

ÉRICO PESSOA FELIX

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS
ELETRÔNICOS COMPLEXOS BASEADA EM ENSAIOS
ACELERADOS DE VIDA**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

São Paulo

2006

ÉRICO PESSOA FELIX

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS
ELETRÔNICOS COMPLEXOS BASEADA EM ENSAIOS
ACELERADOS DE VIDA**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Professor Doutor
Gilberto F. Martha de Souza

São Paulo

2006

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo, 5 de fevereiro de 2007.

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

FICHA CATALOGRÁFICA

Felix, Érico Pessoa

Análise de confiabilidade de sistemas eletrônicos complexos baseada em ensaios acelerados de vida / E.P. Felix. – ed. rev. -- São Paulo, 2006.

140 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

**1.Ensaio acelerado 2.Circuitos eletrônicos (Confiabilidade)
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.**

Aos meus pais Luis e

Maria Luiza.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza, pela orientação deste trabalho, pelo apoio constante e pelas oportunidades que me ofereceu e continua me oferecendo sempre me ajudando a construir minha vida acadêmica.

Aos meus pais por tudo que sou.

À minha querida Clara pela compreensão, apoio emocional e inigualável carinho.

Aos companheiros de pesquisa Fernando, Nátalia e William pelas ajudas e pela amizade.

Ao Engenheiro Marcelo Ghizoni e a toda a sua equipe técnica, principalmente Eng. Carlos Cabral e Luiz Roberto Cidral e, pelo auxílio no planejamento e execução dos ensaios.

A todos os meus amigos que direta ou indiretamente contribuíram para realização de mais este sonho.

A Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE), pela concessão da bolsa de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE SIMBOLOS.....	viii
LISTA DE SIMBOLOS.....	viii
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Iniciais	1
1.2. Objetivo	6
1.3. Organização do Trabalho.....	7
CAPITULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS DE CONFIABILIDADE.....	9
2.1. Definições de Confiabilidade.....	11
2.2. Confiabilidade de Componentes Eletrônicos.....	20
2.3. Predição de Confiabilidade de Sistemas Eletrônicos Através de Normas	23
2.3.1. Modelo de Predição da Taxa de Falha de Componentes Microeletrônicos	27
2.3.2. Diodos e Transistores	27
2.3.3. Resistores.....	28
2.3.4. Capacitores	29
2.3.5. Outros Componentes Elétricos	29
CAPITULO 3 - ENSAIOS ACELERADOS DE VIDA	30
3.1. Considerações Iniciais	30
3.2. Métodos de Aceleração.....	34
3.3. Ensaio Acelerados de Vida	36
3.4. Ensaio Acelerados de Equipamentos	37
3.5. Fator de Aceleração	38
3.6. Análise de Resultados de um Ensaio Acelerado de Vida.....	39
3.7. Aplicações dos Ensaio Acelerados de Vida para Sistemas Eletrônicos	42
3.7.1. Modelo de Aceleração de Vida Operacional a Alta Temperatura	43
3.7.2. Modelo de Aceleração de Vida para Ensaio de Temperatura e Umidade Relativa	46
3.7.3. Modelo de Aceleração para Vibração.....	48
3.7.4. Modelo de Black para Eletromigração	49
3.7.5. Modelo de Eyring para Temperatura e Tensão	49
3.8. Ensaio Acelerados por Temperatura e Umidade	50
CAPITULO 4 - CASO EXEMPLO: ENSAIO ACELERADO DE UMA CENTRAL TELEFÔNICA PABX ANALÓGICA.....	56
4.1. Descrição Funcional do Sistema.....	56
4.2. Descrição do Aparato Experimental	57
4.3. Aplicação da Norma US MIL-HDBK-217 F para a Central Telefônica em Estudo.....	58
4.4. Procedimento de Ensaio com Ciclos de Temperatura e Umidade Constante	60
4.4.1. Calibração dos Equipamentos de Ensaio	61

4.5.	Testes de Funcionamento do Equipamento	63
4.5.1.	Procedimento de Ensaio de Calibração para Ensaio Cíclicos	64
4.5.2.	Ensaio de Calibração Realizado.....	66
4.5.3.	Procedimento de Ensaio Cíclico Proposto	68
4.5.4.	Procedimento de Ensaio a Temperatura e Umidades Constantes	70
4.6.	Análise dos Dados dos Ensaio Acelerados.....	71
4.6.1.	Relatório das Falhas e Eventos Ocorridos nos Ensaio	73
4.6.2.	Análise dos Dados	76
 CAPITULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....		95
5.1.	Considerações Finais	95
5.2.	Conclusões Finais	97
5.3.	Considerações para Trabalhos Futuros	100
 CAPITULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		102
 APÊNDICE I - Cálculo da Taxa de Falha através da US MIL-HDBK-217 F.		106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Função de Probabilidade Acumulada $F(t)$. (Leitch,1995).....	13
Figura 2.2 - Função de Confiabilidade $R(t)$. (Leitch, 1995).	14
Figura 2.3 - Representação da Curva da Banheira (Lafraia, 2001).....	16
Figura 2.4 - Função Densidade de Probabilidade da Distribuição Exponencial, (SOUZA, 2003).....	19
Figura 2.5 - Função Probabilidade Acumulada da Distribuição Exponencial. (SOUZA, 2003).....	19
Figura 3.1 - Procedimento de Análise do Ensaio de Vida Acelerado. (SOUZA, 2003)	41
Figura 3.2 – Energia de Ativação e o Progresso das Falhas. (KECECIOGLU; SUN, 1995)	45
Figura 3.3 - Perfil temporal de temperatura de um ensaio cíclico. (Adaptado de MIL- HDBK-338, 1998).....	51
Figura 3.4 Fluxograma de Análise dos Dados.	55
Figura 4.1 - Câmara Climática Weiss WK 111.	57
Figura 4.2 - Perfil Temporal de Temperatura do Ensaio Proposto.	61
Figura 4.3 - Perfil Temporal de Temperatura do Ensaio 1.	72
Figura 4.4 - Confiabilidade vs Tempo para o Ensaio 1.	78
Figura 4.5 - Confiabilidade vs Tempo para o Ensaio 3.	78
Figura 4.6 - Confiabilidade vs Tempo para o Ensaio 4.	79
Figura 4.7 - Confiabilidade vs Tempo para o Ensaio 5.	79
Figura 4.8 - Comportamento do $MTTF$ com Intervalo de Confiança de 90%.....	88
Figura 4.9 - $MTTF$ nas Condições Normais de Operação em Função da Temperatura Usual e a Umidade Relativa Usual, para $n = 2,5$	93
Figura 4.10 - $MTTF$ nas Condições Normais de Operação em Função da Temperatura Usual e a Umidade Relativa Usual, para $n = 3$	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Modos de falhas nos dispositivos eletrônicos (IRESON et al., 1995)...	21
Tabela 3.1 - Classificação de complexidade de sistemas eletrônicos. (MIL-HDBK-781, 1996)	34
Tabela 3.2 – Energia de ativação associada aos mecanismos de falha de semicondutores de silício, US MIL-HDBK-338(1998).....	44
Tabela 4.1 - Taxas de falhas dos circuitos estudados segunda a norma US MIL-HDBK-217 F (1991).	59
Tabela 4.2 - Leitura dos Termopares após 30 min de Ensaio.....	66
Tabela 4.3 - - Leitura dos Termopares após 65 min de Ensaio.....	67
Tabela 4.4 - Leitura dos Termopares após 95 min de Ensaio.....	67
Tabela 4.5 - Resumo dos Parâmetros Utilizados nos Ensaios.	73
Tabela 4.6 - Descrição dos Eventos Observados Durante o Ensaio 1.	74
Tabela 4.7 - - Descrição dos Eventos Observados Durante o Ensaio 2.	74
Tabela 4.8 - Descrição dos Eventos Observados Durante o Ensaio 3.	75
Tabela 4.9 - Descrição dos Eventos Observados Durante o Ensaio 4.	75
Tabela 4.10 - Descrição dos Eventos Observados Durante o Ensaio 5.	75
Tabela 4.11 - Tempos até a Falha, “F” ou Tempo para Suspensão do Ensaio, “S” ...	77
Tabela 4.12 - Taxas de Falha e <i>MTTF</i> para os Ensaios Executados.....	77
Tabela A.1 - Taxas de Falhas dos Circuitos Estudados segundo a US MIL-HDBK 217 F	107

LISTA DE SIMBOLOS

A	Constante empírica da lei de Ahrrenius
A_E	Constante empírica da lei de Eyring
A_J	Constante relacionada com a geometria do condutor
B_E	Constante empírica da lei de Eyring
C_E	Constante empírica da lei de Eyring
	Fator de complexidade baseados no número de entradas
C_1	dos chips ou no número de transistores para dispositivos lineares
	Fator de complexidade baseados no número de entradas
C_2	dos chips ou no número de transistores para dispositivos lineares
	Fator de complexidade baseado em aspectos de
C_3	encapsulamento
D_E	Constante empírica da lei de Eyring
E	Campo elétrico
E_a	Energia de ativação (elétrons-volt)
FA	Fator de aceleração
$f(t)$	Função densidade de probabilidade
$F(t)$	Função de probabilidade acumulada
G_f	Nível de vibração senoidal ressonante
H	Umidade
HR	Umidade relativa (<i>Relative Humidity – RH</i>) (%)
HR_{teste}	Umidade relativa na condição de teste
HR_{usual}	Umidade relativa na condição usual
J	Densidade de corrente
J_{teste}	Densidade de corrente na condição de teste
J_{usual}	Densidade de corrente na condição usual
k	Constante de Boltzman
K	Número de falhas observadas no ensaio
\hat{m}_x	Estimativa do tempo médio entre falhas

M_b	Parâmetro de fadiga
$MTTF$	Tempo médio até a falha
$MTTF_{CONDIÇÃO DE USO}$	Tempo médio até a falha na condição de uso
$MTTF_{CONDIÇÃO ACCELERADA}$	Tempo médio até a falha na condição acelerada
n	Constante empírica da lei de Ahrrenius
n_J	Constante relacionada com a densidade de corrente
$R(t)$	Função de confiabilidade
S	Área
t	Tempo para ocorrência da falha
t_i	Tempo de ocorrência da i -ésima falha
t_f	Tempo até a falha
t_{teste}	Tempo até a falha nas condições de teste
t_{uso}	Tempo até a falha nas condições de uso
T	Temperatura absoluta expressa em graus
T_a	Tempo total operacional das unidades ao longo do ensaio
$T_{acelerada}$	Temperatura na condição acelerada
T_i	Temperatura inferior do ensaio cíclico
T_j	Temperatura da junção ou ligação
$T_{j, teste}$	Temperatura da junção ou ligação no teste
$T_{j, usual}$	Temperatura da junção ou ligação na condição usual
$T_{média}$	Temperatura média
$T(t)$	Temperatura em função do tempo
T_s	Temperatura superior do ensaio cíclico
T_{teste}	Temperatura do ensaio
T_{uso}	Temperatura nas condições normais de uso
V	tensão
V_{cb}	Tensão no coletor-base
W	Densidade de potência espectral (DPE) através da largura de banda de ressonância (G^2/Hz)

W_{teste}	Densidade de potência espectral (DPE) através da largura de banda de ressonância no ensaio
W_{uso}	Densidade de potência espectral (DPE) através da largura de banda de ressonância nas condições de uso
λ	Taxa de falha
λ_b	Taxa de falha básica relacionada com o componente
$\lambda(t)$	Taxa de falha
μ	Valor médio associado à uma função densidade de probabilidade
π_A	Fator de aplicação
π_C	Fator de complexidade
π_{CV}	Fator de capacitância
π_E	Fator ambiental
π_L	Fator de aprendizagem
π_Q	Nível de qualidade
π_R	Fator de resistência
π_{S2}	Fator que é função da tensão aplicada
π_{SR}	Fator de resistência em série, usado para alguns capacitores eletrolíticos
π_T	Fator de temperatura
π_V	Fator relacionado uma um esforço de tensão

RESUMO

FELIX, E. P. **Análise de Confiabilidade de Sistemas Eletrônicos Complexos Baseada em Ensaio Acelerados de Vida**. 2006. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

O objetivo deste estudo é desenvolver um método para avaliar a confiabilidade de sistemas eletrônicos complexos. A análise proposta baseia-se na aplicação de ensaios de confiabilidade e de normas técnicas, bem como modelos matemáticos para estimação da vida operacional.

Os ensaios de confiabilidade executados nesse estudo simulam condições operacionais mais severas que as usualmente enfrentadas pelo sistema, a fim de reduzir o tempo de execução dos ensaios. Ao longo destes, foram coletados os tempos até a falha de diversas amostras do sistema, os quais são submetidas a diferentes condições de operação.

O planejamento das variáveis que aceleram os principais modos de falha de componentes eletrônicos e os perfis de solicitação empregados também são discutidos, sendo consideradas as mais importantes a temperatura e a umidade.

Através da aplicação de modelos matemáticos para predição da vida nas condições normais de operação, dadas as ocorrências de falhas nas condições aceleradas, a confiabilidade e o tempo médio até a falha são determinados para a central telefônica estudada, tomada como exemplo na aplicação do método.

Adicionalmente aos ensaios são desenvolvidas estimativas da confiabilidade da central telefônica através da norma militar US MIL-HDBK-217 F (1991). Os resultados destas estimativas são utilizados para comparação e confirmação dos resultados obtidos através dos ensaios.

Destaca-se que os métodos descritos neste texto não são restritos a aplicação em centrais telefônicas analógicas, mas podem ser empregados a uma grande família de equipamentos eletrônicos de complexidade tecnológica semelhante.

Palavras-chave: Confiabilidade. Ensaio acelerados. Sistemas Eletrônicos.

ABSTRACT

FELIX, E. P. **Reliability Analysis of Complex Electronic Systems Based on Accelerated Life Tests**. 2006. Master in Engineering Dissertation – Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, 2006.

This research aims to develop a method to evaluate the reliability of complex electronic systems. The analysis proposed is based on application of reliability laboratory tests, technical standards and mathematical models to estimate the system operational life.

Reliability tests proposed simulate harder operational conditions than those usually faced by the system, aiming to reduce the time of execution. During the tests, time to failure of several samples are collected. Those samples are submitted to different environmental conditions.

Selection of variables that accelerate the main failure modes of electronic components and the load profiles used are also analyzed, considering humidity and temperature the most important variables for failure acceleration.

The proposed model is used to estimate the reliability and the mean time to failure of an analog PABX, those values being generated by the application of mathematical models for life prediction in the usage operation condition, given the accelerated reliability estimate.

Additionally to the tests, a reliability estimation of the PABX central is done using US MIL-HDBK-217 F (1991). Results are used to compare and to validate the reliability value evaluated through the accelerated tests.

It is important to emphasize that the application of the methods described in this present text is not restricted to analog PABX systems, being applied to a wide range of electronic equipments with similar technological complexity.

Key words: Reliability, Accelerated tests, Electronic Systems.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

Pode-se definir confiabilidade, segundo a norma NBR-5462(1994), como capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.

A análise de confiabilidade de componentes eletrônicos passou a ser objeto de estudo após a Segunda Guerra Mundial, principalmente com o desenvolvimento de sensores empregados em componentes de sistemas de navegação e comunicação utilizados pelo exército norte-americano. Segundo Evan (1998), a confiabilidade se desenvolveu bastante a partir da década de 50, motivada principalmente pela ocorrência de acidentes na área militar. As técnicas de análise desenvolvidas na época têm sido constantemente aprimoradas e passaram a ser empregadas em outros setores industriais, como a indústria aeronáutica e a eletro-eletrônica em geral, incluindo bens de consumo tais como televisores, computadores ou mesmo telefones celulares.

No âmbito dos sistemas telefônicos de comunicação a confiabilidade é fundamental, pois tais sistemas são base para outros cuja falha pode causar grandes danos à população, por exemplo, no caso de uma falha em um sistema telefônico de um serviço público e emergência.

Segundo Salmela (2005), as empresas de telecomunicações têm a tradição de utilizar padrões de qualidade e confiabilidade similares aos exigidos para os equipamentos de uso militar. Tal fato é necessário para garantir uma alta disponibilidade nos sistemas de comunicação, que operam incessantemente. A confiabilidade é determinada por diversos fatores entre eles as necessidades do operador de telecomunicações e do usuário final, imposições de normas que regulamentam o setor, fatores econômicos, entre outros.

Até meados da década de 80, a indústria militar detinha a maior parte da tecnologia da indústria de componentes eletrônicos. Naquela época, apresentar uma alta confiabilidade era de vital importância, além disso, o custo não era fator determinante em projetos. Passada a guerra fria, o volume de produção da indústria militar diminuiu. Hoje em dia, a tecnologia de componentes eletrônicos é desenvolvida focando-se na demanda do consumidor. E é por esta razão que é necessária a produção de componentes de tamanho reduzido e com preços reduzidos, além disso, a confiabilidade não é sempre o fator determinante no projeto. Por essa razão, não são todos os componentes eletrônicos que apresentam confiabilidade desejada a determinada necessidade.

Para satisfazer a confiabilidade dos sistemas, a manufatura do equipamento deve levar em conta a necessidade e homologação da confiabilidade dos componentes usados na fabricação do produto. O nível de confiabilidade do componente deve ser compatível com o nível que o sistema requeira, sendo este um requisito de projeto.

A princípio entendia-se que projetar um equipamento confiável significava selecionar corretamente componentes e empregá-los conforme recomendações do fabricante. Entretanto, com o aumento da sofisticação e da severidade das consequências das falhas de sistemas eletrônicos, passou-se a empregar técnicas mais sofisticadas de predição de confiabilidade de um sistema ainda em suas fases iniciais de projeto, as quais são complementadas com a execução de experimentos que visam simular a operação do sistema, além da identificação de falhas não previstas no projeto. A partir dos resultados destes experimentos avalia-se a confiabilidade do mesmo verificando se as exigências de projeto foram atingidas e, caso contrário, realizam-se modificações no projeto, a fim de obter-se um aumento de confiabilidade.

O projeto de um equipamento eletrônico deve ser executado a fim de garantir que o mesmo permaneça operacional por um período de tempo específico, sem apresentar falhas que causem a interrupção parcial ou total de sua operação, considerando como requisito de projeto as condições ambientais associadas com a sua operação, bem como condições específicas de utilização.

A análise da confiabilidade de um equipamento eletrônico deve ser executada ao longo do projeto, em conformidade com a técnica denominada de projeto voltado para a confiabilidade e tem por objetivo definir os seguintes pontos:

- 1) Quais os principais modos de falha associados aos componentes do sistema;
- 2) Qual o comportamento estatístico destes modos de falha;
- 3) Qual a progressão da falha de um componente ao longo do sistema e as suas conseqüências sobre a operacionalidade do mesmo.

A caracterização da confiabilidade e de sua vertente estatística se faz necessária como ferramenta de acesso ao tratamento da falha, isto porque uma operação confiável é aquela menos sujeita à falhas ou até isenta das mesmas quando for possível.

Pode-se definir confiabilidade, segundo a norma, como capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.

Tomando-se a definição de confiabilidade apresentada pela norma NBR-5462(1994), “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”, pode-se notar alguns pontos importantes:

- Um desempenho específico é esperado para que possa ser definido se o componente ou sistema cumpre suas funções de forma satisfatória.
- Condições de uso devem ser especificadas.
- Há um período de tempo de utilização especificado.

Alguns outros pontos são merecedores de atenção na determinação da confiabilidade. Primeiramente, a função operacional do equipamento deve ser claramente definida, pois isto permite reconhecer as formas de utilização e eventuais modos de falhar. Segundo Lafraia (2001), falha funcional é a incapacidade de qualquer item atingir o padrão de desempenho esperado.

Adicionalmente, o ambiente de operação deve ser bem caracterizado, sendo um aspecto complexo, pois não só inclui o meio físico, mas as ações de manutenção e operação. Finalmente, o tempo de utilização, o qual pode expressar a severidade de uso imposta ao equipamento.

A confiabilidade é uma grandeza mensurável a partir da análise estatística da ocorrência do evento falha. Sua observação e tratamento estatístico são relevantes para a ciência da confiabilidade, pois a partir desta análise pode-se obter a probabilidade citada na definição de confiabilidade.

Os componentes de um equipamento eletrônico podem apresentar um ou mais modos de falha. Modo de falha pode ser definido como o mecanismo pelo qual um item falha.

A experiência no trato com os equipamentos possibilitou à engenharia conhecer empiricamente alguns modos de falha, como fadiga, o desgaste e a corrosão, entre outros. Atualmente, a determinação dos modos de falha é preferencialmente feita antes mesmo do produto ser comercializado, ou seja, em sua fase de projeto. Pode-se, para tanto, recorrer à simulação, aos ensaios de laboratório e de campo com protótipos.

O modo de falhar dos componentes é função das solicitações a que o mesmo será submetido durante a sua operação. Entretanto, é possível que haja alterações neste modo de falhar se as solicitações limites previstas no projeto forem ultrapassadas.

Para avaliação da progressão da falha de um componente ao longo do sistema, torna-se necessário o emprego de técnicas de análise de confiabilidade mais complexas.

A sofisticação dos equipamentos, os requisitos cada vez mais exigentes quanto à segurança e a necessidade de dominar os fenômenos relativos aos equipamentos e seus desdobramentos deram origem ao método denominado FMEA (do inglês "*Failure Modes and Effects Analysis*"), o qual é muito utilizado em análise de confiabilidade.

Como método, o FMEA tem diretrizes gerais as quais norteiam sua elaboração. Basicamente, a elaboração do mesmo exige a reflexão sobre cinco questões a respeito do sistema:

1. Como cada componente do sistema pode falhar?
2. Quais os efeitos desta(s) falha(s) sobre o sistema?
3. Quão críticos são estes efeitos?
4. Como detectar a falha?
5. Quais as medidas contra estas falhas (evitar, prevenir a ocorrência das mesmas ou minimizar seus efeitos)?

Dessa forma, o FMEA torna-se um método qualitativo de análise da confiabilidade.

Como forma de complementar a análise qualitativa de confiabilidade de um produto deve-se executar ensaios que permitam verificar as hipóteses empregadas nos critérios de projeto dos mesmos, bem como avaliar se os modos de falha previstos são aqueles que irão surgir durante a operação do sistema no campo. O valor numérico da confiabilidade de um equipamento complexo deve ser preferencialmente determinado de forma experimental, dada a escassez de informações sobre a confiabilidade de seus componentes. Como os ensaios de confiabilidade são usualmente bastante demorados, incompatíveis, portanto, com a necessidade de um rápido desenvolvimento e lançamento de um novo produto, deve-se recorrer a um tipo especial de ensaio de confiabilidade, que visa reduzir o tempo de ensaio. Esta técnica de ensaio é conhecida como “ensaios acelerados”.

Nestes ensaios busca-se reduzir o tempo de ocorrência de falhas do equipamento, submetendo o mesmo a solicitações mais severas que as previstas durante sua operação normal, desde que estas não alterem os modos de falha previstos para o equipamento. A partir dos resultados destes ensaios, e empregando-se técnicas de extrapolação de resultados, baseadas não só em modelos matemáticos,

mas também nos fenômenos físicos associados aos modos de falha, pode-se definir a confiabilidade do equipamento na sua condição normal de uso.

Entretanto, embora extremamente atraentes sob o ponto de vista de reduzir o tempo de desenvolvimento de um produto, a utilização de ensaios acelerados envolve um complexo estudo de definição dos modos de falha dos componentes e das maneiras pelas quais os mesmos podem ter sua frequência de ocorrência acelerada, em função da alteração das condições de operação do produto.

1.2. Objetivo

O objetivo desta pesquisa é desenvolver um método para avaliar a confiabilidade de equipamentos eletrônicos complexos, baseado na execução de análises experimentais em laboratório, simulando condições de uso mais severas que as observadas no “campo”.

Segundo a norma MIL-HDBK-781(1996) um sistema eletrônico complexo possui na ordem de 2000 componentes.

Tendo em vista que os prazos de desenvolvimento de um produto estão sendo cada vez mais reduzidos, dada a necessidade de atendimento às novas expectativas de mercado e ao desenvolvimento de produtos com desempenho superior aos concorrentes em prazos também inferiores aos praticados pelos concorrentes, torna-se necessário reduzir os períodos de ensaios de protótipos, sem perder a possibilidade de detecção e correção de erros de projeto ou manufatura quando da execução de ensaios com estes protótipos.

Uma possibilidade de verificar a confiabilidade de um produto, ou seja, verificar a probabilidade deste operar sem falhas por um período de tempo pré-determinado sob condições específicas, em prazos bastante reduzidos, envolve a utilização do conceito de ensaios acelerados. Nestes, através de controle da solicitação atuante no equipamento em níveis superiores aos encontrados em sua utilização normal, reduz-se o prazo necessário para ocorrência de uma falha.

Empregando-se um método de extrapolação dos resultados dos ensaios acelerados, pode-se fazer uma previsão da confiabilidade do equipamento em condições normais de operação.

A execução de ensaios acelerados com equipamentos eletrônicos permite a verificação da confiabilidade dos mesmos em um período reduzido, possibilitando uma diminuição do prazo de desenvolvimento do produto. Adicionalmente a execução destes ensaios permite a verificação experimental dos modos de falha do equipamento, possibilitando a comparação dos mesmos com os modos de falha previstos em projeto ou mesmo observados durante a operação do equipamento em campo.

Dessa forma, elabora-se um método de execução e análise de resultados de ensaios acelerados a serem realizados com equipamentos eletrônicos visando a definição da confiabilidade dos mesmos.

Neste trabalho é usada como exemplo de aplicação uma central telefônica analógica cujas características estão descritas no Capítulo 4.

1.3. Organização do Trabalho

Após uma breve introdução ao escopo e aos objetivos do presente estudo, apresentada no capítulo 1 deste trabalho, no capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos de confiabilidade, incluindo os fatores que influenciam a sua definição bem como a forma de representação da confiabilidade de componentes e sistemas eletrônicos. Destaca-se a apresentação do método de análise de confiabilidade de sistemas eletrônicos proposto pela norma militar US MIL-HDBK-217 F (1991).

No capítulo 3 são apresentados os métodos de análise de confiabilidade através de ensaios acelerados de vida, os modelos de aceleração devido a fatores ambientais e os modelos matemáticos que fundamentam as análises.

A seguir, no capítulo 4, são apresentados os resultados da análise da execução de ensaios de confiabilidade de uma central telefônica analógica, tomada

como exemplo neste estudo. Estes resultados foram obtidos com a aplicação do método descrito no capítulo 3. Obtém-se uma relação que permite calcular o tempo médio até a falha da central nas condições normais de uso em função do tempo médio até a falha calculado a partir dos resultados dos ensaios acelerados.

As principais conclusões obtidas com a execução da presente pesquisa são apresentadas no capítulo 5.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas que subsidiaram a execução deste estudo.

CAPITULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS DE CONFIABILIDADE

Nas décadas que antecederam a Segunda Guerra Mundial, os conceitos de estatística e de probabilidade já estavam plenamente consolidados, porém, não haviam sido empregados para avaliação da probabilidade de falha de sistemas.

No decorrer do conflito global, entre 1939 e 1945, em função do desenvolvimento de armamentos de maior complexidade, a indústria bélica passou a necessitar de instrumentos técnicos e analíticos que permitissem a estimativa da vida útil ou mesmo da probabilidade de um equipamento operar com sucesso. É neste contexto que os conceitos de confiabilidade passaram a ser empregados no desenvolvimento de projetos de Engenharia. No caso específico de componentes eletrônicos, segundo Denson (1998), durante a Segunda Grande Guerra estes ainda eram baseados na tecnologia das válvulas, que apresentavam um grande número de falhas. Esta observação levou ao desencadeamento de vários estudos que visavam melhorar a confiabilidade destes sistemas.

De acordo com Ebel (1998), após a Segunda Grande Guerra, houve uma grande preocupação com o estabelecimento de normas ligadas a confiabilidade e disponibilidade de componentes e sistemas eletrônicos por parte do setor militar norte-americano. Muitos grupos e encontros foram criados. Um dos grupos foi o *Ad Hoc Group on Reliability of Electronics Equipments* criado em 1950. Em 1952 foram concluídas as seguintes necessidades visando aumentar a confiabilidade dos sistemas eletrônicos:

- Era necessário melhorar a coleta de dados de falha dos equipamentos em campo para que as análises quantitativas fossem melhor subsidiadas e para que pudessem ser detectadas as causas raiz das falhas;
- Componentes mais confiáveis deveriam ser desenvolvidos em substituição às válvulas;
- Deveriam ser estabelecidos requisitos quantitativos de confiabilidade;

- A necessidade de ensaios de confiabilidade de equipamentos e componentes produzidos em larga escala;
- Criação de órgãos reguladores para estabelecer os padrões de confiabilidade a serem seguidos;

Ainda segundo Ebel (1998), na década de 60 houve um grande crescimento da chamada Confiabilidade Física que visa analisar o processo de falha através do estudo do processo físico ou químico desencadeador da falha. Esta tendência nasceu na RADC (*Rome Air Development Center*) em Nova York nos Estados Unidos. Em 1961 a RADC iniciou o um programa denominado Física da Falha (*Physics of Failure*). Desde então foram desenvolvidos importantes estudos sobre as propriedades físicas e químicas que propiciam as falhas dos mecanismos eletrônicos. Atualmente pesquisas importantes são desenvolvidas em Física da Falha, principalmente em institutos como o CALCE (*Center for Advanced Life Cycle Engineering*) da Universidade de Maryland, Estados Unidos.

A partir do final da década de 70, a confiabilidade passou a ser empregada no projeto de sistemas mais complexos, cuja falha normalmente causa prejuízos elevados, quer seja de natureza ambiental, financeira ou econômica, além de poder levar à perda de vidas humanas. Como exemplo desta aplicação pode-se citar os sistemas eletrônicos de controle de estruturas oceânicas, civis e aeronáuticas e nucleares.

Atualmente, crescentes exigências do mercado consumidor por produtos com melhor desempenho e menor preço, juntamente com expectativas de redução de custos por parte das empresas, têm levado a um aumento de ações objetivas, visando reduzir a probabilidade de falha de seus produtos, através do emprego de considerações sobre a confiabilidade dos mesmos.

A falha de determinado produto causa aumento de custos e inconveniências para o consumidor e, em casos específicos, pode comprometer aspectos de segurança dos usuários e da população em geral.

A confiabilidade está, portanto, associada à operação bem sucedida, com ausência de paradas para manutenção ou devido à ocorrência de falhas.

Para a análise de Engenharia é necessário definir a confiabilidade como uma probabilidade. Assim, conceitua-se confiabilidade como sendo a probabilidade de um produto, sistema, máquina ou equipamento operar sem falhas, dentro das especificações para as quais foi projetado e construído, por um período de tempo determinado.

A esta conceituação está diretamente ligada a definição clara de um critério de falha, o qual possibilita determinar a partir de que momento o equipamento sob análise é considerado com desempenho abaixo daquele considerado como aceitável, ou seja, a partir de que momento considera-se a ocorrência de falha. Como exemplos de critérios de falha, pode-se citar a potência líquida mínima fornecida no eixo de motor elétrico, a quantidade de impurezas detectadas na análise química de um material de construção, ou ainda, a quantidade de poluentes despejados na atmosfera por um processo químico de fabricação. (Souza, 2003)

2.1. Definições de Confiabilidade

Conforme Leitch (1995) existem diversas definições de confiabilidade de acordo com diversos autores e órgãos reguladores. Segundo a *European Organization for Quality Control* (1965) apud Leitch (1995) confiabilidade é “A medida da capacidade de um produto operar com sucesso, quando solicitado, por um período de tempo pré-determinado, sob condições ambientais específicas. É medida como uma probabilidade”. De acordo com *US Military Handbook* (1970) apud Leitch (1995) confiabilidade pode ser definida como “A probabilidade de um item executar a sua função sob condições pré-definidas de uso e manutenção por um período de tempo específico”. E finalmente, segundo o *BS Institution* (1970) apud Leitch (1995) e *UK Army* (1976) apud Leitch (1995) confiabilidade é definida como “A habilidade de

um item executar a sua função sob determinadas condições específicas, por um período pré-determinado”.

Dentre as definições apresentadas podem-se destacar alguns pontos em comum. Todas as definições especificam a confiabilidade como uma probabilidade, portanto trata-se de uma grandeza estatística, além disso, todas elas pressupõem que o equipamento tenha um desempenho específico sob condições e período de utilização pré-definidos.

Destacam-se também alguns aspectos importantes a serem avaliados em uma análise de confiabilidade. Primeiramente a função do equipamento deve ser claramente definida. Também é importante avaliar o meio físico que envolve o equipamento, assim como os recursos de instalação, manutenção e a interface com o usuário. Finalmente é fundamental para uma análise de confiabilidade a determinação do período de utilização do equipamento, este período nem sempre é medido como uma grandeza temporal, mas também pode ser medido como uma distancia percorrida ou ainda através de ciclos de operação. Souza (2003).

Uma outra forma de conceituar confiabilidade é: “a probabilidade de que um sistema ou equipamento sobreviva por um período de tempo específico”. Expressando esta conceituação em termos da variável aleatória t , o tempo até ocorrer a falha, e da correspondente função densidade de probabilidade (fdp) de ocorrência de falha $f(t)$, tem-se que a probabilidade de falha, em um intervalo de tempo específico, pode ser definida pela relação:

$$f(t) \Delta t = P \{ t < t < t + \Delta t \} \quad (2.1)$$

Sendo $F(t)$ a função de probabilidade acumulada, vem:

$$F(t) = P \{ t < t \} \quad (2.2)$$

ou seja, $F(t)$ expressa a probabilidade de ocorrer falha até um tempo t .

Esta função $F(t)$ é crescente com o tempo, atingindo um valor unitário quando t tende a ∞ , tal como indicado na Figura 2.1.

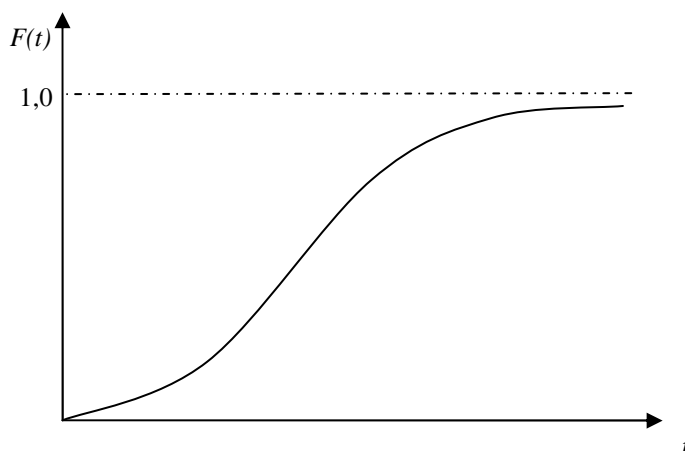


Figura 2.1 - Função de Probabilidade Acumulada $F(t)$. (Leitch,1995).

Como, sob o ponto de vista da lógica de sua operação, um componente ou equipamento ou está operando adequadamente, conforme previsto no projeto, ou está no estado de falha, portanto eventos mutuamente excludentes, a confiabilidade pode ser, probabilisticamente, expressa pela relação:

$$R(t) = P\{t > t\}, \quad (2.3)$$

ou seja,

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.4)$$

A Função de Confiabilidade está mostrada na Figura 2.2.

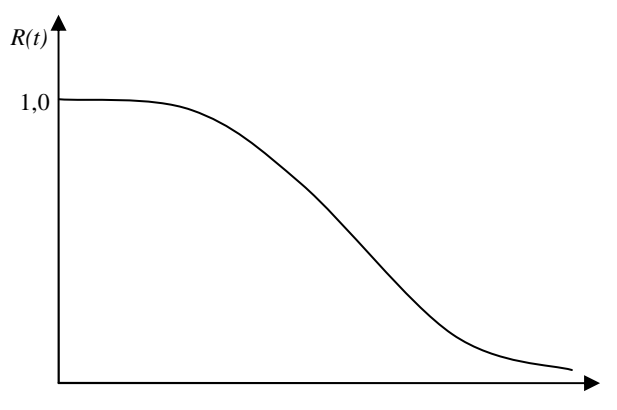


Figura 2.2 - Função de Confiabilidade $R(t)$. (Leitch, 1995).

Como decorrência da própria definição da função distribuição acumulada, tem-se:

$$R(t = 0) = 1 \quad (2.5)$$

$$R(t = \infty) = 0 \quad (2.6)$$

A partir do gráfico apresentado na Figura 2.2 verifica-se, portanto, que a confiabilidade de um produto ou sistema apenas decai ao longo do tempo, ou seja, quanto maior o tempo de operação do mesmo maior será a probabilidade deste apresentar falha. Portanto, apenas no instante em que o equipamento é colocado em operação, sua confiabilidade é de 100%. Adicionalmente, pode-se afirmar que a confiabilidade não é restaurada, ou seja, não “dá saltos” ao longo da vida operacional.

O comportamento de determinado produto com relação à falha é melhor compreendido pelo exame do comportamento de sua taxa de falha .

Segundo Souza (2003) Esta taxa de falha $\lambda(t)$ pode ser definida em termos da própria confiabilidade, como segue: “Sendo $\lambda(t) \Delta t$ a probabilidade de que o sistema falhará em um tempo $t < t + \Delta t$, dado que ainda não falhou até o tempo em $t = t$ ”, tem-se que $\lambda(t) \Delta t$ é a probabilidade condicional abaixo indicada:

$$\lambda(t) \Delta t = P(t < t + \Delta t | t > t) \quad (2.7)$$

Assim, com base na definição de probabilidade condicional, tem-se:

$$P(t < t + \Delta t | t > t) = P\{(t > t) \cap (t < t + \Delta t)\} / P(t > t) \quad (2.8)$$

Como o numerador da Equação (2.8) é a própria $f(t) \Delta t$ e o denominador é a $R(t)$, a taxa de falhas instantânea é expressa pela relação:

$$\lambda(t) = f(t) / R(t) \quad (2.9)$$

sendo,

$f(t)$: função densidade de probabilidade de falha;

$R(t)$: confiabilidade.

O comportamento da taxa de falha $\lambda(t)$ em relação ao tempo t é um indicador das causas de falha. A curva da banheira (“*bathtub curve*”), mostrada na Figura 2.3, representa graficamente esta relação para sistemas ou componentes sem redundância.

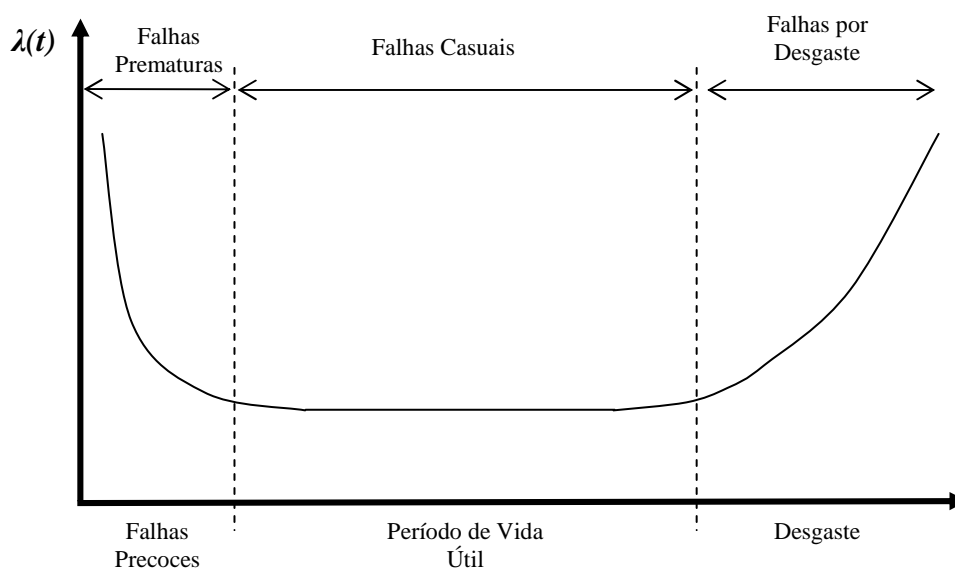


Figura 2.3 - Representação da Curva da Banheira (Lafraia, 2001).

O relativamente curto intervalo de tempo indicado na região I do gráfico apresentado na da Figura 2.3, indica taxas de falha que decrescem a partir de $t = 0$. Esta região denomina-se de falhas precoces (*“early failures”*) ou ainda, em analogia com seres humanos, de mortalidade infantil. Sob este parâmetro de comparação as mortes, neste período, são causadas por defeitos congênitos ou fraquezas, sendo que a taxa de mortalidade decresce com o tempo. Muitas vezes o problema da falha precoce é contornado através da especificação de um período de tempo durante o qual o equipamento realiza um pré-teste. Durante este tempo o carregamento e utilização do produto são controlados de tal maneira que problemas são detectados e componentes são reparados.

Normalmente, as falhas precoces ou prematuras estão relacionadas com problemas associados aos processos de fabricação e montagem ou mesmo com o material empregado na fabricação do componente. Estes problemas são não usuais, ou seja, ocorrem esporadicamente, muitas vezes por alguma razão não específica. No caso de montagem, é bastante comum a falha estar relacionada a algum erro humano do montador, por exemplo, no caso da soldagem de componentes em uma placa podem ocorrer contaminações por impurezas que podem causar a corrosão das

uniões soldadas quando a mesma é submetida a altas temperaturas devido a altas densidades de corrente elétrica.

A região intermediária da curva da banheira contém as aproximadamente constantes e menores taxas de falha, sendo preferencialmente o período de operação do produto. As falhas que ocorrem durante esta fase são denominadas falhas aleatórias e normalmente originam-se de carregamentos inevitáveis e inesperados e menos comumente devido a defeitos inerentes ao equipamento em si, como por exemplo, imperfeições microscópicas dos materiais que compõem o componente que causam, por exemplo, descontinuidades no material provocando assim a falha do sistema. Fazendo-se uma analogia com a população humana, as mortes nesta parte da curva da banheira são devidas a acidentes ou doenças infecciosas. Nos equipamentos podem-se citar como exemplos de causas de falha na região II da curva da banheira: terremotos, surtos de energia, vibrações, impactos mecânicos, flutuações de temperatura e de umidade.

Na região III, mais à direita da curva da banheira, observa-se que a taxa de falha é crescente, em função do próprio desgaste do equipamento, na fase final de sua vida útil. Nesta fase, as falhas tendem a ter natureza cumulativa tais como corrosão, trincas de fadiga, desgaste por atrito, dentre outros. O aumento muito rápido da taxa de falha normalmente fundamenta o critério de quando peças devem ser substituídas e também determina a vida útil do produto ou sistema.

A curva da banheira representada na Figura 2.3 pode ser considerada genérica, uma vez que cada categoria de equipamento apresenta uma curva característica. Para equipamentos eletro-eletrônicos, por exemplo, a curva da banheira apresenta, tipicamente, as regiões I e II, ou seja, verifica-se a presença da mortalidade infantil e durante a vida operacional os mesmos apresentam falhas de natureza aleatória, sem as características de envelhecimento. Contrariamente, para componentes mecânicos, pode-se afirmar que a curva da variação temporal da taxa de falha apresenta preferencialmente as regiões I e III. A mortalidade infantil está associada a problemas de fabricação, montagem ou de materiais, que induzem a falha no início da vida operacional. Durante o uso, os equipamentos mecânicos falham, normalmente, por desgaste, corrosão ou fadiga, que são mecanismos de falha

nos quais o dano é acumulativo ao longo do tempo de operação, até que este atinja um valor crítico, precipitando a falha. Desse modo, a probabilidade de falha do equipamento é crescente ao longo do tempo e, associada a esta, tem-se um aumento da taxa de falha, representando um envelhecimento ou desgaste do produto.

Quando são medidos os tempos até a falha de componentes ou sistemas e são calculados as funções $f(t)$ ou $F(t)$, está se trabalhando com distribuições estatísticas de tempo de vida.

Um parâmetro importante de qualquer distribuição estatística é o seu valor médio. O valor médio associado a uma função densidade de probabilidade $f(x)$ é calculado como:

$$\mu = \int_0^{\infty} x \cdot f(x) dx \quad (2.10)$$

Quando essa distribuição é de tempos até a falha, o valor médio é chamado de Tempo Médio até a Falha, ou *MTTF*, do inglês “*Mean Time to Failure*”. Assim o *MTTF* pode ser calculado por:

$$MTTF = \mu = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (2.11)$$

Um caso particular de grande interesse no estudo de falhas de componentes ou sistemas eletrônicos é a representação da confiabilidade pela distribuição exponencial, que apresenta uma taxa de falha constante, e é utilizada para representar a parte II da curva da banheira.

Uma distribuição exponencial de uma variável aleatória X contínua que tome todos os valores possíveis não negativos, tem sua função densidade de probabilidade expressa por:

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda x}, x \geq 0, \quad (2.12)$$

sendo λ o parâmetro básico da distribuição, comumente denominado taxa de ocorrência de eventos, e no caso deste evento ser a falha, o parâmetro é denominado taxa de falha.

Indica-se na Figura 2.4 a representação gráfica da função densidade de probabilidade da distribuição exponencial.

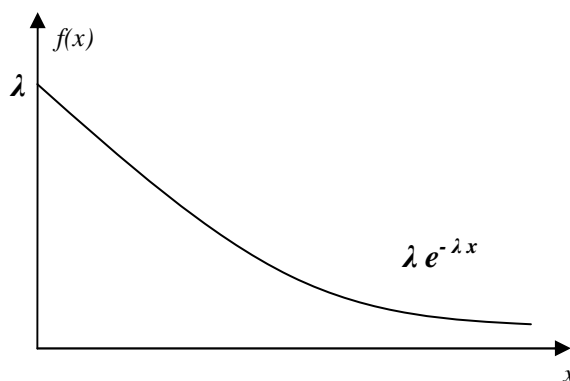


Figura 2.4 - Função Densidade de Probabilidade da Distribuição Exponencial, (SOUZA, 2003).

A distribuição acumulada da distribuição exponencial, mostrada na Figura 2.5 é facilmente obtida a partir da integração da função densidade de probabilidade, obtendo-se expressão apresentada na Equação 2.13.

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}, x \geq 0 \quad (2.13)$$

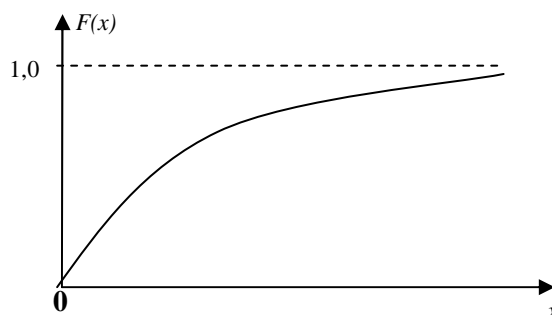


Figura 2.5 - Função Probabilidade Acumulada da Distribuição Exponencial. (SOUZA, 2003)

A média da distribuição, no caso da variável aleatória ser o tempo de vida correspondente ao *MTTF* e é calculada pela relação:

$$\mu = MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.14)$$

Para uma distribuição exponencial de tempos até a falha, característica de sistemas eletrônicos como as centrais telefônicas, para um tempo igual ao tempo médio até a falha, *MTTF*, a confiabilidade é de apenas 0,368, ou seja, cerca de 63% dos equipamentos falham antes de um tempo igual ao *MTTF* da distribuição.

Deve-se, portanto, reconhecer que embora o tempo médio até a falha seja citado como um indicativo do tempo operacional de um componente ou sistema eletrônico, não pode ser esperado que a maioria dos componentes produzidos operem sem falha por um período de tempo igual ao *MTTF*.

2.2. Confiabilidade de Componentes Eletrônicos

Conforme mencionado anteriormente confiabilidade é a probabilidade de um item executar a sua função sob condições específicas de utilização por um período de tempo pré-definido. Vale destacar que para componentes eletrônicos as condições específicas englobam todo o ambiente físico incluindo condições mecânicas, térmicas e elétricas.

A confiabilidade leva em consideração as falhas de um componente ou sistema, portanto, é fundamental conhecer os principais modos de falha e uma proporção aproximada de suas ocorrências, assim como os mecanismos de falha causadores dos correspondentes modos de falha. Porém, primeiramente, é necessária uma clara distinção do conceito de modo de falha e mecanismo de falha.

O modo de falha é o sintoma elétrico causado pela ocorrência de um mecanismo de falha. Assim um circuito aberto ou fechado, um decréscimo de corrente ou um sinal de saída inadequado são modos de falha possíveis para um equipamento eletrônico. Cada modo de falha, em princípio, pode ser causado por um

ou mais mecanismo de falha. Os últimos são os fenômenos ou processos físicos, químicos, metalúrgicos ou ambientais que causam a degradação ou mau funcionamento do equipamento. Por exemplo, circuito aberto de um interconector pode ocorrer devido à corrosão ou devido a uma densidade de corrente muito elevada.

A Tabela 2.1, Ireson et al. (1995) sumariza os principais modos de falha observados em componentes eletrônicos.

Tabela 2.1 - Modos de falhas nos dispositivos eletrônicos (IRESON et al., 1995)

Tipo	Principais modos de Falha	Proporção aproximada (%)
Micro-circuitos de lógica digital	Saída 0 ou 1	80
	Não funcionamento	20
Micro-circuitos Lineares	Parâmetros de ventilação	20
	Sem saída	70
	Saída sobrecarregada	10
Transistores	Baixo ganho	20
	Circuito aberto	30
	Curto circuito	20
	Altas perdas no coletor-base	30
Diodos	Curto circuito	10
	Circuito aberto	20
	Alto corrente reversa	70
Resistores de filmes fixos	Circuito aberto	30
	Mudança de parâmetros	70
Resistores variáveis	Circuito aberto	30
	Intermitente	10
	Ruído	10
	Mudança de parâmetros	50
Relês	Falta de transferência	20
	Intermitente	70
	Curto-circuito	10
Capacitores Fixos	Curto circuito	60
	Circuito aberto	20
	Perda excessiva	10
	Mudança de parâmetros	10

Associado aos mecanismos de falha deve-se avaliar os parâmetros que os causam, por exemplo, uma das causas da corrosão é a umidade relativa excessiva, desta forma a umidade é o parâmetro que influencia no mecanismo de falha corrosão.

Segundo Jensen (1995), visando melhorar o estudo da confiabilidade de componentes e sistemas eletrônicos, é utilizada uma classificação das falhas como intrínsecas e extrínsecas. Falhas intrínsecas são aquelas falhas que ocorrem após a montagem do componente no sistema e estão relacionadas ao projeto, material, processo de fabricação, montagem ou empacotamento do componente. Falhas extrínsecas são normalmente relacionadas a descargas elétricas, manipulação indevida, sobrecarga (mecânica, térmica ou química) ou ainda aplicação indevida do componente (erro de projeto do sistema).

De modo geral pode-se afirmar que as falhas intrínsecas são de responsabilidade da manufatura do componente e as falhas extrínsecas são de responsabilidade da utilização do componente. A distinção entre falhas intrínsecas e extrínsecas é importante, pois estas apontam as possíveis causas da falha e, conseqüentemente, também fundamentam os caminhos para seleção de ações que podem reduzir ou eliminar totalmente o efeito causador da falha.

Desta forma, deve-se encontrar os mecanismos de falha que propiciam a ocorrência das falhas intrínsecas e extrínsecas. Na grande maioria dos ensaios de confiabilidade de componentes eletrônicos o objetivo principal é precipitar a ocorrência de falhas devido a erros de projeto, de seleção dos componentes, de manufatura ou montagem. Assim utilizam-se modelos físicos que relacionam um determinado mecanismo de falha com cada modo de falha.

Assim pode-se destacar as principais variáveis que controlam os mecanismos de falha intrínseca, predominante observadas nos componentes eletrônicos. Destacam-se os fatores ambientais como os principais parâmetros de falhas, sendo eles temperatura, umidade e vibração, conforme é apresentado no Capítulo 3, onde apresenta-se diversos modelos de aceleração para diversos fatores ambientais e funcionais, como por exemplo, densidade de corrente e nível de tensão elétrica a que um componente ou sistema está sujeito. Porém estes fatores são de difícil controle e

de menor proporção de influência na precipitação de modos de falha em relação aos fatores ambientais.

2.3. Predição de Confiabilidade de Sistemas Eletrônicos Através de Normas

No caso de sistemas eletrônicos existe uma norma militar propondo um método de predição da confiabilidade de um sistema, baseado na avaliação da confiabilidade de seus componentes, definida em termos de uma base de dados de frequência de ocorrência de falhas, qual é baseada em observações de equipamentos em operação. Trata-se da norma US MIL-HDBK-217 F (1991) - *Reliability Prediction for Electronic Systems*. Esta norma propõe um método de predição da confiabilidade de componentes eletrônicos sem necessidade do uso de análises experimentais, baseando-se na definição dos componentes e no fluxo de informação entre os mesmos durante a operação do sistema.

Neste método a confiabilidade é determinada pela associação de uma taxa de falha básica a um tipo específico de componente, sendo esta modificada através da aplicação de coeficientes que levam em conta fatores como qualidade do componente, grau de complexidade, fatores ambientais e nível de esforço aplicado, entre outros.

A partir da estimativa de taxa de falha, a norma recomenda a definição da confiabilidade do componente com o emprego de uma distribuição exponencial, usualmente empregada para a representação da probabilidade de falha de componentes eletrônicos.

O procedimento apresentado por esta norma baseia-se em dados coletados durante a operação de componentes eletrônicos não utilizando ensaios para determinar a sua confiabilidade.

Um grande banco de dados de confiabilidade de equipamentos e componentes eletrônicos desenvolvido pelo USAF *Rome Air Development Center* e publicado como US MIL-HDBK-217 F (1991) é utilizado para se obter modelos de taxa de falha para diferentes tipos de componentes. Destaca-se que este banco de dados é construído com dados de falha reais de equipamentos em operação normal e são levados em conta fatores ambientais como temperatura e grau de vibração, bem como, fatores ligados ao carregamento do componente ou sistema, tais como tensões e correntes elétricas, entre outros fatores para estimar a taxa de falha de um componente em uma condição operacional específica.

A expressão geral para a estimação da taxa de falha de um componente eletrônico passivo proposta pela US MIL-HDBK-217 F (1991) é expressa de acordo com a Equação 2.15.

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \prod \pi_i \quad (2.15)$$

onde:

λ_b : Taxa de Falha básica

λ_p : Taxa de Falha do componente

π_i : fatores funcionais adimensionais que expressão a complexidade tecnológica, o nível de qualidade, temperatura, tensão elétrica, entre outros.

Segundo Yang; Raafat (1992), os fatores para o cálculo da taxa de falha são obtidos através de bancos de dados alimentados por dados de falha de equipamentos operando em campo. De acordo com O'Connor (2002), equipamentos nominalmente idênticos podem ter taxas de falhas muito diferentes, por várias razões, como por exemplo, diferenças nos padrões de fabricação e métodos de uso. Equipamentos similares, isto é, construídos com especificações e componentes similares, podem ter confiabilidades muito diferentes devido às falhas na fabricação e no projeto, não levados em conta no modelo de predição da taxa de falha. O modelo de predição da taxa de falha é baseado em um nível de solicitação média constante (por exemplo, temperatura e tensão). Isto não leva em conta a possível incidência de sobrecargas

passageiras, esforços cíclicos e outros fatores que podem precipitar a ocorrência da falha. O modelo também é baseado na hipótese de que todos os equipamentos são propensos à falha e também leva em conta a qualidade do dispositivo. A norma US MIL-HDBK-217 F (1991) fornece uma série de dados para serem empregados na comparação de diferentes alternativas de projeto de sistemas eletrônicos, os quais devem ser validados através de ensaios de protótipos.

O método de análise de solicitação para predição da taxa de falha proposto pela US MIL-HDBK-217 F(1991) é muito usado como um procedimento de revisão do projeto para permitir a quantificação dos efeitos dos esforços e outros fatores, embora mais no sentido de uma análise de comparação ou sensibilidade do que como uma predição explícita da taxa de falha. A taxa de falha real dependerá de muitos fatores, como o projeto para proteção de sobrecargas, qualidade do processo de fabricação, métodos de ensaios usados, em adição aos fatores considerados na análise de solicitação. Segundo O'Connor (2002), os valores de confiabilidade obtidos a partir da US MIL-HDBK-217 F(1991) não são os máximos valores possíveis. Muitos sistemas são produzidos com confiabilidade maior que as indicadas pela norma em questão. Portanto esta análise é apenas mais um elemento de um programa de confiabilidade para um sistema eletrônico.

A US MIL-HDBK-217 F (1991) inclui um método simplificado para a predição da taxa de falha, que omite a análise de esforços. Este método de cálculo pode ser usado nas etapas iniciais do projeto, antes das informações sobre as solicitações sobre componentes serem avaliadas.

A seguir apresenta-se uma breve descrição dos principais fatores adimensionais abordados pela norma em questão.

Nível de qualidade, π_Q

A qualidade dos componentes usados em um sistema eletrônico tem uma grande influência na confiabilidade. O objetivo do controle de qualidade de um

componente é eliminar de uma população aqueles componentes que não estão operando corretamente logo no início da vida operacional e aqueles que possuem defeitos que possam levar a falha mais tarde, durante sua utilização. Na norma US MIL-HDBK-217 F (1991) o fator de qualidade, π_Q , é usado para levar em conta o efeito da qualidade na taxa de falha.

Os principais determinantes de qualidade para a confiabilidade de um componente são o tipo e as variáveis do teste aplicado ao componente e o controle do processo de produção. A norma US MIL-HDBK-217 F (1991) atribui valores apropriados de π_Q para estes fatores.

Efeitos do ambiente sobre o sistema, π_E

Segundo O'Connor (2002), experiências mostram que sistemas eletrônicos têm taxas de falhas que dependem do ambiente de uso do equipamento. Por exemplo, um conjunto de rádio de um avião de combate normalmente falha mais frequentemente que um conjunto similar instalado em uma base fixa. Isto é devido aos altos esforços (vibrações, temperaturas, choques mecânicos, e outros tipos de variações ambientais) experimentados na operação de um avião. A US MIL-HDBK-217 F (1991) leva em conta estes níveis de solicitações sobre o sistema aplicando um fator ambiental, π_E .

Fator de Aplicação, π_A

Alguns componentes podem falhar mais rapidamente dependendo da magnitude das solicitações elétricas e do perfil de aplicação das mesmas. Desta forma, a US MIL-HDBK-217 F (1991) leva em conta estas magnitudes e perfis de solicitações aplicados sobre o sistema aplicando um fator de aplicação, π_A . Este fator é aplicado principalmente para diodos e transistores.

2.3.1. Modelo de Predição da Taxa de Falha de Componentes Microeletrônicos

O modelo de predição da taxa de falha proposto pela norma US MIL-HDBK-217 F (1991) para dispositivos microeletrônicos é apresentado na Equação 2.16.

$$\lambda_p = \pi_Q \pi_L [C_1 \pi_T \pi_V + (C_1 + C_2) \pi_E] / 10^6 h \quad (2.16)$$

onde π_Q e π_E são os fatores descritos anteriormente; π_V é um fator relacionado a um esforço de tensão; π_L é um fator de aprendizagem, igual a uma unidade para um produto com mais de dois anos de produção; C_1 e C_2 fatores de complexidade baseados no número de entradas dos chips, ou no número de bits de memória do dispositivo e no número de transistores para dispositivos lineares, C_3 é um fator de complexidade baseado em aspectos de encapsulamento (número de pinos, tipo de encapsulamento, etc.); e π_T é um fator de temperatura, com o dispositivo em ambiente de operação. O valor π_T pode ser estimado a partir da temperatura ambiente e da carga aplicada para uma determinada saída do dispositivo, ou medido a partir da temperatura do dispositivo. Um modelo similar é usado para memórias e microprocessadores. Na seqüência do texto apresentam-se os principais modelos de predição da taxa de falha para outros elementos microeletrônicos.

2.3.2. Diodos e Transistores

A norma US MIL-HDBK-217 F (1991) propõe o modelo apresentado na Equação 2.17 para predição da taxa de falha para semicondutores discretos.

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_A \pi_Q \pi_R \pi_{S2} \pi_C / 10^6 h \quad (2.17)$$

λ_b é a taxa de falha básica para esse tipo de componente é função da temperatura. Outras definições são: π_R é um fator de classificação de potência para transistores; π_{S2} é uma função da tensão aplicada; π_C é um fator de complexidade do transistor cobre outros tipos de transistor que não os de empacotamento simples; e π_A refere-se às varias aplicações, por exemplo, potências, altas frequências de comutações ou retificações.

Os métodos de ensaio de diodos e transistores são similares ao dos equipamentos microeletrônicos. Especificações padrões e métodos de ensaio são cobertos pela US MIL-HDBK-19500/620D (2001).

2.3.3. Resistores

O modelo de taxa de falha da US MIL-HDBK-217 F (1991) para resistores fixos é apresentado na Equação 2.18.

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_R \pi_Q / 10^6 h \quad (2.18)$$

λ_b é função da potencia dissipada pelo resistor. π_R é um fator de resistência.

Nos resistores a taxa de falha cresce com o acréscimo da temperatura e da tensão elétrica, já que o modo de falha predominante em sua maioria é o circuito aberto causado pela fusão do seu material condutor, devido a uma combinação dos efeitos de defeitos inerentes e do calor. Resistores fixos geralmente não têm modos de falha introduzidos pela degradação do componente e a confiabilidade depende muito do controle de qualidade. Os valores de π_Q variam de 0,03 (confiabilidade comprovada) a 5 para produtos comerciais.

Resistores variáveis são menos confiáveis e devem ser evitados na prática.

2.3.4. Capacitores

A expressão para a taxa de falha proposta pela US MIL-HDBK-217 F (1991) para capacitores é apresentada na Equação 2.19.

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_{CV} \pi_{SR} \pi_Q / 10^6 h \quad , \quad (2.19)$$

onde π_{CV} é função da capacitância e π_{SR} é um fator de resistência em série usado para alguns capacitores eletrolíticos. A variação da taxa de falha depende do tipo de capacitor, assim como o modo de falha predominante.

2.3.5. Outros Componentes Elétricos

A norma US MIL-HDBK-217 F (1991) inclui modelos de predição das taxas de falha para outros componentes elétricos, como indutores, comutadores, transformadores, relês, conectores, etc. Citamos aqui alguns exemplos dos principais componentes a análise dos demais componentes estudados é muito semelhante e preferiu-se omiti-las para não tornar a leitura maçante.

CAPITULO 3 - ENSAIOS ACELERADOS DE VIDA

3.1. Considerações Iniciais

Segundo Nelson (2005), ensaio acelerado de vida consiste em um ensaio de alta sollicitação que encurta a vida do produto, ou acelera a degradação do desempenho de um produto. O termo “sollicitação” é usado de forma a representar uma variável acelerada. O propósito destes ensaios é, normalmente, estimar a vida ou a degradação do produto sob sollicitações de menor magnitude, representando as condições normais de uso.

Ensaio acelerados são utilizados com o objetivo de permitir a extrapolação de dados de falhas de componentes ou subsistemas de modo a comparar diferentes níveis de sollicitação. De acordo com Nelson (2005) o primeiro plano de ensaios acelerados foi desenvolvido na década de 60 por Chernoff. Este plano envolvia somente distribuições exponenciais e apenas duas condições aceleradas e trabalhava principalmente com dados censurados. Na década de 70, Wayne Nelson e seus colaboradores publicaram diversos trabalhos como Kielpinski; Nelson (1975), Meeker; Nelson (1975), nos quais foram desenvolvidos planos de ensaios para distribuições lognormais e de Weibull.

A maioria dos produtos é projetada para operar por anos sem falhar. Assim, é de se esperar que poucas unidades falhem em um ensaio realizado nas condições normais de uso de um produto, portanto, é particularmente difícil estimar a distribuição dos tempos até a falha ou o desempenho ao longo do tempo de componentes de produtos de alta confiabilidade a partir da execução de ensaios de confiabilidade com sollicitações correspondentes às condições normais de uso, quer seja pela necessidade de longa duração do ensaio ou pela observação de um reduzido número de falhas, fato que aumenta a incerteza na estimativa da confiabilidade.

Os ensaios acelerados de vida são largamente utilizados para produtos onde o tempo disponível para realização de ensaios é muito curto em relação ao tempo de vida útil para que este produto foi projetado. Estes ensaios são particularmente utilizados para se obter informações da confiabilidade de componentes simples de produtos mais complexos, proporcionando a possibilidade de uma identificação e

remoção antecipada dos modos de falha, melhorando assim a confiabilidade ainda na fase de desenvolvimento do produto. Neste ponto existem dificuldades práticas e questões estatísticas envolvidas na aceleração de vida, especialmente para produtos mais complexos, que podem falhar de diferentes maneiras.

Geralmente, informações obtidas com a execução de ensaios com altos níveis de solicitações (taxa de uso, temperatura, ou pressão) devem ser extrapoladas através de um modelo físico para obter estimativas de vida ou desempenho em longo prazo, sob níveis de esforços de menor magnitude, representativos da condição normal de uso do produto. Os resultados destes ensaios acelerados de vida são usados no processo do projeto para avaliar ou demonstrar a confiabilidade de componentes e/ou subsistemas, para certificar componentes, detectar modos de falha não previstos no projeto e comparar a qualidade de diferentes fabricantes de um mesmo produto, da maneira mais rápida possível. Os ensaios acelerados de vida têm se tornado mais importantes em função da rapidez das mudanças tecnológicas, produtos mais complexos e com mais componentes, pressão pela rápida introdução de novos produtos no mercado, e pela expectativa dos consumidores por produtos com maior melhor confiabilidade.

Segundo a norma MIL-HDBK-338 (1998), apesar do ensaio acelerado ser comumente usado no estudo de componentes eletrônicos, ele freqüentemente apresenta significados diferentes para diferentes pessoas. Existem principalmente duas razões para execução dos ensaios acelerados. São elas:

- (a) Estimativa de vida;
- (b) Identificação, correção ou confirmação de problemas e fragilidades;

As diferenças entre estas razões, apesar de sutis, podem ter um impacto muito significativo sobre as hipóteses subjacentes sobre as quais o ensaio é baseado.

Os modelos utilizados na construção do ensaio, os equipamentos empregados para execução do ensaio, o meio como o ensaio se desenvolve, a maneira pela qual os dados finais são analisados e interpretados dependem do objetivo da execução do ensaio acelerado.

O ensaio acelerado de vida é um ensaio pelo qual a duração da vida de um produto novo pode ser estimada e posteriormente, através de um procedimento de extrapolação, determina-se a vida nas condições normais de uso. Aqui o foco primário é a estimativa da vida de um item sob as condições normais de operação, baseado em informações obtidas em ensaios realizados sob condições mais severas. Neste caso, o mecanismo de falha esperado para o produto é usualmente documentado e estudado e busca-se a aceleração do tempo de desenvolvimento do mesmo; assim, problemas de identificação e correção de falhas não esperadas são de importância secundária, considerando correto o projeto do produto.

Ensaio acelerados de seleção (“screening”) são empregados para detectar falhas no produto, tendo em vista problemas de projeto, do processo de fabricação, montagem ou dos materiais e componentes utilizados neste produto. Nestes ensaios aplica-se uma combinação de solicitações, de magnitude superior às previstas na operação normal do produto, de forma a precipitar a ocorrência de falhas. Neste ensaio não se busca a redução do tempo para ocorrência de uma falha específica, mas sim verificar, através do aumento da solicitação, a ocorrência de falhas inesperadas no produto, as quais estão associadas com o processo de desenvolvimento do mesmo. A detecção destas falhas, ainda na fase de produção de protótipos, permite a correção das mesmas antes do produto ter uma produção normal para o mercado consumidor, aumentando, portanto, a sua confiabilidade.

Os ensaios acelerados de vida são empregados para adquirir mais informações sobre a confiabilidade obtida do estudo das falhas ocorridas em um dado tempo de ensaio, usando um ambiente que é mais severo que o experimentado durante o uso normal do equipamento. Contudo, segundo a norma militar US MIL-HDBK-338 (1998).

Ensaio acelerados sempre devem ser abordados com o devido cuidado. Existem limitações básicas para a técnica. Toda aplicação de ensaio acelerado é única. Sutis diferenças na aplicação podem invalidar totalmente as informações adquiridas durante o ensaio ou as conclusões alcançadas pelo ensaio.

Este infeliz resultado pode ocorrer, por exemplo, se a faixa de validade para extrapolação dos resultados previstos por um dado modelo for excedida; ou se a

hipótese do ensaio/modelo subjacente, enquanto verdade para a maioria das aplicações, não forem válidas para uma dada aplicação específica. Portanto, é frequentemente necessário no desenvolvimento de um ensaio acelerado a execução de um ensaio preliminar para verificar a validade para uma aplicação específica ou então determinar a relação a ser aplicada (se esta já não estiver sido avaliada na literatura) entre o esforço aplicado e o correspondente tempo de vida operacional do componente, ou seja, a equação que relaciona a magnitude da solitação com a vida esperada do produto.

Uma série de métodos de aceleração de falhas em componentes ou sistemas eletrônicos pode ser usada, individualmente ou em conjunto, incluindo:

- Aumento na frequência de solitação.
- Temperaturas mais elevadas
- Ciclos de temperaturas mais severos.
- Aumentar os níveis de vibração
- Aumentar a magnitude da umidade relativa

Um segundo fator muito importante nos ensaios acelerados é a complexidade do equipamento que é submetido ao ensaio. Algumas técnicas de aceleração são apropriadas apenas para o ensaio de componentes, enquanto outras podem ser usadas para ensaios de sistemas, ou seja, produtos mais complexos, e poucas técnicas podem ser aplicadas a ambos os casos citados acima.

De acordo com a norma MIL-HDBK-781(1996) pode-se classificar um sistema eletrônico quanto à sua complexidade de acordo com o número de componentes que o compõem. Esta classificação é apresentada na Tabela 3.1

Tabela 3.1 - Classificação de complexidade de sistemas eletrônicos. (MIL-HDBK-781, 1996)

Classificação de Complexidade	Número de componentes (aproximadamente)
Simples	100
Complexidade Moderada	500
Complexo	2000
Muito Complexo	4000

A complexidade do sistema pode influenciar grandemente as ferramentas utilizadas para análise do sistema, quanto maior o número de componentes, mais complexa são as interações entre os mesmos e portanto maior a dificuldade na análise de confiabilidade. Segundo, Perrow (1999) a complexidade também pode ser definida como um função do tipo de interação que ocorrem entre os itens do sistema.

No caso dos ensaios acelerados de vida as variáveis a aceleradas podem influenciar diferentes componentes com diferentes fatores de aceleração. Por exemplo, alta temperatura pode fundir os conectores plásticos e desta forma causar um circuito aberto ou um curto circuito, modos de falha esses que não ocorrem em condições normais de utilização.

3.2. Métodos de Aceleração

Segundo Souza (2003), os três principais métodos de aceleração empregados na execução de ensaios acelerados são:

Aumento da Taxa de Uso

Neste tipo de ensaio, opera-se o equipamento a uma taxa de uso maior que a prevista para sua utilização normal. Entende-se por taxa de uso o número de vezes que o produto é utilizado ao longo de um intervalo de tempo.

Neste tipo de ensaio, entende-se como aceleração o aumento da taxa de utilização do produto em um dado intervalo de tempo, reduzindo o tempo necessário para executar-se um dado número de acionamentos. Para aplicação deste ensaio, deve-se ter completo domínio do mecanismo de falha a ser acelerado, e que o mesmo depende apenas da taxa de uso. Nota-se que neste ensaio aplicam-se as cargas encontradas na condição normal de uso do produto ou componente.

Neste tipo de ensaio, principalmente quando se trata de componentes mecânicos, deve-se destinar uma especial atenção à seleção da taxa de acionamento a ser utilizada no ensaio. Para estes componentes, pode ocorrer um aumento da temperatura do mesmo ao longo do ensaio, caso a taxa de acionamento seja muito elevada, o que pode causar variações nos resultados do ensaio. A fim de evitar este possível aquecimento, deve-se escolher uma taxa de aceleração do uso que não implique em outras variações nas condições de operação do produto ou componente, as quais poderiam influenciar o mecanismo de falha dos mesmos.

Aumento da Taxa de Envelhecimento (Degradação)

Intensificam-se as solicitações como, por exemplo, temperatura e umidade, através do aumento da magnitude destas variáveis aplicadas no ensaio, o que faz com que ocorra uma aceleração do processo químico associado ao modo de degradação considerado para o equipamento. Entende-se por degradação a perda da capacidade operacional do componente ou sistema abaixo de um nível mínimo desejado. Normalmente executa-se este ensaio para avaliar a degradação da isolação de componentes eletrônicos.

A maior dificuldade deste ensaio é extrapolar o resultado para a condição normal de uso do componente, ou seja, relacionar um dado tempo de ensaio com a vida esperada do componente. Para tanto necessita-se de um profundo conhecimento do fenômeno físico em estudo, incluindo conhecimento sobre o comportamento do material empregado na fabricação do componente.

Aumento do Carregamento

Através do aumento da magnitude do carregamento (tensão elétrica, pressão, solicitação mecânica) precipita-se a ocorrência de um dado mecanismo de falha do equipamento ou componente, ou seja, a falha ocorre em um tempo reduzido, em comparação com o tempo necessário para a ocorrência da mesma na condição normal de operação.

Em um ensaio acelerado com o emprego do aumento da magnitude do carregamento pode-se utilizar uma combinação de vários métodos de aceleração, desde que os efeitos das acelerações sejam independentes e muito bem controlados.

Nestes ensaios acelerados, a extrapolação dos dados para a condição de uso normal do equipamento deve ser baseada em um bom conhecimento do fenômeno físico que está sendo acelerado, a fim de que possa ser explorada toda a capacidade deste tipo de ensaio.

Um cuidado especial a ser observado quando da execução deste ensaio consiste na correta seleção do fator de aceleração, de forma a reduzir o período para ocorrência de um dado modo de falha específico, evitando a ocorrência de outro modo de falha que não seja objeto do estudo, ou seja, aqueles que não são esperados nas condições normais de uso do produto ou componente. A escolha deste fator de aceleração depende muito do conhecimento que o projetista tem sobre o modo de falha em estudo.

3.3. Ensaio Acelerado de Vida

Nos ensaios acelerados de vida é fundamental que se conheça o modelo que relaciona a vida nas condições aceleradas com a mesma nas condições normais de operação do sistema. Assim, estes ensaios requerem:

- um entendimento antecipado do mecanismo de falha;

- um conhecimento da magnitude da aceleração deste mecanismo de falha, como função da solicitação acelerada.

Na maioria dos casos, fatores de aceleração apropriados podem ser obtidos através de um estudo da literatura, mas em alguns casos novos modelos devem ser desenvolvidos.

Segundo Meeker; Escobar (1999), a faixa de validade do modelo de aceleração não pode ser excedida e a aceleração de um esforço não pode alterar o mecanismo de falha. Se um ensaio acelerado introduzir um novo mecanismo de falha que não é experimentado nas condições normais de uso, este fato pode levar a conclusões falsas e possibilitar mudanças desnecessárias de projeto. Por este motivo é altamente recomendável que se continue o ensaio acelerado até pelo menos um número mínimo de falhas ocorrer. Análises *post mortem* irão verificar qual o mecanismo de falha que realmente está ocorrendo, e se não há um novo mecanismo de aceleração introduzido pela aceleração.

3.4. Ensaios Acelerados de Equipamentos

Segundo Nelson(1990), normalmente não se executam ensaios acelerados com equipamentos, principalmente os de natureza eletro-mecânica, pois estes apresentam uma grande diversidade de modos de falha, e a aceleração de uma dada condição de solicitação pode afetar mais de um modo de falha, o que dificulta a análise de confiabilidade. Ainda de acordo com Nelson (1990), para equipamentos de grande porte procura-se acelerar a ocorrência de um modo de falha específico, considerado essencial para a confiabilidade do equipamento.

Para este modo de falha específico, definem-se as curvas de probabilidade de falhas para diversas condições de aceleração, e a partir da análise das mesmas, define-se uma curva de probabilidade de falha para cada condição normal de uso. Ressalta-se que a partir desta curva não pode ser definida a curva de confiabilidade, pois esta se relaciona com um único mecanismo de falha.

Segundo Nelson (2005), uma proposta inteiramente diferente dos ensaios acelerados de equipamentos eletrônicos é induzir a falha do produto com o objetivo de descobrir os modos de falha que ocorrem nas condições normais de utilização.

No caso de equipamentos eletrônicos, a execução de ensaios acelerados mais comuns são aquelas em que os modos de falha dos componentes presentes nos mesmos são sensíveis à ação da umidade e da temperatura.

3.5. Fator de Aceleração

O Fator de Aceleração é definido segundo Moura (1992) como a razão entre o percentual de falhas da distribuição de vida nas condições aceleradas, e a mesma porcentagem pelos mesmos mecanismos nas condições normais de utilização. Esta razão equivale à razão entre o tempo até a falha nas condições de uso e o mesmo tempo nas condições aceleradas. Desta forma, fator de aceleração é a relação entre o tempo médio até a falha definido para um componente e/ou equipamento, quando submetido à solicitação normal de uso e o tempo médio até a falha definido em um ensaio sob determinada condição de aceleração, como é descrito na Equação 3.1.

$$FA = \frac{MTTF_{CONDIÇÃO_DE_USO}}{MTTF_{CONDIÇÃO_ACELERADA}} \quad (3.1)$$

onde:

FA: fator de aceleração;

*MTTF*_{CONDIÇÃO DE USO} : Tempo médio até a falha na condição de uso;

*MTTF*_{CONDIÇÃO ACELRADA}: Tempo médio até a falha na condição acelerada.

A pré-definição do fator de aceleração em um ensaio só é possível caso haja um modelo físico que permita descrever a variação do tempo de vida do componente ou equipamento em função da variação de uma solicitação específica. Caso contrário, o valor do fator de aceleração só poderá ser obtido após a execução de

alguns ensaios, com diferentes níveis de aceleração que permitam a definição de uma relação específica para o cálculo do fator de aceleração.

3.6. Análise de Resultados de um Ensaio Acelerado de Vida

Para extrapolar os resultados é necessário definir uma relação que permita associar os resultados experimentais, na condição acelerada, com os resultados a serem obtidos como estimativa daqueles relativos às condições normais de uso.

- **Relações Baseadas no Conhecimento do Problema Físico**

Para alguns mecanismos, conhecendo-se a modelagem teórica físico-química que rege o fenômeno de falha em estudo, pode-se obter uma relação entre os dados experimentais, ao longo de toda a faixa de aceleração, o que permite definir, para a condição de uso, o *MTTF*, a confiabilidade e outros parâmetros. Um exemplo clássico deste tipo de lei é a denominada Lei de Arrhenius, a qual representa o efeito da temperatura sobre um fenômeno químico, tal como o efeito da temperatura sobre a taxa de corrosão de um material. Com o emprego desta lei, pode-se extrapolar os dados experimentais, obtidos na condição acelerada, diretamente para a condição de uso.

- **Relações Empíricas**

A partir dos resultados experimentais é necessário definir relações empíricas que expressem a variação da confiabilidade, do *MTTF* e outros em função da aceleração de uma variável. Normalmente esta técnica é empregada para analisar fenômenos dos quais não se tem um perfeito domínio das características físicas ou químicas.

A definição dos valores de interesse para a condição normal de uso é baseada na realização de ensaios com grupos de equipamentos (componentes) sendo que cada grupo é submetido a uma dada condição de solicitação acelerada. Estes ensaios, usualmente, não são censurados, observando-se o tempo de falha de todos os elementos da amostra.

- **Procedimento de Análise**

O procedimento de análise, para ensaios acelerados onde não se conhece a lei que rege a aceleração do fenômeno físico associado a um dado modo de falha, deve ser baseado na utilização de diversas condições de ensaio. Com esses ensaios obtém-se os tempos até a falha e então determina-se a distribuição de probabilidade que melhor se adapta aos dados. Subseqüentemente constrói-se as funções densidade de probabilidade para cada uma das condições aceleradas.

A partir das distribuições podem ser determinados os tempos para que o produto atinja determinados níveis de confiança nas diversas condições aceleradas. A Figura 3.1 apresenta esses níveis de confiança para 5%, 95% e 50%.

Determinam-se então as funções matemáticas que melhor se adaptam aos correspondentes níveis de confiança das diversas condições aceleradas. Estas funções são utilizadas para a determinação dos mesmos níveis de confiança nas condições normais de uso.

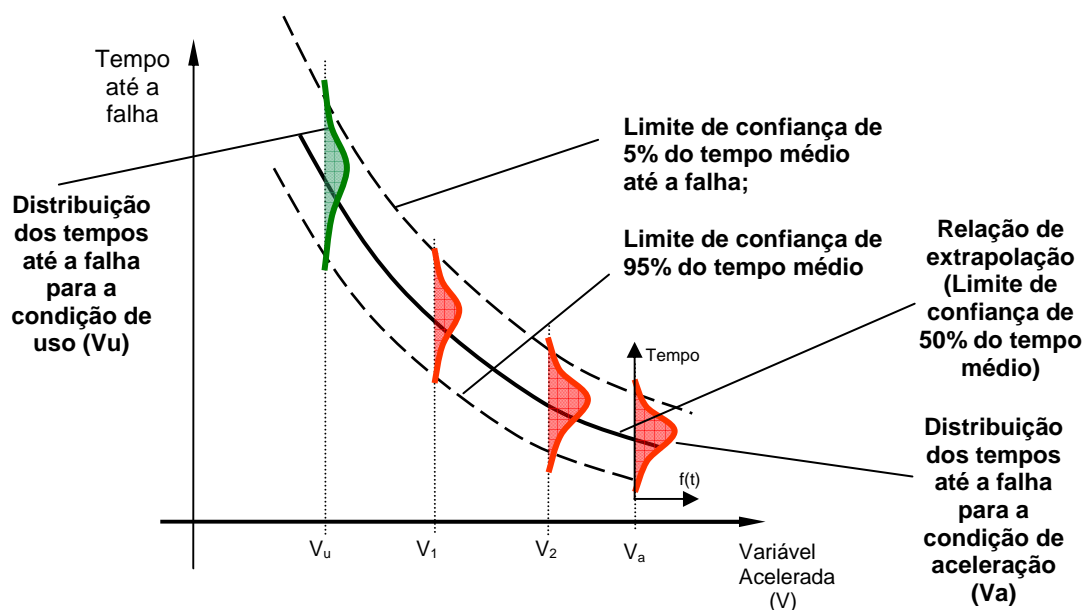


Figura 3.1 - Procedimento de Análise do Ensaio de Vida Acelerado. (SOUZA, 2003)

De acordo com Souza (2003), algumas orientações para o uso de modelos de aceleração incluem:

- Usar uma teoria física para lei de extrapolação tanto quanto possível, e escolher as variáveis de aceleração que correspondam aos fatores causadores das falhas reais;
- Investigar tentativas anteriores para acelerar modos de falha similares àquele de interesse;
- Projetar ensaios acelerados para minimizar, tanto quanto possível, o grau de extrapolação necessário. Ensaios acelerados com alto grau de aceleração podem causar modos de falha que não iriam aparecer em condições normais de uso. Se falhas estranhas não são reconhecidas, elas podem levar a conclusões incorretas;
- A maioria dos ensaios acelerados é usada para obter informações de modos de falha simples ou relativamente simples (ou correspondentes medidas de degradação). Se existe mais de um modo de falha, é normal que diferentes modos de falha sejam acelerados a diferentes taxas e, a menos que isto seja explicável podem levar a interpretações incorretas dos resultados dos ensaios;

- Modelos simples têm provado serem mais práticos nas extrapolações para as condições de uso que modelos elaborados multi-paramétricos, tendo em vista a dificuldade de avaliação de todos os parâmetros que o influenciam;
- O programa de ensaios acelerados de vida deve ser planejado e conduzido por times de incluam pessoas com conhecimentos do produto e seu ambiente de uso, com conhecimento de aspectos físicos, químicos, mecanismos de falha, os aspectos estatísticos do projeto e análise de experimentos de confiabilidade.

3.7. Aplicações dos Ensaios Acelerados de Vida para Sistemas Eletrônicos

Nesta seção é discutida uma avaliação dos ensaios acelerados de vida no qual são discutidos os mecanismos de falha e modelos de aceleração encontrados na literatura.

Os ensaios acelerados em componentes e sistemas eletrônicos são projetados para dar ênfase em quatro tipos de mecanismos de falha. São eles:

- 1) mecanismos termomecânicos (por exemplo, fissuras no encapsulamento, contatos ôhmicos, condutores de ligação, expansões térmicas, fadiga de metal, fluência, etc.).
- 2) mecanismos termoquímicos não relacionados com a umidade (por exemplo, interdifusão de metal, problemas de crescimento intermetálico, eletromigração, etc.).
- 3) mecanismos termoquímicos relacionados com a umidade (por exemplo, efeitos de carga superficial, corrosão galvânica, etc.).
- 4) mecanismos mecânicos (por exemplo, anexos mecânicos, integridade do encapsulamento, fadiga, etc.).

Nelson (1990), e Meeker; Escobar (1999) apresentam em detalhes muitos modelos, metodologias estatísticas, e aplicações de ensaios acelerados. Os ensaios mais comuns são ciclos de temperatura, ensaio de vida operacional a alta temperatura, ensaio de temperatura e umidade, e vibração que são descritos nos

próximos itens. Adicionalmente, o modelo para ensaios acelerados de eletromigração e para temperatura e tensão são apresentados.

Os ciclos de temperatura dão ênfase a mecanismos de falha relacionados com fenômenos termomecânicos, os ensaios de vida operacional a alta temperatura enfatizam os fenômenos termoquímicos não relacionados com a umidade, os ensaios de temperatura e umidade visam incentivar mecanismos relacionados a fenômenos termoquímicos relacionados com a umidade e finalmente, os ensaios de vibração dão ênfase a mecanismos mecânicos de falha.

3.7.1. Modelo de Aceleração de Vida Operacional a Alta Temperatura

Nos ensaios de vida operacional a alta temperatura, uma amostra de equipamentos é sujeita a temperatura elevada por um grande período de tempo. Frequentemente, nestes ensaios é assumido que o mecanismo acelerador da falha dominante é de natureza térmica. Estes fenômenos, segundo Nelson (1990), são descritos pelo modelo de Arrhenius, que é usado para prever vida como função da temperatura. Aplica-se especificamente a mecanismos de falha que são relacionados com a temperatura e que estão dentro da faixa de validade para o modelo. Os principais mecanismos de falha cobertos pela lei de Arrhenius são difusão, reações químicas e corrosão.

A expressão do tempo até a falha, segundo Nelson (1990), para o modelo de Arrhenius é dada por:

$$t = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (3.2)$$

onde:

t : tempo para ocorrência da falha

A : uma constante determinada por experimento

E_a : energia de ativação (elétron-volt): tem um valor diferente para cada mecanismo de falha (são mostrados exemplos das energias de ativação e mecanismos de falha para alguns semicondutores silícicos na Tabela 3.2)

k : constante de Boltzman = 8.62×10^{-5} eV/K

T : Temperatura absoluta expressa em Kelvin.

Tabela 3.2 – Energia de ativação associada aos mecanismos de falha de semicondutores de silício, US MIL-HDBK-338(1998).

Associação de dispositivo	Mecanismo de falha	Fatores relevantes	Fatores acelerados	Aceleração (E_a = Energia de ativação aparente)
Óxido de silício e interface silício-óxido de silício	Acumulo de mudanças superficiais	Mobilidade de íons, V, T	T	Bipolar: $E_a = 1,0-1,05$ eV MOS: $E_a = 1,2-1,35$ eV
	Quebra do dielétrico	E_w, T	E_a	$E_a = 0,3-2,0$ eV
	Injeção de carga	E_w, T	E_w, T	$E_a = 1,3$ eV(Slow Trapping) $E_a = 1,2$ eV (Canal "P") $E_a = 1,0$ eV (Canal "N")
Metalização	Eletromigração	T, J, S , Gradientes de T e J Tamanho do grão	T, J	$E_a = 1,0-1,05$ eV $E_a = 0,3$ eV Tamanhos de grãos pequenos 0,5eV Al típico 0,9 eV contatos em janela
	Corrosão química	Contaminação de H	H, V, T	Forte efeito de H $E_a = 0,3-0,6$ eV (para V pode ter limiares)
	Degradação dos contatos	T , impurezas metálicas	Diversos	$E_a = 0,9$ eV
Ligações e outras interfaces mecânicas	Crescimento de fadigas intermetálicas	T , resistência a impurezas	T	Al-Au: $E_a = 1,0-1,05$ eV
		Temperatura	Extremos de T em ciclos	Al-Au: $E_a = 0,3-1,0$ eV
Hermeticidade	Vazamento na selagem	Diferenças na pressão atmosférica	Ciclos de pressão e temperatura	

V – tensão

E – Campo elétrico

S – Área

T – temperatura

J – Densidade de corrente

H – Umidade

Os valores das constantes “A” e “ E_a ” são tipicamente calculados de dados de experimentos.

O fator de aceleração é dado pela Equação 3.3.

$$FA = \frac{t_{uso}}{t_{teste}} = \exp \left[\left(\frac{E_a}{k} \right) \left(\frac{1}{T_{uso}} - \frac{1}{T_{teste}} \right) \right] \quad (3.3)$$

Na Equação 3.3 pode-se notar que o fator de aceleração é exponencial em relação à Energia de Ativação.

Segundo Kececioglu; Sun (1995), a energia de ativação é a energia necessária para possibilitar a reação de uma molécula constituinte de um determinado corpo. Na Figura 3.2, a abscissa é o eixo que mostra o progresso das falhas (reações) e a ordenada é o eixo da energia da reação. Os valores de energia constituem as energias internas dos defeitos na temperatura ambiente. Estes valores podem variar de defeito para defeito, dependendo de sua natureza, tamanho, forma, localização na estrutura do componente, potencial elétrico através da estrutura, e é claro, da temperatura ambiente. Valores de energia interna são sempre finitos e superiores a zero.

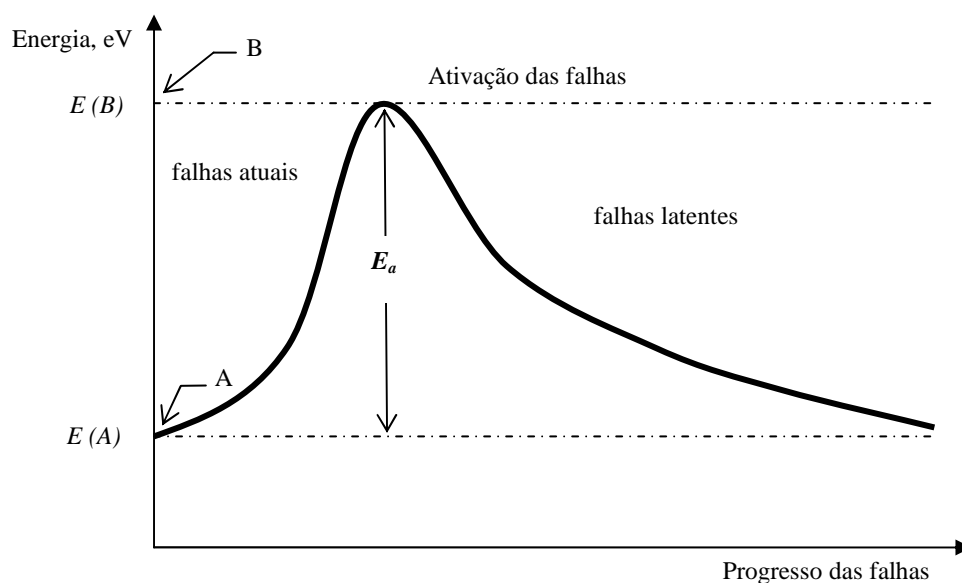


Figura 3.2 – Energia de Ativação e o Progresso das Falhas. (KECECIOGLU; SUN, 1995)

Tomando-se o caso onde $E_a = E(A)$, como exemplo. Neste nível de energia, recebe-se um produto que foi testado e aprovado, mas que se sabe que possui alguma falha. A detecção das falhas não é eficiente, pois os métodos de detecção são limitados. As falhas que não são possíveis de serem detectadas são chamadas de falhas latentes (inativas). Para tornar a falha detectável deve-se elevar o nível de energia, pelo menos, ao nível de $E_a = E(B)$, o que significa que a falha é ativada através do fornecimento de energia adicional, por exemplo, calor. Portanto, uma falha que era originalmente uma falha latente torna-se então ativa e detectável.

Pode-se afirmar que a energia de ativação é a energia necessária para que se rompa a barreira que separa as falhas latentes das falhas atuais. Isto significa que a condição $E_a \geq E(B)$ deve ser obedecida para causar a falha.

Freqüentemente são realizados ensaios para determinação da energia de ativação de um mecanismo de falha. Neste caso os equipamentos são testados separadamente em pelo menos duas temperaturas diferentes. Assim pode-se estimar o valor da energia de ativação experimentalmente.

3.7.2. Modelo de Aceleração de Vida para Ensaios de Temperatura e Umidade Relativa

Segundo Settur et al (1998), a umidade apresenta uma grande influencia na vida de componentes eletrônicos, especialmente em componentes que possuem encapsulamento plástico. Nos ensaios de temperatura e umidade os equipamentos são testados sob alta temperatura e elevada umidade por um período de tempo. Segundo Crowe; Feinberg (2000), o ensaio mais comum de temperatura e umidade é feito a 85°C e 85% de umidade relativa durante um tempo de 1000 horas. O modelo de análise mais comum usado na indústria é o modelo de Peck. Segundo Peck; Hallberg (1986), os mecanismos de falha que são comumente incentivados pela umidade são corrosão, corrosão eletrolítica, e migração do metal.

O modelo de Peck para corrosão (temperatura – umidade) é dado pela Equação 3.4:

$$t_f = A(HR)^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (3.4)$$

onde:

t_f : é o tempo até a falha

A : é uma constante

HR : é a umidade relativa (%)

n : é uma constante

E_a/kT : é o expoente de Arrhenius

Os valores de n e E_a são determinados empiricamente.

O fator de aceleração para o modelo de Peck é apresentado na Equação 3.5.

$$FA = \left(\frac{HR_{usual}}{HR_{teste}}\right)^{-n} \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{usual}} - \frac{1}{T_{teste}}\right)\right] \quad (3.5)$$

A Equação 3.5. nada mais é que a equação de Arrhenius com uma fator que inclui a influência da umidade relativa. Observando a Equação 3.5, pode-se concluir que esta é composta por duas parcelas bem distintas. A primeira relativa à contribuição da umidade no fator de aceleração, representado pelo termo:

$$\left(\frac{HR_{usual}}{HR_{teste}}\right)^{-n}$$

. A segunda relativa à influência da temperatura, modelada pela lei de

$$\exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{usual}} - \frac{1}{T_{teste}}\right)\right]$$

Arrhenius e representada pelo termo:

Segundo Peck; Hallberg (1991), para um ensaio 85/85 o fator n da Equação 3.5 deve variar entre 2,5 e 3. A Equação 3.5 pode ser representada como na Equação 3.6 para o caso específico do ensaio 85/85.

$$FA = \left(\frac{HR_{real}}{85\%} \right)^{-n} \exp \left[\frac{E_a}{8.62 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{real} + 273,15} - \frac{1}{353,15} \right) \right] \quad (3.6)$$

3.7.3. Modelo de Aceleração para Vibração

Nos ensaios de vibração, os equipamentos são montados em uma mesa dinâmica (*shaker*) que aplica vibrações aleatórias ou senoidais sobre o equipamento. Geralmente, os ensaios de vibração aleatória são especificados em termos dos níveis de Densidade de Potência Espectral (DPE). A função DPE descreve a distribuição de energia de vibração em função da frequência. O fator de aceleração que pode ser alcançado através da vibração é uma função dos níveis de DPE. O Fator de aceleração relaciona o valor de DPE do ensaio com o valor a que está sujeito o equipamento na condição normal de uso. O modelo de aceleração clássico é um modelo de potencia inversa. Este modelo é descrito na MIL-HDBK 810E (1983). A Equação 3.7 apresenta a expressão do fator de aceleração para vibração.

$$FA = \frac{t_{uso}}{t_{teste}} = \left(\frac{W_{teste}}{W_{uso}} \right)^{M_b} = \left(\frac{G_{f_{teste}}}{G_{f_{uso}}} \right)^{2M_b} \quad (3.7)$$

onde:

FA : Fator de Aceleração;

t_{uso} : tempo nas condições normais de uso;

t_{teste} : tempo nas condições de teste;

W_{teste} : Densidade de Potencia Espectral (DPE) através da largura de banda de ressonância no teste (G^2/Hz);

W_{uso} : DPE nas condições de uso (G^2/Hz);

$G_{f_{uso}}$: nível de vibração senoidal ressonante G nas condições usuais;

$G_{f_{teste}}$: nível de vibração senoidal ressonante G nas condições do teste;

M_b : parâmetro de fadiga;

O mecanismo de falha em ambientes sob vibração aleatória é dominado pelas fadigas mecânicas principalmente dos contatos elétricos.

3.7.4. Modelo de Black para Eletromigração

Condutores de microcircuitos geralmente falham devido à eletromigração. Altas densidades de corrente em tais condutores promovem movimento dos átomos, resultando em vazios (circuito aberto) ou extrusões (curtos-circuitos). Nos ensaios acelerados para detecção destes fenômenos são empregadas altas temperaturas e densidades de corrente (A/cm^2). A equação geral para o tempo até a falha para falhas por eletromigração é dada pela equação de Black:

$$t_f = A_J \cdot J^{-n_J} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (3.8)$$

onde:

t_f : é o tempo até a falha

A_J : é uma constante relacionada com a geometria do condutor

J : é a densidade de corrente

n_J : é um parâmetro relacionado com a densidade de corrente que considera os efeitos do fluxo de corrente e o aquecimento por efeito Joule do condutor.

O fator de aceleração para este mecanismo de falha é dado por:

$$FA = \left(\frac{J_{usual}}{J_{teste}}\right)^{-n} \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{usual}} - \frac{1}{T_{teste}}\right)\right] \quad (3.9)$$

3.7.5. Modelo de Eyring para Temperatura e Tensão

A relação de Eyring é usada para descrever ensaios acelerados de vida onde a temperatura e outra variável são incrementadas. A aplicação mais comum deste modelo para componentes eletrônicos é nos testes acelerados de tensão elétrica.

O modelo geralmente relaciona a taxa de falha, com a tensão no coletor-base, para uma dada temperatura da junção ou ligação. Assim a taxa de falha é expressa por:

$$\lambda = A_E \cdot T_j \left[\exp\left(\frac{-B_E}{kT_j}\right) \right] \cdot \left[\exp(C_E \cdot V_{cb} + D_E \cdot V_{cb} / kT_j) \right], \quad (3.10)$$

onde:

λ : taxa de falha

V_{cb} : tensão no coletor-base

T_j : temperatura da junção ou ligação

A_E, B_E, C_E e D_E : são constante empíricas

O fator de aceleração é dado por:

$$FA = \left(\frac{T_{j,usual}}{T_{j,teste}} \right) \cdot \exp \left[\frac{(B - DV_{cb})}{k} \left(\frac{1}{T_{j,teste}} - \frac{1}{T_{j,usual}} \right) \right] \quad (3.11)$$

Porém a tensão é um parâmetro de aceleração pobre, pois os mecanismos de falha envolvidos variam e são diferentemente influenciados pela aplicação de tensão, além disso, a tensão aplicada não deve exceder a tensão de colapso do dispositivo que não é significativamente mais alto que a tensão de operação o que limita a aceleração deste parâmetro. Deste modo o ensaio acelerado de tensão é usado apenas para aplicações muito específicas e em geral gera resultados altamente imprecisos devido à dificuldade de se isolar o modo de falha que representa as condições normais de operação.

3.8. Ensaio Acelerados por Temperatura e Umidade

Neste trabalho é desenvolvido um método de análise de confiabilidade para sistemas eletrônicos cujas falhas predominantes sejam falhas intrínsecas, ou seja,

falhas que não são devidas a problemas de operação inadequada do componente eletrônico e sim ao fatores ambientais no qual o sistema está envolto. Desta forma são propostos neste texto ensaios acelerados que levem em consideração temperatura e umidade relativa. A vibração será desprezada, pois a metodologia aqui apresentada será desenvolvida para equipamentos que operam fixos em um local.

O método de avaliação da confiabilidade de um sistema eletrônico complexo baseado na aplicação de ensaios acelerados de vida começa com a determinação das variáveis aceleradas, ou seja, quais os fatores ambientais que mais influenciam na precipitação de falhas intrínsecas. No caso de sistemas eletrônicos fixos ao solo, onde a vibração pode ser desprezada, as variáveis que mais influenciam na ocorrência de falhas são a temperatura e a umidade relativa.

Para a variação destes parâmetros pode-se adotar diversos perfis temporais, por exemplo, pode-se manter a temperatura constante durante o ensaio ou variá-la ciclicamente conforme indicado na Figura 3.3. O parâmetro umidade relativa, na grande maioria dos ensaios é mantido com magnitude elevada e constante durante todo o ensaio.

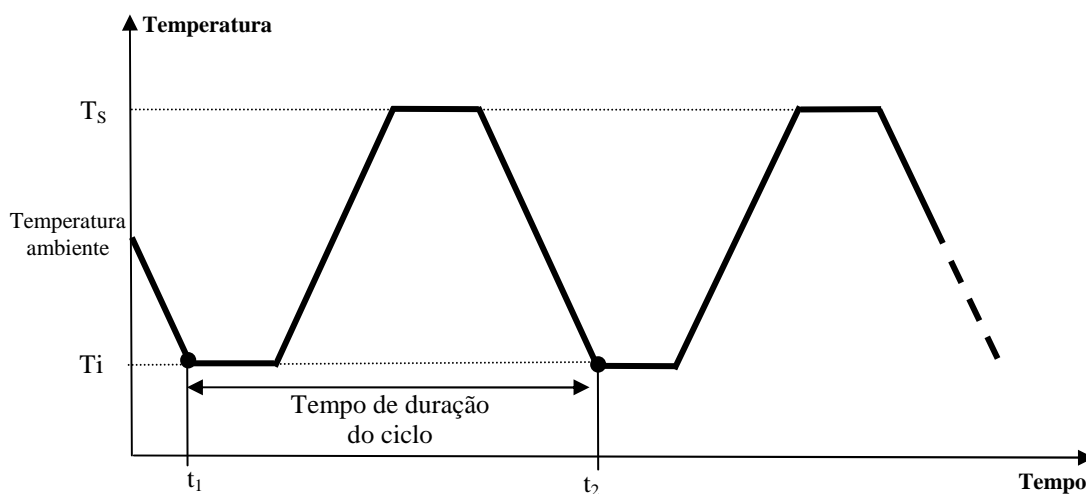


Figura 3.3 - Perfil temporal de temperatura de um ensaio cíclico. (Adaptado de MIL-HDBK-338, 1998).

Segundo a norma técnica US MIL-HDBK-338 (1998), o perfil cíclico de temperatura oferece a vantagem de induzir a ocorrência de falhas relacionadas ao

mecanismo de fadiga térmica nos componentes eletrônicos e assim incentivar falhas que são devidas à falhas no processo de fabricação como, por exemplo, resistência insuficiente das uniões soldadas. Já o perfil de temperatura elevada e uniforme se apresenta de maneira mais agressiva para incentivar falhas como corrosão e eletromigração que são mais comuns a equipamentos com projetos já bem consolidados.

A norma militar MIL-HDBK-338(1998) apresenta uma descrição de diversos procedimentos para ensaios acelerados onde são variados os perfis cíclicos de temperatura, como por exemplo, o perfil apresentado na Figura 3.3. Além da variação da temperatura a MIL-HDBK-338(1998) recomenda ensaios com umidade com magnitude constante e elevada simultaneamente à aplicação de ciclos de temperatura. Um dos perfis de temperatura propostos pela MIL-HDBK-338(1998) e também citado na MIL-HDBK-2164(1996) prevê ciclos de temperatura de -54°C a 73°C .

Além dos ensaios propostos pela norma MIL-HDBK-338(1998), existem outras normas que propõem procedimentos de ensaios semelhantes. A IEC-60068-2-38 (1975) – Basic Environmental Testing Procedures Part 2 – Composite Temperature/Humidity Cyclic Test, norma do International Electrotechnical Commission propõe um procedimento de ensaio muito semelhante ao da MIL-HDBK-338(1998). Este procedimento prevê ciclos de temperatura de 25°C a 65°C , ou seja, menos agressivo quanto à temperatura que o proposto pela MIL-HDBK-338(1998). Porém, a norma prevê uma umidade relativa de 93% e constante, portanto superior aos 85% proposto pelo MIL-HDBK-338. A IEC-60068-2-38(1975) prevê ensaios de funcionalidade do equipamento antes do ensaio e periodicamente durante o ensaio, tal como a norma MIL-HDBK-338 (1998).

Outra norma técnica que trata de ensaios acelerados de componentes eletrônicos é a EDEC JESD22-A101(1997) - Temperature and Humidity Bias (THB) Test editada pela Joint Electron Device Engineering Council (JEDEC). Esta norma propõe um ensaio a temperatura e umidades constantes. A temperatura deve ser mantida em 85°C e a umidade relativa a 85%. Esta norma prevê um tempo para o ensaio de 1000 horas.

Segundo Bojta et al. (2002), a norma IEC foi largamente utilizada durante toda a década de 80. Atualmente as condições de ensaio mais utilizadas são as recomendadas pela norma JEDEC.

Após a definição do tipo de ensaio é necessário definir a magnitude dos seus parâmetros. No caso da umidade relativa a única variável que deve ser ajustada é a magnitude da mesma, já que em qualquer tipo de ensaio que envolva essa variável esta será mantida constante e elevada durante um mesmo ensaio.

Nos perfis com temperatura constante devem ser definidos a magnitude da temperatura, as taxas de variação de temperatura, tanto para crescimento, quanto para decréscimo da temperatura, o tempo de duração contínua de ensaio e o tempo total de execução do ensaio. Destaca-se que periodicamente o ensaio deve ser paralisado para que sejam realizados testes funcionais e dessa forma verificar a ocorrência de falhas.

Nos perfis cíclicos de temperatura devem ser definidas as temperaturas máximas e mínimas do ciclo, as taxas de elevação e decréscimo de temperatura, o tempo de duração de cada ciclo térmico, o número de ciclos contínuos, o número de ciclos totais e os tempos de acomodação térmica superiores e inferiores, que são os tempos em que a temperatura deve permanecer constante.

Os testes funcionais que são executados periodicamente são importantes para determinação do tempo até a falha do equipamento. Estes testes podem ser testes *on-line*, realizados durante o ensaio e testes *off-line*, nos quais é necessária a paralisação do ensaio para sua execução.

Os testes de funcionalidade dos equipamentos complexos devem ser suficientemente abrangentes para que possa ser detectada a maior parte das falhas possíveis.

A partir da observação da falha em um desses testes de funcionalidade são coletados os tempos até a falha para um determinado equipamento. Assim, os equipamentos que apresentaram falhas são descartados do ensaio ou reparados para que o ensaio possa prosseguir, dependendo do tipo de falha sofrida pelo mesmo.

As falhas ocorridas durante o teste podem ou não ser representativas de falhas ocorridas nas condições normais de operação, já que para um equipamento

complexo as variáveis aceleradas podem causar efeitos diferentes para equipamentos diferentes. Desta forma, falhas como fusão de conectores plásticos devem ser desprezadas e os equipamentos devem ser reparados para que o equipamento possa retornar ao ensaio. Portanto, as falhas ocorridas durante o ensaio devem ser comparadas com as falhas observadas em campo para que se possa validar ou desprezar dados de tempo até a falha.

De posse dos dados válidos de falha pode-se então aplicar os conceitos de confiabilidade para determinar o MTTF da condição acelerada. Este valor pode ser determinado através de um programa para análise de confiabilidade ou ainda analiticamente através do emprego dos conceitos apresentados no Capítulo 2.

Além do tempo médio até a falha e da distribuição estatística que representa a confiabilidade do sistema, é fundamental a determinação do intervalo de confiança deste tempo médio que indica com um determinado nível de confiança, que a média se encontra em um intervalo de valores. Os intervalos de confiança devem ser calculados para que se possa ter um completo entendimento do grau de confiança do MTTF calculado.

A partir dos diversos valores de MTTF para diversas condições de ensaio é possível determinar empiricamente as constantes da Lei de Peck-Ahrrenius, representada pela Equação 3.5, caso as mesmas ainda não sejam conhecidas.

Para avaliar o valor de E_a devem-se executar pelo menos dois ensaios com temperaturas diferentes, mas com umidades iguais para que seja considerado somente o efeito da temperatura. Analogamente, para se estimar o valor da constante n devem-se executar ao menos dois ensaios com mesma temperatura e umidades relativas diferentes.

Após da determinação dos parâmetros E_a e n utiliza-se a Lei de Peck-Ahrrenius para determinação do fator de aceleração a partir da Equação 3.5. Para tanto é necessário aplicar uma das condições de ensaio executadas como sendo as variáveis aceleradas e definir as condições normais de utilização. Aplicando estes parâmetros na Lei de Peck-Ahrrenius determina-se o fator de aceleração. Assim é possível determinar a relação entre o tempo médio até a falha nas condições aceleradas com o mesmo nas condições normais de utilização.

A partir do fator de aceleração e do *MTTF* de um dos ensaios executados determina-se o *MTTF* nas condições normais de operação.

A seguir, é apresentada, através da Figura 3.4, a seqüência de etapas que devem ser executadas para a análise dos dados, conforme a metodologia apresentada acima.

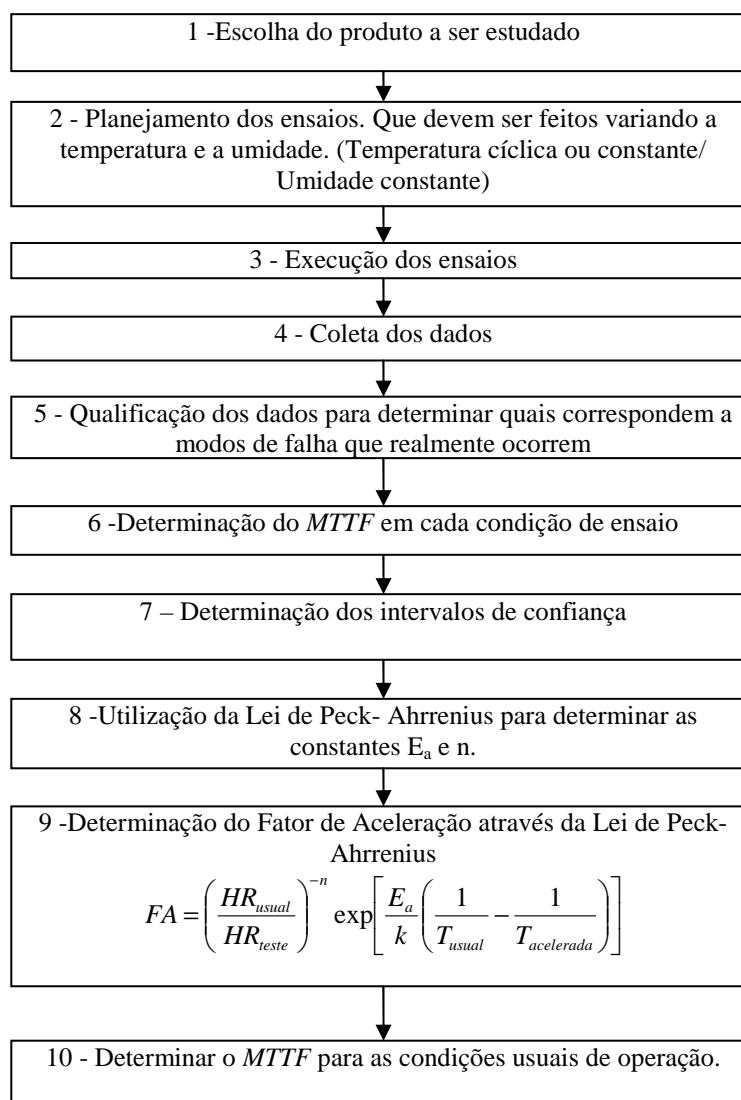


Figura 3.4 Fluxograma de Análise dos Dados.

CAPITULO 4 - CASO EXEMPLO: ENSAIO ACELERADO DE UMA CENTRAL TELEFÔNICA PABX ANALÓGICA

Neste capítulo é apresentado como caso exemplo a análise de confiabilidade de uma central telefônica PABX analógica. Nesta análise executaram-se ensaios de confiabilidade onde foram usadas condições diferentes de temperatura e umidade como variáveis de aceleração. Além da análise de confiabilidade é apresentada uma análise através da norma US MIL-HDBK-217 F (1991).

4.1. Descrição Funcional do Sistema

A central telefônica em estudo pode ser classificada segundo os critérios propostos pela US MIL-HDBK-781(1996) como um sistema complexo, já que possui número de componentes superior a dois mil.

A central foi dividida em quatro sistemas básicos, os quais são: fonte de tensão, circuito de proteção de subtensão, gerenciamento e controle da central, e comutação. Estes sistemas foram analisados, sendo definidas as funções de seus componentes principais.

Primeiramente o circuito de Proteção de Subtensão tem a função de proteger a central de uma tensão abaixo da tensão necessária para o seu funcionamento normal.

O circuito de Gerenciamento e controle tem a função de acessar a memória, gerenciar e controlar as funções da central. Este é composto por um microcontrolador, uma bateria, contadores, temporizadores, memória RAM, um circuito de proteção de subtensão, um EPROM, um detector de *Ring*, entre outros circuitos auxiliares que atuam na execução das funções de controle e gerenciamento da central.

A função principal da central telefônica é cumprida pelo circuito de comutação que é responsável pela comutação das linhas externas com os ramais ligados à central telefônica. O sistema de comutação da central em estudo é

composto por uma matriz de comutação que realiza todas as relações entre as linhas externas e os ramais conectados à central telefônica. Este sistema também é composto por componentes e subsistemas auxiliares como circuitos de seleção de linhas externas, resistores, capacitores, um detector de entrada de sinal do operador (BINA), uma placa detectora de tom, circuitos de conformação do sinal, circuitos de proteção de áudio, entre outros.

Finalmente, a central em estudo dispõe de um sistema de alimentação que tem como função prover energia elétrica para todo o sistema e distribuir a energia de maneira organizada. Este é composto por uma fonte externa à central telefônica e uma fonte interna. A fonte externa transforma a tensão da rede elétrica em uma tensão de 24 V. Esta tensão é transformada novamente para tensões de 5 e 12 V dependendo da tensão solicitada pelo subsistema ou componente.

4.2. Descrição do Aparato Experimental

Os ensaios acelerados, para avaliação da confiabilidade da central, foram realizados em uma câmara climática Weiss WK 111, mostrada na Figura 4.1, com capacidade de controle da umidade e da temperatura, sendo que a taxa de elevação da temperatura é de 2°C/min e a de decréscimo é de 1°C/min. A faixa de trabalho desta câmara é de -10°C a 90°C para a temperatura e de 10 a 98% de umidade relativa.



Figura 4.1 - Câmara Climática Weiss WK 111.

Foram montadas simultaneamente cinco centrais telefônicas no interior da câmara. Estas centrais foram ligadas às suas fontes de alimentação externa, que permaneceram na parte externa da câmara climática. Também externamente à câmara foram montados um telefone convencional e um terminal inteligente para cada central, totalizando cinco telefones convencionais e cinco terminais inteligentes. Os terminais inteligentes são utilizados para controlar as funções de comutação entre os telefones convencionais, que são os ramais propriamente ditos.

4.3. Aplicação da Norma US MIL-HDBK-217 F para a Central Telefônica em Estudo

Nessa seção descreve-se a aplicação da norma US MIL-HDBK-217 F (1991) para estimação da confiabilidade da central telefônica em estudo. São aplicadas as metodologias de estimação da confiabilidade descritas no Capítulo 2 para o circuito Tronco, quatro placas ramais, o circuito de comutação, o circuito de *ring*, a fonte de 12 V e a fonte de 5 V. Todos os circuitos citados foram solicitados durante o ensaio de confiabilidade proposto posteriormente nesse texto. Desta forma é possível comparar os resultados dos ensaios com os valores obtidos através da norma. Para isso, deve-se lembrar que não são considerados os componentes do sistema de alimentação que ficam externos à placa base, pois estes não ficam dentro da câmara durante o ensaio. O cálculo detalhado dos circuitos considerados está apresentado no APÊNDICE I deste texto. Assim, tem-se os resultados apresentados na Tabela 4.1, conforme análise proposta pela US MIL-HDBK 217 F (1991):

Tabela 4.1 - Taxas de falhas dos circuitos estudados segunda a norma US MIL-HDBK-217 F (1991).

Circuito	Quantidade na Central	Taxa de falha de cada circuito (falhas/10⁶ horas)	MTTF (horas)
Ramal	2	0,98	1020408
Matriz de Comutação	1	3,4	505051
Tronco	1	14	335570
Circuito de Ring	1	1,6	251256
Fonte 5 V	1	1,5	200803
Fonte de 12 V	1	2,8	167224

Para a obtenção de cada uma das taxas de falhas citadas na Tabela 4.1 foi admitido que as falhas do circuito são organizadas em série, ou seja, a falha de qualquer componente que compõe o circuito causa a falha de todo o circuito. Os cálculos da confiabilidade apresentados foram executados considerando a temperatura ambiente em 20°C. Outro fator importante avaliado pela norma é o nível de vibração que o equipamento está sujeito. Para a central, este nível de vibração é categorizado como sendo de instalação fixa no solo, ou seja, não está sujeita a vibração durante a operação. A norma considerada não leva em conta a avaliação da taxa de falha em função da umidade à qual o equipamento está sujeito.

Desta forma, como são assumidas distribuições exponenciais, a taxa de falha do circuito será dada pela soma das taxas de falha de cada um dos circuitos. Assim, a taxa de falha resultante do circuito estudado é dada pela soma das taxas de falhas de cada um dos circuitos estudados separadamente, levando-se em conta que foram estudados dois circuitos ramais. Portanto, a taxa de falha de todos os circuitos estudados é $\lambda_{final} = 25$ falhas/ 10⁶ horas. Com isso, pode-se calcular um tempo médio até a falha, que no caso da distribuição exponencial pode ser obtido através do inverso da taxa de falha. Assim, obtém-se um tempo médio até a falha de aproximadamente 40.000 horas.

4.4. Procedimento de Ensaio com Ciclos de Temperatura e Umidade Constante

O procedimento de ensaio descrito neste texto é baseado nas normas militares US MIL-HDBK 2164 (1985) e US MIL-HDBK 338(1998).

Os principais parâmetros que precipitam a ocorrência de falhas são temperatura e umidade, e baseando-se nesta conclusão propõe-se o procedimento de ensaio onde a umidade é mantida constante durante cada ensaio e ciclos de temperatura são aplicados de forma a incentivar a precipitação de falhas por corrosão e fadiga térmica.

A umidade é mantida constante com um valor alto para simular ambientes com altas umidades. Foi escolhido o valor de 85 % de umidade relativa como um valor inicial para um ensaio prévio, mantido constante durante um mesmo ensaio.

Para a temperatura, são aplicados ciclos térmicos com perfis trapezoidais. O valor mínimo para esta temperatura foi estipulado inicialmente em 15°C. O valor máximo de temperatura foi inicialmente de 85°C. A taxa de elevação da temperatura da câmara climática é de cerca de 2°C/min que é o valor máximo de taxa de variação da temperatura do dispositivo disponível para o ensaio. Para diminuição de temperatura a taxa máxima disponível foi de aproximadamente 1°C/min.

Quando a câmara atingir a temperatura máxima ou mínima deve-se manter estas durante certo tempo para garantir que a central telefônica tenha uma distribuição de temperatura aproximadamente uniforme e próxima aos respectivos valores máximos e mínimos. Estes tempos são chamados de tempos de acomodação térmica máxima e mínima e são determinados nos testes de calibração de cada ensaio.

Algumas funções principais do equipamento devem ser testadas antes do início do ensaio e periodicamente após certo número de ciclos térmicos. A descrição dos testes destas funções será descrita posteriormente.

A Figura 4.3 apresenta o perfil temporal de temperatura do ensaio proposto, onde se pode observar os tempos de acomodação térmica.

Os ensaios são realizados com a central ligada, ou seja, com alimentação de energia elétrica. Assim é possível monitorar o funcionamento de algumas funções durante a realização do ensaio.

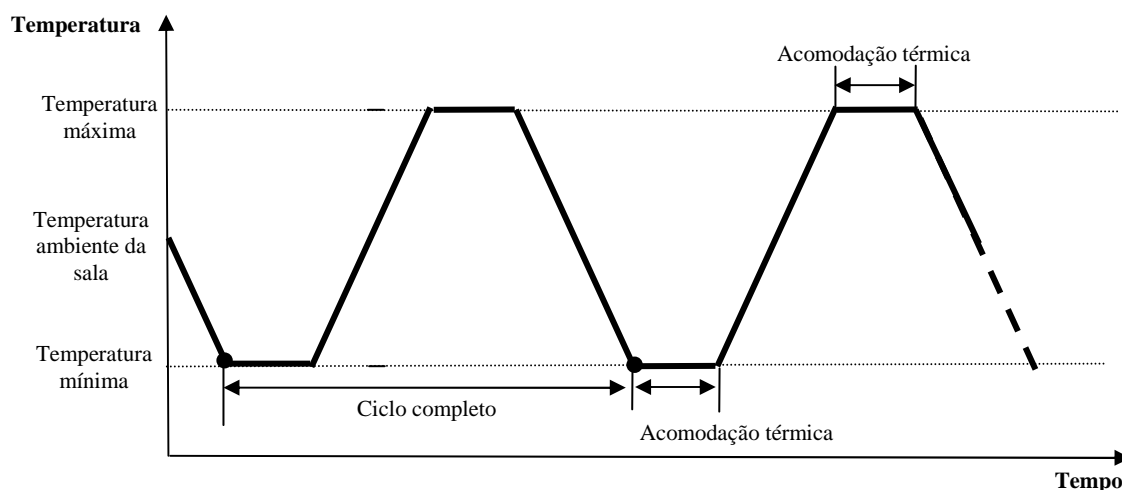


Figura 4.2 - Perfil Temporal de Temperatura do Ensaio Proposto.

4.4.1. Calibração dos Equipamentos de Ensaio

Antes de se iniciar uma seqüência de ensaios é necessária a execução de calibrações de duas condições de ensaio. São elas:

a) Distribuição Espacial de Temperatura da Câmara

É fundamental o conhecimento da distribuição espacial de temperatura da câmara. Este conhecimento é importante, pois limita a região útil de trabalho da câmara, já que a distribuição de temperatura em todas as centrais ensaiadas simultaneamente no interior da câmara climática deve ser aproximadamente constante. Caso a distribuição de temperatura não seja uniforme pode-se ter casos onde uma central aquece mais rapidamente que outras, ou ainda, casos onde uma região da central fica submetida a uma temperatura diferente de outras.

Esta distribuição deve ser medida através da utilização de termopares. Propõe-se o seguinte procedimento para determinação da distribuição de temperatura:

- I) Instalação de termopares distribuídos na câmara e subsequente aplicação de um ciclo de temperatura conforme descrito anteriormente. Para definição do tempo de acomodação térmica da câmara, deve-se aguardar que todos os termopares instalados na mesma apresentem valor igual aos valores máximos e mínimos definidos para o ensaio.
- II) O monitoramento de cada termopar gera um perfil temporal de temperatura espacial da câmara.
- III) A região útil da câmara será aquela na qual não se observa variações de temperatura, máxima ou mínima, superior a 5%, tomada em relação ao valor previsto para o ensaio.

A distribuição temporal foi realizada utilizando cinco termopares distribuídos em pontos distintos da câmara e estes apresentaram o mesmo valor para qualquer variação de temperatura da câmara. Portanto, conclui-se que a distribuição espacial de temperatura é praticamente uniforme em toda a câmara de ensaio.

b) Verificar o Tempo de Acomodação Térmica da Central

Em um ensaio com câmaras climáticas, embora a temperatura seja controlada, deve-se verificar se o equipamento ensaiado atinge a temperatura definida, ou seja, se apresenta a mesma temperatura definida para o interior da câmara.

Para garantir que todas as regiões da central atingiram a temperatura máxima e a mínima estipuladas para o ensaio é necessária a determinação de um tempo de acomodação térmica para a central, ou seja, o tempo necessário para todos os pontos atingirem a temperatura do interior da câmara. Para isso devem ser instalados termopares distribuídos espacialmente na central e com a aplicação de um ciclo de temperatura, conforme previsto para o ensaio, define-se o tempo necessário para a central atingir a temperatura do ensaio sendo este, denominado de tempo de acomodação térmica.

Para determinar o tempo de acomodação térmica da central utiliza-se o critério sugerido pela norma US MIL-HDBK-2164 (1985) o qual propõe que quando

a câmara atingir sua temperatura máxima ou mínima esta temperatura deve ser mantida constante até que 2/3 dos termopares instalados na central atinjam um valor com variação máxima de 10°C em relação à temperatura máxima ou mínima prevista para o ensaio. Por exemplo, no caso da temperatura máxima fixada em 85°C o tempo de acomodação térmica deve ser definido como o intervalo de tempo entre a temperatura da câmara atingir 85°C e 2/3 dos termopares estarem na faixa de temperatura de 75°C a 95°C. Desta forma obtém-se o ciclo de ensaio da central com os tempos de permanência da câmara às temperaturas máxima e mínima, a fim de garantir que a central entre em equilíbrio térmico com o ambiente da câmara.

4.5. Testes de Funcionamento do Equipamento

Antes do início do ensaio e durante a realização do mesmo devem ser feitos testes de funcionamento da central. Além destes, o ensaio conta com dois tipos de testes: os testes *on-line*, que são executados durante o ensaio; e os *off-line*, onde é necessário parar o ensaio para fazer a verificação das funcionalidades da central.

Para a execução dos testes, é estabelecida, para cada central, uma ligação entre um Terminal Inteligente (TI) e um ramal. Esta comunicação permanece estabelecida durante todo o ensaio.

Durante os ensaios, alguns mecanismos de teste de funcionamento *on-line* são adotados, dentre eles a verificação das condições do *display* do Terminal Inteligente. Analisa-se se o *display* está aceso ou não, pois caso alguma falha tenha ocorrido na comunicação entre o ramal e o Terminal Inteligente, o *display* do Terminal Inteligente se apaga. Outra forma de verificação do funcionamento dos ramais é através dos *leds* do Terminal Inteligente, que detecta se o ramal está ou não ativo. Com estes testes pode-se verificar o funcionamento do sistema de alimentação da central, assim como do sistema de comutação, entre outros.

Periodicamente, são realizados testes *off-line* de funcionamento da central. Estes testes são executados externamente à câmara climática, e para tal é necessário

que a temperatura da câmara seja devolvida à temperatura ambiente, podendo-se então executar os testes.

Os ensaios feitos na central telefônica em estudo foram executados utilizando 8 ramais, que correspondem à configuração mais comum de operação em campo. O primeiro procedimento de teste executado na central é o teste dos oito ramais. Nele, realizam-se as seguintes atividades: testa-se um ramal ligando para os outros; o ramal ligando para o Terminal Inteligente; e o Terminal Inteligente ligando para o ramal. Verifica-se então se a comunicação é estabelecida normalmente. Deste modo testa-se o canal de áudio, e avalia-se de maneira indireta se a Matriz de Comutação (responsável pela ligação entre os ramais) está operando corretamente. Também nesse teste são avaliados outros circuitos, incluindo o circuito de *ring*.

4.5.1. Procedimento de Ensaio de Calibração para Ensaio Cíclicos

Nesta seção apresenta-se um procedimento para o ensaio preliminar de calibração, cujo objetivo é determinar os tempos de acomodação térmica da central. Este procedimentos são baseados

As etapas do procedimento de ensaio a serem seguidas são:

- 1) Ligar a central (alimentar com energia);
- 2) Realizar os testes *on-line* e *off-line* das principais funções do equipamento;
- 3) Desligar a central;
- 4) Instalar os termopares na central em posições variadas da placa principal da central, de forma a registrar o perfil de temperatura na placa em função da temperatura da câmara.
- 5) Ligar a central e inserí-la na câmara;
- 6) Ligar a câmara climática e ajustar a umidade relativa na umidade definida para o ensaio;

- 7) Iniciar a contagem de tempo;
- 8) Executar o comando para elevar a temperatura da câmara até esta atingir 85°C.
- 9) Manter a temperatura da câmara até que 2/3 dos termopares instalados na central atingirem valores na faixa de 75°C a 95°C.
- 10) Anotar o intervalo de tempo em que a câmara permaneceu à temperatura constante.
- 11) Executar o comando para reduzir a temperatura da câmara para 15°C.
- 12) Manter a temperatura da câmara até que 2/3 dos termopares atingirem valores na faixa de 5°C a 25°C.
- 13) Anotar o intervalo de tempo em que a câmara permaneceu à temperatura constante;
- 14) Executar o comando para elevar a temperatura da câmara até esta atingir 85°C.
- 15) Manter a temperatura da câmara até que 2/3 dos termopares atingirem valores na faixa de 75°C a 95°C.
- 16) Repetir os itens de 10 a 13 (ciclo térmico completo) 4 vezes, ou seja, executar cinco ciclos completos de carregamento térmico.
- 17) Determinar o tempo de acomodação térmica para temperatura máxima através da média aritmética entre os 5 últimos valores anotados para esta temperatura.
- 18) Determinar o tempo de acomodação térmica para temperatura mínima através da média aritmética entre os 5 valores anotados para esta temperatura.
- 19) Reduzir a temperatura da câmara até esta atingir a temperatura ambiente.
- 20) Manter a temperatura da câmara constante até que todos os termopares atinjam temperaturas inferiores a 30°C, por questão de segurança.
- 21) Anotar o valor do intervalo de tempo entre a câmara atingir a temperatura ambiente e todos os termopares atingirem valores menores que 30°C.

22) Retirar a central da câmara;

23) Retirar os termopares da central;

4.5.2. Ensaio de Calibração Realizado

A verificação deste tempo de acomodação térmica pra a central foi realizada utilizando 3 termopares localizados em pontos diferentes da placa principal. Os procedimentos seguidos foram:

1) Foram instalados três termopares na central telefônica nos seguintes locais:

a) TERMOPAR 1: Sob um componente.

b) TERMOPAR 2: Na superfície de um componente.

c) TERMOPAR 3: Na superfície da placa.

2) A central instrumentada com os termopares foi inserida na central e alimentada com energia. E iniciou-se o procedimento com 25°C e 90% de umidade relativa. Foi dado o comando para diminuir até 15°C e 85% de umidade.

3) Após cerca de 30 minutos de ensaio os termopares atingiram os valores apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Leitura dos Termopares após 30 min de Ensaio.

Termopar	Temperatura
1	14°C
2	15°C
3	14°C

Estes valores permaneceram constantes por 5 minutos.

A diferença entre as temperaturas dos termopares e a temperatura da câmara pode ser explicada pela formação de uma corrente de convecção no interior da câmara gerada pelo sistema de circulação de ar no interior da mesma.

4) Em seguida foi dado o comando para alterar a temperatura para 85°C e após cerca de 60 minutos a temperatura dos termopares atingiram os valores mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Leitura dos Termopares após 60 min de Ensaio.

Termopar	Temperatura
1	83°C
2	86°C
3	84°C

Estes valores permaneceram constantes por 15 minutos.

5) Finalmente foi dado o comando para retornar a 15°C e após cerca de 1 hora e 30 minutos a temperatura da câmara atingiu uma temperatura de 15,8 °C e os termopares mostraram os valores apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Leitura dos Termopares após 90 min de Ensaio.

Termopar	Temperatura
1	16°C
2	17°C
3	16°C

Desta forma pode-se concluir que a distribuição de temperatura na central é praticamente uniforme de forma que o tempo de acomodação térmica pode ser considerado inferior ao tempo estimado para manter a temperatura constante nas temperaturas superior e inferior. Devido à resposta rápida dos termopares em relação

à temperatura da câmara foi descartada a necessidade da realização de 5 ciclos para obtenção de um tempo de acomodação térmica.

A partir desse ensaio definiu-se o perfil temporal de temperatura do ensaio cíclico, que tem uma duração total de 2,5 horas.

4.5.3. Procedimento de Ensaio Cíclico Proposto

Neste item apresenta-se o procedimento padrão para os ensaios de confiabilidade da central telefônica em estudo. Neste procedimento considera-se uma umidade de 85% e um ciclo de temperatura máxima de 85°C e temperatura mínima de 15°C. Para outros perfis de temperatura e umidade o procedimento de ensaio é mantido, apenas variando os valores fixados para os parâmetros de controle do ensaio. Para cada condição de ensaio, são ensaiadas cinco centrais colocadas juntas no interior da câmara.

O procedimento de ensaio proposto é descrito a seguir:

- 1) Instrumentar as cinco centrais para realização dos testes durante o ensaio.
- 2) Ligar as centrais (alimentar com energia);
- 3) Realizar os testes das principais funções (testes *on-line* e *off-line*);
- 4) Inserir as cinco centrais na câmara;
- 5) Ligar a câmara climática e manter a temperatura ambiente e ajustar a umidade relativa em 85%;
- 6) Iniciar a contagem de tempo;
- 7) Executar o comando para reduzir a temperatura da câmara a 15°C. Quando a temperatura da câmara se estabilizar em 15°C poderá ser dado início ao ciclo que se repetirá um certo número de vezes até que sejam realizados os testes de funcionalidade. Este valor é definido pelo executor do ensaio.

- 8) Iniciar o ciclo executando o comando para elevar a temperatura para 85°C. A câmara deve ser programada para executar esta elevação em conformidade com o perfil temporal definido no ensaio de calibração. Isto incluirá a elevação de temperatura e o tempo de acomodação térmica a 85°C.
- 9) Em seguida deve ser dado o comando para reduzir a temperatura para 15°C, em conformidade com o perfil temporal determinado no ensaio de calibração. Neste caso também está incluído o tempo de acomodação térmica.
- 10) Executar os testes de funcionalidade da central – testes on-line.
- 11) Repetir os itens de 8 e 9 (ciclo térmico completo) o número de vezes que se deseja executar os ensaios antes de sua paralisação para realização dos testes *off-line*.
- 12) Reduzir a temperatura da câmara até esta atingir a temperatura ambiente.
- 13) Desligar a central.
- 14) Retirar a central da câmara;
- 15) Ligar a central (alimentar com energia);
- 16) Realizar os testes das principais funções do equipamento.
- 17) Verificar se todas as funções estão em perfeito funcionamento, ou seja, se não ocorreu nenhuma falha;
- 18) Caso seja observada alguma falha, parar o ensaio e anotar o tempo de realização do ensaio, ou seja, o tempo decorrido entre as etapas 5 e 11. Registrar o circuito em que ocorreu a falha e o elemento do circuito que apresentou a falha. Continuar o ensaio para as centrais restantes.
- 19) Caso nenhuma falha seja observada repetir os procedimentos de 4 a 11, até que seja observada a falha em uma central.

- 20) O ensaio deve continuar até que todas as 5 centrais apresentem falha ou até o tempo de execução do ensaio exceda um limite a ser estipulado para cada ensaio.

4.5.4. Procedimento de Ensaio a Temperatura e Umidades Constantes

O procedimento padrão para os ensaios de confiabilidade da central telefônica em estudo com temperatura e umidade constante é descrito nessa seção. Neste procedimento consideram-se uma umidade de 85% e uma temperatura de 80°C, ambas constantes. Para outros parâmetros o procedimento de ensaio é mantido, apenas variando os valores. Cada ensaio tem um intervalo de tempo de duração de aproximadamente 24 horas entre a realização dos testes funcionais *off-line* e assim como no ensaio cíclico, são ensaiadas cinco centrais, colocadas juntas no interior da câmara.

O procedimento de ensaio proposto para temperatura e umidade constante é descrito abaixo:

- 1) Instrumentar as cinco centrais para realização dos testes durante o ensaio;
- 2) Ligar as centrais (alimentar com energia);
- 3) Realizar os testes das principais funções;
- 4) Inserir as cinco centrais na câmara;
- 5) Ligar a câmara climática e manter a temperatura ambiente e ajustar a umidade relativa em 85%;
- 6) Iniciar a contagem de tempo;
- 7) Executar o comando para ajustar a temperatura em 80°C durante aproximadamente 20 horas;
- 8) Executar os testes de funcionalidade da central – testes *on-line* periodicamente;

- 9) Após aproximadamente 20 horas de ensaio reduzir a temperatura da câmara até esta atingir a temperatura ambiente;
- 10) Desligar a central;
- 11) Retirar a central da câmara;
- 12) Ligar a central (alimentar com energia);
- 13) Realizar os testes das principais funções do equipamento;
- 14) Verificar se todas as funções estão em perfeito funcionamento, ou seja, se não ocorreu nenhuma falha;
- 15) Caso seja observada alguma falha, parar o ensaio e anotar o tempo de realização do ensaio, ou seja, o tempo decorrido entre as etapas 6 e 9, registrar o circuito em que ocorreu a falha e o elemento do circuito que apresentou a falha. Continuar o ensaio para as centrais restantes.
- 16) Caso nenhuma falha seja observada repetir os procedimentos de 1 a 9, até que seja observada a falha em uma central.
- 17) O ensaio deve continuar até que todas as 5 centrais apresentem falha ou até o tempo de execução do ensaio exceda um limite a ser estipulado para cada ensaio.

4.6. Análise dos Dados dos Ensaio Acelerados

Conforme discutido anteriormente, parâmetros que mais aceleram a ocorrência dos principais modos de falha no equipamento em estudo são temperatura e umidade. Desta forma, foram executados ensaios os quais estes dois parâmetros foram variados em relação às condições normais de operação da central. Para isso, cinco ensaios diferentes foram realizados, descritos a seguir.

O primeiro ensaio proposto foi um ciclo de temperatura à umidade constante. Neste ensaio, a temperatura variou entre 15°C a 85°C, mantendo a umidade relativa a

uma magnitude de 85%, com aumentos e diminuições dentro desse intervalo, cada um no período de cerca de 2 horas. A 4.2 mostra o perfil temporal da temperatura para um ciclo de ensaio.

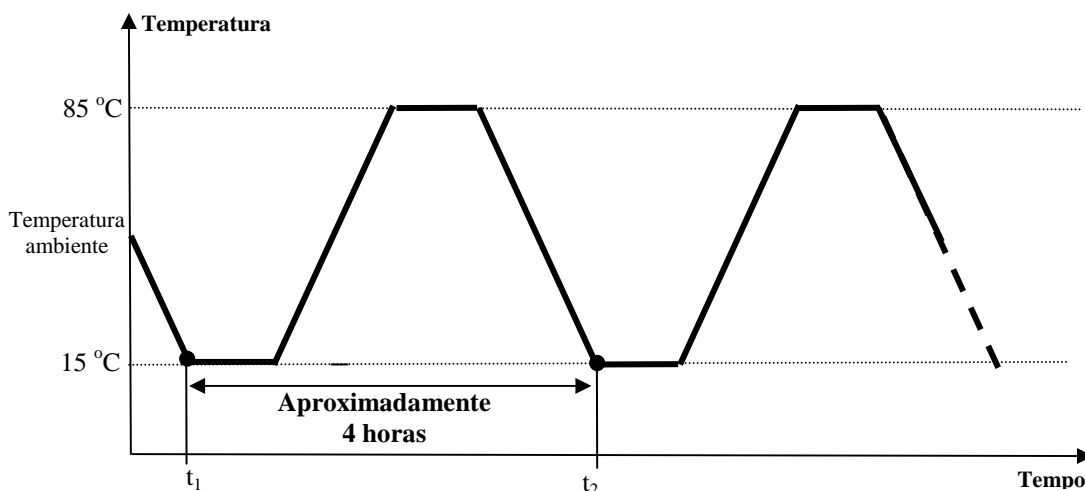


Figura 4.3 - Perfil Temporal de Temperatura do Ensaio 1.

Para posterior análise dos dados, é fundamental estabelecer uma temperatura média do ensaio. Esta temperatura é obtida através da Equação 4.6.

$$T_{\text{média}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} T(t).dt}{t_2 - t_1} \quad (4.6)$$

Aplicando Equação 4.6 para o ciclo do ensaio 1 obtém-se uma temperatura média de 55,1°C.

Devido à grande duração deste ensaio sem a ocorrência de falhas em uma primeira análise, foi proposto um segundo ensaio com a temperatura e umidade constantes nos quais as amostras deveriam ser mantidas por cerca de 600 horas, pois se concluiu que o ciclo de temperatura era pouco agressivo, ou seja, propiciava uma pequena aceleração para os modos de falha do equipamento. Desta forma, o segundo ensaio foi realizado à temperatura de 75°C (constante) e 90% de umidade relativa. Este ciclo se apresentou excessivamente agressivo para a central, provocando uma oxidação generalizada, inclusive das trilhas após 70 horas. Estas falhas não são

esperadas no campo e a execução de ensaios nesta condição geraria falhas que não apresentariam correlação com as falhas observadas nas condições normais de uso da central, impossibilitando a calibração do fator de aceleração. Descartou-se assim a execução de ensaios nestas condições.

Foi proposto então um terceiro ensaio, que visava ser menos agressivo que o segundo, diminuindo-se a umidade relativa para 70% e aumentando-se levemente a temperatura para 80°C. Neste teste, nenhuma falha foi observada até o ensaio atingir 640 horas. Foi proposto então um quarto ensaio.

Neste quarto ensaio a temperatura foi mantida constante a 80°C e a umidade relativa foi de 85%, também constante. Foram observadas algumas falhas que estão descritas na seqüência do texto.

O quinto e ultimo ensaio proposto tem o objetivo de avaliar a influência da umidade nos mecanismos de falha da central. Esta avaliação foi feita a fim de ser comparada com os resultados apresentados pelo 3º ensaio que, apesar de não ter apresentado nenhuma falha, fornece uma estimativa de confiabilidade, pois seus dados podem ser tratados como dados suspensos. Neste ensaio a temperatura foi mantida constante a 80°C e a umidade relativa foi de 78%, também constante.

A Tabela 4.5 apresenta um resumo dos parâmetros usados nos ensaios executados.

Tabela 4.5 - Resumo dos Parâmetros Utilizados nos Ensaiois.

Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 6
Temperatura (°C)	Ciclos de 15 a 85	75 (constante)	80 (constante)	80 (constante)	80 (constante)
Umidade (%)	85	90	70	85	78

4.6.1. Relatório das Falhas e Eventos Ocorridos nos Ensaiois

Nesta seção será apresentada uma descrição das falhas e eventos ocorridos em cada um dos ensaios executado.

As Tabelas de 4.6 a 4.11 apresentam uma descrição dos eventos ocorridos durante os ensaios. Note que dentre as falhas observadas algumas são desconsideradas na análise dos dados por não serem observadas nas condições normais de operação, ou seja, o ensaio introduziu modos de falha que não são usualmente observados, por exemplo, o vazamento das baterias, observado no ensaio 1 e no ensaio 4.

Tabela 4.6 - Descrição dos Eventos Observados Durante o Ensaio 1.

Ensaio 1 – Ciclos de temperatura (15°C a 85°C) e Umidade Relativa 85% (constante)				
Tempo (horas)	Falha/Evento	Causa	Consequência	Observação
200	Mau contato por deformação nos conectores de alimentação.	Temperatura acima da suportada pelos conectores	Mau contato no sistema de alimentação da central	Falha desconsiderada para análise dos dados por não ocorrer nas condições normais de operação.
420	Vazamento da bateria	Temperatura acima da suportada pela bateria	Perda de programação da central	Falha desconsiderada para análise dos dados por não ocorrer nas condições normais de operação.
450	Oxidação na placa ramal	Desconhecida	Baixa isolamento em transistores	Falha considerada na análise dos dados.
390	Troca das baterias e conectores de alimentação	Defeitos nos componentes	Restauração da funcionalidade completa da central	Central devolvida normalmente à funcionalidade
606	Vazamento da bateria	Temperatura acima da suportada pela bateria	Perda de programação da central	Falha desconsiderada para análise dos dados por não ocorrer nas condições normais de operação.

Tabela 4.7 - Descrição dos Eventos Observados Durante o Ensaio 2.

Ensaio 2 – Temperatura 75° C(constante) e Umidade Relativa 90% (constante)				
Tempo (horas)	Falha/Evento	Causa	Consequência	Observação
70	Oxidação generalizada nas soldas	Condições de ensaio muito agressivas	Paralisação do ensaio	Falhas desconsideradas para análise dos dados por não ocorrerem nas condições normais de operação.

Tabela 4.8 - Descrição dos Eventos Observados Durante o Ensaio 3.

Ensaio 3 – Temperatura 80° C(constante) e Umidade Relativa 70% (constante)				
Tempo (horas)	Falha/Evento	Causa	Consequência	Observação
640	Nenhuma falha foi observada	Condição de ensaio muito amena.	Fim do ensaio.	Apesar da ausência de falhas é possível estimar o tempo médio até a falha e considerar o ensaio para análise final.

Tabela 4.9 - Descrição dos Eventos Observados Durante o Ensaio 4.

Ensaio 4 – Temperatura 80° C(constante) e Umidade Relativa 85% (constante)				
Tempo (horas)	Falha/Evento	Causa	Consequência	Observação
63	Placa ramal da central 3 parou de operar.	Contaminação da Placa Ramal. Queima de um transistor.	Troca da placa ramal por outra provisória e continuação do ensaio.	O tempo até a falha é considerado e a partir desse momento é considerado que uma nova central foi inserida na câmara.
240	Placa ramal da central 4 parou de operar	Queima de um transistor	Troca das placas ramais das centrais 3 e 4 por placas novas.	O tempo até a falha é considerado e a partir desse momento é considerado que uma nova central foi inserida na câmara.
300	Vazamento da bateria	Temperatura acima da suportada pela bateria	Perda de programação da central	Falha desconsiderada para análise dos dados por não ocorrer nas condições normais
510	Oxidação na placa base da central 5	Acumulo de água entre a placa e a carcaça	Fim do ensaio	Falha considerada para análise dos dados.

Tabela 4.10 - Descrição dos Eventos Observados Durante o Ensaio 5.

Ensaio 5 – Temperatura 80°C(constante) e Umidade Relativa 78% (constante)				
Tempo (horas)	Falha/Evento	Causa	Consequência	Observação
750	Nenhuma falha foi observada	Condição de ensaio muito amena ou tempo de ensaio insuficiente.	Fim do ensaio.	Apesar da ausência de falhas é possível estimar o tempo médio até a falha e considerar o ensaio para análise final

4.6.2. Análise dos Dados

Nesta seção é apresentada uma análise dos dados obtidos nos ensaios visando a determinação do Tempo Médio até a Falha de cada um dos ensaios válidos e a partir destes valores estimar a vida da central nas condições normais de utilização.

Destaca-se que no ensaio 4 ocorreram falhas nas placas ramais e com o objetivo de testar apenas estes itens, as centrais foram novamente inseridas na câmara após a troca das placas que apresentaram defeito. Desta forma, pôde-se continuar o ensaio assumindo que novas centrais foram inseridas na câmara.

4.6.2.1. Cálculo do Tempo Médio Até a Falha para os Ensaios

A partir dos resultados obtidos nos ensaios pode-se estimar a confiabilidade para cada um dos ensaios executados através da obtenção do *MTTF* para o ensaio, assim como o seu intervalo de confiança. Para esta estimação deve ser assumido que a probabilidade de falha do sistema é aleatória, ou seja, deve ser utilizada uma distribuição exponencial para tratar os dados de falha.

Para analisar os dados dos ensaios é necessário tratá-lo como um ensaio censurado, onde nem todos os elementos são ensaiados até a falha. Dessa forma, ao final de um ensaio censurado podem-se ter equipamentos que falharam e equipamentos que continuam operando.

A Tabela 4.11 expressa os dados de tempo para a falha. No caso de falha, classifica-se o dado com “F”, mas essa tabela também expressa os dados de tempo em que o equipamento que não falhou ficou submetido ao ensaio, e nessa ocorrência diz-se que o dado é suspenso, e o classificamos com “S”.

Os ensaios 2 e 5 foram interrompidos e os seus dados foram desconsiderados para análise.

Tabela 4.11 - Tempos até a Falha, “F” ou Tempo para Suspensão do Ensaio, “S”.

Ensaio 1		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5	
Tempo	S / F	Tempo	S / F	Tempo	S / F	Tempo	S / F
450	F	640	S	63	F	750	S
606	S	640	S	240	F	750	S
606	S	640	S	270	S	750	S
606	S	640	S	447	S	750	S
606	S	640	S	510	S	750	S
				510	S		
				510	F		

Estes valores foram tratados através do programa Weibull 6,0, cuja utilização foi baseada no manual ReliaSoft Corporation (1997) e foram obtidos os seguintes valores indicados na Tabela 4.12 para a taxa de falhas e correspondentes MTTF, utilizando-se para isso distribuições exponenciais.

Tabela 4.12 - Taxas de Falha e *MTTF* para os Ensaios Executados.

	Taxa de falha, λ . (falhas/ hora)	<i>MTTF</i> (horas)
Ensaio 1	0,00035	2874
Ensaio 3	0,00022	4617
Ensaio 4	0,0012	850
Ensaio 6	0,00018	5.411

Com os dados de falha disponíveis para o ensaio não foi possível adequar os dados a outras distribuições de probabilidade como, por exemplo, a distribuição Lognormal e a distribuição de Weibull, porém este procedimento serviria apenas para comparação entre os resultados. Dessa forma, utilizou-se a distribuição exponencial que é a mais indicada pela norma US-MIL-HDBK-217 F (1991).

As Figuras de 4.5 até 4.8 apresentam as curva de confiabilidade versus tempo para os ensaios 1, 3 e 4.

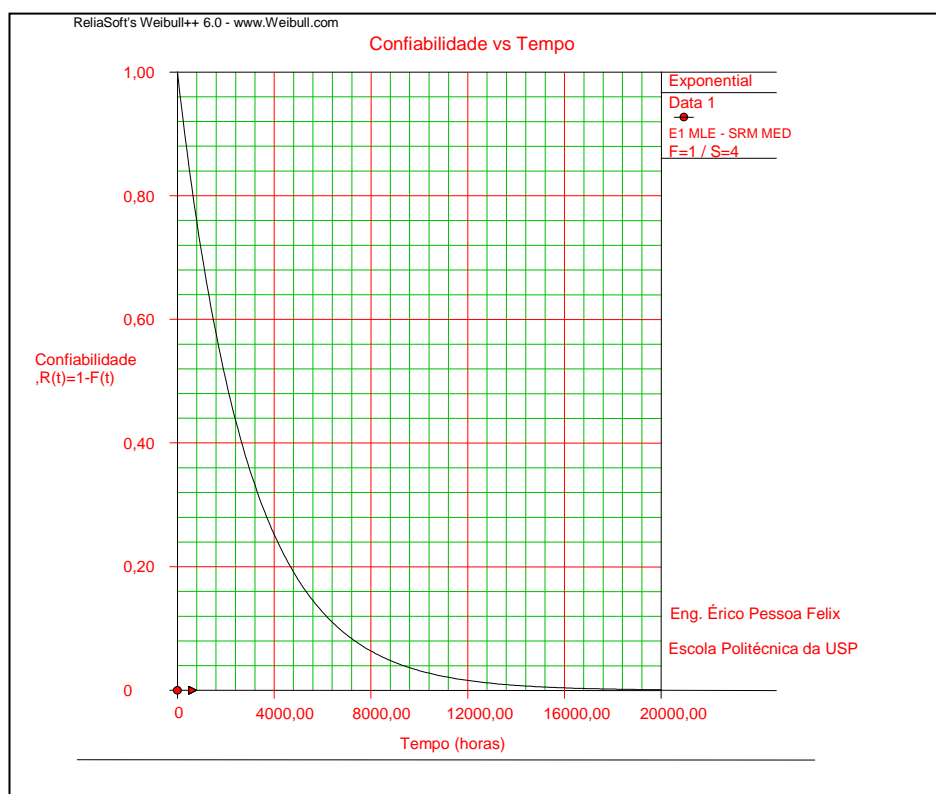


Figura 4.4 - Confiabilidade vs Tempo para o Ensaio 1.

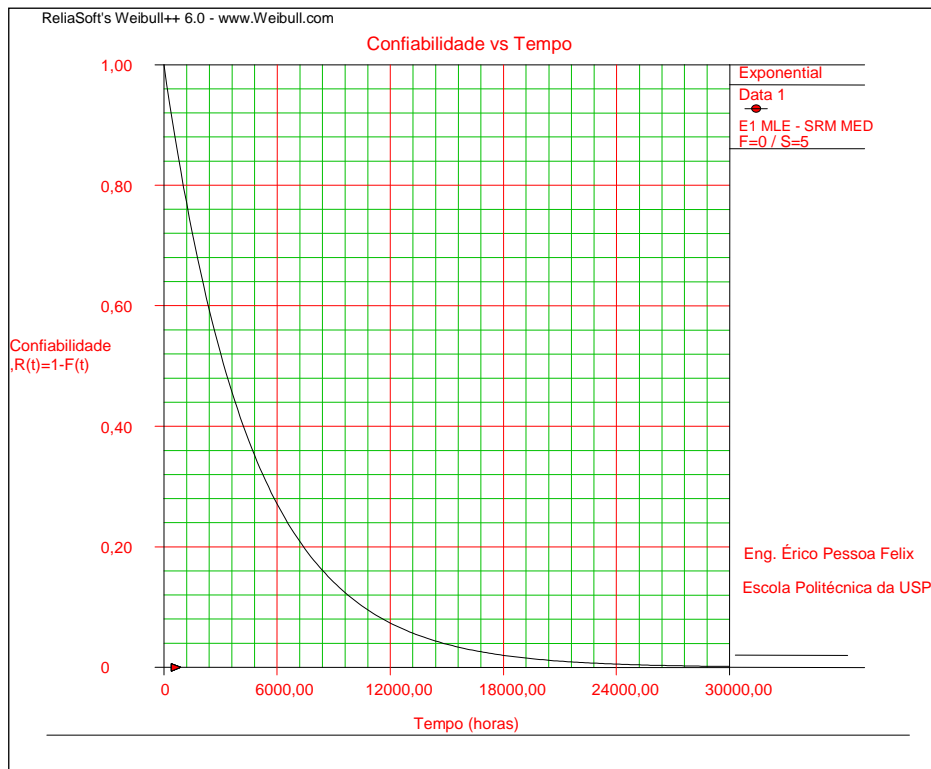


Figura 4.5 - Confiabilidade vs Tempo para o Ensaio 3.

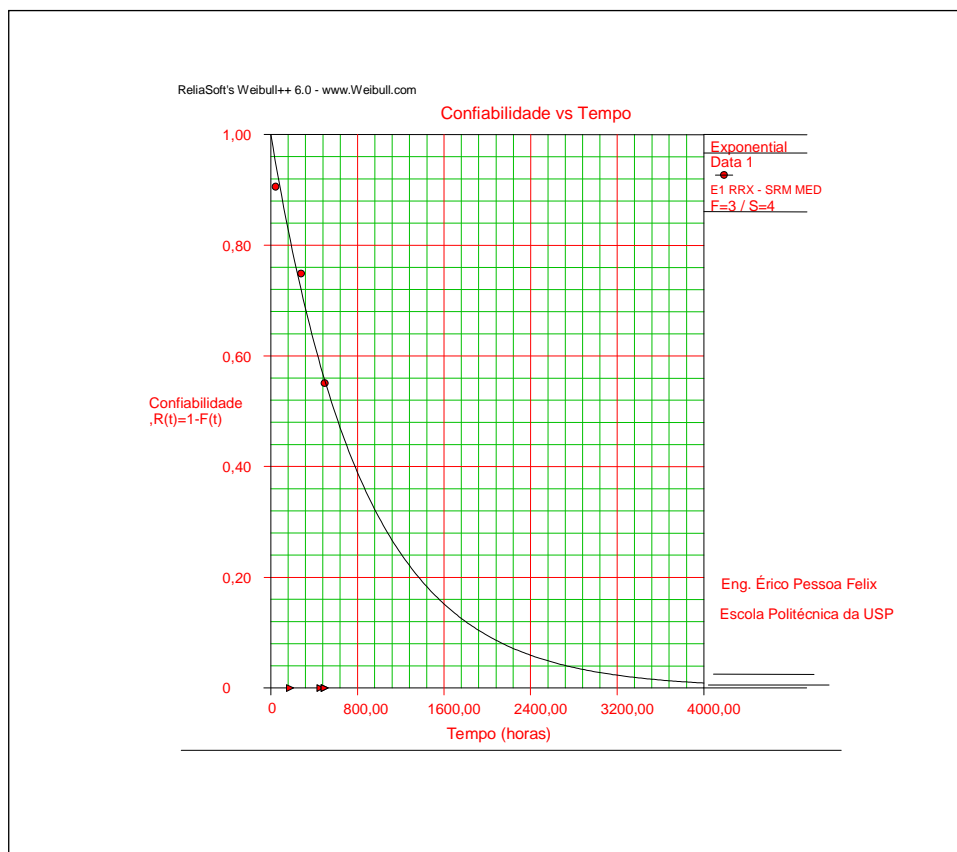


Figura 4.6 - Confiabilidade vs Tempo para o Ensaio 4.

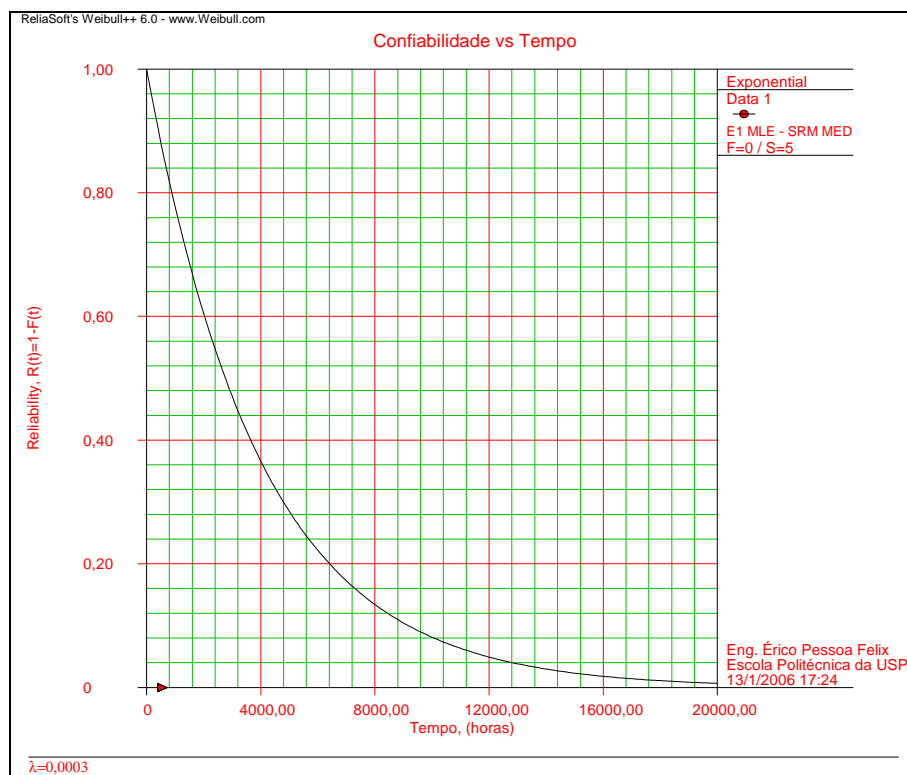


Figura 4.7 - Confiabilidade vs Tempo para o Ensaio 5.

4.6.2.2. Cálculo do Fator de Aceleração Baseada na Lei de Peck-Arrhenius

Para análise dos ensaios são apresentados dois procedimentos. O primeiros deles será feito através da Equação 3.5.

$$FA = \left(\frac{HR_{usual}}{HR_{teste}} \right)^{-n} \cdot \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{usual}} - \frac{1}{T_{acelerada}} \right) \right]$$

Esta equação nada mais é que a equação de Arrhenius adicionada a uma parcela que inclui a influência da umidade relativa.

O fator de aceleração também pode ser expresso através da Equação 3.1.

$$FA = \frac{MTTF_{CONDIÇÃO_DE_USO}}{MTTF_{CONDIÇÃO_ACELERADA}}$$

Pode-se usar estas equações para determinar empiricamente os valores das constantes n e E_a , comparando duas condições de ensaio com uma das variáveis inalterada. Desta forma, pode-se comparar o ensaio 1 com o ensaio 4, pois ambos têm a mesma umidade relativa, assim podendo-se determinar empiricamente o valor da Energia de Ativação. Para isso, pode-se considerar que a temperatura usual adotada é a temperatura média do ensaio 1, correspondente a 55°C. Assim, substituindo na Equação 3.1 nas seguintes condições:

$$TMF_{CONDIÇÃO\ DE\ USO} = 2874 \text{ horas (ensaio 1)}$$

$$TMF_{CONDIÇÃO\ ACELERADA} = 850 \text{ horas (ensaio 4)}$$

Tem-se, então:

$$FA = \frac{2874 \text{ horas}}{850 \text{ horas}} = 3,4$$

Substituindo os dados relacionados aos ensaios 1 e 4 na Equação 3.5, pode-se estimar o valor da energia de ativação, E_a .

$$FA = 3,38$$

$$HR_{usual} = 85\%$$

$$HR_{teste} = 85\%$$

$$n = ?$$

$$E_a = ?$$

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$T_{usual} = 55,1^\circ\text{C} = 328,25 \text{ K}$$

$$T_{teste} = 80^\circ\text{C} = 353,15 \text{ K}$$

Tem-se, então:

$$FA = \left(\frac{85\%}{85\%} \right)^{-n} \exp \left[\frac{E_a}{8.62 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{328,25} - \frac{1}{353,15} \right) \right] = 3,4$$

Isolando o valor de E_a , obtém-se um valor igual 0,43 eV. Este valor é coerente com o valor citado por Ireson et al. (1995) que indica uma variação entre 0,3 e 1,1 para a Energia de ativação dependendo do modo de falha.

Analogamente, pode-se estimar o valor da constante n . Basta comparar os resultados apresentados pelos ensaios 3 e 4, pois estes foram executados a mesma temperatura. As condições do ensaio 3 que devem ser aplicadas na Equação 3.5 são $HR_{usual} = 70\%$ e $HR_{teste} = 85\%$. Primeiramente, é necessário primeiramente estimar o fator de aceleração através dos tempos médios até a falha dos ensaios 4 e 5, obtendo então:

$$MTTF_{CONDIÇÃO DE USO} = 4617 \text{ horas (ensaio 3)}$$

$$MTTF_{CONDIÇÃO ACELERADA} = 850 \text{ horas (ensaio 4)}$$

Tem-se, então:

$$FA = \frac{4617 \text{ horas}}{850 \text{ horas}} = 5,5$$

Este valor é coerente com o esperado para um fator de aceleração, mas devido a não ocorrência de falhas no ensaio 5 não se pode garantir grande confiança a este valor. Portanto, para uma análise mais refinada deve-se executar o ensaio 3 ou 5 por um período de tempo maior. A análise será feita mesmo com esta ressalva apenas para demonstrar a metodologia de análise dos dados.

Substituindo os dados relacionados aos ensaios 4 e 3 na Equação 3.5, pode-se estimar o valor da constante, n .

$$FA = 5,5$$

$$HR_{usual} = 70\%$$

$$HR_{teste} = 85\%$$

$$n = ?$$

$$E_a = ?$$

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$T_{usual} = 80^\circ\text{C} = 353,15 \text{ K}$$

$$T_{teste} = 80^\circ\text{C} = 353,15 \text{ K}$$

Assim:

$$FA = \left(\frac{70\%}{85\%} \right)^{-n} \exp \left[\frac{E_a}{8.62 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{353,15} - \frac{1}{353,15} \right) \right] = 5,5$$

Isolando-se n , obtém-se um valor igual 8,7.

Assim, pode-se expressar o Fator de Aceleração para a central em estudo pela seguinte expressão:

$$FA = \left(\frac{HR_{usual}}{HR_{teste}} \right)^{-8,7} \exp \left[\frac{0,43}{8,63 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{usual}} - \frac{1}{T_{teste}} \right) \right] \quad (4.7)$$

A Equação 4.7 fornece uma relação que pode ser aplicada para qualquer condição de ensaio. Se, por exemplo, deseja-se saber qual o *MTTF* em condições normais de operação que podem ser adotadas como 20°C de temperatura ambiente e 50% de umidade relativa, utiliza-se as informações do ensaio 4, que foi executado a 80°C e 85% de umidade relativa. Pode-se calcular o fator de aceleração através da Equação 4.7. e, a seguir, é apresentado este cálculo.

$$FA = ?$$

$$HR_{usual} = 50\%$$

$$HR_{teste} = 85\%$$

$$n = 8,7$$

$$E_a = 0,43$$

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$T_{usual} = 20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}$$

$$T_{teste} = 80^\circ\text{C} = 353,15 \text{ K}$$

Tem-se, então:

$$FA = \left(\frac{50\%}{85\%} \right)^{-8,7} \exp \left[\frac{0,43}{8.62 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{293,15} - \frac{1}{353,15} \right) \right] = 1831,4687$$

Através da Equação 3.1 pode-se então determinar o *MTTF* nas condições normais de operação.

$$FA = \frac{MTTF_{CONDIÇÃO_DE_USO}}{850}$$

Obtém-se assim a um *MTTF* nas condições normais de operação de aproximadamente 1.556.709 horas.

Este resultado é muito superior ao encontrado por norma, porém os ensaios 3 e 6 foram concluídos sem nenhuma falha ter sido observada o que compromete a

confiança do valor encontrado para a constante n . Ressalta-se que o cálculo foi executado apenas para apresentar a metodologia de análise dos dados. Neste caso é mais adequado utilizar o valor fornecido pela literatura. Lembrando que segundo Peck; Hallberg (1991) o fator n deve variar entre 2,5 e 3. Assim ao se calcular o $MTTF$ utilizando os valores recomendados por Peck obtém-se Fatores de Aceleração de 68 e 88 para os valores de n de 2,5 e 3, respectivamente. Utilizando esses Fatores de Aceleração obtém-se os um $MTTF$ igual a 71.543 e 54.871 horas para valores de n iguais a 2,5 e 3 respectivamente. Estes valores estão mais condizentes com os valores encontrados pela norma e os valores calculados a partir de falhas de campo que não são mencionados nesse trabalho.

4.6.2.3. Intervalos de Confiança dos Dados

É de fundamental importância a avaliação dos intervalos de confiança do valor de $MTTF$ calculado para cada uma das condições de ensaio. Assim é apresentada uma metodologia para essa avaliação. Como o número de falhas nos ensaios são em sua maioria insuficientes para a avaliação dos intervalos de confiança através do programa Weibull 6,0, assim é apresentada a seguir uma metodologia para a determinação desses intervalos de confiança baseada nas teorias de tratamentos de dados censurados. Toda a teoria apresentada a seguir está descrita por (Souza, 2003).

Para determinação do tempo total de um ensaio censurado pode-se utilizar a seguinte relação:

$$T_a = \sum_{i=1}^k t_i + (N - k).t_{ens} \quad (4.8)$$

onde,

T_a = tempo total operacional das unidades ao longo do ensaio, ou seja, corresponde ao total de tempo das N unidades que iniciaram o ensaio;

t_i = tempo de ocorrência da i -ésima falha

t_{ens} = tempo total de ensaio

N = número de unidades que iniciaram o ensaio.

k = número de falhas observadas no ensaio

A estimativa do tempo médio até a falha é dada pela seguinte relação:

$$\hat{m}_x = \frac{T_a}{k} \quad (4.9)$$

O emprego da relação expressa pela Equação 4.9 permite a definição de uma estimativa pontual para o tempo médio até a falha. Porém, esta estimativa é dependente dos valores amostrais, apresentando, portanto uma variabilidade. Para reduzir as incertezas associadas com esta estimativa pontual, podem-se empregar as estimativas por intervalo.

As estimativas por intervalo envolvem a definição do denominado intervalo de confiança, o qual representa um intervalo numérico de variação de uma estimativa que apresenta uma probabilidade de conter o valor real do parâmetro para o qual se está executando a estimação.

A definição do intervalo de confiança para um parâmetro é dependente da distribuição probabilística dos estimadores, que são consideradas variáveis aleatórias.

Especificamente para o caso da distribuição exponencial o intervalo de confiança da média da população ou *MTTF* é dado pela relação:

$$P \left(\frac{2.T_a}{\chi^2_{\left(\frac{\alpha}{2}\right), (2k+2)}} \leq m_x \leq \frac{2.T_a}{\chi^2_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right), (2k)}} \right) = 1 - \alpha \quad (4.10)$$

Onde $1 - \alpha$ indica o grau de confiança do intervalo. A Equação 4.10 pode ser interpretada da seguinte forma: “há uma probabilidade de $1 - \alpha$ do parâmetro média

da população estar contido no intervalo limitado pelos seguintes limites

$$\left(\frac{2.T_a}{\chi^2_{\left(\frac{\alpha}{2}\right), (2k+2)}}; \frac{2.T_a}{\chi^2_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right), (2k)}} \right).$$

A teoria apresentada não contempla caso onde todos os dados são censurados, ou seja, nenhuma falha foi observada. Assim é necessária uma metodologia para tratar os dados do ensaio 3, onde todas as centrais continuavam operando ao final do ensaio. Assim quando o ensaio for interrompido sem que nenhuma unidade apresente falha o intervalo de confiança superior para a taxa de falha, λ pode ser obtido por:

$$(1-\alpha)100\% \text{ intervalo de confiança superior para } \lambda: \frac{\chi^2_{2,\alpha}}{2nt} \quad (4.11)$$

Onde n é o número de unidades ensaiadas e t é o tempo de ensaio para cada unidade.

Para os ensaios 1 e 4 pode-se determinar os intervalos de confiança através da metodologia apresentada por Souza (2003). Considera-se assim os seguintes parâmetros da Equação 4.8, para o ensaio 1.

$$t_1 = 450 \text{ horas}$$

$$k = 1$$

$$t_{\text{ens}} = 606 \text{ horas}$$

$$\text{Assim } T_a = 450 + 4 \cdot 606 = 2874 \text{ horas.}$$

A estimativa do tempo médio até a falha é dada pela seguinte relação:

$$\hat{m}_x = \frac{T_a}{k} = \frac{2874}{1} = 2874 \text{ horas}$$

Este valor de tempo médio até a falha é o mesmo valor encontrado através do software Weibull 6,0 apresentado na Tabela 4.12. Isto comprova a consistência das análises.

Para determinação do intervalo de confiança utilizou-se um grau de confiança de 90%, ou seja, $1 - \alpha = 0,9$. Assim substituindo na Equação 4.10 os resultados encontrados tem-se o seguinte intervalo de confiança para o primeiro ensaio: (606; 56031) horas. Isto significa que com 90% de confiança pode-se garantir que o tempo médio até a falha se encontra entre 605,83 horas e 56031,04 horas. Nota-se que esse intervalo é muito amplo, isso se deve ao fato de que foi observada apenas uma falha e o número de centrais ensaiadas é pequeno para definição um intervalo mais estreito. Se os mesmo método for aplicado para se obter uma confiança de 95% obtém-se o seguinte intervalo de confiança: (516; 113517) horas.

O mesmo método pode ser empregado para o ensaio 4. Isto é feito considerando os seguintes parâmetros.

$$t_1 = 63 \text{ horas}$$

$$t_2 = 240 \text{ horas}$$

$$t_3 = 510 \text{ horas}$$

$$k = 3$$

$$t_{ens} = 510 \text{ horas}$$

Desta forma, encontra-se um valor para $T_a = 2853$ horas e um tempo médio até a falha de 951 horas que também se aproxima bastante do valor encontrado através do software Weibull 6,0 que foi de 850 horas.

O intervalo de confiança para este caso considerando uma confiança de 90 % é (368; 3489) horas. Porém se ao considerar-se uma confiança de 95% obtém-se um intervalo de (325; 4612) horas. Estes intervalos de confiança são bem mais estreitos que para o ensaio 1, que apresenta um número de falhas muito inferior ao número de falhas apresentado pelo ensaio 4.

A Figura 4.8 expressa o comportamento do *MTTF* em função da temperatura de acordo com os dados dos ensaio 1 e 4 e seus correspondentes intervalos de confiança utilizando uma extrapolação exponencial como propõe a Lei de Peck-Ahrrenius.

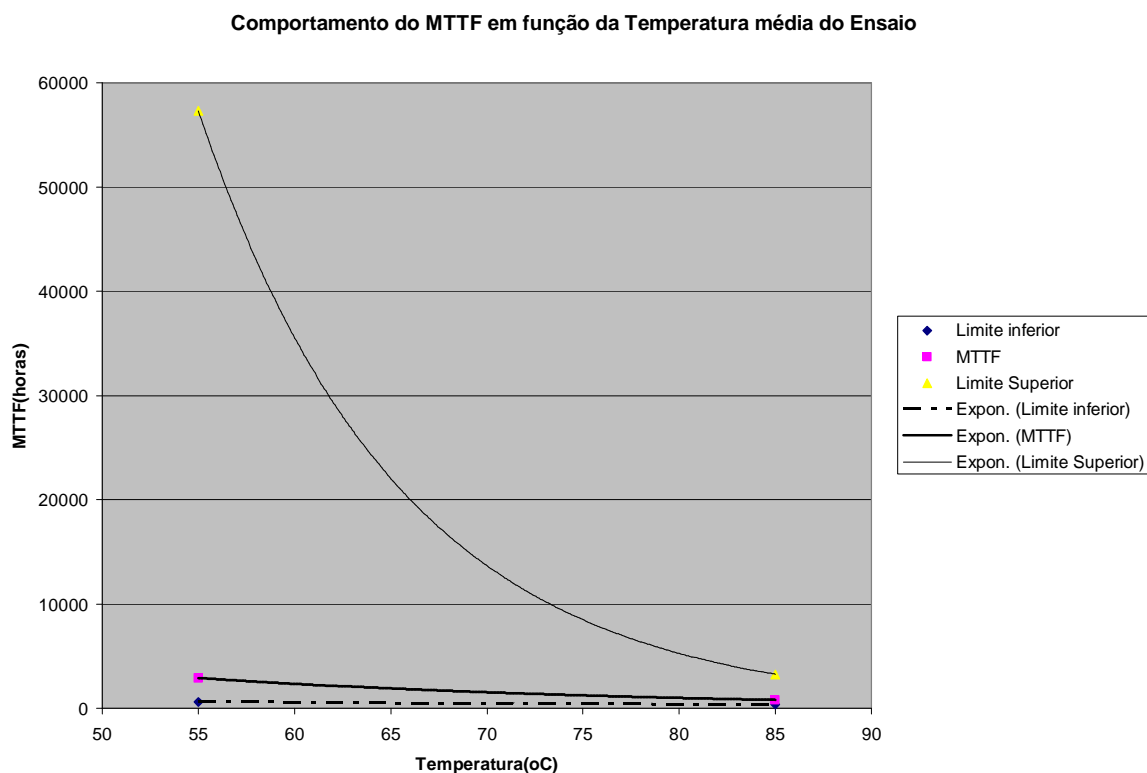


Figura 4.8 - Comportamento do *MTTF* com Intervalo de Confiança de 90%.

Para o ensaio 3 pode-se determinar os intervalos de confiança através da metodologia apresentada na Equação 4.11. Considerado-se assim os seguintes parâmetros.

$$n = 5 \text{ unidades}$$

$$t = 640 \text{ horas}$$

Assim aplicando a Equação 4.11, tem-se que para $\alpha = 10\%$: 90% intervalo de confiança superior para λ :

$$\frac{\chi^2_{2,\alpha}}{2nt} = \frac{\chi^2_{2,0,1}}{2.5.640} = \frac{4,605}{6400} = 7,20.10^{-4} \text{ falhas / hora}$$

Assim pode-se determinar o limite inferior para o *MTTF* do ensaio 3 invertendo o valor para taxa de falha. O obtém-se então um *MTTF* de 1390 horas como o limite inferior do intervalo de confiança para o ensaio 3 considerando uma confiança de 90%. Não há um modelo para predição do limite superior do intervalo de confiança para este tipo de ensaio. Portanto pode-se afirmar que com 90 % de confiança o *MTTF* para o ensaio 3 é superior a 1390 horas. Lembrando que o *MTTF* médio deste ensaio foi de 4617 horas.

Verifica-se então que apesar dos ensaios censurados que não apresentaram nenhuma falha fornecerem uma estimativa para confiabilidade eles apresentam um intervalo de confiança muito largo e limitado.

4.6.2.4. Cálculo do *MTTF* nas Condições Normais de Operação a partir da US MIL-HDBK-217 F

No item 4.1.6 foi discutido a análise de confiabilidade a partir da norma US MIL-HDBK-217 F (1991) a partir da qual foi obtido um *MTTF* de 39239,02 horas, como indicado no APÊNDICE I. Lembrando que estes cálculos foram obtidos apenas para os circuitos que estão sendo solicitados durante os ensaios executados. Estes circuitos são o circuito Tronco, quatro placas ramais, o circuito de comutação da matriz, circuito de *ring*, fonte de 12 V e fonte de 5V.

Estima-se o valor de n através do *MTTF* obtido por norma. Aplicando-se a Equação 3.1 pode-se considerar os seguintes parâmetros:

$$MTTF_{\text{CONDIÇÃO DE USO}} = 40000 \text{ horas}$$

$$MTTF_{\text{ACELERADA}} = 850 \text{ horas (ensaio 4)}$$

$$FA = \frac{40000}{850}$$

O valor de *MTTF* na condição acelerado foi escolhido baseado no ensaio 4 devido ao maior número de falhas apresentado por este ensaio.

Obtém-se então um valor para o fator de aceleração de 46.

Para avaliar o valor de *n* deve-se utilizar a Equação 3.1 com os seguintes parâmetros:

$$HR_{usual} = 50\% \text{ (Estimativa da média de umidade relativa)}$$

$$HR_{teste} = 85\%$$

$$n = ?$$

$$E_a = 0,43$$

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$T_{usual} = 20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}$$

$$T_{teste} = 80^\circ\text{C} = 353,15 \text{ K}$$

Tem-se, então:

$$FA = \left(\frac{50\%}{85\%} \right)^{-n} \exp \left[\frac{0,43}{8.62 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{293,15} - \frac{1}{353,15} \right) \right] = 46$$

Obtém-se então um valor de *n* de 1,77 que é mais coerente com os dados de literatura.

Vale destacar que as condições ambientais para estimar o *MTTF* pela MIL-HDBK-217 F (1991) são as mesmas usadas para estimar a confiabilidade através dos ensaios. Porém, a norma militar US MIL-HDBK-217 F (1991) não leva em consideração a umidade.

Também pode-se fazer uma comparação entre o *MTTF* encontrado por norma e o *MTTF* dado pela Lei de Peck-Ahrrenius desconsiderando o fator referente à

umidade, já que a norma não leva em consideração a influência da umidade. Assim a Equação 3.5 fica reduzida a Equação 4.12.

$$FA = \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_{usual}} - \frac{1}{T_{teste}}\right)\right] \quad (4.12)$$

Assim como foi adotado para os cálculos através da norma uma temperatura ambiente de 20°C pode-se utilizar essa temperatura para a condição normal de operação. Utilizando os dados referentes ao ensaio 4, pode-se calcular o fator de aceleração nessas condições utilizando a equação 4.12.

Dados:

$$E_a = 0,43$$

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$T_{usual} = 20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}$$

$$T_{teste} = 85^\circ\text{C} = 358,15 \text{ K}$$

$$FA = \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_{usual}} - \frac{1}{T_{teste}}\right)\right]$$

Tem-se então um fator de aceleração igual a 18.

Utilizando então a Equação 4.18 para estimar a vida nas condições usuais, tem-se:

$$MTTF_{\text{CONDIÇÃO DE USO}} = ?$$

$$MTTF_{\text{ACELERADA}} = 850 \text{ horas (ensaio 4)}$$

$$FA = 18$$

$$FA = \frac{MTTF_{\text{CONDIÇÃO DE USO}}}{850} = 18$$

Tem-se então um $MTTF$ para as condições normais de operação de 15310 horas, que é bem inferior ao valor encontrado por norma. Este fato comprova a importância do fator umidade na análise dos dados.

Para a avaliação do parâmetro n foi estabelecida uma condição de temperatura igual a 20°C e uma umidade relativa de 50% , porém estes valores podem ser variados dependendo da região onde a central está operando. Desta forma os gráficos das Figuras 4.8 e 4.9 mostram como varia o $MTTF$ nas condições normais de operação para valores n respectivamente iguais a 2,5 e 3 na Equação 3.5.

$$MTTF_{real} = 850 \cdot \left(\frac{HR_{real}}{85\%} \right)^{-n} \exp \left[\frac{0,43}{8.62 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{real} + 273,15} - \frac{1}{353,15} \right) \right] \quad (4.13)$$

Como não foi possível se encontrar um valor confiável de n através dos ensaios, pois estes não foram executados até por tempo suficiente para obtenção de mais tempos de falha e devido à limitação do número de centrais ensaiadas, emprega-se o valor encontrado por Peck; Hallberg (1991), $n = 3$. Para $HR_{usual} = 50\%$ (Estimativa da média de umidade relativa) e $T_{usual} = 20^{\circ}\text{C} = 293,15 \text{ K}$ obtém-se um $MTTF$ igual a 63.675 horas de operação contínua.

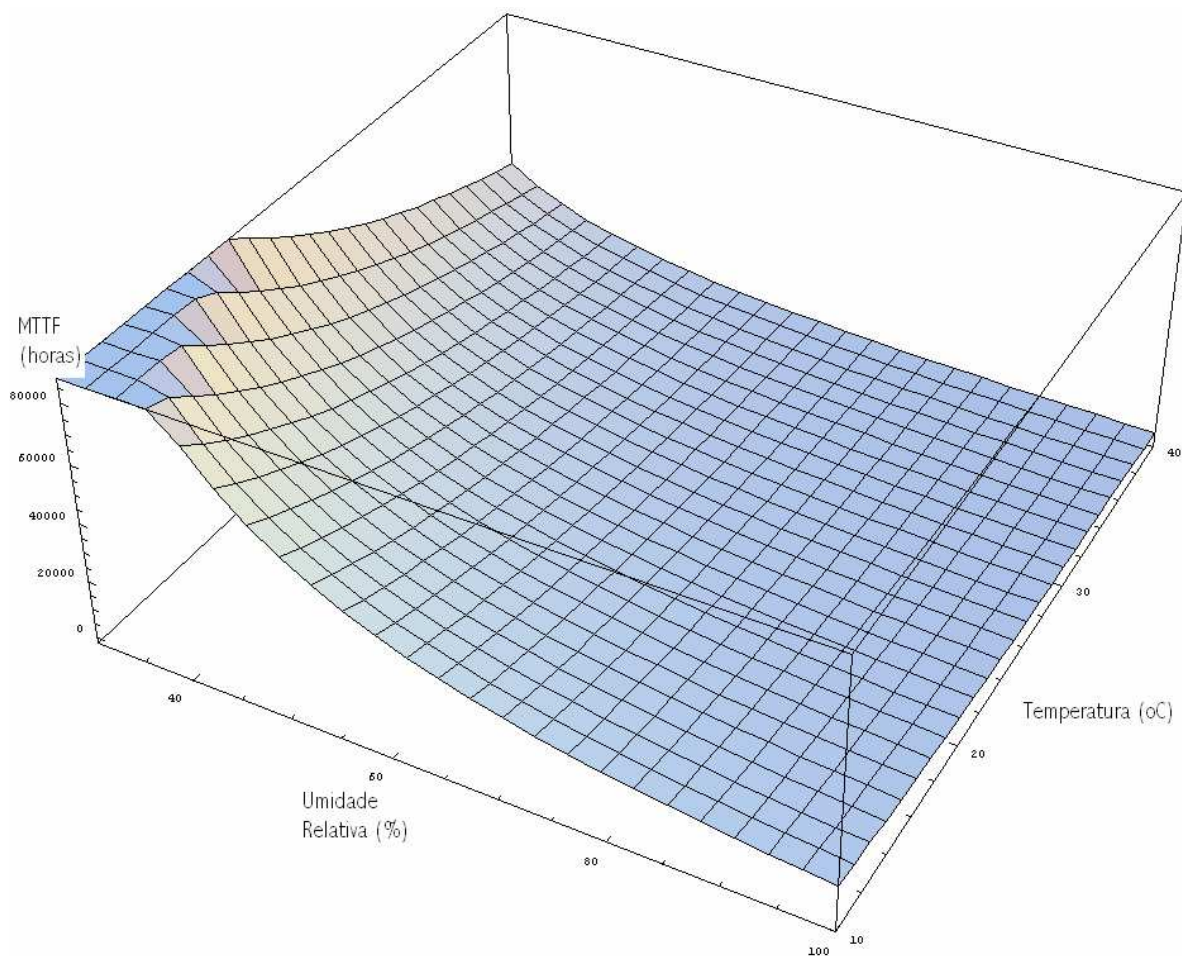


Figura 4.9 - MTTF nas Condições Normais de Operação em Função da Temperatura Usual e a Umidade Relativa Usual, para $n = 2,5$.

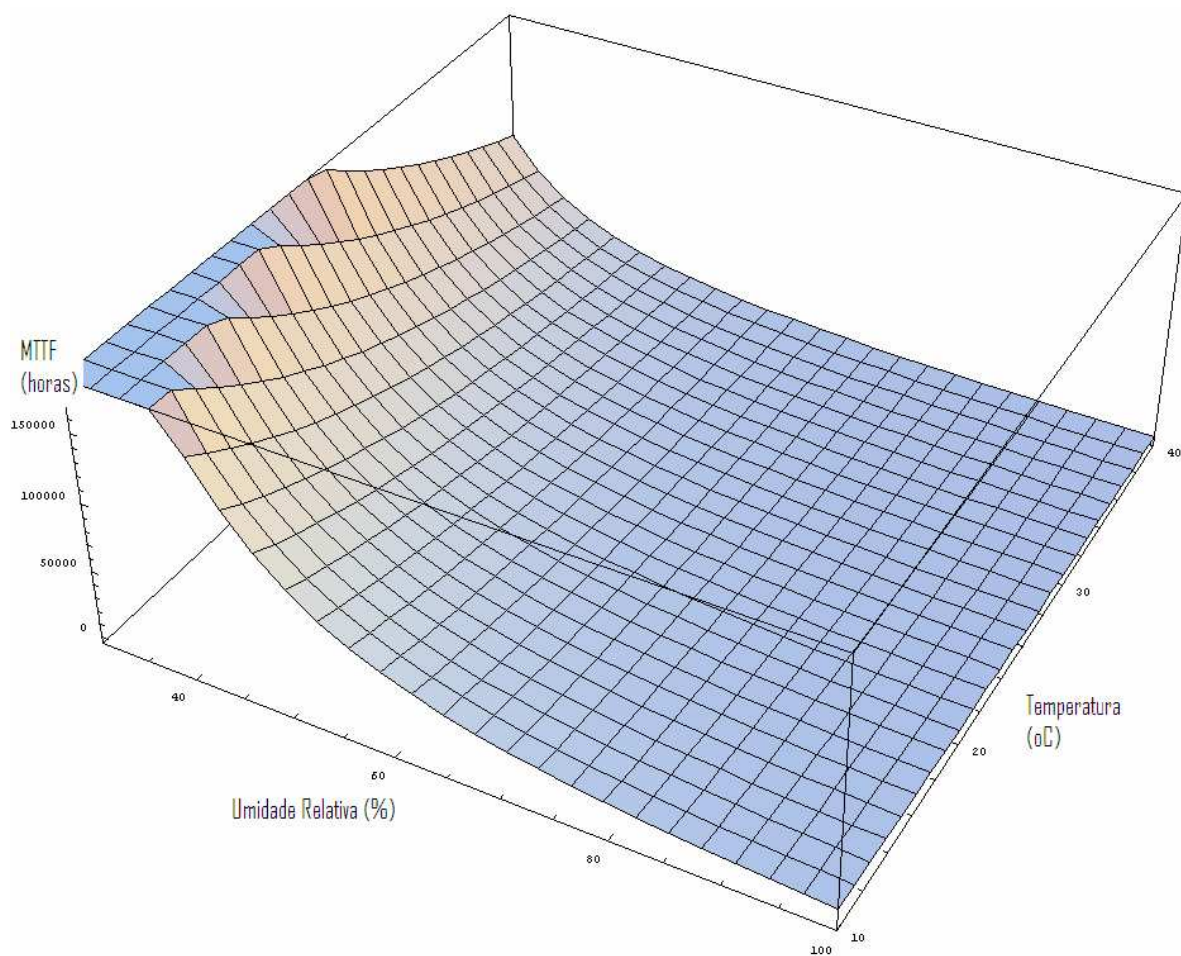


Figura 4.10 - *MTTF* nas Condições Normais de Operação em Função da Temperatura Usual e a Umidade Relativa Usual, para $n = 3$.

CAPITULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Considerações Finais

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo definir um procedimento de ensaios para a avaliação da confiabilidade de equipamentos eletrônicos complexos, sendo usado como caso exemplo o estudo uma central telefônica analógica.

O procedimento de ensaio aqui desenvolvido foi baseado na aplicação das técnicas de ensaios acelerados as quais tem como objetivo reduzir o tempo de execução de experimentos destinados à avaliação da confiabilidade de componentes ou sistemas. Tal técnica de ensaio baseia-se na exposição do sistema a condições de ensaios mais severas que as encontradas em sua condição normal de uso, de forma a reduzir o intervalo de tempo necessário para a ocorrência de uma falha.

Embora o conceito desta técnica seja bastante simples, a sua aplicação é complexa, pois a determinação das condições ambientais para execução do ensaio acelerado exige um conhecimento prévio sobre os possíveis modos de falha dos componentes ou sistema sob análise bem como quais as variáveis físicas, que representam as condições de uso dos mesmos, que podem ter sua magnitude aumentada para reduzir o tempo de ocorrência de uma falha específica. Estas definições têm como meta não alterar os modos de falha observados nos ensaios acelerados em relação aos verificados nas condições normais de uso do produto, fato que invalidaria qualquer conclusão obtida nos ensaios.

Adicionalmente, a execução deste tipo de ensaio exige a determinação de um princípio de extrapolação dos resultados obtidos nas condições aceleradas para as condições normais de uso, ou seja, uma forma de definir a confiabilidade na condição normal de uso a partir da estimativa de confiabilidade obtida experimentalmente. Este princípio deve ser baseado no efeito das variáveis aceleradas sobre o mecanismo de falha do componente ou sistema estudado.

Especificamente no projeto de pesquisa aqui desenvolvido, definiu-se, a partir da análise de diversas referências bibliográficas associadas com a avaliação de confiabilidade de componentes eletrônicos, que a umidade relativa e a temperatura são duas variáveis que têm grande influência sobre o tempo necessário para observar-se a ocorrência de uma falha nos mesmos.

Adicionalmente definiu-se um procedimento experimental para execução de ensaios acelerados com equipamentos eletrônicos empregando-se as variáveis acima citada como fatores de aceleração da ocorrência da falha. Este procedimento baseia-se no emprego de uma câmara climática capaz de controlar a temperatura e a umidade relativa, porém sem altas taxas de variação dessas grandezas. Para a temperatura a taxa máxima de variação da mesma é de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ que não é uma variação recomendada para ciclos térmicos de acordo com a norma US MIL-HDBK-338 (1998).

Este procedimento foi aplicado na avaliação da confiabilidade de uma central telefônica analógica. As estimativas de confiabilidade obtidas experimentalmente foram comparadas com as obtidas através da análise através da norma militar US MIL-HDBK-217 F (1991), possibilitando a comparação com os resultados obtidos através do procedimento experimental proposto.

Ao longo do desenvolvimento desta pesquisa verificou-se que a confiabilidade de sistemas eletrônicos complexos é dependente não só da confiabilidade dos componentes do mesmo, tais como capacitores, resistores, circuitos impressos, entre outros, cujos valores podem ser determinados a partir de informações constantes em catálogos dos fabricantes, mas também é bastante dependente da confiabilidade do processo de manufatura do mesmo, usualmente envolvendo o processo de inserção e soldagem dos componentes em uma placa de circuito impresso.

A falha do processo de manufatura pode reduzir a confiabilidade de um sistema eletrônico muito bem projetado e baseado no emprego de componentes de altíssima confiabilidade.

Um outro fator de grande influência sobre a confiabilidade de um sistema eletrônico é o seu próprio projeto, onde se define a utilização de sistemas

redundantes e sistemas de proteção que tenham por objetivo minimizar a possibilidade do sistema deixar de executar a função para o qual foi projetado.

5.2. Conclusões Finais

As principais conclusões obtidas com a execução deste trabalho de pesquisa foram:

- i) Os ensaios acelerados indicaram que os mecanismos físicos de degradação dos componentes desta central são muito influenciados pela combinação de efeitos ambientais onde se verifica magnitude de temperatura e umidade relativa elevadas;
- ii) A execução de ensaios acelerados com elevada temperatura, igual ou superior a 80°C, e umidade relativa elevada, da ordem de 85%, são os mais efetivos, entre os estudados, para precipitar a ocorrência de falhas na central telefônica. Sugere-se que esse tipo de ensaio seja utilizado para sistema eletrônicos complexos.
- iii) A fim de acelerar a ocorrência de falhas nos componentes da central bem como precipitar a ocorrência de falhas associadas ao processo de manufatura, principalmente a falta de resistência mecânica das soldas entre os componentes e a placa mãe, sugere-se a execução de ensaios onde a central é submetida a ciclos de temperatura, com magnitude máxima de 85°C e magnitude mínima de 15°C, mantida a umidade relativa igual a 85%. Este tipo de ensaio é recomendado por normas *Military Standard* e IEC, embora as magnitudes extremas de temperatura e valor recomendado para umidade variem entre as normas. Os valores recomendados para a duração do ciclo de temperatura devem ser definidos para cada tipo de sistema eletrônico ensaiado.
- iv) Os ensaios recomendados nos itens ii e iii possuem o mesmo valor de umidade relativa, porém a temperatura média do ensaio com variação

cíclica de temperatura é cerca de 55°C , inferior ao valor constante de magnitude 80°C empregado no ensaio descrito em iii. Esta diferença de temperatura faz com que o tempo para a ocorrência de uma falha de um componente no ensaio descrito em ii possa ser superior ao observado quando da execução do ensaio descrito em iii, pois se sabe que o tempo para a ocorrência de uma falha decresce exponencialmente com a magnitude da temperatura. Entretanto ambos os ensaios aceleram as falhas que são dependentes de temperatura, típicas de componentes eletrônicos, porém com fatores de aceleração distintos, afetando a duração do ensaio. O ensaio com variação cíclica de temperatura é recomendado para as fases de desenvolvimento do produto, pois pode detectar falhas nas conexões soldadas, através da indução do mecanismo de falha por fadiga térmica.

- v) A principal falha observada ao longo dos ensaios foi a ocorrência de corrosão na conexão soldada de componentes à placa mãe. Desta forma recomenda-se uma futura investigação das causas desta corrosão para que o processo de fabricação ou o projeto do circuito seja alterado e desta forma falhas como esta sejam evitadas em campo.
- vi) A umidade é um fator de vital importância para acelerar os mecanismos de falha de componentes eletrônicos. Tal fato ficou evidenciado pelos resultados dos ensaios com as centrais telefônicas, nos quais foi mantida uma temperatura elevada, 80°C , com umidade relativa igual ou inferior a 70%, não se observando qualquer falha da central após 640 horas de ensaio;
- vii) Considerando as condições de ensaio apresentadas no item i obteve-se um tempo médio até a falha para a central em estudo igual a 850 horas. Considerando as condições de ensaio apresentadas em iii este tempo médio foi aumentado para 2874 horas.
- viii) A extrapolação dos resultados obtidos nos ensaios acelerados para as condições normais de uso deve ser executada com o emprego da Lei de Peck-Ahrrenius, abaixo descrita, que permite contabilizar o efeito da

temperatura e da umidade sobre o tempo médio até a falha nas condições normais de uso:

$$FA = \left(\frac{HR_{usual}}{HR_{teste}} \right)^{-n} \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{usual}} - \frac{1}{T_{acelerada}} \right) \right]$$

- ix) Considerando a bateria de ensaios realizados com a central em estudo pode-se claramente definir o efeito da temperatura sobre a aceleração do mecanismo de falha. Através dos dados fornecidos pelos ensaios não foi possível a calibração do fator n . Entretanto, de acordo com dados de literatura, este valor é da ordem de 3. Nesta dissertação considerar-se o mesmo variando entre 2,5 e 3, permitindo o cálculo de valores limites superior e inferior para o fator de aceleração associado com uma dada condição de ensaio, expressa pelas magnitudes da temperatura e da umidade relativa;
- x) A câmara disponível para o ensaio, apesar de apresentar uma boa resposta para ensaios com temperatura e umidade constante, oferece limitações para a realização dos ensaios com ciclos de temperatura propostos pela MIL-HDBK-338(1986) que recomenda uma taxa de crescimento e decrescimento da temperatura de 5°C por minuto. A câmara disponível fornece uma taxa de variação da temperatura de no máximo 2°C/min.
- xi) Finalmente deve-se ressaltar que o tempo médio até a falha é um valor indicativo da confiabilidade de sistemas eletrônicos. Considerando-se que a confiabilidade dos mesmos é modelada por um distribuição exponencial, tem-se que existe uma probabilidade de 63% de um sistema apresentar falha em um período de uso inferior ao tempo médio até a falha. Isto significa que do total de sistema eletrônicos, no caso de centrais telefônica cerca de 63% das unidades falharão em um período de uso inferior ao tempo médio até a falha.

5.3.Considerações para Trabalhos Futuros

Considerando as conclusões anteriores e visando melhorar o processo de análise de confiabilidade de sistemas eletrônicos complexos, sugere-se a implementação das seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- i) A fim de comparar e validar o método aqui apresentado sugere-se a execução de uma análise de confiabilidade com dados de campo do produto em estudo. Para tal é fundamental analisar os dados de garantia do fabricante da central e analisar esses dados considerando a censura dos dados de equipamentos que não falharam no período de garantia. Dessa forma deve se conhecer com precisão o número de equipamentos fabricados, os tempos até a falha e o número de equipamentos que falharam.
- ii) A fim de produzir uma análise qualitativa que subsidie a análise de falhas remenda-se a execução da análise de modos e efeitos de falhas (FMEA). Esta ferramenta exige uma divisão do sistema em subsistemas e componentes e caracteriza os modos e mecanismos de falhas desses componentes, evidenciando suas causas e classificando a severidade dessas falhas perante a operacionalidade do sistema como um todo. Previamente à execução do FMEA deve ser construída uma árvore funcional para auxiliar na divisão do sistema em subsistemas e componentes.
- iii) Avaliação da confiabilidade do processo de manufatura das centrais telefônicas, principalmente os processos de inserção e soldagem dos componentes na placa mãe, incluindo avaliação da política de manutenção das máquinas e fornos de soldagem, a fim de evitar a ocorrência de falha envolvendo a corrosão dos componentes das centrais telefônicas. Estas falhas podem ocorrer no campo, principalmente em localidades onde se observa umidade relativa e temperaturas elevadas, tal como na região norte do Brasil;

- iv) Com relação aos ensaios, sugere-se a execução do procedimento descrito nesse trabalho como outras condições ambientais de temperatura e umidade de forma a comparar e refinar os resultados encontrados nesse trabalho.
- v) Além das variáveis analisadas no presente estudo, poderiam ser avaliadas outras condições ambientais, por exemplo, a vibração. Este estudo poderia ser feito para outro tipo de equipamento complexo, como é o caso de um rádio instalado em um avião.
- vi) Um ensaio utilizando uma câmara climática que permita a realização de ciclos térmicos com uma taxa de variação de temperatura de 5°C/min, recomendada pela norma MIL-HDBK-338(1998), verificando a influência desta taxa sobre os mecanismos de falha da central.
- vii) Todos os métodos aqui apresentados e as sugestões apresentadas até aqui não se restringem a aplicação em centrais telefônicas, desta forma recomenda-se à aplicação das metodologias propostas nesta pesquisa para outros equipamentos eletrônicos complexos, por exemplos, aparelhos de rádio, de televisão, *dvd players*, telefones sem fio, entre outros.

CAPITULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR-5462, Confiabilidade e Manutenibilidade, Normas Técnicas Brasileiras – NBR, 1994.

BOJTA, P.; NÉMETH, P.; HARSÁNYI, G. **Searching for appropriate humidity accelerated migration reliability tests methods**. Microelectronics Reliability, vol 42 2002.

CROWE, D. & FEINBERG A. **Design for reliability**, CRC Press, Washington, D.C., 2000.

DENSON W. **The History of Reliability Prediction**, IEEE Transaction on Reliability, Vol 47, 321 – 328, 1998.

DEPARTMENT OF DEFENSE US MIL-HDBK-19500/620D. **Performance specification semiconductor device, hermetic, diode, silicon, rectifier, schottky barrier, types 1N5822 and 1N5822US JAN, JANTX, JANTXV, JANJ, JANS, JANHC, and JANKC**. [S.l.] , 2001.

DEPARTMENT OF DEFENSE US MIL-HDBK-217 F: **Reliability Prediction for Electronic Systems**. USAF Rome, [S.l.], 1991.

DEPARTMENT OF DEFENSE US MIL-HDBK-338: **Electronic Reliability Design Handbook**. Available from the National Technical Information Service, Springfield, Virginia, 1998.

DEPARTMENT OF DEFENSE US MIL-HDBK-344A: **Environmental Stress Screening (ESS) of Electronic Equipment**, [S.l.], 1986.

DEPARTMENT OF DEFENSE US MIL-HDBK-721C: **Definition of Terms for Reliability and Maintainability - Revision C**, [S.l.], 1981.

DEPARTMENT OF DEFENSE US MIL-HDBK-781 A: **Handbook for Reliability Test Methods, Plans, and Environments for Engineering, Development, Qualification, and Production - Revision A**, [S.l.], 1996.

DEPARTMENT OF DEFENSE US MIL-HDBK-810E: **Environmental Test Methods and Engineering Guidelines - Revision E**, [S.l.], 1983.

DEPARTMENT OF DEFENSE US MIL-HDBK-2164: **Environmental Stress Screening Process for Electronic Equipment**, [S.l.], 1985.

EBEL, G.H. **Reliability Physics in Electronic: A Historical View**. IEEE Transaction on Reliability, Vol 47, 379 – 389, [S.l.], 1998.

EDEC JESD22-A101 - **Temperature and Humidity Bias (THB) Test**, Joint Electron Device Engineering Council (JEDEC), [S.l.], 1997.

EVAN R. **Electronic Reliability: A Personal View**, IEEE Transaction on Reliability, Vol 47, 329 – 332., [S.l.], 1998.

IEC-60068-2-38 – **Basic Environmental Testing Procedures Part 2 – Composite Temperature/Humidity Cyclic Test**, International Electrotechnical Commission, [S.l.], 1975.

IRESON, G.; CLYDE F. COOMBS; JR., RICHARD Y. MOSS. **Handbook of reliability engineering and management**, 2º edição, McGraw- Hill Companies, Estados Unidos, 1995.

JENSEN, F. **Electronic Component Reliability: Fundamentals, Modeling, Evaluation and Assurance**, John Wiley & Sons, Inc., 1995

KECECIOGLU, D., SUN, F. **Environmental Stress Screening : Its Quantification, Optimization and Management**, Prentice Hall, 1995.

KIELPINSKI, T. J. & NELSON, W., **Optimum censored accelerated life tests for normal and lognormal life distributions**, IEEE Transaction on Reliability, vol. 24, 1975.

LAFRAIA, J.R.B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Editora. Qualitymark, Petrobrás, Rio de Janeiro, 2001.

LEITCH, R. **Reliability Analysis for Engineering**. Oxford Press, New York, 1995.

MEEKER, W. Q. & NELSON, W. **Optimum accelerated life tests for Weibull and extreme value distribution and censored data**, IEEE Transaction on Reliability, vol 24, 1975.

MEEKER, W. Q. & ESCOBAR L. A. **Pitfalls of Accelerated Testing**, IEEE Transaction on Reliability, vol. 47, 1998.

MEEKER, W. Q. JR. & ESCOBAR, L. A., **Statistical Methods for Reliability Data**, Wiley, New York, 1999.

MOURA. E. C. **A Method to Estimate the Acceleration Factor for Subassemblies**. IEEE Transactions on Reliability, Vol 41, N°3, 1992.

NELSON, W. **Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, Data Analyses**. Wiley, New York, 1990.

NELSON, W. **A Bibliography of Accelerated Test Plans**, IEEE Transaction on Reliability, Vol 54, N° 2, 2005.

O'CONNOR, P. D. T. **Practical Reliability Engineering**. 4^a ed., John Wiley & Sons, Suffolk, 2002.

PECK, D.S. & HALLBERG, O. **Recent Humidity Accelerations, a Base for Testing Standards**, Quality and Reliability Engineering International, vol. 7, 169-180, 1991.

PERROW, C. **Normal Accidents: Living with High Risk Technologies**, Princeton University Press, 1999.

RELIASOFT CORPORATION. **User's Guide ReliaSoft's Weibull++ Version 6**, [S.l.], 1997

SALMELA, O. **The effect of introducing-reliability-risk electronic components into 3rd generation telecommunications systems**, Reliability Engineering and System Safety, Vol 89, 2005.

SETTUR, S.;KUMAR A.K.M. E LAKSHMI Y.V.S. **Evolution of Component-Qualification Methods for Local Component-Manufactures for Telecom Applications**, IEEE Transaction on Reliability, vol 47, 1998.

SOUZA, G. F. M. **Análise de Confiabilidade Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos**, Apostila do curso, São Paulo, Brasil, 2003.

YANG, Z. & RAAFAT, H. **A Statistical for Obtaining the Factor in Electronic-Component Reliability-Prediction Models**. IEEE Transaction on Reliability, vol 41, 1992.

APÊNDICE I - Cálculo da Taxa de Falha através da US MIL-HDBK-217 F.

Foram aplicados os métodos de estimação de confiabilidade descritos no pela norma US MIL-HDBK-217 F (1991) para avaliar a confiabilidade para o conjunto de comutação e de alimentação da central que foram os principais circuitos solicitados durante os ensaios executados.

Esta análise também tem como objetivo validar os cálculos da confiabilidade feitos pela análise dos dados da garantia e dos dados obtidos pelos ensaios já realizados.

Foram avaliados os circuitos Ramal, Tronco, de Comutação, de Ring, Fonte 12 V e Fonte 5V.

O objetivo desta análise é fazer uma comparação entre os resultados dos ensaios e estas estimativas.

A Tabela A.1 apresenta os resultados de taxas de falha obtidos para cada um dos circuitos estudados, assim como os seus respectivos *MTTFs*.

Tabela A.1 - Taxas de Falhas dos Circuitos Estudados segundo a US MIL-HDBK 217 F

Circuito	Quantidade na Central	Taxa de falha de cada circuito (falhas/10⁶ horas)	MTTF (horas)
Ramal	2	0,98156	1018783,26
Matriz de Comutação	1	3,3627	297380,08
Tronco	1	14,2358	70245,37
Circuito de Ring	1	1,6492	606332,53
Fonte 5 V	1	1,4658	682193,39
Fonte de 12 V	1	2,8081	356112,67

Para a obtenção de cada uma das taxas de falhas citadas na Tabela A.1 foi assumida que as falhas do circuito são organizadas em série, ou seja, a falha de qualquer componente que compõe o circuito causa a falha de todo o circuito. Os cálculos da confiabilidade apresentados foram executados considerando a temperatura ambiente de 20°C. Outro fator importante avaliado pela norma é o nível de vibração que o equipamento está sujeito. Para a central, este nível de vibração é categorizado como sendo de instalação fixa no solo, ou seja, não está sujeita a vibração durante a operação. A norma considerada não leva em conta a avaliação da taxa de falha em função da umidade a qual o equipamento está sujeito.

Desta forma, como são assumidas distribuições exponenciais, a taxa de falha do circuito será dada pela soma das taxas de falha de cada um dos circuitos. Assim, a taxa de falha resultante do circuito estudado é dada pela soma das taxas de falhas de cada um dos circuitos estudados separadamente, levando-se em conta que foram estudados dois circuitos ramais. Portanto, a taxa de falha de todos os circuitos

estudados é $\lambda_{final} = 25,4848$ falhas/ 10^6 horas. Com isso, pode-se calcular um tempo médio até a falha, que no caso da distribuição exponencial pode ser obtido através do inverso da taxa de falha. Assim, obtém-se um tempo médio até a falha de 39239,02 horas.

Os cálculos feitos para a obtenção desses valores encontram-se descritos a seguir:

Conjunto Matriz de Comutação

Matriz de Comutação

$$\lambda_P = \lambda_{BD} \pi_{MFG} \pi_T \pi_{CD} + \lambda_{BP} \pi_E \pi_Q \pi_{PT} + \lambda_{EOS} \quad \text{falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_{BD} : \text{Taxa de falha da matriz} \Rightarrow 0,16$$

$$\pi_{MFG} : \text{Fator de correção do processo de manufatura} \Rightarrow 2,0$$

$$\pi_T : \text{Fator de temperatura} \Rightarrow 0,35$$

$$\pi_{CD} : \text{Fator de correção de complexidade da matriz} \Rightarrow 19$$

$$\lambda_{BP} : \text{Taxa de falha básica do encapsulamento} \Rightarrow 0,0029$$

$$\pi_E : \text{Fator Ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de Qualidade} \Rightarrow 10$$

$$\pi_{PT} : \text{Fator de correlação do tipo de encapsulamento} \Rightarrow 1,0$$

$$\lambda_{EOS} : \text{Taxa de falha por sobrecarga elétrica.} \Rightarrow 0,065$$

$$\lambda_P = 2,25 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Capacitor C1

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \quad \text{falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R1

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Capacitor C2

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\text{Total } \lambda_p = 3,3627 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$MTTF = 297380,081482 \text{ horas}$$

Conjunto Ramais

Resistor R2

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R3

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R4

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R5

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R6

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R7

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R8

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,1$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,02277 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R9

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,1$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,02277 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R10

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R11

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R12

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Transistor T1

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00074$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 8,1$$

$$\pi_R : \text{Fator de Taxa de Potência} \Rightarrow 0,77$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 0,29$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,0080307612 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Transistor T2

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00074$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 8,1$$

$$\pi_R : \text{Fator de Taxa de Potência} \Rightarrow 0,77$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 0,29$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,0080307612 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Transistor T3

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00074$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 8,1$$

$$\pi_R : \text{Fator de Taxa de Potência} \Rightarrow 0,77$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 0,29$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,0080307612 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Transistor T4

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00074$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 8,1$$

$$\pi_R : \text{Fator de Taxa de Potência} \Rightarrow 0,77$$

π_S : Fator de Tensão elétrica $\Rightarrow 0,29$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 0,0080307612$ falhas/ 10^6 horas

Diodo D1

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,0038$

π_T : Fator de Temperatura $\Rightarrow 2,6$

π_S : Fator de Tensão elétrica $\Rightarrow 1,0$

π_C : Fator de Constituição do Contato $\Rightarrow 2,0$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 0,11856$ falhas/ 10^6 horas

Diodo D2

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,0038$

π_T : Fator de Temperatura $\Rightarrow 2,6$

π_S : Fator de Tensão elétrica $\Rightarrow 1,0$

π_C : Fator de Constituição do Contato $\Rightarrow 2,0$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 0,11856$ falhas/ 10^6 horas

Diodo D3

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0038$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,6$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_C : \text{Fator de Constituição do Contato} \Rightarrow 2,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,11856 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Diodo D4

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0038$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,6$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_C : \text{Fator de Constituição do Contato} \Rightarrow 2,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,11856 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Diodo D5

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0038$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,6$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_C : \text{Fator de Constituição do Contato} \Rightarrow 2,0$$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 0,11856$ falhas/ 10^6 horas

Diodo Zener Z1

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,0020$

π_T : Fator de Temperatura $\Rightarrow 2,6$

π_S : Fator de Tensão elétrica $\Rightarrow 1,0$

π_C : Fator de Constituição do Contato $\Rightarrow 2,0$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 0,1248$ falhas/ 10^6 horas

Circuito Tronco

Resistor R13

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R14

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R15

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R16

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R17

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R18

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R19

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R20

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R21

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R22

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R23

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R24

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R25

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,1$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,02277 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R26

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R27

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Resistor R28

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Capacitor C3

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Capacitor C4

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Capacitor C5

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Capacitor C6

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Capacitor C7

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Capacitor C8

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Capacitor C9

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Capacitor C10

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Diodo D6

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0038$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,6$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_C : \text{Fator de Constituição do Contato} \Rightarrow 2,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,11856 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Diodo D7

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0038$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,6$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_C : \text{Fator de Constituição do Contato} \Rightarrow 2,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,11856 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Diodo D8

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0038$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,6$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_C : \text{Fator de Constituição do Contato} \Rightarrow 2,0$$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 0,11856$ falhas/ 10^6 horas

Diodo D9

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,0038$

π_T : Fator de Temperatura $\Rightarrow 2,6$

π_S : Fator de Tensão elétrica $\Rightarrow 1,0$

π_C : Fator de Constituição do Contato $\Rightarrow 2,0$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 0,11856$ falhas/ 10^6 horas

Diodo D10

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,0038$

π_T : Fator de Temperatura $\Rightarrow 2,6$

π_S : Fator de Tensão elétrica $\Rightarrow 1,0$

π_C : Fator de Constituição do Contato $\Rightarrow 2,0$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 0,11856$ falhas/ 10^6 horas

Diodo D11

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,0038$

π_T : Fator de Temperatura $\Rightarrow 2,6$

π_S : Fator de Tensão elétrica $\Rightarrow 1,0$

π_C : Fator de Constituição do Contato $\Rightarrow 2,0$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 0,11856$ falhas/ 10^6 horas

Diodo Emissor óptico LD1

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,0040$

π_T : Fator de Temperatura $\Rightarrow 2,4$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 2,0$

$\lambda_p = 0,0192$ falhas/ 10^6 horas

Transistor T5

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_A \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,00074$

π_T : Fator de Temperatura $\Rightarrow 8,1$

π_A : Fator de Aplicação $\Rightarrow 1,5$

π_R : Fator de Taxa de Potência $\Rightarrow 0,77$

π_S : Fator de Tensão elétrica $\Rightarrow 0,29$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 0,0120461418$ falhas/ 10^6 horas

Transistor T6

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_A \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00074$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 8,1$$

$$\pi_A : \text{Fator de Aplicação} \Rightarrow 1,5$$

$$\pi_R : \text{Fator de Taxa de Potência} \Rightarrow 0,77$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 0,29$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,0120461418 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Transistor T7

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_A \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00074$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 8,1$$

$$\pi_A : \text{Fator de Aplicação} \Rightarrow 1,5$$

$$\pi_R : \text{Fator de Taxa de Potência} \Rightarrow 0,77$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 0,29$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,0120461418 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Transistor T8

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_A \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00074$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 8,1$$

$$\pi_A : \text{Fator de Aplicação} \Rightarrow 1,5$$

π_R : Fator de Taxa de Potência $\Rightarrow 0,77$

π_S : Fator de Tensão elétrica $\Rightarrow 0,29$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 0,0120461418$ falhas/ 10^6 horas

Diodo Zener Z2

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,0020$

π_T : Fator de Temperatura $\Rightarrow 2,6$

π_S : Fator de Tensão elétrica $\Rightarrow 1,0$

π_C : Fator de Constituição do Contato $\Rightarrow 2,0$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 0,1248$ falhas/ 10^6 horas

Diodo Zener Z3

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,0020$

π_T : Fator de Temperatura $\Rightarrow 2,6$

π_S : Fator de Tensão elétrica $\Rightarrow 1,0$

π_C : Fator de Constituição do Contato $\Rightarrow 2,0$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 1,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 0,1248$ falhas/ 10^6 horas

Diodo Zener Z4

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0020$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,6$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_C : \text{Fator de Constituição do Contato} \Rightarrow 2,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,1248 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Diodo Zener Z5

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0020$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,6$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_C : \text{Fator de Constituição do Contato} \Rightarrow 2,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,1248 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Acoplamento óptico CT1

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,017$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,4$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 2,0$

$\lambda_p = 0,0816$ falhas/ 10^6 horas

Transformador TR1

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,075$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 7,5$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 6,0$

$\lambda_p = 3,375$

Relê RL1

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,40$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 4,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 3,0$

$\lambda_p = 4,8$ falhas/ 10^6 horas

Total $\lambda_p = 14,2358$ falhas/ 10^6 horas

$MTTF = 70245,37$ horas

Circuito de Ring

VR1

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{TAPS} \cdot \pi_R \cdot \pi_V \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,019$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_{TAPS} : \text{Fator de Saída do Potenciômetro} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_V : \text{Fator de tensão} \Rightarrow 1,1$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 10$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,418 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

D12

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0038$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,6$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_C : \text{Fator de Constituição do Contato} \Rightarrow 2,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,11856 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

C11

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 2,0$

$\lambda_p = 0,546$ falhas/ 10^6 horas

C12

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,039$

π_R : Fator de Capacitância $\Rightarrow 1,0$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 7,0$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 2,0$

$\lambda_p = 0,546$ falhas/ 10^6 horas

R29

$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ falhas/ 10^6 horas

λ_b : Taxa de falhas básica $\Rightarrow 0,00046$

π_R : Fator de Resistência $\Rightarrow 1,0$

π_Q : Fator de qualidade $\Rightarrow 15$

π_E : Fator ambiental $\Rightarrow 3,0$

$\lambda_p = 0,0207$ falhas/ 10^6 horas

Fonte de 5V

C13

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

C14

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

D13

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0038$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,6$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_C : \text{Fator de Constituição do Contato} \Rightarrow 2,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,11856 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

L1

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0029$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,5$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,1305 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Diodo Zenner Z6

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0020$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,6$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_C : \text{Fator de Constituição do Contato} \Rightarrow 2,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,1248 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Fonte de 12 V

VR2

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{TAPS} \cdot \pi_R \cdot \pi_V \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,019$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_{TAPS} : \text{Fator de Saída do Potenciômetro} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_V : \text{Fator de tensão} \Rightarrow 1,1$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 10$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,418 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

C15

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

C16

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

R29

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

R30

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

C17

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

LD2

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0040$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,4$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,0192 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

R31

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,00046$$

$$\pi_R : \text{Fator de Resistência} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 15$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 3,0$$

$$\lambda_p = 0,0207 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

C18

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,039$$

$$\pi_R : \text{Fator de Capacitância} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 7,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 2,0$$

$$\lambda_p = 0,546 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

Z7

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b : \text{Taxa de falhas básica} \Rightarrow 0,0020$$

$$\pi_T : \text{Fator de Temperatura} \Rightarrow 2,6$$

$$\pi_S : \text{Fator de Tensão elétrica} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_C : \text{Fator de Constituição do Contato} \Rightarrow 2,0$$

$$\pi_Q : \text{Fator de qualidade} \Rightarrow 1,0$$

$$\pi_E : \text{Fator ambiental} \Rightarrow 6,0$$

$$\lambda_p = 0,1248 \text{ falhas/ } 10^6 \text{ horas}$$