uma probabilidade de 95% dos bens estarem avariados. O contrário se passa para a percentagem de 5%, onde os tempos esperados são os mínimos apresentados.

No ponto seguinte são determinados os valores correspondentes aos diversos factores de aceleração verificados entre as condições de normal operação e os testes acelerados de vida realizados.

5.4.2.5 Determinação dos factores de aceleração no software ALTA 8

No modelo de extrapolação da Lei da Potência Inversa o valor do factor de aceleração de um determinado teste acelerado face ao valor de normal operação é obtido através da aplicação da equação 3.37. No entanto, visto se estar a utilizar o software ALTA 8, o mesmo permite determinar os valores dos factores de aceleração de um modo automático, bastando para isso introduzir o nível de solicitação do teste acelerado, ou seja, 28 [kV], 30 [kV], 32 [kV], 34 [kV], 36 [kV] e 38 [kV], respectivamente. Essa determinação é feita face ao valor previamente inserido para o nível de solicitação característico de normal operação do óleo, que se verifica ser de 20 [kV].

Na figura 5.21 exemplifica-se a determinação do factor de aceleração correspondente ao teste acelerado realizado a 28 [kV] face às condições de normal operação a 20 [kV].

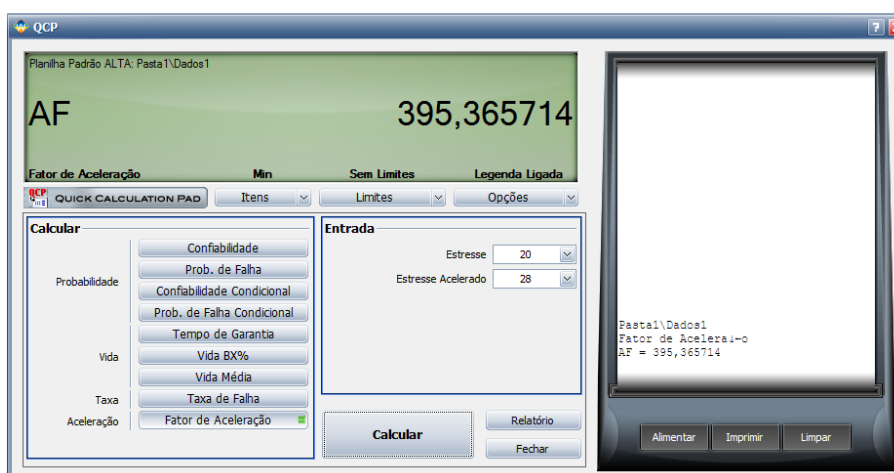


Figura 5.21. Factor de aceleração correspondente ao teste acelerado realizado a 28 [kV].

Na tabela seguinte apresentam-se os resultados dos diversos factores de aceleração de cada teste acelerado face às condições de normal operação.

Tabela 5.11. Factores de Aceleração dos diversos testes acelerados determinados no software ALTA 8.

$A_{F_{[20/28]}}$	$A_{F_{[20/30]}}$	$A_{F_{[20/32]}}$	$A_{F_{[20/34]}}$	$A_{F_{[20/36]}}$	$A_{F_{[20/38]}}$
395	1347	4243	12461	34413	89956

De acordo com a tabela 5.11 verifica-se que os valores correspondentes aos factores de aceleração aumentam com o aumento do nível de solicitação verificado no teste acelerado, repercutindo-se no número de vezes que a vida característica obtida no teste acelerado é menor que a verificada para normal operação.

5.4.3 Comparação de resultados entre as duas metodologias de análise

Implementadas as duas metodologias de análise podem agora ser comparados os resultados obtidos para os diferentes valores determinados. De notar que os métodos utilizados divergem um pouco na metodologia seguida na implementação do modelo da lei da Potência Inversa, assumindo por isso alguns desvios inerentes a essa razão.

Na tabela 5.12 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos para os diferentes parâmetros que caracterizam o modelo da Lei da Potência Inversa. Na coluna da esquerda estão dispostos os valores determinados através do método detalhado e na coluna da direita os valores obtidos na análise realizada no software ALTA 8.

Tabela 5.12. Síntese de resultados obtidos dos parâmetros característicos do modelo da Lei da Potência Inversa.

	Análise Método Detalhado (Lei da Potência Inversa)	Análise ALTA 8 (Lei da Potência Inversa)	Desvio (%)
β	0,8747	0,7859	11,3
η [min]	116037,2408	128499,9533	9,7
n	17,7398	17,7721	0,2
K	$7,1675 \times 10^{-29}$	$5,8761 \times 10^{-29}$	22

De acordo com a tabela anterior verifica-se que efectivamente existe algum desvio entre os valores determinados através dos dois métodos, sendo o maior verificado para a constante K .

Quanto aos desvios verificados nos valores dos parâmetros β e η , estes podem ser justificados pelo modo como os valores de β são estimados em cada um dos métodos. No método detalhado é calculada uma média ponderada dos valores do parâmetro β , tendo em conta o número de amostras de cada teste acelerado, verificando-se assim que os testes com maior número de amostras têm uma maior influência na sua determinação. Na análise realizada no software ALTA a determinação do parâmetro β é feita utilizando o método da máxima verosimilhança, justificando-se assim o desvio verificado nos valores obtidos.

O desvio verificado nos restantes parâmetros é influenciado pelo modo como os valores de β e η são determinados em cada um dos métodos. Quanto ao valor de n , verifica-se que apresenta a menor diferença, já o valor de K apresenta um desvio considerável, cerca de 22%, no entanto, verifica-se que ambos os resultados obtidos apresentam a mesma ordem de grandeza, considerando-se ainda assim aceitável.

Na tabela 5.13 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos para os diferentes factores de aceleração do modelo da Lei da Potência Inversa aplicado aos dados dos testes acelerados em utilização. Na coluna da esquerda estão dispostos os valores determinados através do método detalhado e na coluna da direita os valores obtidos na análise realizada no software ALTA 8.

Tabela 5.13. Síntese de resultados obtidos dos factores de aceleração do modelo da Lei da Potência Inversa.

	Análise Método Detalhado	Análise ALTA 8	Desvio
	(Lei da Potência Inversa)	(Lei da Potência Inversa)	(%)
$A_{F_{[20/28]}}$	391	395	1
$A_{F_{[20/30]}}$	1330	1347	1,3
$A_{F_{[20/32]}}$	4179	4243	1,5
$A_{F_{[20/34]}}$	12250	12461	1,7
$A_{F_{[20/36]}}$	33767	34413	1,9
$A_{F_{[20/38]}}$	88114	89956	2

Observando a tabela anterior constata-se que o desvio verificado entre os resultados obtidos através dos dois métodos de análise são pouco expressivos. O maior desvio verificado apresenta o valor de cerca de 2% de diferença entre os valores, pelo que se consideram não existir uma grande margem de erro entre os diferentes valores obtidos.

Na tabela 5.14 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos para os diferentes tempos correspondentes às diferentes probabilidades de falha analisadas. De notar que os resultados apresentados apenas fazem referência às condições de normal operação, ou seja para 20 [kV], podendo ser feita uma análise idêntica aos dados referentes às outras condições de teste.

A determinação dos tempos foi realizada utilizando a equação 5.18 para o caso do método detalhado e a ferramenta “QCP” no caso da análise no software ALTA 8, apresentando-se na coluna da esquerda e na coluna da direita da tabela 5.14, respectivamente.

Tabela 5.14. Síntese de resultados obtidos dos tempos correspondentes às diferentes probabilidades de falha analisadas.

	Análise Método Detalhado (Lei da Potência Inversa)	Análise ALTA 8 (Lei da Potência Inversa)	Desvio (%)
$t_{[F(t)=5\%]}$	3890,3346	2935,1769	32,5
$t_{[F(t)=10\%]}$	8857,7575	7334,9364	20,8
$t_{[F(t)=50\%]}$	76317,9917	80607,5056	5,3
$t_{[F(t)=63,2\%]}$	115994,7747	128446,3240	9,7
$t_{[F(t)=90\%]}$	301093,6532	371340,3254	18,9
$t_{[F(t)=95\%]}$	406780,4680	519023,2799	21,6

Alguns dos desvios anteriormente verificados encontram-se na casa dos 20%, sendo o mais elevado de cerca de 32,5%, para uma probabilidade de falha de 5%, ou seja, quando 5% dos bens estiverem em falha. Ao observar-se a tabela 5.14 constata-se que os maiores valores de desvio são verificados nos percentis extremos, ou seja, para 5%, 10%, 90% e 95%. Nos percentis centrais o valor referente ao desvio é mínimo, verificando-se assim um erro muito pequeno. Analisando o caso em que o desvio é máximo, a diferença entre os tempos é de cerca de 955 minutos, ou de cerca de 16 horas, traduzindo-se em menos de um dia de operação (caso de 24 horas diárias de

operação). No caso em que o desvio é o menor verificado, a diferença entre os tempos é de cerca de 4290 minutos, ou de cerca de 72 horas, o que simboliza 3 dias de operação (caso de 24 horas diárias de operação).

Pode então verificar-se que para maiores percentagens de probabilidade de falha, os valores de tempo para os quais são calculados os desvios são maiores, traduzindo-se assim em diferentes tempos de operação para cada método. Por outras palavras, quando a probabilidade de falha é maior, maiores são os tempos até estas serem verificadas, repercutindo-se em maiores discrepâncias entre a estimativa de cada método para os tempos que determinado óleo isolante deveria operar.

De modo a ser feita uma análise objectiva aos valores determinados para a vida característica determinada nas duas metodologias de análise, apresenta-se de seguida uma tabela síntese de resultados.

Tabela 5.15. Comparação de resultados para os valores determinados da vida característica do óleo isolante.

	Análise Método Detalhado (Lei da Potência Inversa)	Análise ALTA 8 (Lei da Potência Inversa)
η [min]	116037,2408	128499,9533
η [horas]	1934	2142
η [semanas]	12	13

Observando a tabela 5.15 verifica-se que a os resultados obtidos através das duas metodologias de análise divergem em cerca de uma semana de operação. No entanto é de ressaltar que em condições reais de operação, os óleos isolantes dos transformadores demoram anos a degradar-se, pelo que o seu ciclo de operação é caracterizado por ser muito longo. Verifica-se assim que os resultados obtidos não são adequados aos que se observam na realidade.

No ponto seguinte são apresentadas algumas conclusões bem como alguns trabalhos futuros a realizar numa eventual reapreciação do tema dos testes acelerados de vida.

Capítulo 6

Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões Gerais

O tema dos testes acelerados de vida revela-se de uma extrema importância no desenvolvimento de metodologias de análise da fiabilidade dos bens. Nesta área de conhecimento, os testes acelerados de vida demonstram ser uma ferramenta indispensável, permitindo o desenvolvimento de novos projectos e a verificação do comportamento dos bens quando solicitados sob determinadas condições.

Sob a perspectiva de desenvolvimento de novos produtos/projectos, esta metodologia torna-se muito importante quer para as organizações que desenvolvem os bens, quer para os seus consumidores. Uma das grandes vantagens que trazem na sua utilização e que se reflecte nas organizações, visto que os mercados estão cada vez mais competitivos, é a redução de tempo que se consegue obter ao analisar os protótipos, determinando assim os resultados num tempo muito mais reduzido, que de outra forma não seria possível de determinar. De notar que o grande objectivo dos testes acelerados de vida é tentar obter dados referentes às condições de normal operação dos bens, utilizando para isso modelos matemáticos de extrapolação que utilizam os dados dos testes realizados com níveis de solicitação mais elevada.

No decorrer da implementação de um estudo que tenha por base os testes acelerados de vida devem ser cumpridas algumas exigências, sob pena de invalidar quaisquer conclusões obtidas. A escolha do tipo de teste acelerado a realizar é muito importante, assim como o tipo e número de solicitações que se utilizará, tendo sempre em conta que o teste é adaptado ao bem em estudo. No que toca ao tipo de teste acelerado

implementado, no presente documento, foram utilizados dados obtidos através do método do aumento do carregamento com carga constante, ou seja, utilizaram-se níveis de solicitação mais elevados do que os que se verificam em normal operação, com um perfil constante ao longo do tempo de teste.

No caso de estudo realizado foram utilizados dados referentes aos testes acelerados de vida de um óleo isolante, em que a solicitação de teste era a tensão eléctrica aplicada no mesmo, sendo o objectivo principal dos testes a obtenção dos tempos até à falha de cada uma das tensões eléctricas de teste. Para melhor perceber o funcionamento e propósito que fundamentou a realização de tais testes acelerados de vida, abordou-se de forma objectiva o tema relativo aos transformadores eléctricos, sua concepção, constituintes e finalidade. Abordou-se ainda o tema relacionado com os óleos isolantes que fazem parte do sistema transformador eléctrico, tendo por objectivo perceber as suas funções, bem como os tipos de teste que mais são utilizados na sua análise.

Nos dois métodos de análise implementados pretendeu-se expor duas metodologias distintas de análise dos dados dos testes acelerados de vida, sendo comparados os resultados obtidos em cada uma delas. Nas duas metodologias o modelo matemático de extrapolação de resultados utilizado foi o da Lei da Potência Inversa, sendo considerado como o que melhor se adequa à solicitação específica do presente trabalho para realizar nos testes acelerados de vida.

No método detalhado foi utilizada a distribuição de Weibull bi-paramétrica como a distribuição estatística que melhor se ajusta aos dados utilizados, sendo posteriormente determinados os respectivos parâmetros no software Weibull++ 8 da Reliasoft. No desenvolvimento do método foram utilizadas algumas técnicas matemáticas com vista à obtenção das rectas que permitiram estimar os parâmetros característicos do modelo da Lei da Potência Inversa, concretizando-se de seguida a sua implementação e respectiva determinação dos dados fiabilísticos pretendidos. No método que recorreu à utilização exclusiva do software ALTA 8 da Reliasoft, analogamente ao realizado no método detalhado, introduziram-se os dados dos testes acelerados de vida, escolheu-se o modelo pretendido, sendo determinados de forma automática os dados fiabilísticos pretendidos. No ponto 5.4.3 foram realizadas as comparações possíveis entre os dois métodos de análise utilizados, sendo evidenciadas as grandes diferenças entre eles.

Observou-se ainda que os resultados obtidos através das duas metodologias de análise para a vida característica do óleo isolante não são verificados na realidade, ficando muito aquém dos valores que são considerados na prática. A duração de um óleo isolante significa na maior parte dos transformadores vários anos e não algumas semanas, como foi determinado. No entanto, por questões de comparabilidade e desconhecimento do tipo específico de transformador em estudo na fonte dos dados considerados não se alteraram os valores de referência.

Em resumo, na realização da presente dissertação conseguiu atingir-se todos os objectivos propostos à partida. Foi realizada uma abordagem histórica ao tema dos testes acelerados de vida, aos modelos matemáticos de extrapolação e ao tema dos transformadores eléctricos. Foram descritos os principais conceitos de fiabilidade e as principais distribuições estatísticas utilizadas. Procedeu-se à caracterização dos modelos matemáticos de extrapolação de resultados que mais são utilizados, explicitando-se a fundamentação matemática por detrás de cada um deles. Foram implementados dois métodos de análise dos dados dos testes acelerados de vida, sendo posteriormente feita a comparação e análise crítica dos resultados. No desenvolvimento e implementação das metodologias de análise foram utilizados os programas informáticos da área da fiabilidade e ensaios acelerados de vida, nomeadamente os softwares Weibull++ 8 e o ALTA 8, ambos da Reliasoft, revelando-se uma grande mais-valia para este tipo de trabalho.

6.2 Síntese dos objectivos atingidos

Julgando-se conveniente apresentar uma síntese de todos os objectivos atingidos, o que permite uma clara e objectiva análise do conteúdo do presente documento. De seguida apresentam-se os objectivos atingidos:

- Caracterização e análise dos conceitos fundamentais de fiabilidade;
- Definição e caracterização das principais causas da falha dos bens;
- Estudo dos parâmetros fundamentais à medição da fiabilidade, sua formulação e características;
- Estudo e análise das principais distribuições de probabilidade utilizadas na análise da fiabilidade dos bens;

- Estudo do tema dos testes acelerados de vida, compreendendo os métodos de aceleração mais conhecidos, tipos de testes acelerados existentes e os modelos de extrapolação matemática dos dados que mais são utilizados.
- Abordagem histórica ao surgimento dos vários modelos matemáticos existentes;
- Estudo do tema relacionado com os transformadores eléctricos, nomeadamente esclarecimento dos tipos de transformadores mais conhecidos e seus constituintes;
- Estudo e análise de óleos isolantes, permitindo compreender a sua finalidade, características e testes mais utilizados.
- Realização de um caso de estudo onde são implementadas as metodologias estudadas no capítulo referente à fiabilidade e aos testes acelerados de vida;
- Implementação de um modelo detalhado de análise ao caso de estudo;
- Implementação e resolução da análise fiabilística do caso de estudo no software Weibull++ 8 e no software ALTA 8;
- Comparação de resultados entre o método detalhado utilizado e a resolução decorrente do uso do software ALTA 8;
- Enunciação de algumas conclusões pertinentes à análise de resultados do caso de estudo, bem como a alguns trabalhos futuros.

6.3 Principais Dificuldades ou Problemas

Na presente dissertação foram notadas algumas dificuldades quer ao nível técnico quer ao nível logístico.

Uma das dificuldades prende-se com a inexistência de meios técnicos que providenciassem a realização dos ensaios e obtenção dos respectivos resultados na Área Departamental de Engenharia Mecânica do ISEL, o que fomentou a utilização de dados relativos aos testes acelerados de vida que não foram propositadamente determinados para o efeito, e também pela dificuldade extrema de conseguir que as organizações que desenvolvem e implementam os testes acelerados de vida disponibilizem dados relativos aos mesmos, mantendo assim uma política de total segredo.

Outra das dificuldades sentidas foi em conceber um modelo prático capaz de realizar testes acelerados de vida com alguma exactidão. Visto ser necessário à concepção de

um modelo com essas características, componentes tecnologicamente avançados que seriam demasiadamente dispendiosos, custo esse inoportável, tanto pela Área Departamental de Engenharia Mecânica (ADEM) do ISEL, tanto pelo autor.

6.4 Trabalhos Futuros

Tendo em consideração que os objectivos da presente dissertação foram alcançados podem ainda ser estabelecidas novas metas, objectivos ou explorados outras metodologias.

Como desenvolvimento futuro poderia ser projectado e concebido um modelo prático que permitisse levar a cabo a execução de testes acelerados de vida. Este desenvolvimento permitiria a aproximação da teoria e da prática relativamente à implementação de toda a metodologia relacionada com os testes acelerados de vida. Uma solução deste género poderia incluir tipos de solicitação distintos, tais como a temperatura, a humidade, a tensão, entre outros.

Outro dos trabalhos futuros a realizar poderia passar por analisar modelos matemáticos de extrapolação mais utilizados em aplicações específicas, não tão generalizadas como os que foram descritos na presente dissertação. Possibilitando a comparação de resultados com normas que parametrizam modelos empíricos de estimação dos dados fiabilísticos.

Por último poderá ser implementado outro método detalhado de análise dos dados dos testes acelerados de vida, utilizando outro tipo de distribuição estatística e métodos de aproximação.

Bibliografia

Aggarwal, K. K. (1993). *Reliability Engineering*. Dordrecht, The Netherlands. Kluwer Academic Publishers. ISBN No: 0-7923-2524-9.

Arrhenius, G., Caldwell, K. e Wold, S. (2008). *A Tribute To The Memory Of Svante Arrhenius*. Royal Swedish Academy of Engineering Sciences. ISSN No: 1102-8254. ISBN No: 978-91-7082-770-2.

Assis, R. (1997). *Manutenção centrada na fiabilidade*. Lisboa: LIDEL - Edições Técnicas, Limitada.

Clauset, A., Shalizi, C. R., e Newman, M. J. (2009). Power-law distributions in empirical data. *SIAM REVIEW*. 51: 661-703, No. 4.

Denson, W. (1998). The History of Reliability Prediction. *IEEE Transactions On Reliability*. 47: 321-328.

Ebel, G. H. (1998). Reliability Physics in Electronics: A Historical View. *IEEE Transactions On Reliability*. 47: 379-389.

Elsayed, E. A. (1996). *Reliability Engineering*. Addison Wesley Longman, Inc. Reading, Massachusetts, U.S.A. ISBN No: 0-201-63481-3.

Felix, É. P. (2006). *Análise de Confiabilidade de Sistemas Eletrônicos Complexos Baseada em Ensaio Acelerados de Vida*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 154pp.

Grange, J. M. (1971). Study on the Validity of Electronic Parts Stress Models. *IEEE Transactions On Reliability*. 20: 136-142.

Halacsy, A. A., e Von Fuchs, G. H. (1961). Transformer Invented 75 Years Ago. *Power Apparatus and Systems - Transactions of The American Institute of Electrical Engineers*. 80: 121-125.

Kauffman, G. B. (2001). The Nobel Centennial 1901-2001. *The Chemical Educator*. 6: 370-384. Springer. ISSN No: 1430-4171.

Kececioglu, D. B. (2002). *Reliability & Life Testing Handbook (Vol. 2)*. DEStech Publications, Inc. Lancaster, Pennsylvania, U.S.A .ISBN No: 1-932078-03-7.

Kececioglu, D. e Sun, F. B. (2003). *Environmental Stress Screening - Its Quantification, Optimization and Management*. DEStech Publications, Inc. Lancaster, Pennsylvania, U.S.A .ISBN No: 1-932078-04-5.

Meeker, W. Q. e Escobar, L. A. (1998). *Statistical Methods for Reliability Data*. Wiley. New York.

MIL-HDBK-338B. (1998). *Electronic Reliability Design Handbook*. Department of Defense (DoD), U.S.A.

MIL-HDBK-781A. (1996). *Handbook For Reliability Test Methods, Plans, And Environments For Engineering, Development Qualification, And Production*. Department of Defense (DoD), U.S.A.

MIL-STD-721C. (1981). *Military Standard: Definitions of Terms for Reliability and Maintainability*. Department of Defense (DoD), U.S.A.

Naresky, J. J. (1970). Reliability Definitions. *IEEE Transactions on Reliability*. 19: 198-200.

Nelson, W. B. (1972). Graphical Analysis of Accelerated Life Test Data with the Inverse Power Law Model. *IEEE Transactions On Reliability*. 21: 2-11.

Nelson, W. B. (1990). *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans and Data Analysis*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. ISBN No: 0-471-69736-2.

Nelson, W. B. (2005). A bibliography of accelerated test plans. *IEEE Transactions On Reliability*. 54: 194-197.

Newman, M. E. (2005). Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. *Contemporary Physics*. 46: 323-351.

NP EN 13306. (2007). Terminologia da manutenção. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Caparica.

Pansini, A. J. (1998). *Electrical Transformers and Power Equipment - Third Edition*. The Fairmont Press, Inc. Lilburn. ISBN No: 0-88173-311-3.

Reliability Hotwire 14. (2002). *Reliability Basics - Characteristics of the Weibull Distribution*. Reliasoft Corporation.

Reliability HotWire 56. (2009). *Conceitos de Confiabilidade - O Assistente de Distribuição no Weibull++ 7*. Reliasoft Corporation.

Reliawiki. (2012). *Chapter 5 - Life Data Classification*. Acedido em: 18 de Maio de 2012, em: <http://reliawiki.org/index.php/Life_Data_Classification>.

Saleh, J. P., & Marais, K. (2006). Highlights from the early (and pre-) history of reliability engineering. *Reliability Engineering and System Safety*. ELSEVIER. 91: 249-256.

Sándor, Z. (2004). *First Transformers (Déri - Bláthy - Zipernowsky, Budapest 1885)*. Acedido em: 3 de Setembro de 2012, em: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:DBZ_trafo.jpg>.

Sobral, J. A. (2010). *Utilização Da Metodologia "RAMS" Na Análise Da Barreiras De Segurança De Instalações Industriais De Risco Elevado*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Teves, H. (1999). *Máquina De Corrente Contínua*. Caderno de Apontamentos de Máquinas Eléctricas, Curso de Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

TM 5-686. (1998). *Power Transformer Maintenance and Acceptance Testing*. Headquarters Department Of The Army. Washington, DC. U.S.A.

Vishal, Saurabh, Vikas, e Prashant. (2011). Transformer's History and its Insulating Oil. *Proceedings of the 5th National Conference*. INDIACom 2011.

WEG. (s.d.). *Características e especificações de transformadores de distribuição e força*. Curso de Treinamento DT 11: Transformadores de Distribuição e Força. WEG S.A .

Winders, J. J. (2002). *Power Transformers - Principles and Applications*. Marcel Dekker, Inc. New York. ISBN No: 0-8247-0766-4.

Woo, C. S. e Park, H. S. (2011). Useful lifetime prediction of rubber component. *Engineering Failure Analysis*. ELSEVIER. 18: 1645-1651. ISSN No: 1350-6307.

ANEXO I

Determinação da Vida Característica Ajustada ao Valor de β_{med}

DETERMINAÇÃO DA VIDA CARACTERÍSTICA AJUSTADA AO VALOR MÉDIO DO FACTOR DE FORMA

β =	0,8747	(Valor do Factor de Forma β_{med})	Tipo de solicitação	Tensão Eléctrica [kV]
N_i =	5	(Dimensão da Amostra)	Valor da solicitação	28

i = 1	T1 = 68,85	ln(T) = 4,2319	MR(T) = 0,1296	1-MR(T) = 0,8704	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,9745
i = 2	T2 = 108,29	ln(T) = 4,6848	MR(T) = 0,3148	1-MR(T) = 0,6852	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,9727
i = 3	T3 = 110,29	ln(T) = 4,7031	MR(T) = 0,5000	1-MR(T) = 0,5000	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,3665
i = 4	T4 = 426,07	ln(T) = 6,0546	MR(T) = 0,6852	1-MR(T) = 0,3148	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,1448
i = 5	T5 = 1067,50	ln(T) = 6,9731	MR(T) = 0,8704	1-MR(T) = 0,1296	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,7145
i = 6	T6 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 7	T7 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 8	T8 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 9	T9 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 10	T10 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 11	T11 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 12	T12 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 13	T13 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 14	T14 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 15	T15 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 16	T16 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 17	T17 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 18	T18 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 19	T19 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 20	T20 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
					$\Sigma = -2,4544$

X_i =	5,3295
Y_i =	-0,4909

η_i =	361,6631	(novo valor da Vida Característica)
------------	----------	-------------------------------------

DETERMINAÇÃO DA VIDA CARACTERÍSTICA AJUSTADA AO VALOR MÉDIO DO FACTOR DE FORMA

β =	0,8747	(Valor do Factor de Forma β_{med})	Tipo de solicitação	Tensão Eléctrica [kV]
N_i =	11	(Dimensão da Amostra)	Valor da solicitação	30

i = 1	T1 = 7,74	ln(T) = 2,0464	MR(T) = 0,0614	1-MR(T) = 0,9386	ln[-ln[1-MR(T)]] = -2,7588
i = 2	T2 = 17,05	ln(T) = 2,8362	MR(T) = 0,1491	1-MR(T) = 0,8509	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,8233
i = 3	T3 = 20,46	ln(T) = 3,0185	MR(T) = 0,2368	1-MR(T) = 0,7632	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,3083
i = 4	T4 = 21,02	ln(T) = 3,0455	MR(T) = 0,3246	1-MR(T) = 0,6754	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,9355
i = 5	T5 = 22,66	ln(T) = 3,1206	MR(T) = 0,4123	1-MR(T) = 0,5877	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,6320
i = 6	T6 = 43,40	ln(T) = 3,7705	MR(T) = 0,5000	1-MR(T) = 0,5000	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,3665
i = 7	T7 = 47,30	ln(T) = 3,8565	MR(T) = 0,5877	1-MR(T) = 0,4123	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,1210
i = 8	T8 = 139,07	ln(T) = 4,9350	MR(T) = 0,6754	1-MR(T) = 0,3246	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,1180
i = 9	T9 = 144,12	ln(T) = 4,9706	MR(T) = 0,7632	1-MR(T) = 0,2368	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,3649
i = 10	T10 = 175,88	ln(T) = 5,1698	MR(T) = 0,8509	1-MR(T) = 0,1491	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,6434
i = 11	T11 = 194,90	ln(T) = 5,2725	MR(T) = 0,9386	1-MR(T) = 0,0614	ln[-ln[1-MR(T)]] = 1,0261
i = 12	T12 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 13	T13 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 14	T14 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 15	T15 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 16	T16 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 17	T17 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 18	T18 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 19	T19 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 20	T20 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
					$\Sigma = -5,7929$

X_i =	3,8220
Y_i =	-0,5266

η_i =	83,4346	(novo valor da Vida Característica)
------------	---------	-------------------------------------

DETERMINAÇÃO DA VIDA CARACTERÍSTICA AJUSTADA AO VALOR MÉDIO DO FACTOR DE FORMA

β =	0,8747	(Valor do Factor de Forma β_{med})	Tipo de solicitação	Tensão Eléctrica [kV]
N_i =	15	(Dimensão da Amostra)	Valor da solicitação	32

i = 1	T1 = 0,27	ln(T) = -1,3093	MR(T) = 0,0455	1-MR(T) = 0,9545	ln[-ln[1-MR(T)]] = -3,0679
i = 2	T2 = 0,40	ln(T) = -0,9163	MR(T) = 0,1104	1-MR(T) = 0,8896	ln[-ln[1-MR(T)]] = -2,1458
i = 3	T3 = 0,69	ln(T) = -0,3711	MR(T) = 0,1753	1-MR(T) = 0,8247	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,6463
i = 4	T4 = 0,79	ln(T) = -0,2357	MR(T) = 0,2403	1-MR(T) = 0,7597	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,2918
i = 5	T5 = 2,75	ln(T) = 1,0116	MR(T) = 0,3052	1-MR(T) = 0,6948	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,0103
i = 6	T6 = 3,91	ln(T) = 1,3635	MR(T) = 0,3701	1-MR(T) = 0,6299	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,7717
i = 7	T7 = 9,88	ln(T) = 2,2905	MR(T) = 0,4351	1-MR(T) = 0,5649	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,5603
i = 8	T8 = 13,95	ln(T) = 2,6355	MR(T) = 0,5000	1-MR(T) = 0,5000	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,3665
i = 9	T9 = 15,93	ln(T) = 2,7682	MR(T) = 0,5649	1-MR(T) = 0,4351	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,1836
i = 10	T10 = 27,80	ln(T) = 3,3250	MR(T) = 0,6299	1-MR(T) = 0,3701	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,0061
i = 11	T11 = 53,24	ln(T) = 3,9748	MR(T) = 0,6948	1-MR(T) = 0,3052	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,1713
i = 12	T12 = 82,85	ln(T) = 4,4170	MR(T) = 0,7597	1-MR(T) = 0,2403	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,3549
i = 13	T13 = 89,29	ln(T) = 4,4919	MR(T) = 0,8247	1-MR(T) = 0,1753	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,5545
i = 14	T14 = 100,58	ln(T) = 4,6110	MR(T) = 0,8896	1-MR(T) = 0,1104	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,7902
i = 15	T15 = 215,10	ln(T) = 5,3711	MR(T) = 0,9545	1-MR(T) = 0,0455	ln[-ln[1-MR(T)]] = 1,1285
i = 16	T16 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 17	T17 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 18	T18 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 19	T19 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 20	T20 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
					$\Sigma = -8,0509$

X_i =	2,2285
Y_i =	-0,5367

η_i = 17,1522 (novo valor da Vida Característica)

DETERMINAÇÃO DA VIDA CARACTERÍSTICA AJUSTADA AO VALOR MÉDIO DO FACTOR DE FORMA

β =	0,8747	(Valor do Factor de Forma β_{med})	Tipo de solicitação	Tensão Eléctrica [kV]
N_i =	19	(Dimensão da Amostra)	Valor da solicitação	34

i = 1	T1 = 0,19	ln(T) = -1,6607	MR(T) = 0,0361	1-MR(T) = 0,9639	ln[-ln[1-MR(T)]] = -3,3036
i = 2	T2 = 0,78	ln(T) = -0,2485	MR(T) = 0,0876	1-MR(T) = 0,9124	ln[-ln[1-MR(T)]] = -2,3891
i = 3	T3 = 0,96	ln(T) = -0,0408	MR(T) = 0,1392	1-MR(T) = 0,8608	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,8980
i = 4	T4 = 1,31	ln(T) = 0,2700	MR(T) = 0,1907	1-MR(T) = 0,8093	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,5530
i = 5	T5 = 2,78	ln(T) = 1,0225	MR(T) = 0,2423	1-MR(T) = 0,7577	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,2822
i = 6	T6 = 3,16	ln(T) = 1,1506	MR(T) = 0,2938	1-MR(T) = 0,7062	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,0559
i = 7	T7 = 4,15	ln(T) = 1,4231	MR(T) = 0,3454	1-MR(T) = 0,6546	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,8588
i = 8	T8 = 4,67	ln(T) = 1,5412	MR(T) = 0,3969	1-MR(T) = 0,6031	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,6818
i = 9	T9 = 4,85	ln(T) = 1,5790	MR(T) = 0,4485	1-MR(T) = 0,5515	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,5191
i = 10	T10 = 6,50	ln(T) = 1,8718	MR(T) = 0,5000	1-MR(T) = 0,5000	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,3665
i = 11	T11 = 7,35	ln(T) = 1,9947	MR(T) = 0,5515	1-MR(T) = 0,4485	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,2207
i = 12	T12 = 8,01	ln(T) = 2,0807	MR(T) = 0,6031	1-MR(T) = 0,3969	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,0790
i = 13	T13 = 8,27	ln(T) = 2,1126	MR(T) = 0,6546	1-MR(T) = 0,3454	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0613
i = 14	T14 = 12,06	ln(T) = 2,4899	MR(T) = 0,7062	1-MR(T) = 0,2938	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,2028
i = 15	T15 = 31,75	ln(T) = 3,4579	MR(T) = 0,7577	1-MR(T) = 0,2423	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,3490
i = 16	T16 = 32,52	ln(T) = 3,4819	MR(T) = 0,8093	1-MR(T) = 0,1907	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,5050
i = 17	T17 = 33,91	ln(T) = 3,5237	MR(T) = 0,8608	1-MR(T) = 0,1392	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,6791
i = 18	T18 = 36,71	ln(T) = 3,6030	MR(T) = 0,9124	1-MR(T) = 0,0876	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,8898
i = 19	T19 = 72,89	ln(T) = 4,2890	MR(T) = 0,9639	1-MR(T) = 0,0361	ln[-ln[1-MR(T)]] = 1,2006
i = 20	T20 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
					$\Sigma = -10,3204$

X_i =	1,7864
Y_i =	-0,5432

η_i = 11,1049 (novo valor da Vida Característica)

DETERMINAÇÃO DA VIDA CARACTERÍSTICA AJUSTADA AO VALOR MÉDIO DO FACTOR DE FORMA

β =	0,8747	(Valor do Factor de Forma β_{med})	Tipo de solicitação	Tensão Eléctrica [kV]
			Valor da solicitação	36
N_i =	15	(Dimensão da Amostra)		

i = 1	T1 = 0,35	ln(T) = -1,0498	MR(T) = 0,0455	1-MR(T) = 0,9545	ln[-ln[1-MR(T)]] = -3,0679
i = 2	T2 = 0,59	ln(T) = -0,5276	MR(T) = 0,1104	1-MR(T) = 0,8896	ln[-ln[1-MR(T)]] = -2,1458
i = 3	T3 = 0,96	ln(T) = -0,0408	MR(T) = 0,1753	1-MR(T) = 0,8247	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,6463
i = 4	T4 = 0,99	ln(T) = -0,0101	MR(T) = 0,2403	1-MR(T) = 0,7597	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,2918
i = 5	T5 = 1,69	ln(T) = 0,5247	MR(T) = 0,3052	1-MR(T) = 0,6948	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,0103
i = 6	T6 = 1,97	ln(T) = 0,6780	MR(T) = 0,3701	1-MR(T) = 0,6299	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,7717
i = 7	T7 = 2,07	ln(T) = 0,7275	MR(T) = 0,4351	1-MR(T) = 0,5649	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,5603
i = 8	T8 = 2,58	ln(T) = 0,9478	MR(T) = 0,5000	1-MR(T) = 0,5000	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,3665
i = 9	T9 = 2,71	ln(T) = 0,9969	MR(T) = 0,5649	1-MR(T) = 0,4351	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,1836
i = 10	T10 = 2,90	ln(T) = 1,0647	MR(T) = 0,6299	1-MR(T) = 0,3701	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,0061
i = 11	T11 = 3,67	ln(T) = 1,3002	MR(T) = 0,6948	1-MR(T) = 0,3052	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,1713
i = 12	T12 = 3,99	ln(T) = 1,3838	MR(T) = 0,7597	1-MR(T) = 0,2403	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,3549
i = 13	T13 = 5,35	ln(T) = 1,6771	MR(T) = 0,8247	1-MR(T) = 0,1753	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,5545
i = 14	T14 = 13,77	ln(T) = 2,6225	MR(T) = 0,8896	1-MR(T) = 0,1104	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,7902
i = 15	T15 = 25,50	ln(T) = 3,2387	MR(T) = 0,9545	1-MR(T) = 0,0455	ln[-ln[1-MR(T)]] = 1,1285
i = 16	T16 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 17	T17 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 18	T18 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 19	T19 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 20	T20 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
$\Sigma = 13,5337$					$\Sigma = -8,0509$

X_i =	0,9022
Y_i =	-0,5367

η_i =	4,5533	(novo valor da Vida Característica)
------------	--------	-------------------------------------

DETERMINAÇÃO DA VIDA CARACTERÍSTICA AJUSTADA AO VALOR MÉDIO DO FACTOR DE FORMA

β =	0,8747	(Valor do Factor de Forma β_{med})	Tipo de solicitação	Tensão Eléctrica [kV]
			Valor da solicitação	38
N_i =	8	(Dimensão da Amostra)		

i = 1	T1 = 0,09	ln(T) = -2,4079	MR(T) = 0,0833	1-MR(T) = 0,9167	ln[-ln[1-MR(T)]] = -2,4417
i = 2	T2 = 0,39	ln(T) = -0,9416	MR(T) = 0,2024	1-MR(T) = 0,7976	ln[-ln[1-MR(T)]] = -1,4867
i = 3	T3 = 0,47	ln(T) = -0,7550	MR(T) = 0,3214	1-MR(T) = 0,6786	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,9474
i = 4	T4 = 0,73	ln(T) = -0,3147	MR(T) = 0,4405	1-MR(T) = 0,5595	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,5436
i = 5	T5 = 0,74	ln(T) = -0,3011	MR(T) = 0,5595	1-MR(T) = 0,4405	ln[-ln[1-MR(T)]] = -0,1986
i = 6	T6 = 1,13	ln(T) = 0,1222	MR(T) = 0,6786	1-MR(T) = 0,3214	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,1266
i = 7	T7 = 1,40	ln(T) = 0,3365	MR(T) = 0,7976	1-MR(T) = 0,2024	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,4685
i = 8	T8 = 2,38	ln(T) = 0,8671	MR(T) = 0,9167	1-MR(T) = 0,0833	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,9102
i = 9	T9 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 10	T10 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 11	T11 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 12	T12 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 13	T13 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 14	T14 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 15	T15 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 16	T16 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 17	T17 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 18	T18 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 19	T19 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
i = 20	T20 =	ln(T) = 0,0000	MR(T) = 0,0000	1-MR(T) = 0,0000	ln[-ln[1-MR(T)]] = 0,0000
$\Sigma = -3,3946$					$\Sigma = -4,1125$

X_i =	-0,4243
Y_i =	-0,5141

η_i =	1,1775	(novo valor da Vida Característica)
------------	--------	-------------------------------------

ANEXO II

Determinação dos Parâmetros n e K do Modelo da Lei da Potência Inversa

Determinação dos Parâmetros do n e K do Modelo da Lei da Potência Inversa

		Y = ln(η_i)	X = ln(V_i)	Xi-X	Yi-Y	(Xi-X).(Yi-Y)	(Xi-X) ²	(η_i)
V ₁ = 28	$\eta_1 = 361,6631$	5,8907131	3,3322045	-0,1589	3,01679063	-0,479356144	0,0252	296,69653
V ₂ = 30	$\eta_2 = 83,4346$	4,4240631	3,4011974	-0,0899	1,55014061	-0,139362582	0,0081	87,250979
V ₃ = 32	$\eta_3 = 17,1522$	2,8421264	3,4657359	-0,0254	-0,031796	0,000806496	0,0006	27,768078
V ₄ = 34	$\eta_4 = 11,1049$	2,4073865	3,5263605	0,0353	-0,466536	-0,016450039	0,0012	9,4727311
V ₅ = 36	$\eta_5 = 4,5533$	1,5158522	3,5835189	0,0924	-1,3580702	-0,125510636	0,0085	3,4364444
V ₆ = 38	$\eta_6 = 1,1775$	0,1633935	3,6375862	0,1465	-2,7105289	-0,397053431	0,0215	1,3169186
	Média =	2,8739225	3,4911006					
						Σ -1,156926337	Σ 0,0652164	

$$b = -17,7398$$

$$a = 64,8054$$

$$K = 7,1675E-29$$

$$n = 17,7398$$

$$V = 20 \text{ kV}$$

$$\eta = 116037,241 \text{ min}$$