

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Centro Tecnológico

**Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial
Departamento de Engenharia Mecânica
Labmetro - Laboratório de Metrologia e Automatização**

**Recomendações para a
Implementação de Ensaios de Estresse
Térmico Voltados à Confiabilidade de
Hardwares Eletrônicos**

por

Luciana Veloso De Luca, Eng.

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Metrologia Científica e Industrial na UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

Florianópolis, 27 de agosto de 2004

RECOMENDAÇÕES PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE ENSAIOS DE ESTRESSE TÉRMICO VOLTADOS À CONFIABILIDADE DE HARDWARES ELETRÔNICOS

LUCIANA VELOSO DE LUCA, ENG.

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de
Mestre em METROLOGIA
e aprovada na sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.
Orientador

Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC

Carlos Amadeu Pallerosi, Dr. Eng.
Universidade de Campinas – UNICAMP

Vicente Machado Neto, Dr. Eng.
Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-PR

Wolfgang Biben, Eng.
Centro de Pesquisa Renato Archer - CenPRA

Agradecimentos

É com a certeza de que a vitória alcançada não é fruto de apenas um esforço individual, mas também de todo apoio recebido ao longo desta caminhada, que eu expresso meus sinceros agradecimentos:

- Aos meus pais, Reni e Maria Elisa, por sempre acreditarem que sou capaz de realizar muito mais do que eu mesma às vezes acho que posso, o que me faz voar mais alto buscando atender esta expectativa, e por confiarem nas escolhas que tenho feito na vida.
- À minha irmã Carina e meu cunhado Sérgio, por estarem sempre ao meu lado, segurando a minha mão e me ajudando a seguir em frente, principalmente nos momentos mais difíceis.
- Ao meu irmão Gabriel, pela amizade e companheirismo, dividindo as preocupações e dificuldades e compartilhando alegrias, fazendo com que a vida se torne mais leve e gostosa de ser vivida.
- Ao meu avô Helvídio de Castro Veloso Filho (*in memoriam*), por ser minha eterna fonte de inspiração e orgulho.
- Aos amigos Janaína, César e Cristiano que estiveram presente em momentos de grande dificuldade, me acolhendo e ajudando a superá-los, e sendo uma grande fonte de energia e força que não me deixou desistir.
- Aos amigos Alex, Ana, Gemaque, Vera, Liliana, Mário, Andréa, Bel, Sutério, Fred, Gui, Cesare e Sônia por me deixarem fazer parte das suas vidas, pelos excelentes momentos vividos e todo o carinho que sempre recebi.
- Ao meu orientador e amigo Gustavo Daniel Donatelli, por toda a confiança depositada e pela amizade dedicada.
- Aos colegas do Labmetro, em especial à turma 2002, pelos momentos alegres e difíceis compartilhados.
- Ao Labmetro e seus colaboradores pela oportunidade e infra-estrutura proporcionada.
- À Rosana pela sua dedicação e profissionalismo.

- À Fundação CERTI e seus representantes, em especial ao professor Carlos Alberto Schneider e ao senhor Günther Pfeiffer, pelo seu apoio em momentos decisivos para a continuidade do projeto de mestrado e desenvolvimento desta dissertação.
- Ao Centro de Pesquisa Renato Archer, em especial aos senhores Wolfgang Biben e Marcos Pimentel, pela oportunidade de aprendizado nesta instituição e pelo apoio dispensado no desenvolvimento deste trabalho.
- Ao senhor Vicente Machado Neto, também colega do Labmetro, por todo conhecimento compartilhado e ajuda dispensada, a qual foi fundamental para a realização deste trabalho.
- A DEUS por toda oportunidade de aprendizado e crescimento que ele me proporciona e por todas as pessoas que ele coloca em minha vida.

*“Em qualquer direção que percorras a alma,
nunca tropeçarás em seus limites”.*

Sócrates

Resumo

A crescente competição mercadológica mundial e o atual cenário da indústria eletrônica no qual os produtos tornam-se cada vez mais complexos e os índices de qualidade e confiabilidade cada vez mais apertados, apontam para uma situação na qual a necessidade da utilização de técnicas que auxiliem na construção da confiabilidade de um produto desde as primeiras fases do seu desenvolvimento seja cada vez maior.

A confiabilidade do produto eletrônico é principalmente afetada pela existência de defeitos que se encontram em um estado latente, os quais, se não removidos, podem se manifestar como falhas infantis durante o uso do produto. Esses defeitos, não são detectáveis pelo uso de inspeções visuais, testes funcionais e outros procedimentos convencionais de garantia da qualidade. Ensaios de estresses ambientais são o veículo pelo qual defeitos latentes são transformados em falhas detectáveis. Eles podem, portanto, ser vistos como uma extensão da garantia da qualidade. A proposta básica desses ensaios é estimular a precipitação de defeitos latentes através da exposição dos produtos a condições ambientais com níveis de estresse acima das condições normais de operação e a partir disto tomar ações para melhorar a confiabilidade do produto. O estresse mais comumente usado com o intuito de precipitar falhas é o térmico, visto que ele é capaz de precipitar uma ampla variedade de falhas.

Dentro deste contexto, o presente trabalho apresenta alguns conceitos básicos da disciplina da confiabilidade, teorias que suportam a aplicabilidade dos ensaios de estresses ambientais e o efeito do estresse térmico no comportamento de falha dos produtos e discute as técnicas de ensaio de estresse ambiental para melhoria da confiabilidade existentes, de forma a evidenciar as suas diferenças e semelhanças, tanto nas definições propriamente ditas como na utilização das mesmas.

Tais conceitos são utilizados para a elaboração de um modelo geral para o planejamento de ensaios de estresses ambientais, dentro do qual são fornecidas recomendações para a implementação dos ensaios de estresse térmico, possibilitando que profissionais que estejam

iniciando nesse tema possam dar um primeiro passo na direção da melhoria da confiabilidade de seus produtos.

Palavras chave: confiabilidade, ensaios acelerados, estresse térmico, produtos eletrônicos, defeitos latentes.

Abstract

The increasingly competition of the world market and the current scenery of electronic industry where de products are becoming much more complex and expectations of quality and reliability levels have grown takes to a situation where the utilization of techniques to build reliability into a product since de early stages of its development are getting more importance.

The reliability of an electronic product is, especially, affected by the presence of defects which reside in a latent way into the product and if not removed will manifest itself as early life failures at some time during product use. These defects, are not detectable by visual inspections, functional tests and others conventional quality assurance procedures. Environmental stress testing is the vehicle by which latent defects are transformed in detectable failures. It can thus be viewed as an extension of the quality assurance. The basic proposal of this kind of testing is to stimulate precipitation of latent defects by exposing products to environmental conditions with higher stress levels than the product would encounter under normal use conditions. One of the most commonly used stresses is the thermal stress. It has the ability of precipitate a wide variety of failures.

In this context, the present work introduce some basic concepts about reliability, the theories which give support to the applicability of the environmental stress testing, the knowledge behind the effect caused by the thermal stress in the products failure behavior and discusses the techniques of environmental stress testing for reliability improvement in order to create evidences about the differences and resemblances between their definitions and utilization mode.

Such concepts are used to develop a general model to the environmental stress testing planning. This model gives some recommendations about de implementation of thermal stress testing. The idea is to give support to professionals which are starting in this topic to break ground toward reliability improvement of their products.

Keywords: reliability, accelerated testing, thermal stress, electronic product, latent defect.

Sumário

Aprovação

Resumo

Abstract

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Abreviaturas

Lista de Símbolos

Capítulo 1

Aplicação de Estresses Ambientais no Âmbito da Melhoria da Confiabilidade de Produtos Eletrônicos.....	18
1.1 Noções sobre Confiabilidade de Produtos Eletrônicos.....	19
1.1.1 A confiabilidade como um elemento importante para o crescimento da organização	19
1.1.2 Conceitos básicos de confiabilidade	20
1.1.3 O desenvolvimento da confiabilidade em produtos eletrônicos.....	23
1.2 A Aplicação de Estresses Ambientais como uma das Ferramentas para Melhoria da Confiabilidade de Produtos Eletrônicos	25
1.2.1 Modelo estresse versus resistência.....	26
1.2.2 Alguns tipos de estresses ambientais comumente aplicáveis.....	28
1.2.3 Mecanismos de falha e estresses ambientais.....	32
1.3 A Proposta deste Trabalho	34

Capítulo 2

Comportamento de Vida de Produtos Eletrônicos e a Aceleração por Estresse.....	38
2.1 Comportamento Característico de Vida.....	39
2.2 Distribuições de Vida.....	41
2.2.1 Weibull de dois parâmetros.....	41
2.2.2 Exponencial.....	44
2.2.3 Lognormal.....	45
2.3 Relação entre Vida e Estresse.....	47
2.3.1 Aceleração por estresse.....	47
2.3.2 Modelo de Arrhenius: aceleração por estresse térmico.....	50
2.3.3 Estimação dos parâmetros do modelo de aceleração de Arrhenius.....	53
2.3.4 Determinação do fator de aceleração para uma condição específica...	54

Capítulo 3

Técnicas de Utilização de Estresses para Melhoria da Confiabilidade	57
3.1 Aspectos Gerais dos Ensaios de Estresse para a Melhoria da Confiabilidade.....	57
3.2 Apresentação das Técnicas.....	59
3.2.1 Ensaio de Estresse Acelerado (AST).....	60
3.2.2 Ensaio de Vida Acelerado (ALT).....	62
3.2.3 Ensaio de Estresse Altamente Acelerado (HAST).....	65
3.2.4 Ensaio de Vida Altamente Acelerado (HALT).....	65
3.2.5 Triagem por Estresse Altamente Acelerado (HASS).....	69
3.2.6 Auditoria por Estresse Altamente Acelerado (HASA).....	72
3.2.7 Triagem por Estresse Ambiental (ESS).....	72
3.2.8 Burn-in ou Steady-state burn-in.....	76

3.3 Comparação entre as Técnicas.....	78
---------------------------------------	----

Capítulo 4

Recomendações para a Implementação de Ensaios de Estresse Térmico	80
4.1 Modelo Geral para o Planejamento de Ensaios de Estresse	80
4.2 Detalhamento das Etapas do Modelo.....	82
4.2.1 Clarificação da tarefa	82
4.2.1.1 Apontar necessidade.....	82
4.2.1.2 Caracterizar estado atual	83
4.2.1.3 Definir objetivos.....	84
4.2.2 Definição do tipo de ensaio	84
4.2.2.1 Definir técnica	85
4.2.2.2 Definir fase do ciclo do produto.....	85
4.2.2.3 Definir abrangência	85
4.2.2.4 Definir dados a serem coletados e tratamento dos dados	87
4.2.3 Definição das condições de ensaio	88
4.2.3.1 Definir tipo de estresse.....	90
4.2.3.2 Definir nível de montagem.....	91
4.2.3.3 Definir nível de ativação do ensaio e estratégia de monitoramento do produto	93
4.2.3.4 Definir parâmetros.....	95
4.2.4 Definição da infra-estrutura necessária	98
4.2.4.1 Especificar a estrutura de aplicação de estresse	98
4.2.4.2 Especificar a estrutura de monitoramento e avaliação do produto.	100
4.2.4.3 Especificar o sistema de coleta e análise de dados.....	101
4.2.4.4 Especificar o sistema para a avaliação e validação da estrutura de ensaio.....	102
4.2.5 Análise da viabilidade do ensaio	103

4.2.5.1 Analisar a viabilidade técnica.....	103
4.2.5.2 Analisar a viabilidade econômica.....	103
4.2.6 Implementação do ensaio	105
4.2.6.1 Preparar e validar a estrutura de ensaio	105
4.2.6.2 Rodar o ensaio	107
4.2.6.3 Registrar dados e resultados do ensaio	109
4.2.7 Avaliação do ensaio	110
4.2.7.1 Avaliar eficácia do executado	111
4.2.7.2 Avaliar eficiência do planejado	112
4.3 Considerações Finais ao Modelo.....	113

Capítulo 5

Considerações Finais	115
5.1 Sobre a Dissertação	115
5.2 Sobre o Modelo de Planejamento Proposto	116
5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros	118
Referências Bibliográficas.....	120

Lista de Figuras

Nº.	Legenda	Pg
1.1	Principais técnicas para desenvolvimento da confiabilidade [3][12]	24
1.2	Aumento das falhas com a redução da resistência [2]	27
1.3	Aumento das falhas com o aumento do estresse [2]	27
1.4	Respostas térmicas de um produto para diferentes velocidades do ar [5]	29
1.5	Estresses e mecanismos primários de falhas (adaptada de [2])	33
1.6	Ranking de efetividade dos estresses [5][17]	34
2.1	Diferentes taxas de falha ao longo da vida útil do produto eletrônico [6]	39
2.2a	Efeito do parâmetro de forma β na função densidade de probabilidade Weibull [20]	42
2.2b	Efeito do parâmetro de escala η na função densidade de probabilidade Weibull [20]	42
2.3	Curvas de taxa de falha instantânea para diferentes valores do parâmetro β [20]	43
2.4	Efeito do parâmetro λ na função distribuição de probabilidade exponencial [20]	44
2.5a	Efeito do parâmetro σ na função densidade de probabilidade Log-normal [20]	46
2.5b	Efeito do parâmetro μ na função densidade de probabilidade Log-normal [29]	46
2.6	Carregamentos parcialmente dependente do tempo [15]	49
2.7	Carregamentos continuamente dependente do tempo [15]	49
2.8	Características de vida típicas [15]	51
2.9	Efeito da temperatura na função distribuição de probabilidade Weibull [20]	52
3.1	Limites do produto (adaptada de [15][19])	60

N.º	Legenda	Pg
3.2	Curvas típicas de crescimento da confiabilidade para um produto típico a) sem a utilização de AST e b) com a utilização de AST (adaptada de [1])	61
3.3	Ciclo HALT [33]	67
3.4	Aumento da margem de segurança da situação a) antes de HALT para b) depois do HALT [33]	68
3.5	Modo de operação do HASS [33]	70
3.6	Efeito da aplicação de HALT e HASS [33]	71
3.7	Ciclo HASS (adaptada de [33])	72
3.8	Enfoque quantitativo do ESS [29]	75
3.9	Quadro comparativo das técnicas de utilização de estresse	79
4.1	Modelo para planejamento de ensaio de estresse	81
4.2	Fases do ciclo de vida do produto até a utilização (adaptada de [41])	85
4.3	Probabilidade de observação de defeitos para um tamanho de amostra definido [2]	86
4.4	Vantagens e desvantagens da alocação de estresse em cada nível de montagem [29]	92
4.5	Relação entre nível de ativação do ensaio e estratégia de monitoramento	95
4.6	Diretrizes para condições de ensaio iniciais	97
4.7	Fluxos básicos para a realização dos ensaios (a) AST, HAST , (b) ALT, (c) HALT e (d) ESS, Burn-in, HASS.	108
4.8	Fluxo de avaliação do ensaio para liberação	110

Lista de Abreviaturas

Abreviatura	Significado em Inglês	Significado em Português
ALT:	Accelerated Life Testing	Ensaio de vida acelerado
AST:	Accelerated Stress Testing	Ensaio de estresse acelerado
DC:	Direct Current	Corrente contínua
DoE:	Design of Experiments	Projeto de experimentos
ESS:	Environmental Stress Screening	Triagem por estresse ambiental
FMA:	Failure Mode Analysis	Análises do modo de falha
FMEA:	Failure Mode and Effects Analysis	Análises dos efeitos e modos de falha
FTA:	Fault Tree Analysis	Análises da árvore de falhas
HALT:	Highly Accelerated Life Testing	Ensaio de vida altamente acelerado
HASA:	Highly Accelerated Stress Audit	Auditoria por estresse altamente acelerado
HASS:	Highly Accelerated Stress Screening	Triagem por estresse altamente acelerado
HAST:	Highly Accelerated Stress Testing	Ensaio de estresse altamente acelerado
MLE:	Maximum Likelihood Estimation	Estimação da máxima verossimilhança
MTBF:	Mean Time Between Failures	Tempo médio entre falhas
MTBM:	Mean Time Between Maintenances	Tempo médio entre manutenções
MTBR:	Mean Time Between Repairs	Tempo médio entre reparos
MTTF:	Mean Time To Failure	Tempo médio para falha
ROI:	Return on Investment	Retorno de investimento

Lista de Símbolos

Símbolo **Descrição**

t :	Tempo para falha
$R(t)$:	Função confiabilidade
$f(t)$:	Função densidade de probabilidade de tempo para falha (<i>pdf</i>)
$F(t)$:	Função distribuição acumulada de tempo para falha
R_i :	Confiabilidade do <i>iesimo</i> componente
R_S :	Confiabilidade do produto ou sistema
θ_0 :	Vida média
$h(t)$:	Função de taxa de falha instantânea ou função de risco
β :	Parâmetro de forma da distribuição weibull
η :	Parâmetro de escala ou característica de vida para a distribuição weibull
$\Gamma(\cdot)$:	Função gama
λ :	Parâmetro de escala ou taxa de falha constante para a distribuição exponencial
σ_T :	Parâmetro de forma para a distribuição lognormal
\bar{T} :	Parâmetro de escala para a distribuição lognormal
\hat{T} :	Mediana para a distribuição lognormal
Z :	Variável normal padrão
$\Phi(Z)$:	Função distribuição acumulada para a variável normal padrão
$\phi(Z)$:	Função densidade de probabilidade para a variável normal padrão

Símbolo Descrição

T:	Temperatura
V(T):	Função taxa de reação de Arrhenius
A:	Constante de proporcionalidade da taxa de reação de Arrhenius
E _a :	Energia de ativação
K:	Constante de Boltzman
L(T):	Função aceleração da característica de vida
C:	Constante de proporcionalidade da característica de vida
A _F :	Fator de aceleração
μ:	Média populacional
σ ² :	Variância populacional
σ:	Desvio padrão populacional
\bar{X} :	Média amostral
X _i :	<i>i</i> ésimo valor do mensurando
n:	Tamanho da amostra
S ² :	Variância amostral
S:	Desvio padrão amostral
ΔT:	Diferença de temperatura entre extremos
v _{ar} :	Velocidade do ar

Capítulo 1

Aplicação de Estresses Ambientais no Âmbito da Melhoria da Confiabilidade de Produtos Eletrônicos

A indústria eletrônica sofreu grandes mudanças durante os últimos vinte anos. Os produtos têm se tornado muito mais complexos, as expectativas dos clientes com relação aos produtos têm aumentado e a competição mercadológica cresce cada vez mais. Os clientes estão começando a reconhecer a importância da confiabilidade dos produtos e empresas que desenvolvem uma reputação de confiabilidade pobre geralmente pagam com perda de mercado. Além disto, os custos de reparos ou trocas de produtos que falharam em campo podem fazer a diferença entre lucro e prejuízo[1][2].

Para que a construção da confiabilidade nos produtos seja possível, é necessário conhecer tanto sobre “como as coisas falham” quanto se sabe sobre “como as coisas funcionam” [1]. Porém, na prática, ninguém pode esperar anos até saber como o produto vai realmente se comportar. Além disto, não é interessante para a empresa esperar que os produtos falhem em campo para ter uma avaliação das falhas. Portanto, a utilização de técnicas de ensaios de estresses ambientais com o propósito de antecipar a vida dos produtos é de grande utilidade, principalmente quando acompanhada de um processo de análise de falhas [2].

Com o propósito de localizar a proposta de trabalho neste contexto, o presente capítulo irá introduzir alguns conceitos básicos da disciplina da confiabilidade e a teoria que suporta a aplicabilidade dos ensaios de estresses ambientais como uma ferramenta útil para a melhoria da mesma.

1.1. Noções sobre Confiabilidade de Produtos Eletrônicos

Nesta seção, aspectos gerais da confiabilidade são apresentados sem a pretensão de uma discussão aprofundada sobre o tema. A intenção é despertar a percepção da importância da confiabilidade e localizar a participação dos estresses ambientais no seu desenvolvimento.

1.1.1. A confiabilidade como um elemento importante para o crescimento da organização

Todo produtor de bens ou serviços sabe que o sucesso de um negócio depende fortemente da satisfação do cliente com o produto ou serviço em relação ao preço cobrado. Isto comumente significa que a qualidade do produto ou serviço atende ou supera as expectativas do cliente dentro de um preço ou custo considerado razoável [2].

No entanto, a qualidade pode envolver vários aspectos. Segundo Garvin [3][4], pode-se determinar 8 dimensões para a qualidade:

- desempenho, significando como o produto irá executar a função pretendida;
- confiabilidade, significando com que frequência o produto falha;
- durabilidade, significando por quanto tempo o produto irá durar;
- manutenibilidade, significando o quão fácil é reparar o produto;
- estética, significando o apelo visual do produto;
- características, significando o que o produto faz;
- qualidade percebida, significando qual a reputação da empresa e do seu produto;
- conformidade com o projeto, significando a adequação do produto às especificações.

Conforme essa definição, a confiabilidade é uma das dimensões e pode ser vista como a projeção da qualidade no tempo. Baixa confiabilidade significa alta taxa de falha, o que é totalmente indesejável, tendo reflexo direto na satisfação dos clientes. Além da insatisfação direta dos clientes existem outras razões que intensificam a necessidade do foco em confiabilidade, por exemplo [5]:

- Qualificação exigida – Indústrias tanto da área militar como comercial, têm aumentado a ênfase na certificação da confiabilidade. Algumas até incluem uma cláusula de multa para fracassos em provar a confiabilidade, como parte do contrato. Ou de outra forma,

apenas vinculam a homologação dos fornecedores à comprovação de um índice especificado que represente a confiabilidade.

- Ciclos de vida de mercado curtos – As rápidas mudanças de tecnologia e o aumento da competição, diminuem a atenção ou interesse a longo prazo que um produto pode gerar. Portanto, um produto introdutório defeituoso pode matar uma oportunidade de mercado de uma empresa.
- Alto custo de re-trabalho – Reparos e trocas de componentes nas fases finais de produção consomem muito tempo e geram custos altos.
- Custos altos de garantia – O gasto para desmontar um produto em campo, ou administrar uma re-chamada (*recall*) de produto pode ter um impacto oculto e desnecessário no custo unitário.
- Perda de mercado – Insatisfação continuada do cliente pode ter um impacto a longo prazo que não afeta somente a lucratividade mas também a imagem da empresa.

A partir destas considerações, o entendimento dos conceitos que envolvem a confiabilidade de um produto, e das técnicas desenvolvidas para o seu aprimoramento tornam-se fundamentais para a busca do crescimento econômico e tecnológico industrial.

1.1.2. Conceitos básicos de confiabilidade

Existem várias definições para confiabilidade. Uma mais simplificada, outras mais elaboradas, mas todas caminhando para um mesmo significado que pode ser expressado da seguinte forma:

A confiabilidade de um produto pode ser definida como a probabilidade de que este irá executar suas funções de projeto sem falhas em um ambiente especificado, por um período projetado, com um determinado nível de confiança [2][3][6][7][8].

Para se analisar a confiabilidade de um produto final é necessário quantificar a vida do produto pela sua operação por um tempo ou número de ciclos desejados, ou até que ele falhe. Pode-se ainda, analisá-la através da confiabilidade de seus componentes. Obviamente, não se pode degradar todos os produtos ou componentes para provar que eles atendem as especificações, então, deve-se contar com dados adquiridos através de ensaios em amostras.

Por esta razão, as afirmações relacionadas à confiabilidade devem ser em termos de **probabilidade** de funcionamento sem falhas durante um tempo t , a qual pode ser representada pela equação a seguir [2][9]:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1.1)$$

onde, $F(t)$ é a função de distribuição acumulada correspondente à $f(t)$, que é a função densidade de probabilidade do tempo para falha, a qual representa a distribuição de falhas ao longo do tempo [9].

Para o caso de se computar a confiabilidade de um produto, a partir das confiabilidades de seus componentes, um diagrama de blocos de confiabilidade deve ser desenvolvido com base em uma análise cuidadosa da maneira na qual o produto opera. Considerando R_i como a confiabilidade do *iésimo* componente, $i = 1, 2, \dots, n$, são apresentadas aqui as equações de confiabilidade para as estruturas em série, paralela e combinada, que são tomadas como premissas para algumas técnicas de análise de confiabilidade propostas. Outras estruturas e maiores detalhes podem ser encontrados na referência [2].

- Uma estrutura é chamada em *série* quando o sistema funciona se e somente se todos os n componentes do produto funcionam. Assume-se que os componentes falham ou funcionam independentemente de um outro. Então, a confiabilidade R_S do produto é dada por:

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \quad (1.2)$$

- Uma estrutura é dita em *paralelo* quando o produto funciona se pelo menos um dos n componentes do produto funciona. Então, a confiabilidade R_S do produto é dada por:

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (1.3)$$

- Uma estrutura é dita *combinada* quando apresenta parte da estrutura em série e parte em paralelo. Então, a confiabilidade R_S do produto é calculada parte a parte, gerando subsistemas equivalentes com $R_{equivalentes}$, utilizando as equações de série e paralelo definidas acima.

Existem, ainda, algumas medidas que são frequentemente utilizadas como indicadores indiretos da confiabilidade. Em geral, através delas, metas de confiabilidade podem ser expressas. Dentre elas podem ser citadas [2]:

- MTTF – Tempo médio para falha;
- MTBF – Tempo médio entre falhas;
- MTBM – Tempo médio entre (ou antes) manutenções;
- MTBR – Tempo médio entre (ou antes) reparos;
- θ_0 – Vida média expressa em alguma unidade de tempo como horas ou ciclos;

Uma questão a ser observada com relação à definição de metas de confiabilidade é que a taxa de falha não é constante ao longo da vida do produto. Essa *taxa de falha instantânea*, também conhecida como *taxa de risco*, pode ser dada pela relação entre a função densidade de probabilidade $f(t)$ e a confiabilidade $R(t)$, como mostra a equação a seguir [2][9]:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.4)$$

Em se tratando da análise de produtos eletrônicos, é conhecido que na sua maioria, esses experimentarão uma história de confiabilidade que mostra uma quantidade desproporcional de falhas no período inicial de sua vida de operação, chamado *período de mortalidade infantil*¹. A taxa de falha é alta, mas reduz gradativamente a medida que o produto caminha para o chamado *período de vida útil* ou *de maturidade*², assumindo uma taxa de falha pequena e aproximadamente constante. O comportamento de falhas se completa com um período que apresenta um aumento na taxa de falhas devido à degradação do produto, conhecido como *período de desgaste*. Este comportamento é representado pela curva de vida característica conhecida como curva da banheira, que será discutida em mais detalhes no capítulo 2 [9][10]. Uma implicação óbvia deste conceito é que a confiabilidade de um produto não pode ser definida por apenas um número. Ela depende da idade do produto e dos estresses que estejam presentes, e deve estar associada a um intervalo de confiança que resulta da amostragem [2].

Para descrever o comportamento de falhas de um produto eletrônico e possibilitar análises de confiabilidade, são utilizadas distribuições estatísticas, sendo aqui chamadas de distribuições de

¹ Também conhecido como período de falha inicial ou prematura, de *burn-in*, de *debugging* ou de *running-in* [6].

² Também conhecido como período de falhas randômicas, de falhas estáveis ou de falhas intrínsecas [6].

vida. Dentre elas, pode-se destacar as distribuições exponencial, lognormal e Weibull de dois parâmetros, que são as mais utilizadas [15]. Estas distribuições, servem para modelar a função densidade de probabilidade de tempo para falha $f(t)$, que é a base para chegar aos modelos matemáticos de confiabilidade [9]. Estas distribuições serão abordadas no capítulo 2.

1.1.3. O desenvolvimento da confiabilidade em produtos eletrônicos

Todas as razões vistas na seção 1.1.1 levam a percepção da importância da construção da confiabilidade desde as primeiras fases do desenvolvimento de um novo produto. Isto, para que o custo e tempo relacionados às mudanças no projeto do produto e no processo produtivo em busca da confiabilidade desejada sejam os menores possíveis. É importante, portanto, descobrir os *modos de falha*³ existentes no produto o mais cedo possível, pois a liberdade para realizar mudanças no projeto com a intenção de eliminar *mecanismos de falha*⁴ são maiores. A medida que o início da produção se aproxima, menos mudanças em projeto, componentes, ou processo produtivo são possíveis, porque os custos tornam-se altos e atrasos no lançamento do produto são gerados. No pior dos casos, pode ser impossível eliminar mecanismos de falha pelo projeto e uma inspeção cem por cento após a produção, chamada *screening*⁵ pode ser a única alternativa. Porém, qualquer processo de triagem aumenta o custo do produto, pois é um passo adicional no processo produtivo e a sua utilização deve ser analisada com relação aos custos gerados pelos retornos de campo e reparos em garantia, bem como a gravidade ou não da ocorrência de falhas em campo [2].

Como se pode perceber, o desenvolvimento da confiabilidade está extremamente ligado ao conhecimento sobre a ocorrência de falhas e às ações para eliminá-las. Seja através de experiências prévias ou realização de ensaios o importante é buscar o entendimento do que provoca as falhas, do que as faz se manifestar, de como elas podem ser eliminadas e de qual é a sua distribuição ao longo da vida de um produto.

Além dos ensaios, existe uma série de técnicas que auxiliam no conhecimento e desenvolvimento da confiabilidade nos produtos. Na figura 1.1 estão listadas as principais técnicas para desenvolvimento da confiabilidade citadas por Josim U. Ahmed em seu artigo

³ O efeito pelo qual a falha é observada [9].

⁴ Processo físico-químico que resulta na falha [9].

⁵ O processo de estressar cem por cento dos produtos manufaturados com o intuito de remover itens insatisfatórios ou aqueles que provavelmente apresentarão falhas prematuras[5][11].

“Modern Approaches to Product Reliability Improvement” [12]. Segundo Ahmed as técnicas que asseguram a confiabilidade durante o projeto e a manufatura do produto podem ser classificadas como técnicas off-line e as técnicas usadas para medir, monitorar e avaliar a confiabilidade como técnicas on-line, ou seja, técnicas preventivas e técnicas de controle.

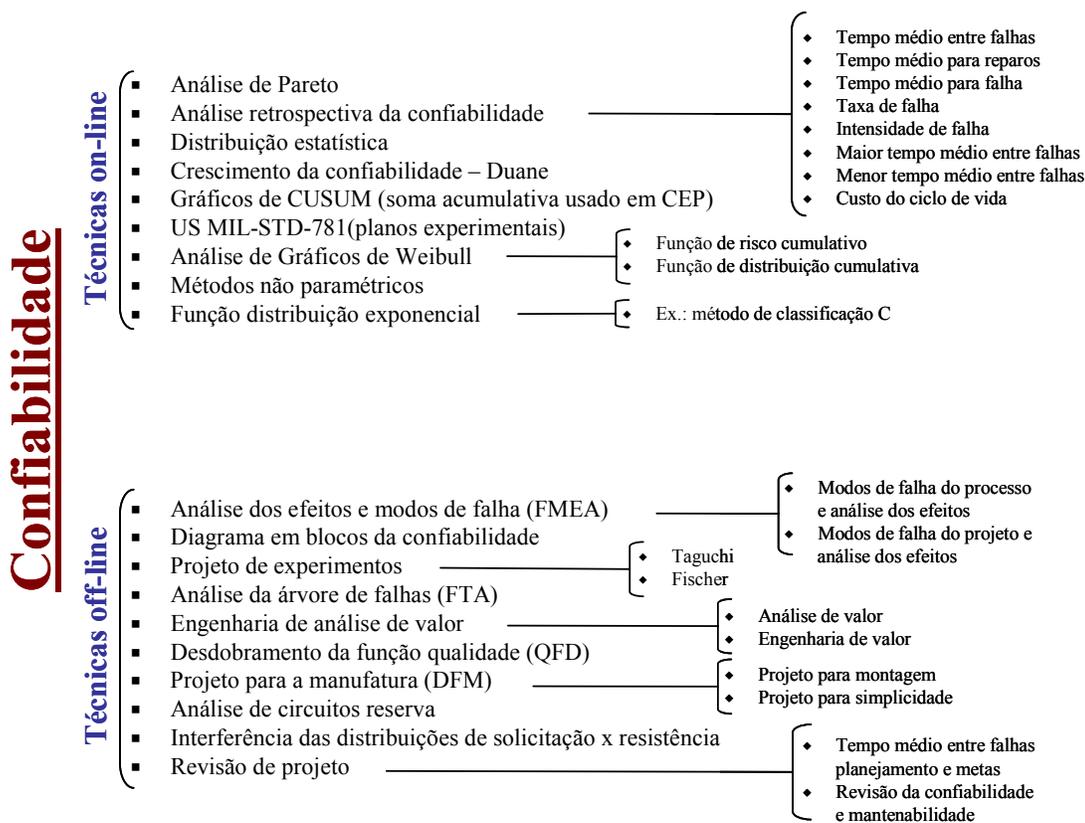


Figura 1.1 – Principais técnicas para desenvolvimento da confiabilidade [3][12].

Muitas destas técnicas, podem ser de grande utilidade para o planejamento, execução, monitoramento e análise dos ensaios para melhoria da confiabilidade. Como por exemplo:

- FMEA: é uma ferramenta de análise estruturada que busca identificar modos de falha potenciais, o efeito de cada modo de falha na operação do produto e identificar causas potenciais de falhas antes que elas se tornem uma realidade durante o uso do produto [2][12][13].
- FTA: esta ferramenta pode ser descrita como um diagrama lógico que é usado para determinar todas os defeitos do sistema, unidades, módulos, partes e as combinações de imperfeições que podem resultar em falhas específicas do sistema. Um tipo de análise em que cada um dos eventos que contribuem para uma anomalia pode ser avaliado em termos qualitativos e quantitativos. Em outras palavras, a árvore de falhas mostra a

relação causa e efeito entre o nível mais alto do evento indesejado e os vários eventos contribuintes [2][13].

- Análise retrospectiva da confiabilidade: são análises de dados históricos de falhas através das quais características de confiabilidade, como MTBF e taxa de falha, podem ser estimadas [2][12].
- Análise de gráficos de Weibull: a partir destes gráficos o padrão de falhas do produto pode ser analisado e estimativas dos parâmetros da distribuição de vida obtidas [2][9].

Todas estas técnicas trazem informações qualitativas ou quantitativas que subsidiam a identificação de características de falhas de um determinado produto.

1.2. A Aplicação de Estresses Ambientais como uma das Ferramentas para Melhoria da Confiabilidade de Produtos Eletrônicos

Como visto no item 1.1.2, a confiabilidade de qualquer produto pode ser tratada como uma função das confiabilidades dos seus componentes. Desta forma, segundo Wolfgang Biben da Divisão de Qualificação e Análise de Produtos Eletrônicos do Centro de Pesquisas Renato Archer (CenPRA), uma analogia pode ser feita entre a confiabilidade e uma corrente, a qual é somente tão forte quanto o seu elo mais fraco [14]. Isto é principalmente verdade com relação aos produtos comerciais, que em geral evitam redundâncias, ou seja, a introdução de elementos auxiliares com o intuito de assegurar a continuidade do funcionamento do produto [11], pois isso implica um aumento de custo. Essa situação exemplifica uma estrutura em série a qual é representada pela equação 1.2, conforme apresentado anteriormente. Neste caso, cada elo da corrente, isto é, cada componente é essencial para obter a funcionalidade plena do produto [2].

Tendo isto em mente, fica evidente que, para o completo entendimento da confiabilidade de um produto, é necessário conhecer como se comportam os componentes com referência à confiabilidade. A idéia básica em análises de confiabilidade do ponto de vista da metodologia de projeto probabilística é que um componente tem uma certa resistência, a qual, se excedida, resultará na sua falha. Os fatores que determinam a resistência do componente são variáveis aleatórias, assim como os fatores que determinam os estresses ou cargas agindo sobre o componente. A palavra estresse, neste caso, é usada para indicar qualquer agente que tenha tendência a induzir falhas, enquanto a palavra resistência indica a capacidade de resistir aos mecanismos de falha.

Com base na afirmação de que a falha em um determinado ponto ocorre quando o estresse imposto excede a resistência do mesmo, pode-se considerar que é possível fazer uso de estresses com o intuito de expor os elos fracos, que são geralmente as causas das falhas.

Os estresses podem ser utilizados para três fins diferentes no âmbito da confiabilidade. O primeiro, para obter informações qualitativas sobre falhas como, por exemplo, identificar modos de falha. O segundo, para obter informações quantitativas sobre confiabilidade, como a vida característica do produto. Já o terceiro, não tem o papel de obter informação, mas sim de realizar um *screening*, ou seja, uma triagem no processo para separar produtos fracos. A utilização de estresse para realizar qualquer uma das três funções, segue o princípio básico de transformar *defeitos latentes*⁶ em falhas detectáveis pelo uso de estresses mais severos que aqueles esperados no ambiente de uso normal. No entanto, o perfil detalhado do ensaio como, tipo de estresse, estresse máximo e mínimo, taxa de variação, deve ser definido sob medida para cada produto e objetivo de ensaio. As diferentes técnicas envolvidas nestes três propósitos serão tratadas no capítulo 3 [1][2][15].

Para uma melhor compreensão, nas seções seguintes serão apresentados, além da relação entre estresse e resistência, os estresses ambientais comumente usados, os mecanismos potenciais de falhas relacionados a cada tipo de estresse individual e a abrangência de cada um.

1.2.1. Modelo estresse versus resistência

Em reconhecimento ao fato de que nem todos os ambientes de uso sujeitam um produto aos mesmos níveis de estresse, e que sempre existem variações de robustez entre unidades de um mesmo produto, estresse e resistência são usualmente desenhados como distribuições de probabilidade. Cada parâmetro dos componentes variará ao longo de uma faixa de valores, resultando em variações de robustez e performance de produto para produto. Os estresses experimentados por esses componentes também terão uma variação, dependendo da sua aplicação em cada produto e do ambiente de uso final [2].

No caso ideal, não haveria sobreposição das distribuições de resistência do produto e estresse de uso, ou seja, o produto mais fraco seria capaz de suportar o ambiente de uso mais severo. Falhas ocorreriam apenas quando o estresse aplicado excedesse a resistência do produto.

⁶ Falhas que não aparecem prontamente, mas que com o tempo serão precipitadas [5]

Porém, a medida que um produto envelhece, vários mecanismos de falha associados ao desgaste atuam. Em consequência disto, a distribuição de resistência do produto muda gradualmente na direção de diminuição da robustez, então os produtos tornam-se mais fracos. Eventualmente, as duas distribuições se sobrepõem significativamente, e dentro da região sobreposta, é provável que falhas ocorram. A figura 1.2 representa esta situação. Além disto, a dispersão da distribuição de resistência pode aumentar, favorecendo também a sobreposição das distribuições. Essa deterioração pode requerer muitas horas para acontecer sob condições ambientais de uso normais, e pode ser detectada pelos métodos de ensaio de confiabilidade tradicionais, isto é, operação em estresse constante e de longa duração [2].

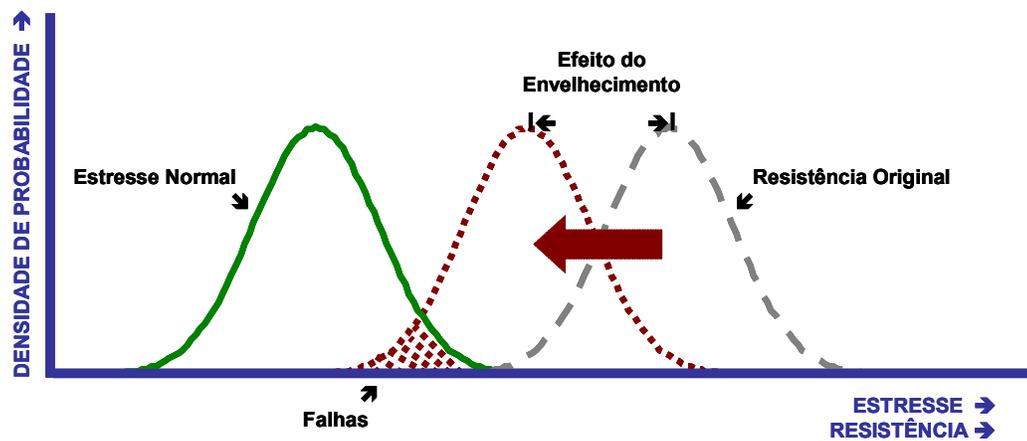


Figura 1.2 – Aumento das falhas com a redução da resistência [2].

Para forçar uma sobreposição mais rapidamente, a distribuição de estresse aplicada pode ser induzida a se deslocar na direção do aumento de estresse, com isso uma sobreposição das duas distribuições acontece imediatamente, como pode ser visto na figura 1.3.

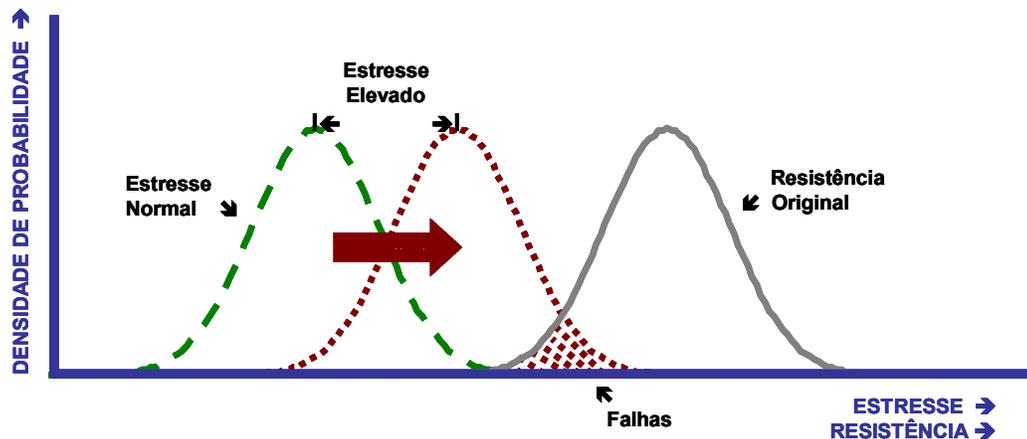


Figura 1.3 – Aumento das falhas com o aumento do estresse [2].

Se isto é feito corretamente, com conhecimento das tecnologias envolvidas, é possível descobrir a posição e a natureza do lado inferior da curva de distribuição da resistência do produto rapidamente, ou seja, os pontos fracos do produto. Desta forma, o tempo de teste para verificar a margem de projeto adequada, isto é, a diferença entre o estresse especificado aplicado a um produto e a sua resistência com relação a esse estresse, (também conhecida como *margem de segurança*), pode ser bastante reduzido. Além disto, menos amostras de teste são necessárias do que em um teste de vida de estresse normal [2].

1.2.2. Tipos de estresses ambientais comumente aplicáveis

A escolha do tipo de estresse adequado é uma etapa muito importante no planejamento dos ensaios. Ela depende não apenas dos mecanismos de falha que se pretende ativar, mas também da capacidade de aplicação do estresse, seja pela infra-estrutura necessária, ou pelo conhecimento técnico envolvido. Embora, nos capítulos 3 e 4 serão apresentadas algumas especificidades em relação à aplicação de estresses em função das técnicas de ensaio existentes e da proposta da dissertação, uma breve descrição de alguns dos estresses mais comumente usados é feita na seqüência [1][5][16]:

- Alta temperatura: É geralmente aplicada com o produto ligado. Ele é sujeito a uma temperatura elevada e constante, ao longo de um tempo pré-determinado. A aplicação deste estresse é baseada na idéia de que a operação contínua de um produto força falhas infantis e o aquecimento adicional eleva a taxa de falhas. Exposição à alta temperatura por tempo prolongado favorece os fenômenos de difusão e as reações químicas.
- Baixa temperatura: É aplicada de forma similar à alta temperatura, mas é baseada no princípio que falhas serão forçadas pelo contraste entre o aquecimento gerado pelo produto estar ligado e o ambiente frio. Além disto, existem mecanismos de falha de semicondutores que são potencializados em temperaturas baixas.
- Ciclagem de temperatura: Consiste de múltiplos ciclos de mudança de temperatura entre extremos predeterminados com uma taxa de variação constante que deve prover a expansão e contração necessária para estressar os produtos suficientemente. É realizada em câmaras climáticas e as temperaturas extremas devem ser distantes o suficiente para permitir uma solicitação efetiva, porém sem produzir falhas atípicas no produto.

A taxa de variação de temperatura é dependente de propriedades específicas de aquecimento do produto como: a diferença entre as temperaturas do ar e do produto e os

fatores de condução de calor na superfície que envolvem a velocidade e direcionamento do ar.

Sendo assim, o fluxo de ar em uma câmara de ciclagem térmica é um fator crítico, pois ele afeta diretamente a taxa de variação de temperatura do produto [2]. A figura 1.4 ilustra a temperatura de um produto durante quatro operações separadas que tiveram taxas de variação de temperatura do ar idênticas. A única diferença entre as operações foi a velocidade do ar.

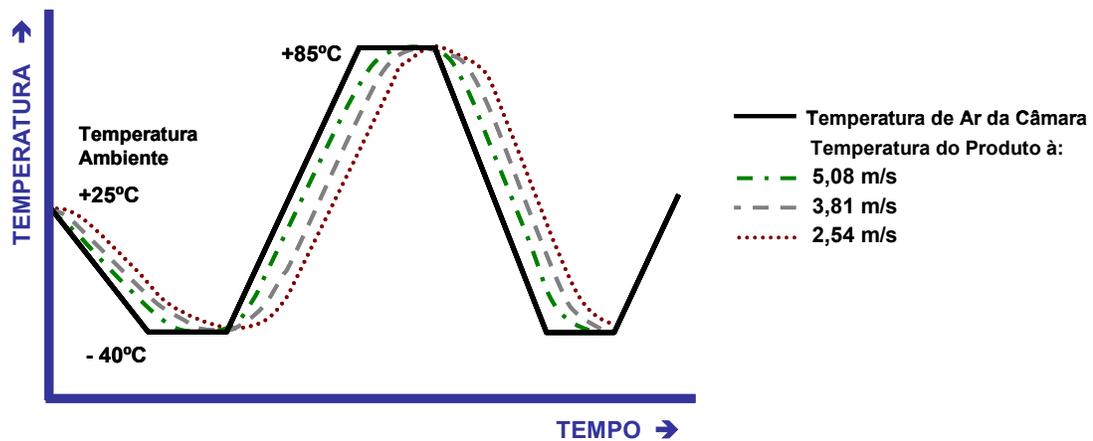


Figura 1.4 – Respostas térmicas de um produto para diferentes velocidades do ar [5].

A figura 1.4 mostra que quanto menor a velocidade do ar, mais lentamente a temperatura do produto aumenta e diminui e, portanto, menor o estresse sofrido pelo produto. As velocidades do ar maiores causam uma mudança de temperatura do produto mais rápida e então sujeitam o produto a um grau de estresse mais alto.

Uma outra consideração a ser feita é com relação aos períodos de permanência nas temperaturas extremas. Os tempos de permanência nos extremos são importantes para simular corretamente a aplicação do produto. Por exemplo, nas soldas é importante deixar um tempo de permanência suficiente para relaxamento dos esforços pela deformação lenta da solda.

- Choque térmico: Um processo que expõe produtos a severos extremos de temperaturas, usualmente de forma rápida, isto é, um produto é transferido diretamente, seja por meios mecânicos ou manual, de um ambiente extremamente quente para um ambiente extremamente frio e vice-versa.

Choque térmico é geralmente considerado efetivo para expor defeitos ao nível de componentes, particularmente circuitos integrados, que requerem um alto grau de estresse para experimentar a taxa de variação necessária para transformar defeitos latentes em falhas detectáveis.

Choque térmico pode também ser útil em outros níveis de montagem, como módulos ou unidades, a medida que a severidade de suas taxas de variação não causem danos ao equipamento. Esse é um risco particular em montagens complexas. Choque térmico é particularmente efetivo para verificar a resistência das soldas em placas montadas.

Cuidado deve ser tomado com relação à efetividade econômica do choque térmico, pois geralmente o equipamento necessário para gerar um estresse efetivo tem um custo alto. Ainda, se a transferência envolvida for manual o risco de danificar acidentalmente o produto aumenta. Finalmente, em processos de choque térmico é difícil, ou em alguns casos impraticável, a operação e monitoramento do produto. Isto limita as oportunidades para acumulação de dados de falhas.

- Vibração aleatória: Considerada a mais efetiva dos três principais tipos de vibração, a vibração aleatória envolve a excitação de um produto com um perfil predeterminado sobre uma ampla faixa de frequência, usualmente de 20 a 2000 Hz [5]. O estresse do produto é criado através de excitações simultâneas de todas as frequências dentro de uma faixa.

Vibração aleatória é aplicada pela fixação do produto a uma unidade chamada *electrodynamic shaker*, ou seja, um sistema de vibração eletrodinâmico. A montagem deve ser bem firme para garantir que o estresse seja transmitido diretamente ao produto e que o processo seja reprodutível com uma exatidão razoável. Produtos podem ser vibrados em um único eixo ou em eixos múltiplos, simultaneamente ou consecutivamente. Existem opiniões variadas de qual forma produz o ambiente mais estressante.

Vibração aleatória geralmente requer menos tempo de operação que outros estresses e é considerada particularmente efetiva em expor defeitos mecânicos, como perda de soldagem, curtos impróprios de placas de circuito impresso, ressonâncias indesejadas e conseqüente fadiga dos materiais de fixação.

As dificuldades primárias são o custo do equipamento e a falta de uniformidade no ensaio, ou seja, sistemas de vibração eletrodinâmicos podem ter um custo alto de

instalação, controle e manutenção. Vibração aleatória é também, por natureza, menos eficaz que ciclagem de temperatura em prover um ambiente de estresse uniforme. Por efeito de ressonância pode haver um maior estresse no centro de uma placa de circuito impresso montada do que perto dos pontos de fixação.

- **Vibração senoidal – frequência fixada:** É uma forma de vibração que opera em um seno fixo ou uma frequência de operação individual. Este método usualmente requer um *mechanical shaker*, ou sistema de vibração mecânico, com faixa de frequência acima de 60 Hz [5]. Apesar de ter menor custo e ser mais fácil de controlar do que a vibração aleatória, a vibração de frequência fixada é geralmente vista como não provedora de um nível de estresse tão efetivo. Por não exercitar plenamente as possíveis ressonâncias, este estresse é raramente utilizado.
- **Vibração senoidal – varredura de frequência:** É uma forma de vibração que opera em uma varredura de seno ou frequência operacional múltipla. Usualmente requer um *hydraulic shaker*, ou sistema de vibração hidráulico, com faixa de frequência acima de 500 Hz [5]. Visto similarmente à frequência fixada em termos de efetividade geral.
- **Estresse elétrico:** É usado para exercitar o circuito e simular as temperaturas de junção em semicondutores. Existem dois tipos básicos: ciclagem de energia, que consiste em ligar e desligar o produto em intervalos especificados, e marginalização de tensão, que envolve variação da tensão de alimentação acima e abaixo da tensão nominal do produto. Segundo pesquisas, estresse elétrico, não expõe o número de defeitos comumente encontrados através de estresses térmicos e de vibração aleatória, conseqüentemente é considerado muito menos efetivo. Contudo, ele pode ter um custo de implementação relativamente baixo e pode ser aplicado em conjunto com outro tipo de estresse para aumentar a efetividade geral. Verificar a resistência de um produto à sobre-tensões e pulsos é essencial para garantir a sua sobrevivência em campo.
- **Ambiente combinado:** Dependendo da complexidade do produto, custo e especificações de confiabilidade, os estresses ambientais podem ser usados em conjunto. As considerações primárias devem ser se o estresse adicional, aplicado simultaneamente ou consecutivamente, irá expor um número adicional de defeitos significativo e se o custo do estresse adicional é justificável.
- **Umidade:** Ensaios de umidade são tipicamente realizados em uma câmara que controla a umidade relativa do ar pela medição de temperaturas de bulbo seco e molhado. Expor

produtos ao estresse de umidade precipita defeitos de corrosão e contaminação nos produtos. Umidade possui a capacidade de penetrar nos poros dos materiais, causar correntes de fuga entre condutores elétricos e é também um importante estresse quando se quer avaliar revestimento e vedação. Tipicamente, ensaios de umidade são de longa duração e certos tipos de corrosão requerem mínimo fluxo de ar, o que não é típico na maioria das câmaras. Existe ainda um outro tipo de ensaio de umidade, feito em um recipiente pressurizado que é muito mais acelerado.

1.2.3. Mecanismos de falhas e estresses ambientais

A utilização de estresses para estimular a precipitação de falhas é um processo que não pode ser padronizado no sentido de estabelecer um portfólio padrão de estresses para todos os produtos. Cada tipo de estresse é capaz de expor certos mecanismos de falha e cada produto terá diferentes mecanismos de falha dominantes.

Segundo Charles Schinner da Hewlett-Packard [2], a utilização de um portfólio com uma variedade de estresses, aplicados seqüencialmente ou em combinações simultâneas, aumenta a probabilidade de encontrar o maior número de mecanismos de falha em menos tempo. Contudo, nem sempre uma empresa tem capacidade para varrer cada produto com os vários estresses existentes. Apesar de sua efetividade, esta é uma estratégia cara e complicada devido à infraestrutura necessária e à diversidade de áreas de conhecimento envolvidas.

De qualquer forma, nem todos os mecanismos de falha existentes serão estimulados pelo portfólio de estresses escolhido. No entanto, deve-se buscar a precipitação de boa parte deles para que uma melhora significativa da confiabilidade possa ser alcançada. Vale salientar que, embora diferentes mecanismos de falha estejam presente, sempre haverá um ou dois preponderantes que determinam a confiabilidade do produto.

Atenção também deve ser dada ao fato que alguns tipos de estresses são considerados como mais efetivos em termos da capacidade de expor defeitos latentes ao longo de um período de tempo, portanto, de forma simplificada, pode-se optar pela utilização de um deles no intuito de promover alguma melhoria [2][5].

Na figura 1.5 são apresentados alguns estresses e os mecanismos de falhas tipicamente precipitados por eles [2][16].

ESTRESSE	MECANISMOS TRADICIONAIS DE FALHAS
UMIDADE	Defeitos nas vedações herméticas
	Corrosão
	Crescimento de dendrite (formações irregulares fossilizadas)
	Migração iônica
	Resistência de isolamento
	Instabilidade de circuitos de alta impedância
ALTA TEMPERATURA	Reações químicas
	Migração iônica
	Difusão
	Crescimento de intermetálicos
	Mudança das margens dos temporizadores digitais
	Aumento do processo de difusão do silício
CICLAGEM DE TEMPERATURA	Instabilidade térmica do circuito
	Taxa de expansão diferencial
	Imperfeições de soldagem
	Problemas no projeto de transferência de calor
	Trincas
	Curtos ou circuitos abertos nas metalizações
	Ligações: quebradas, erguidas, grudadas
	Defeitos de contato da matriz
	Defeitos na proteção de metais contra corrosão
	Corrosão bimetálica
	Imperfeições em cristais
VIBRAÇÃO ALEATÓRIA	Imperfeições na montagem de componentes grandes
	Fadiga
	Imperfeições na montagem de dissipador de calor
	Imperfeições de soldagem
VARIAÇÃO DA TENSÃO DA REDE	Proteção do circuito contra transientes
	Margens de projeto do circuito
	Dissipação de potência
	Regulação de saída
CICLAGEM DE POTÊNCIA	Fadiga térmica
	Dissipação de potência
	Resposta inadequada de corrente a transientes

Figura 1.5 – Estresses e mecanismos primários de falhas (adaptada de [2]).

O Instituto de Ciências Ambientais e Tecnologia (IEST - *Institute of Environmental Sciences and Technology*), publicou o seguinte gráfico de efetividade de estresses ambientais, o qual é amplamente aceito [5][17]

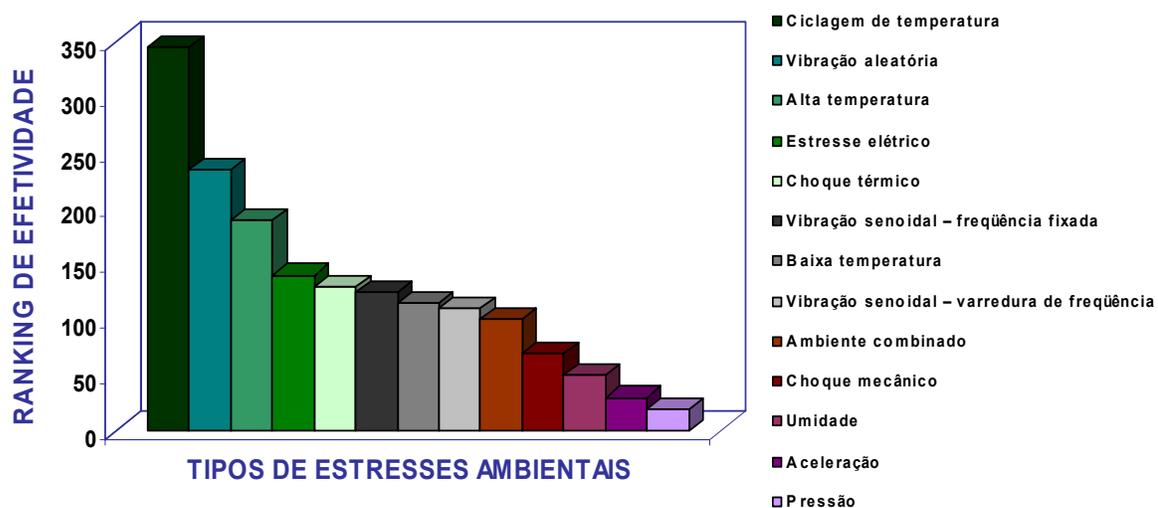


Figura 1.6 – Ranking de efetividade dos estresses [5][17].

No gráfico acima se pode observar que entre os cinco estresses considerados mais efetivos encontram-se três categorias de estresse térmico, dos quais a ciclagem térmica e alta temperatura são os mais expressivos. Por esta razão e pelo fato de que o estresse térmico é o mais amplamente usado no ambiente industrial, o foco desta dissertação será voltado aos ensaios de estresse térmico fornecendo maiores detalhes nas duas modalidades referidas: ciclagem térmica e alta temperatura.

1.3. A Proposta deste Trabalho

Um estudo realizado no estado de Santa Catarina [18], revelou que aproximadamente 70% das empresas dessa região, que possuem eletrônica em seus produtos, são de micro e pequeno porte. A pesquisa fornece também informações que indicam algumas deficiências na garantia da qualidade destas empresas. Algumas são citadas abaixo:

- Aproximadamente 70 % das micro e pequenas empresas pesquisadas terceirizam suas montagens de placas de circuito impresso (PCI), ou pelo menos uma parte dela, tendo portanto, pouco ou nenhum controle sobre as variações de processo, as quais podem prejudicar a qualidade do produto. Isto torna-se preocupante, principalmente em um

cenário no qual a escolha dos prestadores de serviço de montagem de placas, normalmente, é priorizada pelo custo.

- O controle sobre a qualidade da matéria prima é praticamente inexistente. A influência das micro e pequenas empresas e seu poder de barganha com os fornecedores é mínimo, já que a sua representatividade é muito pequena para os fornecedores de componentes.
- Em geral, as micro e pequenas empresas praticam baixo investimento em pesquisa e desenvolvimento, e possuem uma característica de desenvolvimento de produtos não sistematizado. Isto desfavorece o processo de decisão durante o desenvolvimento, o tempo de desenvolvimento e o crescimento rápido da maturidade do produto através da realimentação de dados de experiências anteriores.

Essas deficiências geram oportunidades de ocorrência de falhas e portanto afetam a confiabilidade dos produtos. Assim, os ensaios de estresses ambientais podem ser pertinentes para essas empresas, por serem comprovadamente eficazes na melhoria da confiabilidade de produtos eletrônicos.

Um outro aspecto observado é que, das micro e pequenas empresas que participaram da pesquisa, 75% disseram realizar ensaios de confiabilidade na própria empresa, inclusive como parte do seu processo de desenvolvimento. Porém, as respostas a respeito de quais ensaios de confiabilidade são utilizados, foram vagas ou giraram em torno dos ensaios de burn-in, ou seja, manter o produto ligado, durante um período determinado, em um ambiente com temperatura acima da temperatura ambiente. Foi constatado também que a grande maioria destas empresas desconhece as diferentes técnicas de ensaio existentes, bem como as tecnologias envolvidas. Os ensaios normalmente são definidos e projetados de forma empírica, sem saber se são apropriados para a sua realidade; se este é o tipo de estresse que o seu produto necessita; se o ensaio está sendo executado da forma correta e, muito menos, se está sendo eficiente. Quase 100% das empresas não possuem dados sobre falhas, tanto de campo como internas, os quais trazem informações básicas para o planejamento consistente de tais ensaios. De fato, os ensaios, quando aplicados, são especificados com base em observações do que é feito em outras empresas, desconsiderando que cada produto e cada processo produtivo possuem comportamentos distintos e, portanto, resultam em diferentes características de vida do produto.

Em virtude desse cenário, esta dissertação foi desenvolvida com o objetivo geral de auxiliar empresas que estejam iniciando na aplicação de ensaios de estresse térmico, para a melhoria e/ou garantia da confiabilidade da eletrônica dos seus produtos, no planejamento adequado destes ensaios.

Os objetivos específicos são :

- Apresentar a base teórica para o entendimento da física envolvida na aceleração de falhas por estresse térmico e uma noção dos conceitos da confiabilidade, que é o contexto em que esses ensaios estão inseridos.
- Esclarecer as ambigüidades existentes na literatura e no ambiente industrial, a respeito das diferentes técnicas de ensaio existentes, ressaltando as particularidades de cada uma e os pontos em comum.
- Prover um modelo para orientar o planejamento dos ensaios, contemplando os aspectos principais que devem ser considerados para um planejamento adequado.
- Fornecer um conjunto de parâmetros iniciais de ensaio, que possam servir como ponto de partida para a realização dos ensaios no nível de unidade, ou seja, produto final.

Com base nesses objetivos, o capítulo 1 apresenta, de forma superficial, os conceitos gerais da confiabilidade com o intuito de favorecer a compreensão do contexto em que as técnicas de ensaios de estresse térmicos utilizadas na busca da melhoria da confiabilidade estão inseridas. Esses conceitos fornecem a base para uma avaliação quantitativa da confiabilidade, apesar de este não ser o foco do trabalho.

O capítulo 2 apresenta o comportamento de vida característico dos produtos eletrônicos e traz a base necessária para estabelecer uma relação entre aplicação de estresses térmicos e a vida dos produtos.

No capítulo 3 é feita uma apresentação de diferentes técnicas de utilização de estresses para a melhoria da confiabilidade, de modo a enfatizar diferenças e semelhanças através de suas definições, objetivos e modos de utilização.

No capítulo 4 são discutidos pontos relevantes do planejamento e implementação dos ensaios de estresse para a melhoria da confiabilidade em geral, convergindo para recomendações relacionadas à aplicação de estresses térmicos.

Finalmente, no capítulo 5, são feitas considerações de fechamento sobre a dissertação, o modelo de planejamento proposto e algumas recomendações para trabalhos futuros.

Cabe salientar que, embora traduzidos, alguns termos serão mantidos em inglês ao longo da dissertação em virtude de sua ampla utilização no ambiente industrial. Além desta razão, alguns termos quando traduzidos perdem a sua familiaridade ou ligação direta com o seu significado prático.

Capítulo 2

Comportamento de Vida de Produtos Eletrônicos e a Aceleração por Estresse

Uma análise tradicional de dados de vida de um produto envolve analisar dados de tempo para falha, obtidos sob condições de operação, com o intuito de quantificar as suas características de vida. Em muitas situações, tais dados de vida são muito difíceis, se não impossíveis, de se obter. As razões para essa dificuldade podem incluir o tempo de vida longo dos produtos; o período de tempo curto entre projeto e colocação do produto no mercado e o desafio de testar produtos que são usados de forma contínua sob condições normais [15].

Dadas essas dificuldades e a necessidade de observar as falhas dos produtos para melhor entender seus modos de falha e características de vida, tem sido feito um esforço para encontrar meios de fazer com que esses produtos falhem mais rapidamente do que sob condições de uso normal, em outras palavras, acelerar as falhas. Essa aceleração pode ser feita de duas formas: aceleração pelo aumento da taxa de uso e aceleração pelo aumento do fator de estresse. O primeiro é um método mais comum e simples de ser aplicado, porém para produtos de uso intenso ou contínuo ele é impraticável. Então, a aplicação de estresses mais elevados que as condições normais de uso, a fim de acelerar a ocorrência da falha, é a única forma viável encontrada até o momento [15].

Entretanto, em análises de dados de vida, a chave é determinar através do uso de distribuições estatísticas, uma distribuição de vida que descreva o tempo para falha de um produto sob condições normais de operação. Ou seja, deseja-se determinar a função densidade de probabilidade ou *pdf* do tempo para falha sob as condições de uso. Uma vez que a *pdf* seja obtida outros resultados de confiabilidade podem ser facilmente determinados, como por exemplo: percentual de falhas sob garantia, período de degradação e tempo médio entre falhas (MTBF) [15].

Para alcançar esses resultados, se faz necessária a utilização de modelos que permitam fazer uma extrapolação dos dados coletados na condição acelerada para chegar a uma estimativa das características de vida do produto sob condições normais de uso. Estes modelos podem variar desde uma situação trivial, com ampla base de dados, aplicação de estresses simples e constantes, distribuições de vida bem conhecida, até uma tarefa quase impossível, com modelos altamente complexos [19]. Na maioria dos casos em que se busca analisar dados de vida, utiliza-se estresse térmico e constante devido à associação da sua capacidade de precipitar falhas e simplicidade de aplicação e análise.

Para um melhor entendimento do processo de análise envolvido serão apresentados neste capítulo, algumas distribuições de vida conhecidas e a relação utilizada para extrapolar os dados quando o estresse aplicado é térmico e constante.

2.1. Comportamento Característico de Vida

Há muito tempo, engenheiros de confiabilidade têm observado um comportamento decrescente da taxa de falha de diversos tipos de produtos durante o período inicial da sua vida de operação, antes de atingir um nível baixo e estabilizado. Isto tem origem no início dos anos 50, quando a primeira curva da banheira foi desenvolvida por Clifford M. Ryerson com base em dados reais de campo e fábrica. A figura 2.1 mostra uma típica curva da banheira que é composta de três períodos de falhas [6].

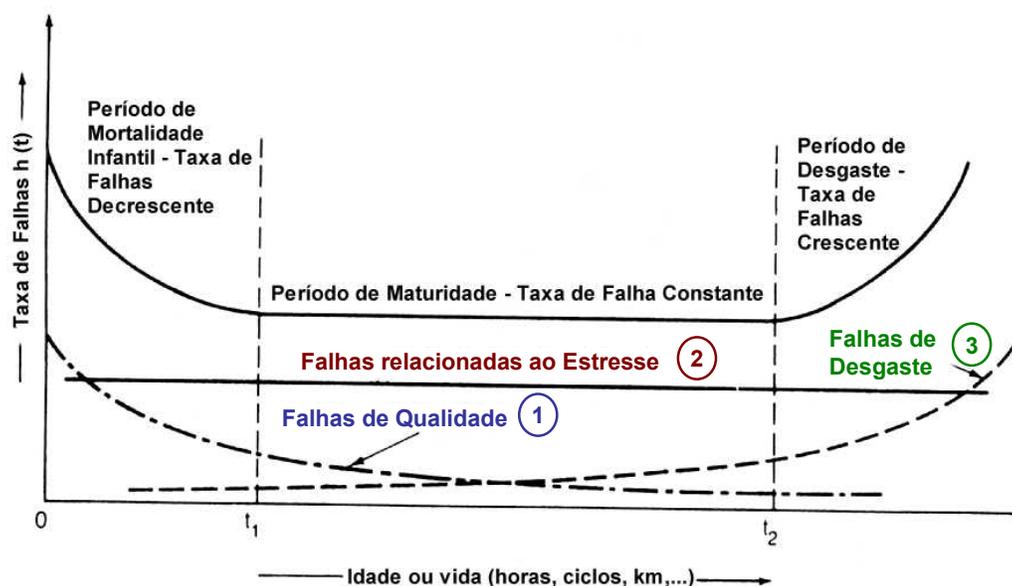


Figura 2.1 – Diferentes taxas de falha ao longo da vida útil do produto eletrônico [6].

A primeira parte da curva, conhecida como período de mortalidade infantil, tipicamente apresenta uma taxa de falha decrescente. Os produtos com funcionamento marginal geralmente falham durante este período. A falha prematura pode ser causada por técnicas ineficientes de fabricação, trabalhos manuais ruins e controle de qualidade pobre, gerando, por exemplo, juntas de solda ruins, conexões mal feitas, sujeira ou contaminação nas superfícies ou nos materiais. Caso a taxa de falha seja alta deve-se realizar algum tipo de *screening* [6].

A porção longa e razoavelmente plana da curva de taxa de falha é chamada de período de maturidade. Durante este período, falhas parecem acontecer de forma aleatória em uma taxa aproximadamente constante que não aparenta depender de quanto tempo o produto tenha operado. Estas falhas podem ser causadas pela interferência, ou sobreposição, da resistência projetada e o estresse experimentado durante o funcionamento (figuras 1.2 e 1.3), devido a margens ou fatores de segurança insuficientes, ocorrência de cargas aleatórias maiores que o esperado, ocorrência de resistência aleatória menor que o esperado [6].

A parte final da curva, na qual a taxa de falha cresce com o tempo de operação, é conhecida como o período de desgaste. Durante este período, falhas de degradação acontecem em um ritmo continuamente crescente. Falhas de desgaste são causadas pela deterioração inerente da resistência devido a uma série de processos físicos e químicos, como envelhecimento, corrosão e oxidação [6]. Manutenção preventiva e reposições podem melhorar a confiabilidade operacional de produtos compostos de módulos ou partes intercambiáveis acessíveis [16].

A curva da banheira não descreve a taxa de falha de um único item, mas sim, a taxa de falha relativa a uma população inteira de determinado produto ao longo do tempo. Algumas unidades individuais falharão relativamente cedo, apresentando falhas de mortalidade infantil; outras falharão durante o período relativamente longo, chamado vida normal e ainda há aquelas que permanecerão até o período de desgaste [10]. Espera-se que essas últimas sejam maioria. Vale acrescentar que para componentes eletrônicos o período de desgaste pode ser tão distante ao ponto de ser desconsiderado e portanto este último período não é bem caracterizado.

Ainda observando a figura 2.1 pode-se perceber a decomposição da curva da banheira que vem a ser uma soma de três distribuições de falhas sobrepostas. O período de mortalidade infantil é formado por (1) uma taxa de falhas de qualidade alta e decrescente, (2) uma taxa constante de falhas relacionadas a estresses e (3) uma taxa desprezível de falhas de desgaste. O período de vida útil, ou de maturidade é caracterizado por (1) uma taxa de falhas de qualidade baixa e

decrecente, (2) uma taxa constante de falhas relacionadas a estresses e (3) uma taxa de falhas de desgaste baixa mas crescente. A combinação destas falhas resulta em uma taxa de falhas razoavelmente constante, porque as características decrescente das falhas de qualidade e a crescente das falhas de desgaste neste período tendem a compensar uma à outra e ainda as falhas relacionadas a estresse apresentam uma taxa alta em relação às outras duas e portanto torna-se predominante. O período de desgaste é composto por (1) uma taxa muito pequena de falhas de qualidade, (2) uma taxa constante de falhas relacionadas a estresses e (3) uma taxa de falhas de desgaste inicialmente baixa mas rapidamente crescente [6].

Para representar matematicamente o comportamento da curva da banheira, a utilização da distribuição Weibull é adequada. Esta e outras distribuições, comumente usadas para representar o comportamento de vida de produtos eletrônicos serão apresentadas na seção seguinte.

2.2. Distribuições de Vida

O primeiro passo para realizar uma análise de ensaio de vida acelerado é escolher uma distribuição de vida apropriada, ou seja, uma distribuição que represente adequadamente o comportamento de tempo para falha de determinado produto. A distribuição de vida pode ser qualquer uma, mas as mais comumente usadas são a exponencial, a lognormal e a distribuição Weibull de dois parâmetros. Apesar de raramente ser apropriada, a distribuição exponencial é muito utilizada por sua simplicidade [15]. As distribuições Weibull e lognormal, que requerem mais cálculos, são mais apropriadas na maioria dos casos práticos.

2.2.1. Weibull de dois parâmetros

A distribuição Weibull é uma das distribuições de vida mais frequentemente usadas em análises de confiabilidade, devido a sua versatilidade de alteração de forma. A função densidade de probabilidade relacionada pode ser descrita da seguinte forma [2][20][21]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]}, \quad t > 0 \quad (2.1)$$

onde β é o parâmetro de forma e η o parâmetro de escala, sendo que os dois são positivos. O parâmetro η é também chamado de vida característica e é sempre definido como o tempo no qual a função densidade de probabilidade atinge 63.2%. Portanto, η tem sempre a mesma unidade que t como, horas, meses, ciclos. Entretanto, β é um parâmetro adimensional, usualmente na faixa de

0.5 a 5. Dependendo do valor de β , a distribuição Weibull pode tomar características de outros tipos de distribuição. Então, pode-se dizer que β determina a forma da distribuição e η determina o tempo com que uma determinada probabilidade é alcançada. Estes dois efeitos podem ser observados nas figuras 2.2a e 2.2b respectivamente [2].

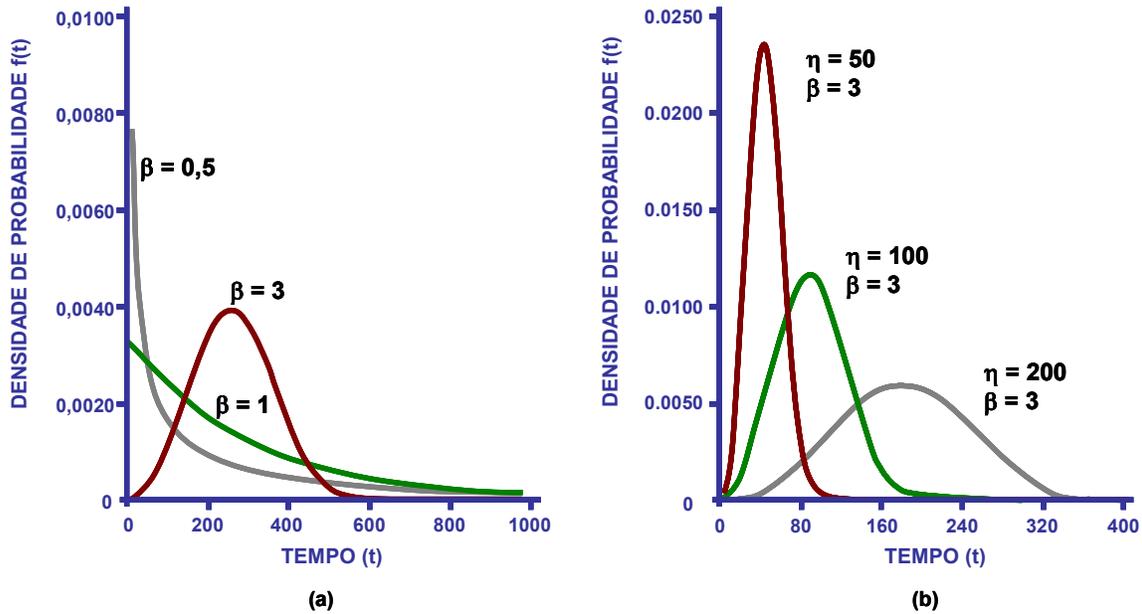


Figura 2.2 – (a) Efeito do parâmetro de forma β na função densidade de probabilidade Weibull
 (b) Efeito do parâmetro de escala η na função densidade de probabilidade Weibull [20].

Como visto no capítulo 1 a equação que descreve a confiabilidade $R(t)$, é determinada pelo complemento da função distribuição de probabilidade acumulada $1-F(t)$, gerada a partir da função densidade de probabilidade $f(t)$. As equações da distribuição de probabilidade acumulada e da confiabilidade para a distribuição Weibull são apresentadas abaixo [2][20][21]:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad t > 0 \tag{2.2}$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad t > 0 \tag{2.3}$$

Uma outra função importante é a da taxa de falha instantânea $h(t)$ a qual é representada pela equação 2.4 para a distribuição Weibull.

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}, \quad t > 0 \tag{2.4}$$

Ela é uma função com a propriedade de descrever a taxa na qual os itens de uma população, que tenham sobrevivido até um tempo t , irão falhar [2][20][21]. Abaixo pode ser vista a representação gráfica da função para diferentes valores de β (fig. 2.3) [21]:

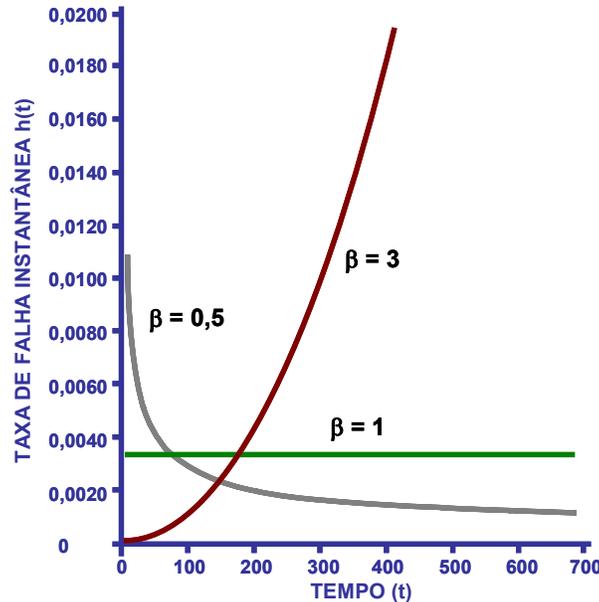


Figura 2.3 – Curvas de taxa de falha instantânea para diferentes valores do parâmetro β [20].

Em uma análise rápida da figura 2.3, verifica-se que, quando o parâmetro de forma β é menor que 1, a taxa de falha para a distribuição Weibull é decrescente e pode ser usada pra modelar o período de mortalidade infantil, quando β é igual a um, a distribuição Weibull comporta-se como a distribuição exponencial assumindo uma taxa de falhas constante, e quando β é maior que 1, a taxa de falha é crescente e portanto, esse é um bom modelo para o período de desgaste. Como se pode ver, a distribuição Weibull pode representar muito bem o comportamento da curva da banheira, explicando a sua ampla utilização [2]. É importante ressaltar que para isto é necessário a utilização de três curvas Weibull.

Uma medida que é freqüentemente usada como um indicador indireto da confiabilidade é o denominado “tempo médio para falha” (MTTF), que é o valor médio ou esperado da variável aleatória tempo para falha. Um outro termo usado para este conceito é “tempo médio entre falhas” (MTBF), que é a nomenclatura usual para produtos reparáveis [2]. O MTBF não deve ser confundido com a vida do produto. Enquanto a vida do produto expressa o período para o qual cada produto é projetado para funcionar, o MTBF representa o tempo médio entre a ocorrência de falhas consecutivas em produtos de uma população, os quais foram projetados para uma vida específica [2].

O MTBF para a distribuição Weibull pode ser determinado pela equação 2.5:

$$\text{MTBF} = \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (2.5)$$

onde $\Gamma(\cdot)$ é a função gamma. Informações sobre a utilização desta função podem ser encontradas nas referências [22] e [23].

2.2.2. Exponencial

A distribuição exponencial é um bom modelo para a vida de produtos complexos que tenham um grande número de componentes. Matematicamente, ela é razoavelmente simples de ser aplicada, o que leva, às vezes, ao uso em situações não apropriadas. Ela pode ser vista como um caso particular da distribuição Weibull, onde o parâmetro de forma β é igual a 1 e η é igual a $1/\lambda$. A função densidade de probabilidade exponencial pode ser expressa pela equação 2.6 e o seu comportamento visualizado na figura 2.4 [2][20][21]:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t > 0 \quad (2.6)$$

onde λ é o parâmetro de escala e a medida que ele diminui, a distribuição é esticada para a direita, e quando ele aumenta, a distribuição é empurrada em direção à origem. Isto pode ser visto na figura 2.4 [20].

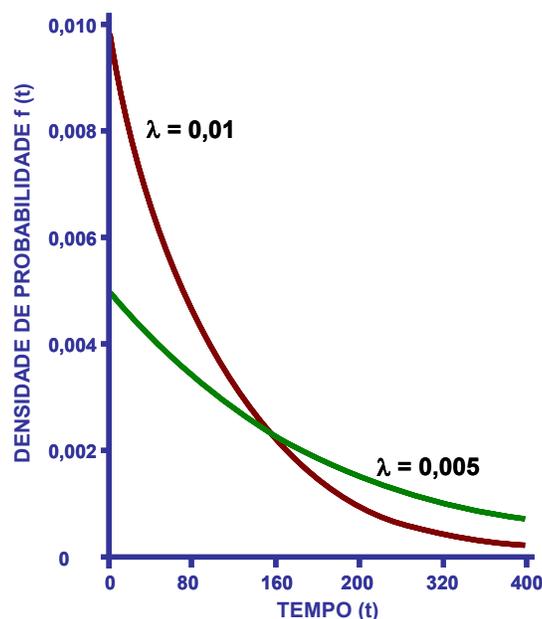


Figura 2.4 – Efeito do parâmetro λ na função distribuição de probabilidade exponencial [20].

As equações da distribuição de probabilidade acumulada, da confiabilidade, e da taxa de falha, obtidas a partir da equação 2.6 podem ser vistas a seguir [2][20][21].

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t > 0 \quad (2.7)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad t > 0 \quad (2.8)$$

$$h(t) = \lambda, \quad t > 0 \quad (2.9)$$

Como a distribuição exponencial tem uma taxa de falhas constante, é adequada para a vida útil de muitos produtos após o término do período de mortalidade infantil.

Na distribuição exponencial o MTBF é definido como o inverso da taxa de falha como mostra a equação 2.10:

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.10)$$

2.2.3. Lognormal

A distribuição lognormal, assim como a Weibull, é um modelo flexível que pode ajustar-se a muitos tipos de dados de falhas. É uma distribuição dita “assimétrica” que pode ser usada para modelar situações nas quais grandes ocorrências de falhas estão concentradas na cauda inicial da faixa de distribuição. A função densidade de probabilidade relacionada pode ser descrita da seguinte forma [2][20][21]:

$$f(t) = \left[(2\pi)^{1/2} t \sigma_{T'} \right]^{-1} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T' - \bar{T}'}{\sigma_{T'}} \right)^2}, \quad t > 0 \quad (2.11)$$

onde, T' é o logaritmo natural do tempo para falha ($T' = \ln(t)$), \bar{T}' é a média do logaritmo natural dos tempos para falha e $\sigma_{T'}$ é o desvio padrão do logaritmo natural dos tempos para falha e deve ser positivo. Os parâmetros \bar{T}' e $\sigma_{T'}$ não são “tempos” como t , eles são variáveis dimensionais. O valor de $\sigma_{T'}$ determina o formato da distribuição, sendo portanto o parâmetro de forma, e o valor de \bar{T}' determina o ponto da distribuição em que 50 por cento de probabilidade é acumulado.

Nas figuras 2.5a e 2.5b pode-se ver o efeito dos parâmetros $\sigma_{T'}$ e \bar{T}' na função distribuição de falha [2][20][21].

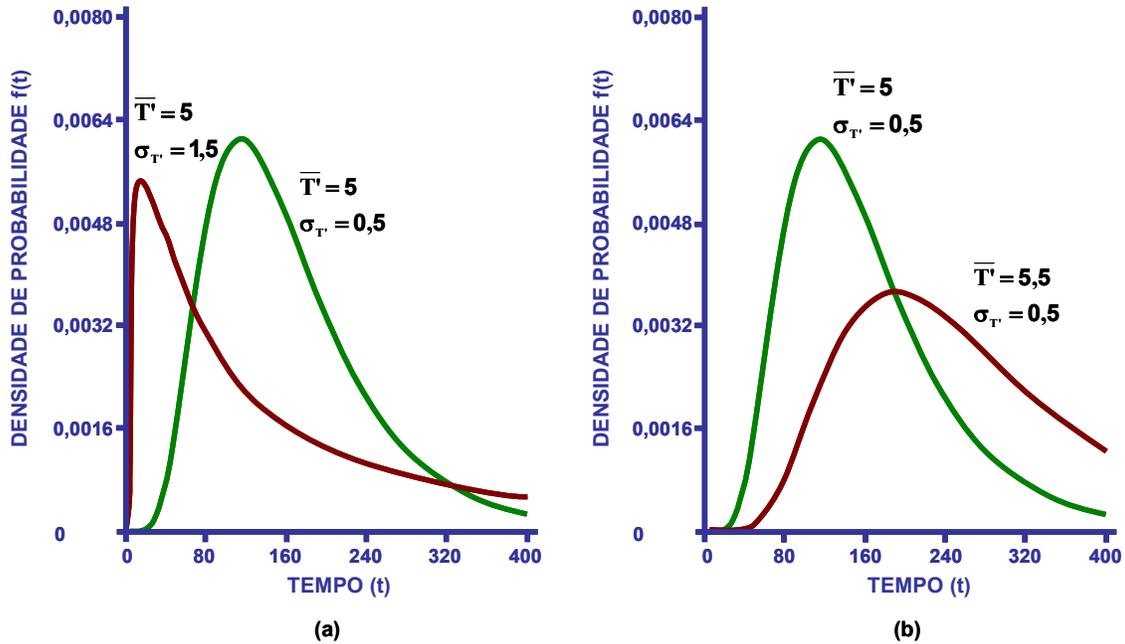


Figura 2.5 – (a) Efeito do parâmetro $\sigma_{T'}$ na função densidade de probabilidade Lognormal (b) Efeito do parâmetro \bar{T}' na função densidade de probabilidade Lognormal [20].

As equações da distribuição de probabilidade acumulada, da confiabilidade e da taxa de falha, obtidas a partir da equação 2.11 podem ser vistas a seguir [2][20][21].

$$F(t) = \Phi \left[\frac{T' - \bar{T}'}{\sigma_{T'}} \right], \quad t > 0 \quad (2.12)$$

$$R(t) = 1 - \Phi \left[\frac{T' - \bar{T}'}{\sigma_{T'}} \right], \quad t > 0 \quad (2.13)$$

$$h(t) = \phi \left[\frac{(T' - \bar{T}') / \sigma_{T'}}{t \sigma_{T'} R(t)} \right], \quad t > 0 \quad (2.14)$$

onde $\Phi (Z)$ é a função distribuição acumulada e $\phi (Z)$ é a função densidade de probabilidade para a variável normal padrão Z . Seus valores podem ser encontrados em tabelas da distribuição padronizada normal padrão [2].

O MTBF da distribuição lognormal pode ser calculado pela equação 2.15:

$$\text{MTBF} = e^{\left(\bar{T} + \frac{\sigma_T^2}{2}\right)} \quad (2.15)$$

Alguns autores, como por exemplo, Petersen e Jensen [9], afirmam que a distribuição lognormal de tempo para falha, apesar da sua complexidade matemática, apresenta um bom ajuste aos dados reais. E isto deve ser considerado no momento da escolha da distribuição que irá modelar o comportamento de falhas do produto.

Um outro aspecto a ser considerado é que ao descrever a distribuição de falhas de um produto, sempre que possível, deve-se procurar fazê-la de forma que somente um modo de falha por vez seja ilustrado. Isto é interessante porque o padrão de falhas de um modo de falha específico pode dar um direcionamento para qual tipo de ação corretiva pode ser tomada de forma mais lucrativa.

2.3. Relação entre Vida e Estresse

A maioria dos produtos são esperados para realizar suas funções com sucesso por períodos longos de tempo, como anos. Obviamente, para uma empresa manter-se competitiva, o tempo requerido para obter dados de tempo para falha deve ser consideravelmente menor que a vida esperada do produto. Isto leva as empresas a lançarem mão de técnicas para acelerar este processo e obter dados de tempo para falha mais rapidamente como, por exemplo, a aceleração por estresse. Este é um método capaz de acelerar falhas, independente da intensidade de uso dos produtos, através do aumento dos níveis de estresse.

A seguir serão apresentados os conceitos gerais da aceleração por estresse e o modelo que relaciona a vida do produto com o estresse térmico, para o qual esta dissertação está direcionada.

2.3.1. Aceleração por estresse

A aceleração por estresse consiste na aplicação de estresses que excedam àqueles que um produto experimentaria sob condições normais de uso. O objetivo é deslocar a curva de estresse de forma a sobrepor a curva de resistência, para simular o envelhecimento do produto. As falhas

que são destinadas a ocorrer em meses ou anos, podem ser detectadas em horas ou dias pelo aumento do estresse [24][15].

Na aceleração por estresse, uma atenção deve ser dada ao carregamento de estresse. Diferentes tipos de carregamentos podem ser considerados e a sua classificação pode ser feita de acordo com a dependência do estresse em relação ao tempo. Sob este aspecto, existem dois esquemas possíveis de carregamentos: carregamentos em que o estresse é dependente do tempo e carregamentos no qual o estresse é independente do tempo. O tratamento matemático, modelos e suposições variam de acordo com a relação entre estresse e tempo [15].

O tipo de carregamento mais comumente aplicado em ensaios acelerados com o objetivo de análise de dados de vida são os de estresse independente do tempo. Isto acontece pois os de estresse dependente do tempo, embora sejam mais eficazes em acelerar falhas, geram uma complexidade maior para o tratamento dos dados [15].

Quando o estresse é independente do tempo, o estresse aplicado a uma amostra de unidades não varia com o tempo. Este tipo de carregamento de estresse tem muitas vantagens em relação aos de estresse dependente do tempo. Especificamente:

- a maioria dos produtos são considerados operar a estresse constante em uso normal;
- é muito mais fácil realizar um ensaio de estresse constante;
- é muito mais fácil avaliar quantitativamente os dados de um ensaio de estresse constante;
- existem modelos para análises de dados bastante publicados e empiricamente verificados;
- a extrapolação dos dados de um ensaio de estresse constante é muito mais exata⁷ do que a de um ensaio de estresse dependente do tempo.

Quando o estresse é dito dependente do tempo, isso significa que o produto é sujeito a um nível de estresse que varia com o tempo. Produtos sujeitos a esse tipo de carregamento produzirão falhas mais rapidamente.

Os carregamentos de estresse dependente do tempo podem ser divididos em dois tipos: o modelo parcialmente dependente do tempo e o modelo continuamente dependente do tempo. O primeiro pode ser representado pelo carregamento em degraus e alguns variantes.

⁷ Exatidão: grau de concordância entre o resultado obtido e o valor real [25]

Isto é ilustrado na figura 2.6.

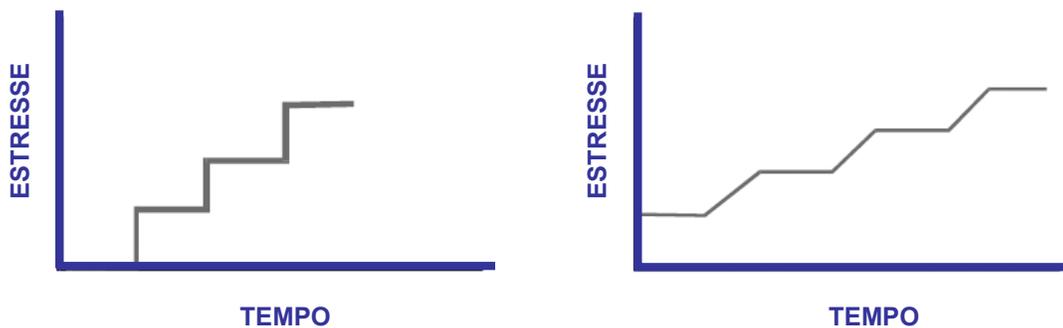


Figura 2.6 – Carregamentos parcialmente dependente do tempo [15].

Ele é chamado de parcialmente dependente, pois, o estresse é mantido constante por um período de tempo e então é levado a um nível de estresse diferente, no qual é novamente mantido constante até ser elevado novamente. O segundo modelo está relacionado aos estresses que variam continuamente com o tempo, como mostra a figura 2.7.

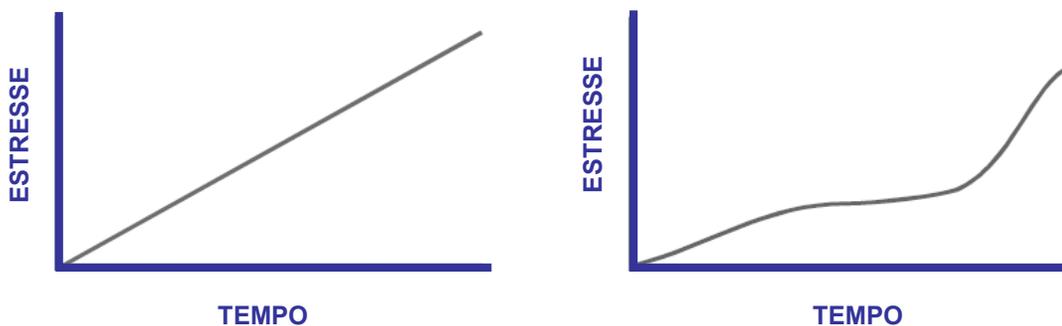


Figura 2.7 – Carregamentos continuamente dependente do tempo [15].

Este tipo de carregamento é pouco contemplado na literatura e é considerado o mais complexo. O livro de ensaios acelerados do Dr. Wayne Nelson [26] contém maiores informações sobre os carregamentos de estresse dependentes do tempo. Nesse livro ele afirma que estes modelos são muito comentados, mas pouco utilizados, e que ajustar tais modelos a dados requer recursos computacionais. Esta questão pode ser resolvida pela utilização de um programa como, por exemplo o software ALTA.PRO, recentemente lançado (4 meses) pela Reliasoft.. Ele menciona ainda que, para a estimação da confiabilidade, ensaios de estresse constante são os mais recomendados [15].

Existem duas regras básicas que devem ser observadas quando contemplando aceleração por estresse para análise de dados de vida [9][19]:

- os modos de falha observados no ambiente acelerado devem ser os mesmos que aqueles observados sob condições de uso;
- deve ser possível extrapolar os dados de um ambiente acelerado para as condições de uso, com baixa incerteza.

Pela compreensão do produto, pode-se focar em como acelerar a vida do produto e identificar fraquezas potenciais ou falhas potenciais. Para fazer isto se devem identificar quais estresses o produto pode suportar e quais estresses precipitam defeitos [1].

Conforme mencionado na seção 1.2.3, é muito importante entender que tipos específicos de defeitos são precipitados ou levados à tona por certos estresses ou combinações de estresses. Vale lembrar que cada produto é único e não existe nenhuma ferramenta ou máquina que precipitará todas as falhas relevantes para todos os produtos. Isto não é somente devido às várias dimensões e funções dos produtos, mas mais importante que isto, à física da resposta do produto a vários estímulos [1]. O projetista muitas vezes não imagina os usos estranhos e abusos ao qual o usuário vai submeter seu produto.

Na seção 1.2.3, foi visto também que o estresse mais destrutivo é o calor, pois ele acelera uma grande parte dos mecanismos de falha encontrados em componentes eletrônicos. Com o aumento da temperatura, quase sempre, a taxa de falha aumenta. A maioria das falhas aumenta exponencialmente com a temperatura, exatamente como acontece com uma reação química. Este comportamento é chamado de relação de Arrhenius e será vista a seguir [2].

2.3.2. Modelo de Arrhenius: aceleração por estresse térmico

Em 1889, um físico e químico sueco, Svante August Arrhenius (primeiro prêmio Nobel da Suécia em 1903), demonstrou empiricamente que as taxas de reações químicas aumentavam exponencialmente com a temperatura. Depois de algum tempo, observou-se que componentes eletrônicos exibiam este mesmo comportamento exponencial com relação a degradação da sua resistência pelo aumento da temperatura. A justificativa para isto é que a degradação da resistência dos componentes pelo aumento da temperatura é governada por processos químicos e físicos [2][9].

A taxa de reação da relação de Arrhenius pode ser expressa por [6][9]:

$$V(T) = Ae^{-\frac{E_a}{KT}} \tag{2.13}$$

onde,

V= taxa de reação de Arrhenius

A= constante de proporcionalidade

E_a = energia de ativação (eV)

K = Constante de Boltzman = 1,38044 X 10⁻²³ J/K ou 8,617 X 10⁻⁵ eV/K (1eV=1,60206 X 10⁻¹⁹ J)

T = Temperatura (K)

De forma geral, a relação entre vida e um estresse qualquer implica na maneira pela qual a distribuição de vida ou a característica da distribuição de vida em consideração, muda com diferentes níveis de estresse. Para estabelecer essa relação é necessário selecionar ou criar um modelo que transcreva um ponto característico ou uma característica de vida da distribuição de um nível de estresse para outro. A vida característica pode ser qualquer medida de vida como a média, mediana, etc. Essa característica de vida é expressa como uma função do estresse e dependendo da distribuição de vida assumida, a característica de vida considerada é diferente [15]. Na figura 2.8, são apresentadas as características de vida típicas de algumas distribuições de vida.

<i>Distribuição</i>	<i>Parâmetros</i>	<i>Característica de Vida</i>
Weibull	β^*, η	Parâmetro de escala (η)
Exponencial	λ	Vida média ($1/\lambda$)
Log-normal	$\bar{T}', \sigma_{T'}^*$	Mediana ($\frac{1}{T'} = e^{\bar{T}'}$)

** Usualmente assumidos constantes*

Figura 2.8 – Características de vida típicas [15].

O modelo de Arrhenius que relaciona a vida e o estresse é formulado assumindo que a vida é proporcional ao inverso da taxa de reação, ou seja, a medida que a taxa de reação aumenta a vida diminui.

A figura 2.9 mostra o comportamento da função densidade de probabilidade Weibull em diferentes níveis de temperatura, com o parâmetro de forma sendo mantido constante.

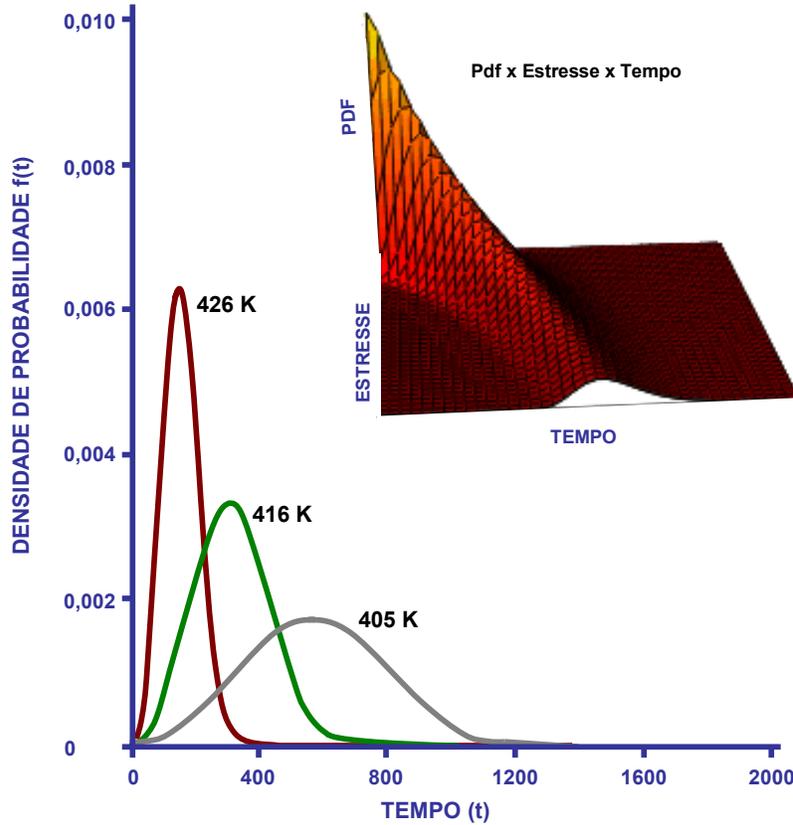


Figura 2.9 – Efeito da temperatura na função distribuição de probabilidade Weibull [20].

O modelo de Arrhenius pode ser expresso a partir da equação 2.14 [15]:

$$L(T) = C e^{\frac{E_a}{KT}} \tag{2.14}$$

onde $L(T)$ representa uma característica de vida mensurável e C é uma constante inversamente proporcional a A . Usando essa expressão, pode-se determinar um fator de aceleração A_F relacionando a característica de vida considerada na temperatura de uso com a mesma em uma temperatura em nível mais alto, ou seja, um nível acelerado, como pode ser visto na equação 2.15 [6][15]:

$$A_F = \frac{L(T_{uso})}{L(T_{acelerado})} = e^{\frac{E_a}{K} \left(\frac{1}{T_{uso}} - \frac{1}{T_{acelerado}} \right)} \tag{2.15}$$

Nos casos em que os mecanismos de falha seguem a relação de Arrhenius e a distribuição de vida é exponencial, a taxa de falha constante λ é diretamente proporcional à taxa de reação de Arrhenius e o modelo para descrever a relação vida e estresse pode ser representada pela equação 2.16 [6]:

$$\frac{1}{\lambda(T)} = C e^{\frac{E_a}{KT}} \quad (2.16)$$

O fator de aceleração pode ser expresso em termos das taxas de falha para os diferentes níveis de estresse como mostra a equação 2.17:

$$A_F = \frac{\lambda(T_{acelerado})}{\lambda(T_{uso})} = e^{\frac{E_a}{K} \left(\frac{1}{T_{uso}} - \frac{1}{T_{acelerado}} \right)} \quad (2.17)$$

2.3.3. Estimação dos parâmetros do modelo de aceleração de Arrhenius

Como visto anteriormente, o modelo de Arrhenius é muito utilizado para estimar a vida do produto no uso normal a partir de dados de vida obtidos em condições aceleradas, quando o estresse em consideração é térmico. No entanto, para que isto seja possível, alguns parâmetros que descrevem o modelo precisam ser estimados. Dentre eles, a energia de ativação E_a e a constante de proporcionalidade C .

A energia de ativação E_a é a energia necessária para uma molécula participar da reação [6] e determina a inclinação da função fator de aceleração versus temperatura. Embora existam alguns valores de E_a comumente citados para semicondutores, cada mecanismo de falha tem sua própria energia de ativação característica. Portanto, a identificação da energia de ativação propriamente dita depende de uma análise minuciosa das falhas. Em se tratando de produtos, que contêm vários componentes e conseqüentemente diferentes modos e mecanismos de falha, a estimação da energia de ativação considerando cada mecanismo de falha através de tabelas ou gráficos existentes torna-se complexa, ou até mesmo inviável [2].

Na prática, tanto E_a como a constante C são determinadas experimentalmente. Isto pode ser feito pela observação dos tempos para falha de amostras do produto em diferentes níveis de temperatura, seguida do ajuste dos dados obtidos a uma distribuição de vida e análise posterior. Desta forma, é determinada uma energia de ativação para o produto, que em geral corresponde à

energia de ativação do mecanismo de falha dominante, ao invés da energia de ativação de cada mecanismo de falha existente.

Os métodos disponíveis para a estimação dos parâmetros de um modelo incluem o método gráfico, o método dos mínimos quadrados, e o método da estimação da máxima verossimilhança conhecido como MLE. Maiores informações sobre os métodos podem ser encontradas nas referências [6][20][27].

No entanto, nem sempre é possível realizar o experimento acima descrito, devido a fatores econômicos ou mesmo em função da limitação de amostras disponíveis para ensaiar em diferentes níveis. Alternativamente, o que comumente se faz em grandes empresas ou laboratórios especializados, é colocar uma amostra de produtos para ensaiar em uma determinada temperatura acelerada e observar o seu comportamento de falha. Geralmente, em um produto, se observam apenas um ou dois mecanismos de falha predominantes ao fazer um ensaio de estresse. Portanto, quando a primeira falha ocorre determina-se o mecanismo de falha correspondente e se estabelece a energia de ativação para este mecanismo, a qual é atribuída ao produto [16]. Deve-se lembrar que, a determinação do mecanismo de falha e da energia de ativação correspondente exige um grande conhecimento do produto e dos processos físico-químicos que geraram a falha.

2.3.4. Determinação do fator de aceleração para uma condição específica

A determinação do fator de aceleração a partir dos parâmetros do modelo de aceleração de Arrhenius, embora exija cálculos que podem ser considerados complexos, permite a estimação da característica de vida sob condição de uso sem a realização de ensaio a esse nível de estresse. Ela também permite a extrapolação dos dados para outras temperaturas. Contudo, algumas referências, como [2][28], propõe um modo simplificado para determinar, a partir de um ensaio, um fator de aceleração médio para uma condição específica como, por exemplo, o fator de aceleração entre a condição de uso (T_{uso}) e uma condição acelerada ($T_{acelerado}$).

Este fator de aceleração é dito médio em função de ele não ser determinado para um mecanismo de falha específico, mas sim a partir da combinação de todas as falhas resultantes do ensaio. Nem todo mecanismo de falha é acelerado pelo mesmo fator para um determinado estresse. Segundo a referência [2], se existem dados suficientes sobre cada mecanismo de falha (um mínimo de cinco falhas em cada nível de estresse), então, os fatores de aceleração de cada

mecanismo podem ser estimados. Porém, em geral, as amostras para ensaio são pequenas, portanto, é difícil verificar ocorrências suficientes para cada mecanismo de falha e um fator médio para todo o produto é geralmente calculado. No entanto, o uso de um único fator de aceleração, conforme apresentado, pode resultar em uma estimativa errônea das características de vida do produto, devendo portanto, ser utilizado com cautela [2].

O modo simplificado proposto implica realizar ensaios em amostras do produto em níveis de estresse diferentes, o primeiro sob condição normal de uso (T_{uso}) e outro sob condição de estresse elevada ($T_{acelerado}$) e estabelecer uma relação entre as duas situações. Ou seja, este método é uma solução para uma condição específica, que não permite a extrapolação de dados para outras condições ambientais [2].

Como se sabe, quando estresses elevados são usados para avaliar a confiabilidade de um produto, a taxa de falha está sendo acelerada ou o tempo comprimido. Portanto, a relação entre as duas situações pode ser estabelecida através da razão entre os tempos observados na condição de uso normal e na condição acelerada para um percentual de falhas definido [28]. Ou, a razão entre os percentuais de falha obtidos nas duas condições para um tempo determinado [2]. As equações 2.18 e 2.19 representam as duas possibilidades respectivamente:

$$\text{Fator de Aceleração} = \frac{t_{T_{uso}}}{t_{T_{acelerado}}} \quad (2.18)$$

$$\text{Fator de Aceleração} = \frac{\% \text{ de falhas sob } T_{uso}}{\% \text{ de falhas sob } T_{acelerado}} \quad (2.19)$$

Visto que é esperado que a vida de um produto seja mais curta em estresses elevados, esse fator deveria ser maior que 1. Se não é, pode-se concluir que as condições de estresse elevado aplicadas não aceleraram qualquer mecanismo de falha [2].

Deve-se observar que, na condição de uso a primeira falha pode demorar anos para aparecer, portanto, obter um percentual de falhas nesta condição para determinar o fator de aceleração não é prático [16]. Logo, pode-se concluir que o método anterior, com base no modelo de Arrhenius, é mais interessante e viável.

Um outro aspecto que deve ser observado é que existem conseqüências econômicas em função do número de unidades necessárias para se realizar o ensaio e o tempo de ensaio envolvido. De acordo com o que foi dito no parágrafo anterior, a porção do teste conduzida em condições de uso normal pode levar muito tempo se a vida esperada é longa. Dada a pressão no desenvolvimento de novos produtos, para encurtar o tempo de colocação no mercado, uma solução possível é ensaiar mais unidades, com o intuito de reduzir o tempo para a ocorrência de uma quantidade suficiente de falhas. No entanto, isto pode não ser praticável, pois, tipicamente o número de protótipos funcionando de um produto novo é muito limitado, e este número maior de unidades para ensaio pode simplesmente não estar disponível [2].

Todas as informações vistas neste capítulo sobre o comportamento de vida do produto, as distribuições de vida usadas para descrevê-lo, o modelo que relaciona a vida do produto com o estresse térmico e os métodos para determinação do fator de aceleração, são importantes para a compreensão do efeito que a temperatura causa na precipitação de falhas latentes, acelerando-a exponencialmente de acordo com a relação de Arrhenius e preparar o leitor para o entendimento de ensaios de vida como o ALT (*Accelerated Life Testing*), que será abordado no capítulo 3.

Capítulo 3

Técnicas de Utilização de Estresses para Melhoria da Confiabilidade

Como visto nos capítulos anteriores, a utilização de estresses para acelerar falhas é uma importante ferramenta para promover a melhoria da confiabilidade em produtos eletrônicos. Ela pode ser aplicada de diversas formas e para a obtenção de resultados distintos. Com base nisso, ao longo dos tempos, diferentes técnicas de utilização de estresses foram desenvolvidas em cima do princípio central da precipitação antecipada de defeitos latentes no produto em falhas detectáveis através da aplicação de estresses ambientais.

Estas técnicas apesar de diferentes, possuem muitas semelhanças, o que explica a grande confusão existente nas terminologias utilizadas para descrevê-las, tanto na literatura como no meio industrial. Devido à esta falta de padronização torna-se difícil a obtenção das informações necessárias para a aplicação adequada de tais técnicas.

Com o objetivo de clarificar o tema, no presente capítulo são apresentadas as técnicas discutidas em várias referências bibliográficas, de forma a evidenciar as diferenças e semelhanças, tanto nas definições propriamente ditas como na utilização das mesmas. Como ponto central para as suas definições, foram utilizadas as orientações do Centro de Análises de Confiabilidade (RAC - *Reliability Analysis Center*) [30].

3.1. Aspectos Gerais dos Ensaio de Estresse para a Melhoria da Confiabilidade

Os ensaios de estresse seguem basicamente o mesmo princípio de expor um grupo de produtos a estresses ambientais acima das condições normais de operação, fazendo com que defeitos latentes no produto sejam precipitados em falhas aparentes em um período de tempo muito

menor do que aconteceria a níveis normais de estresse [1][2][5][29].

Em contraste a muitos tipos de ensaios, os ensaios de estresse não são ensaios para verificar se o produto atende algum critério de aceitação. Ao contrário, os ensaios de estresses aqui apresentados são ensaios para falhar e não para passar [1][2][5][31].

De forma geral, os ensaios têm as finalidades de promover a melhoria da confiabilidade, garantir a confiabilidade projetada ou conhecer as características de confiabilidade do produto. A primeira diz respeito a aumentar a margem de segurança do produto pela eliminação das deficiências de projeto, e desta forma atuar no período de maturidade do produto. A segunda está relacionada à eliminação de componentes defeituosos e fraquezas de processo antes da entrega do produto ao cliente. Essas deficiências alteram a confiabilidade do produto, fazendo com que a confiabilidade de campo seja diferente da confiabilidade projetada. A eliminação destas deficiências minimiza o período de mortalidade infantil do produto. A terceira trata-se da avaliação quantitativa dos dados de vida do produto [1][15]. O processo que envolve os ensaios, em qualquer uma das três condições, consiste de duas etapas principais [24]:

- Precipitação: transformar um defeito latente ou não desenvolvido em uma falha aparente ou desenvolvida, através da aplicação de estresses acelerados.
- Detecção: uma vez que a falha seja desenvolvida, detectá-la através de testes funcionais, elétricos e inspeção visual.

Independente do objetivo principal do ensaio, os seus dados resultantes podem ser usados para promover a melhoria da confiabilidade, através das etapas a seguir [24]:

- Análise de falhas: determinar a causa raiz da falha.
- Ação corretiva: realizar mudanças no processo produtivo e/ou projeto, onde factível, para eliminar a fonte do problema.
- Verificação: verificar se a ação corretiva eliminou a causa raiz. Verificação adicional pode ser obtida pelo rastreamento dos modos de falha de campo e sua frequência.
- Documentação da experiência: registrar o que foi aprendido para construir uma base de conhecimento de projeto e manufatura para melhorar os produtos e processos futuros.

Apesar destes pontos em comum, cada técnica possui suas particularidades, as quais serão vistas na seção a seguir.

3.2. Apresentação das Técnicas

As técnicas que serão apresentadas nesta seção são muito conhecidas através de suas siglas e nomenclaturas originais em inglês, as quais estão citadas abaixo:

- *AST – Accelerated Stress Testing*
- *ALT – Accelerated Life Testing*
- *HAST – Highly Accelerated Stress Testing*
- *HALT – Highly Accelerated Life Testing*
- *HASS – Highly Accelerated Stress Screening*
- *HASA – Highly Accelerated Stress Audit*
- *ESS – Environmental Stress Screening*
- *Burn-in* ou *Steady-state Burn-in*

Basicamente, pode-se dizer que o que difere uma técnica da outra é o objetivo principal do ensaio, em consequência do qual, as técnicas, embora similares em conceito, possuem diferenças na sua implementação, como por exemplo:

- Tipo de estresse: em geral, os estresses comumente utilizados nas técnicas são aqueles vistos na seção 1.2.2 do capítulo 1, porém, alguns ensaios contemplam tipos específicos de estresse, tanto em relação à condição ambiental como ao tipo de carregamento.
- Abrangência: dependendo do objetivo do ensaio a obrigatoriedade da realização em 100% dos produtos pode existir.
- Fase do ciclo de vida do produto em que é aplicado: as técnicas podem diferir na sua aplicabilidade na fase de desenvolvimento ou produção.
- Infra-estrutura necessária: em função do objetivo, as técnicas diferem na necessidade de monitoramento contínuo e sistemas de análises de falhas.
- Níveis de estresse: normalmente a intensidade dos estresses utilizados estará fora ou próxima aos *limites de especificação* do produto [15], porém, dependendo das

características do ensaio os níveis de estresse podem atingir os *limites de projeto* ou até mesmo os *limites destrutivos*. A figura 3.1 ilustra estes limites:

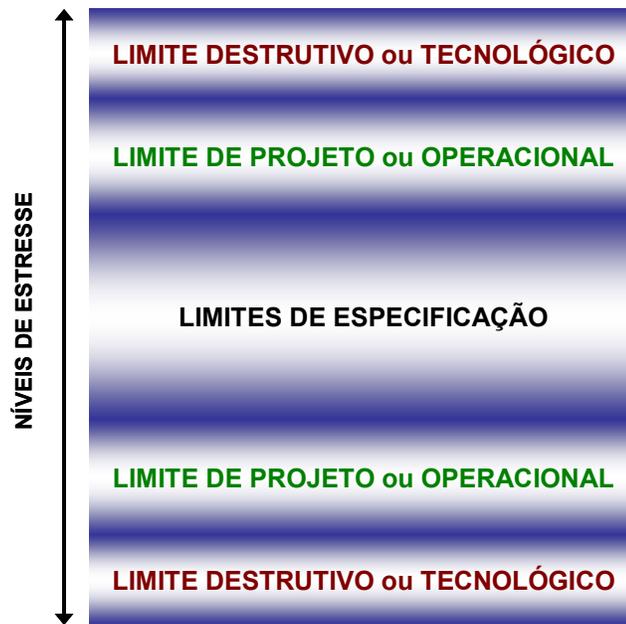


Figura 3.1 – Limites do produto (adaptada de [15][19]).

Estas diferenças serão melhor percebidas a partir da descrição das técnicas que se segue.

3.2.1. Ensaio de Estresse Acelerado (AST)

Ensaio de estresse acelerado é o processo de aplicar estresses ambientais a uma amostra do produto por um período determinado. Os níveis de estresses aplicados encontram-se acima das condições normais de operação, porém abaixo dos *limites destrutivos* do produto, os quais são definidos a partir de ensaios experimentais prévios ou dados históricos [1][30].

3.2.1.1. Objetivos

a) Principal

A proposta principal do AST é identificar e corrigir fraquezas de projeto do produto e a partir da obtenção de informações sobre modos de falha acelerar o crescimento da confiabilidade para o mesmo. A intenção é obter maturidade da confiabilidade de um produto mais cedo na fase de projeto.

A figura 3.2 ilustra este efeito [1].

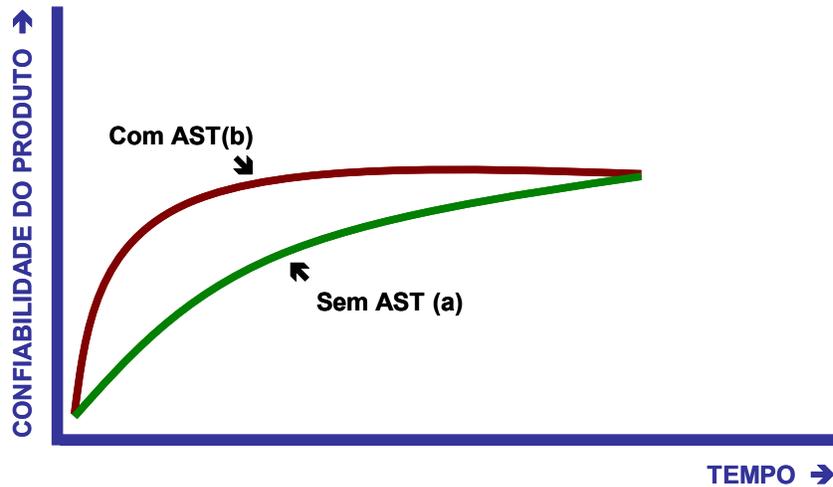


Figura 3.2 – Curvas típicas de crescimento da confiabilidade para um produto típico a) sem a utilização de AST e b) com a utilização de AST (adaptada de [1]).

b) Secundários

O ensaio pode também ser usado para determinar a probabilidade de ocorrência de falhas em um período de tempo fixo [30]. Porém, para que esta determinação seja extrapolada para a condição normal de uso, o fator de aceleração deve ser conhecido.

3.2.1.2. Modo de utilização

Existem vários modos para utilização de AST: qualificação de projeto, qualificação do processo produtivo, amostragem da produção e contínuo. Estando em ordem do mais efetivo para o menos, em aumentar a confiabilidade do produto [1].

- AST qualificação de projeto: o produto é testado perto do final do estágio de projeto para ver se ele é robusto com relação aos níveis de estresse que excedem àqueles prováveis de serem encontrados no ambiente de uso. Se deficiências são encontradas, a causa raiz é determinada e ações corretivas são tomadas para consertar as causas primárias do problema. Este é o modo mais produtivo de se fazer AST, pois os benefícios são refletidos por toda a vida do produto.
- AST qualificação do processo produtivo: uma amostra representativa do produto é sujeita ao AST durante o crescimento da produção para identificar deficiências na qualidade de

componentes ou processo produtivo. Em adição, deficiências na margem de projeto que não apareceram no AST qualificação de projeto, podem ser identificadas. A ênfase novamente é em análises de modos de falha (FMA) e ações corretivas, então deficiências no produto podem ser rapidamente eliminadas antes que os volumes de produção tornem-se grandes.

- AST amostragem de produção: para produtos requerendo confiabilidade alta é útil continuar a realizar AST em bases amostrais para monitorar o processo produtivo com relação a variações da manufatura ou qualidade dos componentes, mesmo após qualificação satisfatória ter sido adquirida. A ênfase continua a ser em determinar a causa raiz de qualquer problema encontrado e tomar ações corretivas para consertá-lo.
- AST contínuo: algumas vezes ocorre que AST é realizado com a intenção de fazer um bom FMA e corrigir qualquer problema encontrado mas, em consequência da realização insuficiente de pesquisas, problemas de qualidade persistem. Neste caso, pode ser economicamente factível a realização de AST em uma base continuada com algum grau de FMA e ações corretivas para aumentar a confiabilidade do produto. Contudo, esse modo é certamente menos desejável que os modos mencionados acima.

3.2.2. Ensaio de Vida Acelerado (ALT)

Assim como o AST, o ensaio de vida acelerado tem como base a aplicação de estresses acima das condições de operação nominais e abaixo dos *limites destrutivos*, em uma amostra do produto. A diferença entre eles é que o ALT, ao invés de ter um tempo de duração preestabelecido, é continuado até que a falha aconteça [1][30].

3.2.2.1. Objetivos

a) Principal

ALT consiste de ensaios quantitativos, nos quais o objetivo principal é determinar as características de vida do produto sob condições normais de uso e então prover informações de confiabilidade como, por exemplo, a probabilidade de falha do produto sob condições de uso, a vida média sob condições de uso e o tempo médio entre falhas (MTBF) [15][30].

Em outras palavras, a intenção do ensaio de vida é determinar não somente que uma falha

ocorrerá durante o tempo de vida esperado do produto mas, também, quando, na vida do produto, a falha aconteceria em uso normal [1].

b) Secundários

O ensaio também pode ser usado para identificar modos de falha e promover a aceleração do crescimento da confiabilidade do produto, a partir da análise dos itens falhados.

3.2.2.2. Modo de utilização

Como visto no capítulo 2, a análise de dados de ensaios de vida acelerados é feita a partir da combinação de uma distribuição de vida apropriada e um modelo que relaciona vida e estresse e possibilita a extrapolação dos dados de ensaio em uma condição acelerada para a condição normal de uso. Nesse capítulo foram descritos as principais distribuições e o modelo geralmente utilizado para estresses térmicos.

Com o intuito de explicar o processo de extrapolação envolvido no ALT, por simplicidade vamos assumir que amostras do produto tenham sido ensaiadas sob 3 níveis diferentes de algum estresse independente do tempo como, por exemplo, temperatura constante. Para realizar a análise, os tempos para falha em cada nível de estresse devem ser obtidos através do monitoramento contínuo dos produtos. Os valores obtidos devem ser ajustados à uma distribuição de vida adequada, como aquelas vistas no capítulo 2, através da respectiva função densidade de probabilidade $f(t)$ ou a sua acumulada $F(t)$. Detalhes do ajuste de dados podem ser obtidos na referência [9]. Os parâmetros da distribuição em cada nível de estresse devem ser estimados através dos métodos existentes, como por exemplo, o método gráfico ou o estimador de parâmetros MLE, sugeridos no capítulo 2. Esse processo de ajuste e determinação de parâmetros pode ser feito com o auxílio de softwares específicos para análises de dados de vida como, por exemplo, o ALTA 6 [27], o qual permite uma série de facilidades para os cálculos subsequentes.

Com os parâmetros da distribuição definidos, pode-se fazer matematicamente a regressão do modelo de aceleração para determinar seus parâmetros. Isto é feito a partir da substituição dos parâmetros da distribuição, encontrados para cada nível de estresse, na equação do modelo de aceleração específico para o estresse utilizado, neste caso o modelo de Arrhenius (eq. 2.14).

Dessa forma serão obtidas três equações, uma para cada nível de temperatura, das quais basta utilizar duas para determinar os parâmetros de aceleração [15].

Uma vez que os parâmetros da distribuição para cada nível de temperatura e os parâmetros de aceleração tenham sido estimados, a extrapolação dos dados para outras temperaturas e outras estimativas de confiabilidade podem ser diretamente obtidas usando as equações apropriadas [19]. Exemplos do processo descrito podem ser encontrados nas referências [3][15][19].

Outras técnicas de análise podem ser encontradas na referência [20] como, por exemplo, a não paramétrica que permite avaliar dados de vida sem definir uma distribuição de vida subjacente.

Um ponto importante a ser considerado no ALT é que a medida que os estresses usados em um ensaio acelerado tornam-se maiores, ou seja, se distanciam das condições normais de uso, a duração dos ensaios diminuem, porém, a incerteza na extrapolação aumenta. Intervalos de confiança devem ser definidos estabelecendo assim uma medida desta incerteza na extrapolação [15], mais detalhes podem ser vistos na referência [9][15].

Outras fontes de incerteza também influenciam na determinação da característica de vida desejada. Como por exemplo:

- Diferença entre os tipos de estresses aos quais o produto é exposto sob condições normais de uso e os que ele é exposto no ensaio. Normalmente, o ambiente de uso está sujeito a mais tipos de estresses do que são contemplados no ensaio.
- O tempo para falha medido durante o ensaio também possui as incertezas do dispositivo de medição usado. Embora, seja considerado que a influência no ajuste dos dados a uma distribuição e determinação dos seus parâmetros seja desprezível, não é conhecido ao certo o quanto se pode tolerar para essa incerteza.
- Os parâmetros da distribuição são definidos através de amostras; portanto, possuem também uma incerteza associada.
- Pode existir uma diferença, mesmo que pequena entre as condições ambientais geradas para aplicação do estresse e as condições percebidas pelo produto; além do controle e homogeneidade espacial do estresse aplicado.

Além das incertezas no ensaio existem também situações que alteram a característica do produto fazendo com que o que foi estimado possa não corresponder à realidade verificada em campo. Pode-se citar:

- variações nos processos produtivos ao longo do tempo podem modificar as características do produto que foram analisadas;
- variações na matéria-prima de lote para lote também têm influência nas características do produto.

Deve-se lembrar também que o fator de aceleração é fortemente dependente do mecanismo de falha em questão e sempre que possível deve ser analisado separadamente para cada um [2][3].

3.2.3. Ensaio de Estresse Altamente Acelerado (HAST)

Este é um ensaio de estresses múltiplos de níveis muito elevados, usualmente realizados para identificar modos e mecanismos de falha no nível de componentes individuais como micro-circuitos, com o intuito de melhorar os processos produtivos. Os níveis de estresse do ensaio aproximam-se e muitas vezes excedem os *limites de projeto* para os componentes [1][30].

A condição de estresses múltiplos é usualmente formada por ciclagem de temperatura ou temperatura constante combinada com alta umidade e possivelmente altitude. Os estresses aplicados podem ser tão agressivos como 85°C/85% UR (umidade relativa) e temperatura maior que 100°C [32]. É usualmente realizado em um recipiente pressurizado, sendo este um sistema análogo a um forno de pressão ou autoclave [1][30].

Este é um ensaio muito particular e sua breve apresentação neste trabalho tem a simples intenção de proporcionar ao leitor o conhecimento de sua existência, já que se trata de um ensaio apoiado na aplicação agressiva de umidade, o que foge do escopo do trabalho.

3.2.4. Ensaio de Vida Altamente Acelerado (HALT)

Este é um ensaio de processo destrutivo no qual o estresse aplicado é aumentado em degraus até a unidade falhar [30]. O estresse aplicado durante HALT é bastante agressivo, levando o produto muito além dos *limites operacionais* [24][32][33].

3.2.4.1. Objetivos

a) Principal

O HALT assim como o AST tem o propósito de encontrar modos de falha e corrigi-los e com isso acelerar a curva de crescimento da confiabilidade dos produtos rapidamente. Porém, o HALT tem um caráter mais investigativo em função da sua aplicação até a exaustão. A idéia é ajudar o projetista a aumentar a robustez do produto ampliando sua margem de operação, ou seja, os seus *limites operacionais e destrutivos* [24][33][34].

HALT não pode prever exatamente quando uma falha possa ocorrer na vida do produto, mas somente, como a falha acontecerá, por esta razão alguns autores dizem que ele não deveria ser denominado de ensaio de vida mas sim de ensaio de fadiga [1].

b) Secundários

HALT ajuda a identificar os estresses ou combinações de estresses, que mais efetivamente forcem fraquezas a se manifestarem como falhas detectáveis. Este conhecimento, em conjunto com os *limites destrutivos e operacionais* obtidos, provê toda informação necessária para projetar um processo de *screening* de produção efetivo, o qual pode ser conduzido em todas as unidades antes da entrega aos clientes [33][34].

3.2.4.2. Modo de utilização

Como visto, o objetivo do HALT não é apenas encontrar falhas, mas corrigir as fraquezas que as causam. Ele é usado primordialmente durante as fases iniciais do desenvolvimento do produto. Ele começa pelo aumento gradativo de um estresse ou combinação de estresses, até uma falha acontecer [32][33][34]. Este processo é chamado de *step stressing*, ou estressamento em degraus [1]. Em geral, esse processo é realizado com a unidade sob ensaio operando, com o máximo possível da sua funcionalidade especificada coberta, para aumentar a capacidade de detecção das falhas [34].

Uma vez que as falhas tenham sido precipitadas, os resultados do ensaio são analisados, a causa raiz da falha é determinada e ações corretivas são implementadas. Então, a aplicação dos estresses é continuada com o propósito de encontrar a próxima fraqueza, aumentando assim a robustez do projeto [32][33][34].

Este ciclo é continuado até o *limite tecnológico fundamental* ser alcançado e esforços adicionais em melhorar o produto terem pouco ou nenhum benefício. Esse limite tecnológico fundamental representa o *limite destrutivo* do produto [32][33]. A figura 3.3 ilustra o ciclo HALT.

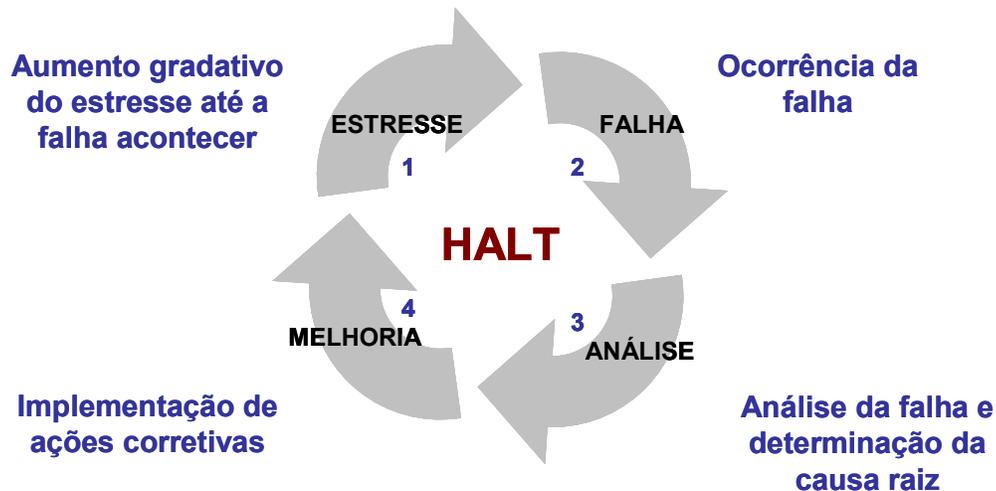


Figura 3.3 – Ciclo HALT [33].

Cabe ressaltar, que os resultados deste ensaio podem dar uma idéia errada da situação real, na medida em que as falhas observadas não representem os mesmos modos de falha das condições nominais [30]. Portanto, o conhecimento do projetista a respeito do produto é extremamente importante para uma avaliação dos dados.

Com a correta utilização do HALT a *margem de operação*⁸ do produto pode ser aumentada. Isto pode ser feito criando uma distância maior entre os *limites de especificação* e os *limites de operação* reais do produto, através de modificações de projeto implementadas durante o ensaio. Isto resulta diretamente em confiabilidade melhorada. Sem esse aumento da margem, distribuições de falha reais em torno dos limites operacionais podem cair dentro dos limites de especificação, resultando em falhas. Com uma margem de operação mais ampla gerada pelo HALT, variações do processo produtivo e efeitos ambientais de campo têm mínimo impacto no desempenho do produto e sua confiabilidade [33]. A meta é adquirir um nível máximo de margem entre os limites de operação e a especificação do produto [24].

⁸ A margem de operação pode ser entendida como o efeito operacional da margem de projeto.

A figura 3.4 ilustra a ampliação da distância entre os limites de especificação e os limites operacionais do produto.

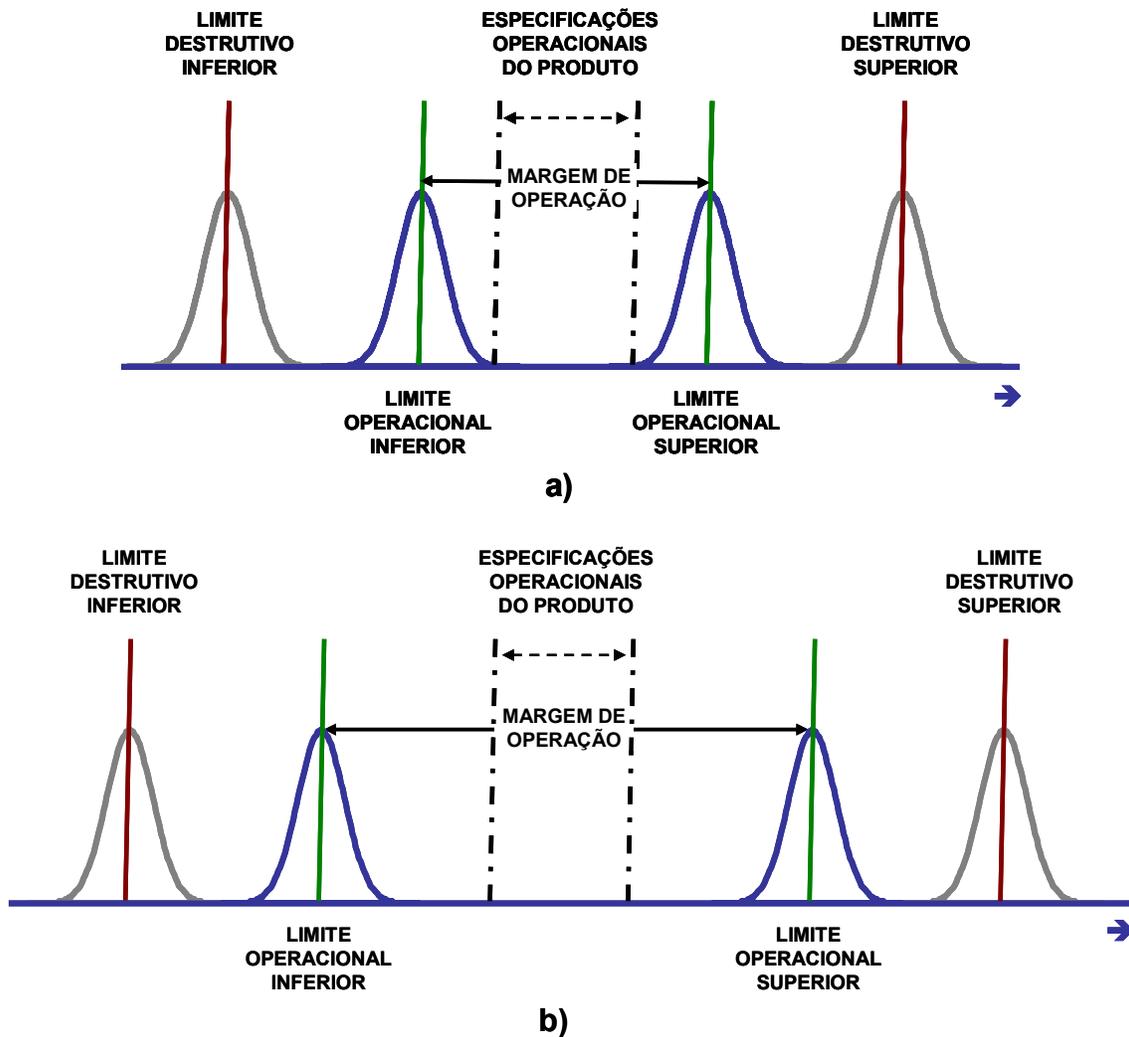


Figura 3.4– Aumento da margem de operação da situação a) antes de HALT para b) depois do HALT [33].

HALT, assim como o AST, pode ser conduzido em vários estágios ao longo do ciclo de vida do produto [33]. Esse processo pode ser realizado em itens protótipo de engenharia para melhorar a robustez do circuito na fase inicial do processo de desenvolvimento. Pode ser repetido com os protótipos de pré-produção para avaliar a unidade completamente montada [24]. Pode, ainda, ser aplicado na fase de produção para garantir que a margem de segurança não variou com o tempo e também ajudar a revalidar os processos de *screening* que serão vistos nas seções seguintes [33].

O sucesso dessa metodologia de ensaio requer que tanto a gerência como a engenharia de projeto comprometam-se a aceitar os resultados do HALT como indicadores reais de falhas de campo futuras. Aqueles que são novos no processo HALT tendem a desconfiar dos resultados porque as falhas são precipitadas sob condições que excedem muito à aplicação real [33].

3.2.5. Triagem por Estresse Altamente Acelerado (HASS)

Este ensaio é um complemento do HALT. Porém, diferentemente do HALT, o HASS é um ensaio não destrutivo. Os níveis de estresse são menores que os *limites destrutivos*. Este ensaio é rodado por um tempo ou número de ciclos fixo e é normalmente realizado em 100% das unidades. O problema com este ensaio é a possibilidade de causar destruição nas unidades devido aos altos níveis de estresse utilizados. Este ensaio também remove uma parte substancial da vida da unidade e deveria ser considerado ensaio limitador de vida e, portanto, a sua aplicabilidade em 100% das unidades deve ser cuidadosamente avaliada [30][32].

3.2.5.1. Objetivos

a) Principal

HASS é um ensaio através do qual é feita uma triagem dos produtos, com o propósito de identificar unidades defeituosas. Mais precisamente, a função principal do HASS é eliminar falhas de mortalidade infantil. O resultado chave do HASS, assim como o de qualquer *screening*, é produtos com um alto grau de garantia da confiabilidade projetada no momento da entrega ao cliente [30][33].

b) Secundários

Os defeitos latentes precipitados pelo HASS podem ser analisados e desta forma auxiliar na identificação de fraquezas do processo produtivo ou até mesmo do projeto.

3.2.5.2. Modo de utilização

No HASS, a etapa de precipitação estressa o produto além dos *limites operacionais* no esforço de forçar fraquezas a se tornar falhas detectáveis. Os estresses são então reduzidos durante a etapa de detecção, até o ponto no qual um ensaio funcional dinâmico é conduzido com a intenção de detectar as fraquezas que foram estressadas a um estado de falha.

A figura 3.5 ilustra a relação entre estas duas etapas [33].

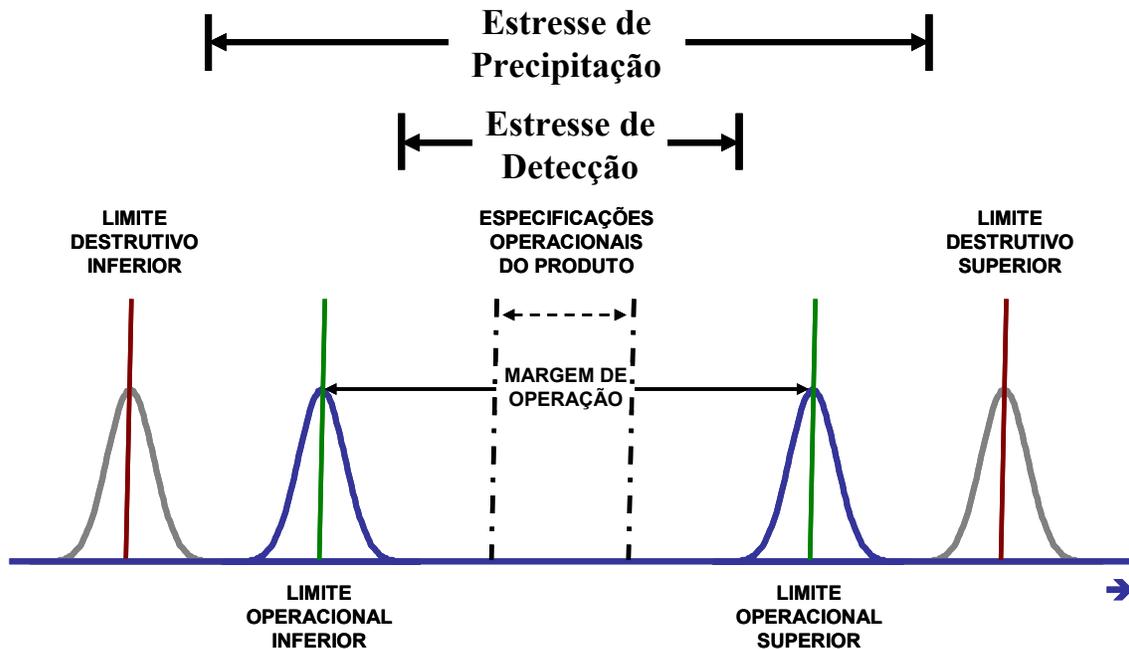


Figura 3.5– Modo de operação do HASS [33].

Conforme dito no início do item 3.2.5, HASS é um processo complementar ao ensaio HALT. Ele usa equipamentos similares, mas em um volume maior [24]. Com o intuito de não danificar as unidades, os limites de estresses para HASS são obtidos dos resultados de HALT e tipicamente incluem todos, ou alguns, dos mesmos estresses que são usados em HALT, porém, em níveis menores [33][34].

Os efeitos que HALT e HASS causam na confiabilidade do produto também são complementares. Com a adição de HALT, a taxa de falha constante do período de vida útil do produto pode ser bastante reduzida assim como a taxa de falha do período de mortalidade infantil, visto que devem ter sido feitas correções no projeto do produto e no processo produtivo. Com HASS, o período de mortalidade infantil pode ser reduzido ou eliminado efetivamente, resultando na liberação do produto para o cliente no ponto onde a confiabilidade é a maior [33].

A figura 3.6 ilustra o efeito que HALT e HASS causam na confiabilidade de campo.

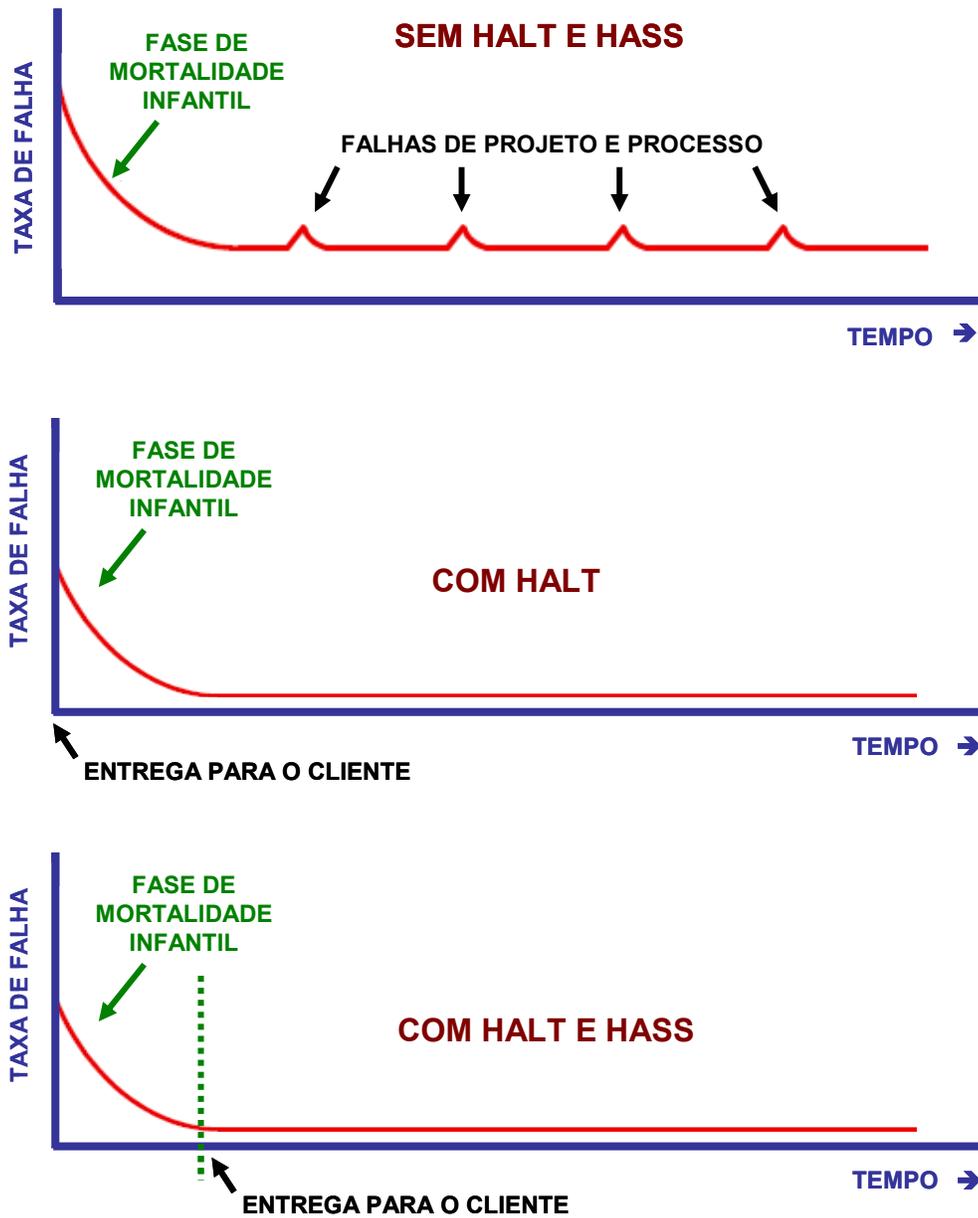


Figura 3.6– Efeito da aplicação de HALT e HASS [33].

HASS é muito mais efetivo que os métodos convencionais de *screening* como, por exemplo, o chamado burn-in que será visto na seção 3.2.8. Isso se deve à alta intensidade dos estresses utilizados. HASS é também um processo que requer muito menos tempo. A sua natureza rápida pode contribuir para a realimentação, igualmente rápida, de problemas do processo produtivo e conseqüente ação corretiva [33]. Logo, o aproveitamento de seus dados para a realização de

melhorias não deveria ser ignorado. A figura 3.7 ilustra um ciclo HASS completo, contemplando esse aspecto.

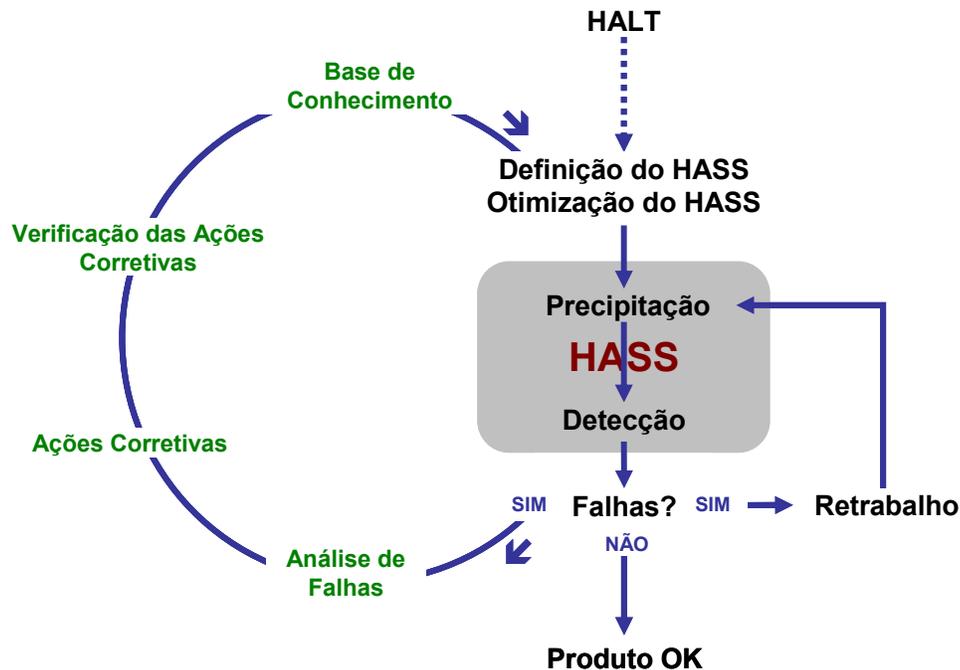


Figura 3.7– Ciclo HASS (adaptada de [33]).

Deve-se notar que, à medida que mudanças no produto ou processo produtivo são feitas, o perfil do HASS deve também ser alterado, resultando no melhoramento contínuo do processo de *screening* e otimização da confiabilidade do produto [33]. Entende-se que tanto o projeto do produto como o processo produtivo deveriam ser otimizados a tal ponto de não precisar mais de HASS [16].

3.2.6. Auditoria por Estresse Altamente Acelerado (HASA)

Este ensaio segue o mesmo conceito do HASS exceto pelo uso de amostras estatísticas da população, ao invés de 100%. Essa é uma proposta mais econômica para identificar defeitos causados por variações de processo ou de material e tomar ações para remover as suas causas [10][30][34].

3.2.7. Triagem por Estresse Ambiental (ESS)

Este é um ensaio de níveis médios de estresse. Ele é geralmente mais intenso que um ensaio convencional de burn-in, porém menos intenso que um HASS. Ciclagem térmica de produtos é de longe o estresse que mais precipita defeitos latentes seguida pela vibração randômica. Por

essa razão, a maioria dos ensaios de ESS incluem ambos, mas todos os limites de ensaio são baixos o suficiente para que danos não sejam esperados e nem a vida do produto seja muito diminuída. ESS é um processo aplicado a toda unidade que é produzida, ou seja, 100% dos produtos são sujeitos a estímulos ambientais, por um tempo predeterminado [30].

3.2.7.1. Objetivos

a) Principal

ESS é um ensaio através do qual defeitos prematuros são detectados e eliminados antes que as unidades sejam colocadas em operação [30]. É em função deste objetivo, que os processos de *screening* requerem que todos os produtos sejam expostos, pois defeitos latentes são randômicos por natureza. Ensaiar todos os produtos é a única forma de garantir que os defeitos latentes existentes, susceptíveis aos estresses aplicados, sejam precipitados antes de o produto ir a campo [5][29]. Deve ser notado que mesmo assim não é possível eliminar todos os defeitos do produto através de *screening* de estresse. Contudo, algumas partes do produto contêm defeitos latentes grosseiros e tendem a falhar prematuramente e então dominar a confiabilidade dos produtos em campo durante a vida inicial. O objetivo é remover o máximo de defeitos quanto seja tecnicamente e economicamente possível para então adquirir a confiabilidade projetada ou requerida [29]. Falhas detectadas durante ensaio na fábrica geram custos menores que falhas no campo. Além disto, algumas vezes, requisitos de segurança de produtos que devem atender certas diretrizes regulamentares fazem com que ESS seja obrigatório [32][35].

ESS é usado primariamente para expor fraquezas em materiais e processos, podendo então eliminar casos de mortalidade infantil. Dessa forma o produto pode entrar na fase de vida útil da curva da banheira no final do ensaio ESS e garantir o MTBF projetado [1][5].

É importante lembrar que processos de *screening*, por si só, não aumentam a confiabilidade de um produto, visto que a confiabilidade é uma característica inerente ao produto e é dirigida primariamente pelo projeto de produto e de processo. Porém, eles ajudam a garantir que os produtos que vão para campo tenham a confiabilidade projetada [2]. Logo, ao contrário do que muitos pensam, os processos de *screening* não devem ser considerados como substitutos, mas sim parte integrante de um programa de confiabilidade conduzido nas fases de projeto e desenvolvimento [31].

b) Secundários

O ESS pode ser usado também para se obter informações sobre falhas, as quais podem ser analisadas para a implementação de ações corretivas que melhorem a confiabilidade do produto. Os resultados de ESS podem ser usados também para estimar taxas de falha em condições de operação normal, desde que o fator de aceleração seja conhecido [32].

3.2.7.2. Modo de utilização

ESS pode ser usado de forma eficiente, apenas quando a curva da taxa de falhas versus tempo tem uma inclinação inicial decrescente, ou seja, encontra-se no período de mortalidade infantil. Se um nível inaceitável de falhas de vida inicial não está acontecendo em campo, não existe razão para estabelecer um ESS e qualquer esforço nesta direção meramente consumirá vida útil do produto sem diminuir taxa de falha no campo. O mesmo ocorre com os outros processos de *screening*. Este tipo de ensaio não terá muito efeito na taxa de falha de longo prazo do produto a menos que os estresses sejam tão altos que mesmo partes boas sejam enfraquecidas [2][35].

Qualquer processo de *screening* pode ser considerado como uma inspeção final do produto, sendo portanto **uma solução paliativa para mitigar deficiências do processo produtivo** [36]. É um passo adicional no processo produtivo que aumenta o custo do produto sem agregar valor ao mesmo. Por esta razão, a sua utilização neste sentido deve ser analisada com relação aos custos gerados pelos retornos de campo e reparos em garantia, bem como a gravidade ou não da ocorrência de falhas em campo. Um esforço para identificar as causas da variabilidade do processo e um melhor controle de seus parâmetros geralmente consegue a eliminação das falhas infantis e uma melhora da confiabilidade em campo. Isso pode e deve resultar na eliminação ou redução do processo de *screening* [35][37]. Para tecnologias que estão no “estado da arte” e onde as causas raízes não podem ser eliminadas, processos de *screening* têm se mostrado adequados [10].

Para a especificação do ESS, historicamente, duas direções básicas têm sido tomadas. Em uma delas, o comprador do produto especifica explicitamente os estresses, os níveis de estresse e os níveis de montagem em que os produtos devem ser ensaiados. Na segunda, e mais adequada, o fabricante desenvolve um programa de *screening* específico para o produto. A determinação deve ser baseada no perfil do produto, que determina o estresse máximo permissível que o produto pode absorver sem afetar sua vida útil, seus requisitos de confiabilidade e características

de falha. Essa escolha pode ser feita pela análise das funções do produto, tolerâncias e taxas de falha [5]. O custo é um direcionador primário neste ponto e a meta é selecionar a condição de ensaio mais efetiva, pelo menor custo e que utilize mínimo tempo. Limitações do produto e equipamento de ensaio disponíveis devem também ser consideradas [29][31].

O MIL-HDBK-344 [29] apresenta uma sistemática para planejamento de ESS, com base no perfil do produto, com enfoque quantitativo. Esse enfoque pode ser ilustrado pela figura 3.8:

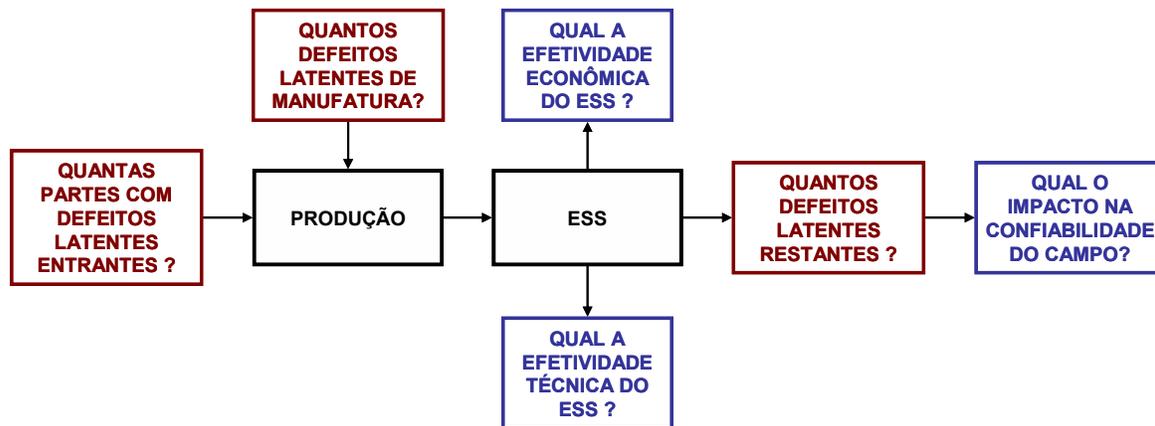


Figura 3.8– Enfoque quantitativo do ESS [29].

Como se pode observar na figura 3.8, essa sistemática requer que sejam definidos os níveis iniciais de partes com defeitos latentes, o nível de defeito introduzido durante a manufatura do produto, a efetividade das condições de ensaio, e valores razoavelmente aceitáveis para o número de defeitos latentes que permanecem e escapam para o campo. Porém, essas definições não são simples de se obter e tam pouco conhecê-las com exatidão [29].

Existem vários desconhecimentos associados com a aplicação de *screening*. Quanto efetivas são as condições de estresse aplicadas? Como a quantidade de defeitos restantes no equipamento após a entrega ao cliente impacta a confiabilidade do campo? Por exemplo, se a quantidade de falhas detectadas pelo *screening* é baixa, não se sabe se o equipamento é bom ou se o ensaio não foi efetivo. De outro lado, se a quantidade é alta não se sabe se os níveis de defeitos entrantes são altos ou se o ensaio pode estar causando falhas em produtos não defeituosos [29]. Dados de experiência coletados de programas anteriores, dados de campo, experimentos conduzidos durante a fase de desenvolvimento e o uso dos procedimentos do MIL-HDBK-344 podem auxiliar no planejamento e condução de um ESS efetivo. No entanto, mesmo que

cuidadosamente planejado, o ensaio pode produzir resultados inesperados que devem ser considerados através de modificações das condições de ensaio estabelecidas [29].

Os defeitos que podem potencialmente residir no produto e a efetividade dos estresses em precipitar os defeitos em falhas para então detectá-los não são conhecidos com exatidão. Pela comparação das estimativas planejadas de defeitos com a quantidade real encontrada, o processo de *screening* pode ser refinado e/ou, quando economicamente viável, o processo produtivo melhorado para adquirir as metas desejadas de um produto altamente confiável [29].

Com base nas informações apresentadas até o momento, pode-se concluir que um programa de *screening* viável deve ser dinâmico. Ele deve ser continuamente monitorado e pode ser modificado para garantir a sua eficiência técnica e econômica [29].

3.2.8. Burn-in ou Steady-state burn-in

Burn-in é um termo comum na indústria eletrônica. Ensaio de burn-in envolve o uso de temperatura levemente elevada e constante, geralmente com a aplicação de uma tensão DC (*direct current*) externa para estabelecer os limites de operação superiores e inferiores de um dispositivo (ou seja, é um ensaio operacional levando o produto aos limites da especificação). Uma carga elétrica pode ser aplicada, com o intuito de acelerar o processo de envelhecimento [5][30][38]. O ensaio é usualmente projetado para representar os primeiros 90 dias de operação do produto [30].

O burn-in pode ter duração fixa ou variável [16], dependendo do procedimento de ensaio adotado. Alguns deles podem ser vistos na referência [9]. De forma geral, pode-se estabelecer um tempo fixo de duração do ensaio, ou pode-se interromper o ensaio ao atingir um período sem falhas que, extrapolado as condições de uso, garanta uma confiabilidade desejada. Isso permite a adaptação às variações de taxa de falhas infantis do produto (que são naturais por tratar-se de defeitos de produção ainda não controlados pela complexidade do processo produtivo) [16].

Burn-in pode ser visto como um caso especial de ESS, no qual o estresse aplicado é temperatura constante e o tempo de aplicação é mais longo [5][6][35]. No “ESS Handbook”, produzido pela Thermotron [5], é mencionado o burn-in de alta temperatura (*high temperature burn-in*) como um tipo de ESS. Ele é o mesmo que o burn-in convencional, porém, realizado em temperaturas

significativamente mais altas. Esse é um ensaio que pode ser limitador de vida, logo, seu uso em 100% das unidades deve ser cuidadosamente avaliado [5][30].

Kececioglu, em seu livro “Burn-in” [6], faz uma distinção particular entre ESS e burn-in. Ele afirma que burn-in é conduzido primariamente no nível de componente, enquanto ESS é conduzido nos níveis de módulo, unidade e sistemas.

3.2.8.1. Objetivos

a) Principal

O objetivo do burn-in, como o de qualquer *screening*, é detectar e remover produtos fracos, da população, ou seja, produtos com dispositivos funcionando marginalmente ou defeitos resultantes de anomalias no processo produtivo, que são evidenciadas como falhas dependentes de tempo e estresse. A proposta é encontrar e eliminar falhas prematuras ou infantis antes da introdução do produto no mercado [5][9][36][39][40].

b) Secundários

Burn-in é a técnica de ensaio mais facilmente relacionada com a Lei de Arrhenius, pois seu princípio é acelerar os mecanismos de falha por temperatura constante. Logo, seus dados de falhas, se monitorados continuamente, podem ser usados para estimar características de confiabilidade do produto. No entanto, devido ao nível de estresse utilizado não ser muito alto, os tempos de ensaio necessários para verificar o comportamento de vida do produto podem ser muito longos e apenas a parte da curva correspondente a mortalidade infantil pode ser verificada durante o ensaio [37].

3.2.8.2. Modo de utilização

Burn-in é normalmente realizado em câmaras, fornos, ou simplesmente, em uma sala de aquecimento, quando não for o caso de temperaturas muito elevadas [37]. Essas estruturas devem manter os produtos em uma temperatura de teste especificada e prover acesso para conexões elétricas.

Apesar de o burn-in permitir entregar ao cliente um produto com uma confiabilidade melhor durante sua vida útil, eliminando “em casa” as falhas infantis, ele possui algumas desvantagens

como: custo e tempo de processamento adicional [37]. Por essa razão o tempo de exposição de burn-in torna-se um fator crítico no seu planejamento. Ele deve ser um compromisso entre custo e melhora obtida em confiabilidade [9][39]. Além disto, **burn-in só funciona quando os mecanismos de falha infantis tem uma energia de ativação bem maior que os mecanismos de falha considerados normais**, ou seja, aqueles relacionados ao período de vida útil do produto [36].

O tempo ótimo de burn-in pode ser estimado a partir da distribuição de vida do produto, através da qual é possível identificar o período de mortalidade infantil e o tempo necessário para eliminá-lo. Isto pode ser visto em detalhes na referência [9]. Porém, são raros os casos em que se tem conhecimento prévio do comportamento dos tempos para falha do produto. O mais freqüente é que não se tem essa informação e, para planejar um procedimento de burn-in efetivo, deve-se realizar um experimento de burn-in em uma amostra de produtos. Esse experimento inicial é feito com o intuito de se obter uma idéia do padrão de falhas do produto a partir do monitoramento contínuo do tempo para falha durante o ensaio e extrair os dados necessários para o planejamento efetivo do burn-in. Existem métodos para analisar os padrões de falha e estimar os parâmetros que os descrevem como, por exemplo, o método gráfico e o método de Bayes [9]. Com os parâmetros estimados torna-se possível a utilização dos procedimentos existentes para a realização do burn-in. Eles podem ser separados em procedimentos para produtos reparáveis e procedimentos para produtos não reparáveis. Esses procedimentos podem ser vistos em detalhes na referência [9], bem como os métodos de análise do padrão de falhas.

Uma questão que é freqüentemente levantada em conexão tanto com burn-in como com ESS, é se mesmo os itens sobreviventes serão degradados pelo estresse. A resposta a essa questão deve ser sim, mas a extensão da degradação usualmente não é severa. Mas, certamente, a questão deveria ser olhada em cada caso específico, levando em consideração toda a informação disponível a respeito de modos de falha e tempos de vida esperados.

3.3. Comparação entre as Técnicas

Na seção anterior, foi feita uma apresentação das técnicas de utilização de estresses para a melhoria da confiabilidade, na qual procurou-se destacar as suas principais características. Embora, a partir das informações relatadas, seja possível a identificação das diferenças e semelhanças entre as técnicas, parece válido, em função do volume de informações, uma apresentação mais compacta e visual dos principais aspectos.

Com o intuito de tornar mais perceptível as diferenças e semelhanças entre as técnicas, a figura 3.9 apresenta um quadro de informações determinantes para a comparação.

TÉCNICAS	OBJETIVO PRINCIPAL	ESPECIFICIDADE DE ESTRESSE	NÍVEL DE ESTRESSE	ABRANGÊNCIA	DURAÇÃO FIXA OU INDETERMINADA
AST	Identificar modos de falha	-	Médio para Alto	Amostral	Fixa
ALT	Identificar tempos para falha	-	Médio para Alto	Amostral	Indeterminada
HAST	Identificar modos de falha em componentes	Umidade e Temperatura	Alto	Amostral	Fixa
HALT	Identificar modos de falha	Degrau	Muito Alto	Amostral	Indeterminada
HASS	Screening	-	Alto	100%	Fixa
HASA	Auditoria/ Verificação	-	Alto	Amostral	Fixa
ESS	Screening	-	Médio	100%	Fixa
Burn-in	Screening	Temperatura cte.	Baixo para Médio	100%	Fixa ou Indeterminada
HT Burn-in	Identificar modos de falha	Temperatura cte.	Médio para Alto	Amostral	Fixa ou Indeterminada

Figura 3.9– Quadro comparativo das técnicas de utilização de estresse.

É importante acrescentar que as técnicas que não apresentam especificidade de estresse podem ser aplicadas com os estresses apresentados na seção 1.2.2. Apesar disto, deve ser lembrado que este trabalho se resume à aplicação de estresses térmicos.

Tão importante quanto a escolha do estresse, ou da técnica apropriada para cada situação, é o fato que qualquer técnica de ensaio, quando usada impropriamente, leva a conclusões falsas e pode ter implicações custosas [1]. Por essa razão, no capítulo 4, faz-se algumas recomendações gerais para auxiliar no planejamento da aplicação dos ensaios com enfoque na utilização de estresses térmicos.

Capítulo 4

Recomendações para a Implementação de Ensaios de Estresse Térmico

Como se pode perceber, pelos capítulos anteriores, implementar um ensaio de estresse não é uma tarefa simples. A sua aplicação envolve uma série de variáveis e tarefas que, se não forem bem planejadas, podem levar à utilização inadequada das técnicas de ensaio e conseqüentemente conduzir a resultados inconvenientes para a empresa, como altos custos e/ou ineficácia do ensaio.

Cada produto possui seu próprio conjunto de características e cada processo produtivo apresenta comportamentos distintos com relação a suas variáveis. Além disso, o cenário e as necessidades de cada empresa são particulares. Portanto, os ensaios devem ser específicos para cada situação e não é possível cobrir as suas aplicações individuais em detalhes [1][5].

Conforme a proposta apresentada no capítulo 1, esta dissertação tem o propósito de servir como orientação para empresas que estejam começando a investir em ensaios de estresse térmico para a melhoria e garantia da confiabilidade em seus produtos. Logo, através deste capítulo, se pretende fornecer bases gerais para que, com o conhecimento das técnicas existentes e da física relacionada vistas nos capítulos anteriores, o planejamento do ensaio tenha boas chances de sucesso.

4.1. Modelo Geral para o Planejamento de Ensaios de Estresse

Segundo as orientações do MIL-HDBK-344 [29], para se planejar um ensaio de estresse, as seguintes questões básicas devem ser respondidas:

- Quais os objetivos do ensaio?

- Quais são as condições de estresse a serem usadas e em qual nível de montagem devem ser aplicados para alcançar os objetivos desejados?
- Quais são os custos associados a cada alternativa possível das condições de ensaio e como o ensaio pode ser economicamente eficiente?
- Como se sabe se o ensaio está procedendo de acordo com o planejado? Que garantias podem ser dadas de que o ensaio está atingindo seus objetivos?
- Que ações corretivas devem ser tomadas para alcançar as metas desejadas se os dados de falhas indicam diferenças significativas em relação ao que era esperado?

Com base nessas questões e nos métodos específicos existentes na literatura para o planejamento de algumas técnicas como ESS, burn-in, AST e ALT, foi desenvolvido um modelo com o propósito de orientar o processo de planejamento de ensaios de estresses discutidos no capítulo 3. A figura 4.1 ilustra esse modelo.

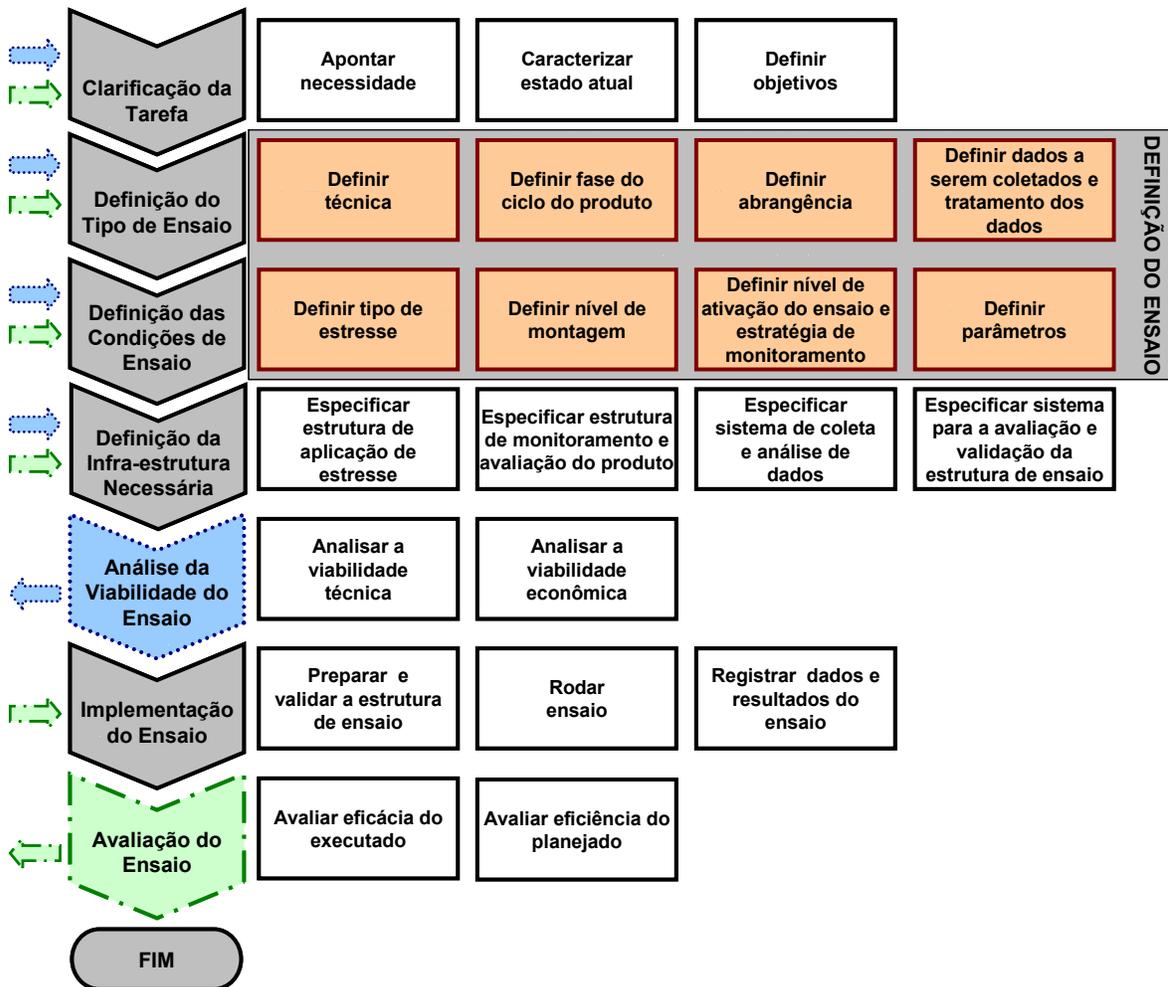


Figura 4.1 – Modelo para planejamento de ensaio de estresse

O modelo não tem a pretensão de funcionar como uma “receita de bolo”, e nem contemplar todos os detalhes que possam envolver o planejamento de ensaios de estresse, mas sim responder as dúvidas primárias referentes ao tema. Ele procura reunir, de forma macro, os principais aspectos a serem observados na busca de uma solução ao problema de planejar um ensaio de estresse.

Como pode ser observado na figura 4.1, o modelo possui um fluxo principal composto por sete etapas, as quais são desdobradas em atividades de planejamento e implementação do ensaio. Pode-se observar também que atribuiu-se ao modelo um fluxo cíclico, o qual é evidenciado através das setas que partem dos pontos principais de avaliação para as demais etapas. Estas setas simbolizam caminhos de retorno que devem ser utilizados sempre que alguma modificação no planejamento for necessária. Vale lembrar que cada empresa possuirá um cenário diferente, portanto, variáveis diferentes a serem consideradas em cada etapa e uma seqüência própria de obtenção das informações.

4.2. Detalhamento das Etapas do Modelo

O detalhamento das etapas do modelo que será feito nesta seção vem para elucidar pontos importantes a serem considerados durante o planejamento e execução dos ensaios em cada etapa, com maior ênfase nas tarefas que correspondem à definição propriamente dita do ensaio. Esta seção visa também destacar, sempre que for pertinente, os aspectos relacionados especificamente aos estresses térmicos, visto que o modelo foi definido com um caráter mais abrangente.

4.2.1. Clarificação da tarefa

As razões para a realização do ensaio devem estar claras para que o planejamento funcione. Para isto, deve ser feita uma reflexão sobre as necessidades reais, em conjunto com uma coleta de informações para caracterizar o cenário envolvido, além do estabelecimento de objetivos para direcionar as ações [2].

4.2.1.1 Apontar necessidade

O apontamento das necessidades é um ponto fundamental para o restante do planejamento. Ele está relacionado com a percepção inicial do que se pretende resolver com a aplicação do ensaio. Cabe destacar que esse apontamento diz respeito à uma necessidade aparente, que pode ou não ser confirmada pela caracterização do estado atual que será comentado na seção a seguir. As

necessidades podem ou não ser facilmente percebidas. Elas podem surgir de uma exigência contratual, de uma política adotada pela empresa, pela percepção do mercado, pela busca da redução de custos, pelo aumento da competitividade e outras situações relacionadas à confiabilidade do produto. Embora pareça uma tarefa óbvia, nem sempre é realizada. Muito freqüentemente, o ensaio é instituído porque alguém leu em uma revista que outras empresas estão realizando [5]. Ou seja, decide-se por realizar ensaios de estresse sem ter a menor idéia se realmente existe a necessidade de tal aplicação ou mesmo se esse tipo de ensaio vai solucionar o problema existente. Portanto, uma investigação inicial é de grande importância. Algumas necessidades que podem ser apontadas são [2][5]:

- reduzir falhas de mortalidade infantil em campo;
- conhecer características de confiabilidade do produto;
- aumentar robustez do produto;
- identificar modos de falha do produto;
- prever taxas de falha em campo;
- prever gastos com garantia;
- garantir confiabilidade do produto;
- reduzir custos pela correção antecipada de defeitos no processo produtivo;
- atender um requisito contratual de demonstração de confiabilidade;
- reduzir custos de operações e manutenção em campo.

Para justificar a aplicação de ensaios de estresse, essas necessidades devem ser investigadas e avaliadas antes, durante e após o planejamento e implementação do ensaio.

4.2.1.2 Caracterizar estado atual

Após o apontamento da necessidade, é importante identificar e coletar informações iniciais existentes para confirmar e caracterizar a necessidade apontada, as condições e possibilidades existentes para supri-la. A intenção é auxiliar na definição dos objetivos e planejamento do ensaio. Algumas informações pertinentes nesta etapa podem ser [29]:

- requisitos de confiabilidade do produto existentes;
- resultados de ensaios anteriores;
- dados de falha em campo;
- especificações técnicas do produto;

- características do ambiente de uso;
- características e fluxo do processo produtivo.

Dependendo da necessidade apontada, diferentes informações podem ser necessárias para a sua confirmação. Em alguns casos, principalmente quando não se dispõe de informação alguma, pode ser necessário a realização de algum experimento preliminar em busca de dados. Esse experimento pode ser algo muito simples, sem o rigor do ensaio que está sendo planejado como, por exemplo, expor alguns produtos a temperaturas baixas e altas utilizando um freezer e uma estufa para observar o seu comportamento em relação a mudanças bruscas de temperatura, ou pode ser um ensaio mais complexo como, por exemplo, um HALT, o qual também deveria seguir o modelo aqui apresentado.

4.2.1.3 Definir objetivos

Os objetivos aqui tratados definem os resultados desejados da realização do ensaio. Eles podem estar relacionados a obtenção de informações sobre o produto ou indicar estados a que se pretende chegar. Alguns exemplos de objetivos estão citados abaixo:

- determinar a probabilidade de taxa de falhas no período de garantia;
- determinar o comportamento de vida do produto;
- identificar os modos e mecanismos de falha do produto;
- determinar os estresses que expõem os mecanismos de falha existentes.
- reduzir falhas de campo em um percentual estipulado;
- aumentar a confiabilidade do produto para um valor definido;
- obter um tempo médio entre falhas especificado.

A definição de objetivos é importante para direcionar as ações e decisões durante o planejamento dos ensaios, afim de atender as necessidades apontadas. Eles servem, também, como indicadores para a avaliação da eficácia da execução do ensaio planejado [2].

4.2.2. Definição do tipo de ensaio

O tipo de ensaio deve ser cuidadosamente definido, buscando um equilíbrio entre o que é tecnicamente desejável, o que é estrategicamente importante para a empresa, a viabilidade técnica e econômica para a sua aplicação e o retorno gerado pela sua utilização.

4.2.2.1 Definir técnica

Como visto no capítulo 3, diferentes técnicas de ensaio de estresse podem ser usadas no âmbito da melhoria e garantia da confiabilidade. A escolha da técnica de ensaio a ser aplicada deve ser feita com base nos objetivos do ensaio e pela capacidade de implementação. Deve-se lembrar que diferentes técnicas, muitas vezes podem atender objetivos semelhantes, mesmo que a sua função principal não seja a mesma.

4.2.2.2 Definir fase do ciclo do produto

Esta definição diz respeito à fase do ciclo de vida do produto na qual o ensaio será aplicado. Ela depende do objetivo do ensaio, da técnica escolhida, da disponibilidade de produtos para serem ensaiados em cada fase do ciclo de vida em que o produto se encontra no momento do planejamento do ensaio. A figura 4.2 ilustra as fases do ciclo de vida do produto até a sua utilização.



Figura 4.2 – Fases do ciclo de vida do produto até a utilização (adaptada de [41]).

O ensaio não precisa ser limitado a apenas uma fase do ciclo de vida do produto. Ele pode ser aplicado em diversas fases para atender objetivos distintos, formando desta forma um programa de ensaios.

4.2.2.3 Definir abrangência

Esta definição está muito ligada à escolha da técnica, ou seja, da exigência de ser um processo de *screening* ou a possibilidade de ser um ensaio de base amostral, e aos riscos que a empresa está disposta a assumir. Sendo a hipótese da amostragem possível, deve-se definir o tamanho da amostra.

Se todo mecanismo de falha estivesse presente em todo produto, ensaiar somente uma unidade seria suficiente para detectar e corrigir todos eles. Porém, devido à variabilidade do processo produtivo dos componentes e dos produtos, nenhuma unidade é exatamente igual às outras e,

portanto, mais de uma deve ser testada para provar a ausência de mecanismos de falha sérios. Supondo que o mecanismo de falha esteja presente em somente uma pequena porcentagem das unidades, o que deve ser a realidade de uma empresa competitiva, pode-se demonstrar que ensaios com amostras pequenas possuem pouca chance de identificá-lo [2]. Isto pode ser explicado através dos conceitos de probabilidade, utilizando a distribuição de probabilidade binomial. Essa distribuição é aplicável a problemas de probabilidade de variáveis discretas, que possuem um número infinito de itens ou que tem um fluxo constante de itens vindo de um centro de trabalho. A distribuição binomial é aplicada a problemas que possuem atributos como: conformidade ou não conformidade, sucesso ou fracasso e passar ou falhar [42]. A figura 4.3, baseada na distribuição binomial, apresenta a relação entre o percentual de falhas de uma população e a probabilidade de se detectar essas falhas dependendo do tamanho da amostra utilizada.

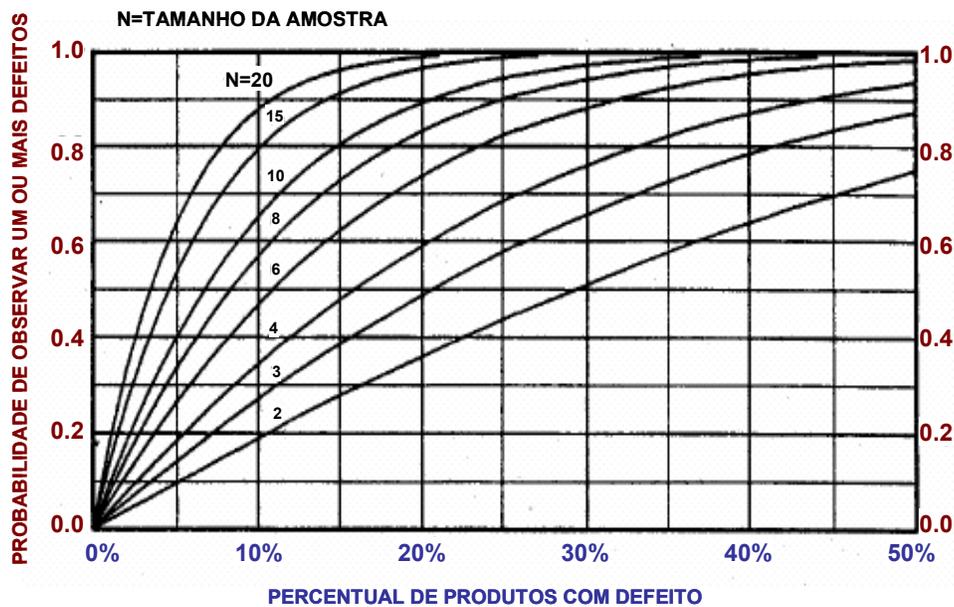


Figura 4.3 – Probabilidade de observação de defeitos para um tamanho de amostra definido [2].

Como se pode observar no gráfico, com uma amostra de 2 unidades tem-se somente uma probabilidade de 20 por cento de detectar um defeito que ocorre em 10 por cento dos produtos. Mesmo testando 10 unidades, a probabilidade é aumentada somente para um pouco acima de 60 por cento. E conforme o percentual de defeitos diminui, uma amostra maior é necessária para se ter uma probabilidade alta de detecção destes defeitos. Técnicas para definição de número de amostra podem ser encontrados na referência [42].

4.2.2.4 Definir dados a serem coletados e tratamento dos dados

Com base nos objetivos estabelecidos, deve-se definir quais os tipos de dados que devem ser coletados e de que forma estes dados serão tratados, ou seja, cálculos que se pretenda fazer e análises que se deseja realizar.

Com relação ao tratamento quantitativo de dados deve-se atentar para o fato que, quando se pretende tirar conclusões sobre uma população a partir da análise de dados coletados de uma amostra da população, o uso de *estatísticas*⁹ se faz necessário. As mais comuns são as utilizadas para estimar a média (μ), a variância (σ^2) e o desvio padrão (σ) populacionais. Quando a distribuição da variável analisada é normal, esses parâmetros populacionais podem ser aproximados pelos seguintes estimadores [2][3]:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (4.1)$$

onde \bar{X} é a média amostral, X_i é o *iésimo* valor da variável analisada, $i = 1, 2, \dots, n$, e n o tamanho da amostra,

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}, \quad (4.2)$$

onde S^2 é a variância amostral através da qual o desvio padrão é estimado,

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}}, \quad (4.3)$$

onde S é a desvio padrão amostral que é o parâmetro estatístico empregado para medir a dispersão de uma função aleatória [43].

Essas estimativas só são confiáveis para valores grandes de n . Se amostras pequenas são envolvidas ($n < 200$), é necessário aplicar um coeficiente de correção (t) conhecido como

⁹ Uma estatística é qualquer função das observações de uma amostra aleatória [2][44][45].

coeficiente t-Student. Mais detalhes e informações sobre outras distribuições podem ser encontrados nas referências [43][44].

Vale lembrar que, pelo teorema do limite central [2], se uma população possui uma média e uma variância finita, então a distribuição amostral de médias da população aproxima-se da distribuição normal com média μ e variância σ^2/n a medida que n aumenta, ou seja, a distribuição amostral de média é progressivamente normal. Para que isto seja possível a amostra precisa ser representativa e randômica. Uma amostra randômica é aquela em que cada membro da população tem uma chance igual de estar presente [2][45].

Um outro parâmetro que deve ser levado em consideração é o intervalo de confiança que define a faixa em que o parâmetro populacional encontra-se, com um determinado nível de confiança. Mais informações sobre esse tema pode ser encontrado nas referências [2][3][44].

A definição dos dados e seu tratamento em função do objetivo do ensaio é importante para o estabelecimento da necessidade ou não, de monitoramento contínuo do produto, determinação das variáveis que precisam ser controladas, especificação da instrumentação para determinação das variáveis e dos sistemas de coleta e análise de dados que precisam ser implementados.

4.2.3. Definição das condições de ensaio

Conforme mencionado anteriormente, os ensaios de estresse são específicos para cada produto e devem ser planejados de acordo com as necessidades de cada empresa. Eles requerem condições de ensaio elevadas o suficiente para alcançar os resultados esperados no menor tempo possível, porém, sem produzir efeitos indesejados para os objetivos do ensaio, como por exemplo introduzir defeitos que não aconteceriam nas condições normais de uso [19]. Para que isto seja possível, informações específicas sobre os requisitos de operação do produto, ambientes de uso, e históricos de falha devem ser usados para selecionar e alocar estresses apropriados em um ou mais *níveis de montagem*¹⁰ de forma a implementar um programa eficiente de ensaio. Além disto, o *nível de ativação*¹¹ do ensaio e a condição de monitoramento para obter os dados desejados devem ser definidas [5][29]. A seguir estão descritas algumas dimensões que compõem a eficiência dos ensaios [29]:

¹⁰ Nível de montagem: grau de integração ao produto do item sob ensaio.

¹¹ Nível de ativação: grau de operabilidade do produto durante o ensaio.

- Eficiência de precipitação: é a capacidade do ensaio em precipitar defeitos latentes em falhas. Isto tem relação com os mecanismos de falhas existentes no produto. A eficiência de precipitação é também uma função dos níveis de estresse e do tempo de duração da aplicação dos estresses.
- Eficiência de detecção: é a capacidade do ensaio de detectar defeitos que tenham sido precipitados em falhas. Enquanto os estresses podem ser efetivos na precipitação de um defeito latente em falhas detectáveis, a remoção da condição falhada depende da capacidade dos procedimentos de teste usados para detectar e localizar as falhas bem como da *confiabilidade metrológica dos instrumentos* ¹² utilizados.
- Força do ensaio: é a relação entre a eficiência de precipitação e a eficiência de detecção dos defeitos. Determina a capacidade de remover defeitos. No planejamento de um ensaio a alta eficiência de detecção é tão importante quanto a alta eficiência de precipitação e o desequilíbrio entre estes dois fatores implica em custos desnecessários [29]. Quando se pretende avaliar a força do ensaio, os itens que serão ensaiados devem ser testados antes do ensaio para garantir que não restam falhas detectáveis. Quando isto não é feito, não se sabe se defeitos patentes estavam presente, os quais poderiam ter sido detectados sem a realização do ensaio.

Abaixo estão listados alguns fatores que podem afetar a eficiência do ensaio e devem ser considerados durante a definição das condições de ensaio [29]:

- Respostas características aos estresses aplicados: propriedades estrutural, térmica e material dos itens a serem ensaiados e suas repostas com relação ao estresse aplicado.
- Limites de projeto: o uso de parâmetros de ensaio que excedem os limites de projeto do produto não é recomendado, a menos que o ensaio seja destrutivo.
- Facilidades: as facilidades disponíveis para aplicação de estresses, monitoramento do produto e do ensaio podem ser um limitante para sua execução.
- Custos: os custos para alcançar as metas do programa têm influência na eficiência econômica do ensaio.

¹² Capacidade dos instrumentos de medição de fornecer resultados confiáveis conforme condições de utilização definidas por um período de tempo especificado [1][46][47].

A participação do projetista do produto para determinar o estresse apropriado, bem como para identificar os limites de projeto e níveis apropriados de estresse é de fundamental importância [1].

4.2.3.1 Definir tipo de estresse

A primeira consideração na definição das condições de ensaio deve ser o tipo de estresse a ser aplicado. Isso diz respeito não somente à uma condição ambiental, como temperatura, vibração, umidade, mas também ao carregamento que será aplicado, ou seja, estresse constante, cíclico, em degraus e outros já mencionados [1].

O tipo de estresse deve ser escolhido de forma a otimizar a eficiência de precipitação do ensaio. O conceito geral é aplicar estresses que precipitem o máximo de falhas latentes que viriam à tona após um certo tempo de vida do produto, no menor tempo possível [1].

Como visto no capítulo 1 os estresses não são todos igualmente efetivos em transformar defeitos latentes em falhas detectáveis. As informações contidas nas seções 1.2.2 e 1.2.3 a respeito dos tipos de estresse mais comumente usados e os mecanismos de falha normalmente precipitados por eles podem ser de grande ajuda nesta etapa. Logo, o tipo de estresse pode ser determinado a partir da revisão de dados de falhas típicas do produto em campo e a previsão dos mecanismos de falha esperados. *Ensaios ambientais*¹³, realizados durante o processo de desenvolvimento de produto, também podem fornecer informações úteis para selecionar o estresse apropriado.

Se não houverem dados que descrevam o comportamento passado do produto em questão ou produtos similares, experimentos com estresses prováveis de serem encontrados em campo podem ser realizados em amostras, para identificar fraquezas potenciais do produto. A adequação dos estresses pode ser confirmada através de análises subsequentes de falhas. Esses experimentos podem envolver técnicas de estressamento em degraus, como a utilizada no HALT, descrita no item 3.2.4.2., considerando mais de um tipo de estresse. Dessa forma é possível identificar mais rapidamente os estresses que ativam os mecanismos de falha existentes bem como os níveis de estresses apropriados, conforme será visto na seção 4.3.3.4. O uso apropriado do método de projeto de experimentos (DoE) pode auxiliar nesse passo.

¹³ Ensaio para observar a performance do produto em um ambiente simulando as condições de uso [1][3][5].

A aplicação dos estresses durante o experimento deve ser realizada em alguma forma mensurável, controlada e lógica. Dados dos estresses aplicados bem como do comportamento observado do ensaio devem ser mantidos [1]. É importante que as incertezas desses dados sejam suficientemente baixas.

Conforme apresentado no capítulo 1, esta dissertação se resume a aplicação de estresses térmicos que são muito eficientes na precipitação de falhas latentes, além de serem os mais comumente usados. Porém, não se deve esquecer que apesar de sua eficiência, o estresse térmico pode gerar degradação por temperatura das superfícies soldáveis (oxidação, crescimento de inter-metálicos) e, portanto, uma avaliação rigorosa dos resultados deve ser feita [36].

4.2.3.2 Definir nível de montagem

Os níveis de montagem em que os ensaios podem ser aplicados são: componentes individuais, *módulos*¹⁴ ou sub-montagens, *unidades*¹⁵ e *sistemas*¹⁶. A escolha é usualmente baseada na relação entre custo total do ensaio e eficiência do ensaio; ou seja, mais defeitos existentes precipitados, detectados e corrigidos pelo menor custo. Deve-se lembrar que o ensaio pode ser definido para mais de um nível de montagem, gerando assim um programa de ensaios [2][29].

Enquanto a lógica pode sugerir que ensaio no nível de componente é a alternativa de menor custo e portanto aparentemente melhor, deve ser notado que ensaio em um nível tão baixo de complexidade pode não produzir resultados significativos. Por exemplo, componentes ensaiados podem continuar sendo danificados durante a montagem e portanto produzir falhas futuras e conseqüentemente custos [5]. Considerando que a confiabilidade dos componentes deveria ser de responsabilidade dos seus fabricantes, ensaios a esse nível de montagem, em geral, fogem ao escopo dos fabricantes de produtos eletrônicos, a menos que sejam feitos com o intuito de homologação dos fornecedores. Além disto, os fabricantes de componente certamente possuem conhecimento mais avançado sobre a tecnologia dos componentes, dos processos envolvidos na sua fabricação e dos mecanismos de falha, além de dispor de métodos economicamente eficazes para testar e ensaiar os componentes [2].

¹⁴ Um item formado pelo agrupamento de um número de partes para realizar uma função específica e é capaz de ser removido, como por exemplo uma placa de circuito impresso montada [29].

¹⁵ Um item que pode reunir um ou mais módulos interligados para realizar uma ou mais funções específicas [29].

¹⁶ Um grupo de unidades interconectadas para realizar alguma função [29].

Esta dissertação se concentra na confiabilidade dos produtos eletrônicos e portanto nos níveis de montagem que fazem parte de seu domínio e controle. O que se pode afirmar com relação a estes níveis é que existem vantagens e desvantagens da aplicação de estresse em cada um e que nenhum nível de montagem será apropriado o tempo todo em consequência da diversidade dos tipos de produtos e aplicações.

Um ponto a ser destacado é que os estresses que podem ser aplicados sem causar danos a partes boas diminuem a medida que o nível de montagem aumenta. Em outras palavras, nos níveis mais altos de montagem, os estresses que podem ser aplicados em segurança não serão capazes de eliminar alguns tipos de defeitos que poderiam ser eliminados aplicando estresses mais altos em níveis de montagem menores [2]. Na figura 4.4 são apresentadas algumas informações que podem ajudar na determinação do nível de montagem adequado para o seu produto [2][29].

NÍVEL DE MONTAGEM	VANTAGENS	DESVANTAGENS
MÓDULO	<ul style="list-style-type: none"> ▪ custo por falha precipitada é menor; ▪ massas térmicas menores permitem altas taxas de variação de temperatura; ▪ faixa de temperatura maior que a faixa de operação permitida para o produto. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ eficiência do teste de detecção é relativamente baixa; ▪ custo do equipamento de teste para ensaios alimentados é alto.
UNIDADE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ relativamente fácil de alimentar e monitorar a performance durante ensaio; ▪ eficiência de detecção maior que no nível de módulos; ▪ interconexões dos módulos são também ensaiadas. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ massa térmica dificulta taxas muito altas de mudança de temperatura, ou requerem facilidades de alto custo; ▪ custo por falha significativamente maior que no nível de módulo; ▪ faixa de temperatura reduzida com relação ao nível de módulo.
SISTEMA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ todas as fontes potenciais de falhas são ensaiadas; ▪ falhas de interoperabilidade da unidade são detectadas; ▪ alta eficiência do teste de detecção. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ testar em temperaturas extremas é difícil e de alto custo; ▪ custo por falha é mais alto.

Figura 4.4 – Vantagens e desvantagens da alocação de estresse em cada nível de montagem [29].

Um outro fator que deve ser considerado é o tamanho físico do produto, pois ele tem influência na quantidade possível de itens a serem ensaiados por vez e no custo do ensaio. Para ser capaz de aplicar estresses como temperatura os recursos ambientais devem crescer em tamanho a medida que o tamanho físico e dissipação de energia dos produtos crescem, resultando em aumento dos custos associados a essa estrutura [2].

4.2.3.3 Definir nível de ativação do ensaio e estratégia de monitoramento do produto

O nível de ativação do ensaio e a estratégia de monitoramento do produto para falhas devem ser determinadas de forma a obter a melhor vantagem do ensaio. Para isto, algumas considerações são necessárias com relação ao produto, à infra-estrutura existente para realização do ensaio, ao custo envolvido e aos objetivos do ensaio, como por exemplo [5]:

- o nível de montagem no qual o produto será estressado;
- o ganho, economicamente justificável, que se pode obter se a capacidade de precipitação for aumentada através da combinação do estresse definido para o ensaio com estresses elétricos;
- necessidade de identificar ou forçar tipos específicos de falhas, como por exemplo *destrutivas*¹⁷ ou *operacionais*¹⁸ ;
- necessidade de determinar tempos para falha, etc.

Uma vez que estas condições sejam estabelecidas, o nível apropriado de ativação do ensaio e a estratégia de monitoramento podem ser definidos. Os tipos básicos de ativação são [5]:

- Estático: submeter um produto desligado a um único ambiente estressante.
- Dinâmico: o produto é alimentado eletricamente durante o ensaio. Além do estresse ambiental definido para o ensaio, uma ciclagem de alimentação pode ser adicionada, ou seja, o produto está sendo ligado e desligado durante o ensaio. Também, os níveis de alimentação podem variar acima e abaixo dos valores nominais.
- Exercitado: alimentação, bem como alguns sinais adicionais de entrada e cargas de saída são aplicados ao produto. Em alguns casos, sinais ou cargas devem ser aplicados aos produtos alimentados para evitar danos. Este é um aspecto que deve ser discutido com o projetista do produto.
- Funcionamento completo: o produto é operado como se estivesse em uso real. Isto inclui alimentação e todos os sinais e cargas necessárias, os quais podem ou não ser alternados entre ligados e desligados.

¹⁷ Também chamadas falhas permanentes: casos onde o produto para de funcionar e não retoma a operação a menos que seja reparado [1][3][5].

¹⁸ Também chamadas falhas leves, intermitentes ou temporárias: casos onde o produto para de funcionar sob certas condições mas retoma a operação quando a condição em particular cessa [1][3][5].

Quando se trata de ciclagem térmica, a alimentação é normalmente desligada durante as transições de quente para frio para que o aquecimento gerado pelo produto não afete as taxas descendentes de temperatura do produto e da câmara, o que reduz o estresse durante esta parte do ensaio [5].

A estratégia de monitoramento do produto irá determinar a eficiência de detecção de falhas. Ela é definida sob três aspectos:

- monitoramento contínuo ou intermitente;
- testes durante ou somente após o ensaio;
- testes funcionais ou paramétricos¹⁹.

As condições de cada um dos três aspectos podem ser combinadas de forma a estabelecer uma estratégia de monitoramento eficiente para cada caso, porém, recomenda-se que em qualquer alternativa um teste antes do ensaio esteja contemplado.

Uma boa prática é realizar um teste funcional antes e um teste funcional contínuo durante o ensaio [2]. Porém, o monitoramento contínuo necessita de dispositivos que mostram ou registram a performance do ensaio. Isso permite a determinação de quando exatamente a falha ocorreu, e então qual estresse aparentemente causou a falha. Além disto, o monitoramento contínuo permite detectar falhas intermitentes que de outra forma não seriam observadas [2][5]. Um exemplo disto pode ser um componente cujos parâmetros, sob condições de estresse, mudam mais do que os circuitos circundantes podem tolerar, porém, retornam ao normal quando o estresse é removido. Para detectar este fenômeno, o item sob avaliação deve ser continuamente monitorado. A principal desvantagem deste tipo de monitoramento é o custo associado [2]. Uma boa referência que descreve os benefícios de monitoramentos contínuos durante o ensaio é “ESS Case Study” de Paul Parker [48].

Se um teste funcional é usado somente antes e depois do estresse, não existem dados de como o item sob avaliação comportou-se durante a aplicação do estresse. Ou seja, tudo que pode ser detectado são as falhas destrutivas. As falhas leves provavelmente não serão detectadas, e certamente causarão problemas mais tarde [2][5]. Alguns autores sugerem que somente uma percentagem pequena de todas as falhas são da variedade permanente, e que monitoramentos

¹⁹ Na referência [49] podem ser encontradas informações sobre testes funcionais e paramétricos.

contínuos durante aplicação de estresse produzem um alto retorno de investimento. Porém cada caso deve ser particularmente analisado [2].

Existem vantagens e desvantagens para cada alternativa e a escolha da estratégia de monitoramento pode ser limitada pelo nível de ativação do produto durante o ensaio [5]. A figura 4.5 apresenta a relação entre o nível de ativação do ensaio e a estratégia de monitoramento possível.

		ESTRATÉGIA DE MONITORAMENTO					
		INTERMITENTE APÓS		INTERMITENTE DURANTE		CONTÍNUO	
		PARAMÉTRICO	FUNCIONAL	PARAMÉTRICO	FUNCIONAL	PARAMÉTRICO	FUNCIONAL
NÍVEL DE ATIVAÇÃO	ESTÁTICO	✓	✓	✓	✓		
	DINÂMICO	✓	✓	✓	✓	✓	
	EXERCITADO	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FUNCIONAMENTO COMPLETO	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Figura 4.5 – Relação entre nível de ativação do ensaio e estratégia de monitoramento.

Na essência, a restrição básica para a estratégia de monitoramento é que ensaios de produtos não alimentados não podem ser ensaiados continuamente [5] e testes funcionais necessitam da aplicação de sinais de entrada.

4.2.3.4 Definir parâmetros

Esta seção diz respeito à definição dos tipos de parâmetros envolvidos em cada técnica de ensaio e estresse escolhido, e aos níveis em que os parâmetros são aplicados, ou seja, os níveis de estresse. Com relação aos tipos de parâmetros, pode-se dizer que, de forma geral, eles correspondem a características do tipo de estresse que será aplicado e à duração do ensaio. Já os níveis de estresse, assim como os tipos de estresse, devem ser escolhidos de forma a ampliar a eficiência de precipitação de falhas.

Como já mencionado anteriormente, os níveis de estresse devem acelerar os modos de falhas sob consideração mas não introduzir modos de falhas que nunca ocorreriam sob condições normais

de uso. Normalmente, esses níveis de estresse cairão fora dos limites de especificação do produto mas dentro dos limites de projeto vistos na figura 3.3 [1][19].

Os níveis de estresse podem ser obtidos a partir de dados de ensaios anteriores ou, como visto na seção 4.3.3.1, podem ser determinados pela aplicação de um procedimento de estressamento em degraus para determinar o *limite destrutivo* do produto. Estressamento em degraus tem sido usado desde os primeiros dias dos programas espaciais [1]. Conforme apresentado na seção 3.2.4.2, ele é basicamente um processo de começar em um nível de estresse conhecido, que o produto possa suportar, e então aumentar os níveis de estresse em degraus controlados até o produto falhar. Quando o produto falha, as falhas são analisadas e categorizadas e o produto é reparado e ensaiado novamente. Nesta etapa é importante utilizar técnicas de análise para identificar fraquezas de produto e implementar alguma ação corretiva requerida. Para fazer isto, é necessário que o produto seja exercitado e monitorado. Esse processo é repetido até que níveis de estresse bem acima daqueles esperados em serviço sejam alcançados, toda a amostra falhar, falhas irrelevantes comecem a aparecer ou os reparos deixarem de ser economicamente e fisicamente factíveis Um mínimo de três amostras é requerido para este tipo de ensaio, no entanto, quanto maior a amostra, maior a confiança nos resultados obtidos [1].

Falando agora da duração do estresse, ela é determinada pela natureza do ensaio. Existem métodos gráficos e modelos matemáticos com base em dados históricos ou experimentais que permitem definir o tempo de ensaio adequado para determinadas técnicas com base no comportamento de falhas do produto. Alguns exemplos são: o modelo encontrado na referência [29], que define a duração para ESS, e os métodos encontrados na referência [9], que são especificamente para burn-in. Para realizar um experimento prévio para levantar os dados de tempo para falha para a utilização destes métodos e modelos, é interessante dispor de pelo menos 10 itens para servir de amostra e o ensaio deve ser monitorado continuamente. O tempo típico para realização do experimento gira em torno de uma a duas semanas para conhecer o padrão de falhas de mortalidade infantil [9].

Como nem sempre se dispõe de dados históricos ou condições para a realização de experimentos prévios, dispor de parâmetros iniciais pode ser de grande ajuda. Com base nas informações contidas em diversas referências [5][9][24][29][33][36][50], recomendações foram reunidas na figura 4.6 como ponto de partida para os parâmetros envolvidos na aplicação de alguns estresses térmicos.

ESTRESSE	TIPOS DE PARÂMETROS	OBSERVAÇÕES	NÍVEIS	ENSAIOS
ALTA TEMPERATURA (constante)	T	Nota 1 e 2	(60 a 90) °C	ESS, Burn-in
	Duração do ensaio	Nota 3 e 4 e 5	(5 a 48) h	AST, ALT
	v _{ar}	Nota 6	≅ 4 m/s	HASS
CICLAGEM TÉRMICA	ΔT	Nota 7	≥ 100 °C	ESS, AST
	T _{MÁX}	Nota 1 e 2	≅ +70 °C	ALT, HASS
	T _{MÍN}	Nota 8 e 2	≅ - 40 °C	
	dT/dt	Nota 9 e 10	≥ 5 °C/min	
	Permanência nos extremos	Nota 11	≥ 10 min	
	Duração do ensaio	Nota 3 e 4 e 5	(10 a 30) ciclos	
	v _{ar}	Nota 6	≅ 4 m/s	
DEGRAU DE RESFRIAMENTO	T _{INICIAL}	-	+20 °C	HALT
	dT/dt	Nota 9	≅ -10 °C/min	
	Permanência nos patamares	Nota 11	≥ 10 min	
	v _{ar}	Nota 6	≅ 4 m/s	
DEGRAU DE AQUECIMENTO	T _{INICIAL}	-	+20 °C	HALT
	dT/dt	Nota 9	≅ 10 °C/min	
	Permanência nos patamares	Nota 11	≥ 10 min	
	v _{ar}	Nota 6	≅ 4 m/s	

Nota 1 - A temperatura não deve exceder o menor dos valores nominais máximos de todas as partes e materiais contidas no item. Note que os valores nominais de temperatura de não operação para partes são maiores que os de operação [50].

Nota 2 – Para o HASS as temperaturas extremas são mais agressivas e são baseadas nos limites obtidos pelo HALT [24].

Nota 3 - Ciclos ou horas suficientes para efetivamente levar defeitos latentes a produzir falhas. Dependendo da intensidade do estresse aplicado a duração necessária aumenta ou diminui.

Nota 4 - Como os estresses para o HASS são mais agressivos a duração do ensaio reduz. Um tempo típico para o HASS gira em torno de três horas [24].

Nota 5 - Para ensaios como o ALT a duração não é pré-determinada, ou seja, o ensaio vai levar o tempo necessário para que o comportamento de vida dos produtos seja determinado.

Nota 6 - A temperatura do produto deve seguir o mais próximo possível a temperatura dentro da câmara. Isto é adquirido garantindo que alta velocidade do ar envolva propriamente o produto.

Nota 7 - As temperaturas extremas devem ser o mais distante possível sem causar danos desnecessários ao produto.

Nota 8 - A temperatura não deve exceder o maior dos valores nominais mínimos de todas as partes e materiais contidas no item [50].

Nota 9- A taxa de mudança entre os extremos deve ser rápida o suficiente para criar um nível ótimo de estresse, novamente sem danificar o produto.

Nota 10 – No HASS a taxa de mudança de temperatura entre os extremos são mais agressivas. Normalmente, as taxas são definidas como o mais rápido que a câmara e o produto permitirem, podendo atingir valores da ordem de 50 °C/min [24].

Nota 11 - O tempo de permanência nas temperaturas extremas e nos patamares deve ser o suficiente para a estabilização térmica do produto e a checagem da sua funcionalidade. Ele é uma função das diferenças na massa térmica dos itens sendo ensaiados.

Figura 4.6 – Diretrizes para condições de ensaio iniciais.

As recomendações vistas na figura 4.6 são feitas considerando que o ensaio esteja sendo realizado no nível de unidade e em produtos usando componentes comerciais. Para outras situações as discussões feitas ao longo do capítulo devem ser levadas em consideração. Vale lembrar que essas são condições que representam valores iniciais e podem ser modificadas com base na análise dos dados observados.

4.2.4. Definição da infra-estrutura necessária

A infra-estrutura para realização do ensaio vai muito além da estrutura para a aplicação do estresse. Ela é composta também pela instrumentação necessária para validação da estrutura de ensaio, monitoramento e avaliação do produto e coleta e análise de dados.

Esta infra-estrutura deve ser definida em função do perfil do ensaio. Ele determinará quais os equipamentos e acessórios que são requeridos, com base no exame dos tipos de estresse, nível de ativação do ensaio e análises que se pretenda realizar [5]. No capítulo 1, quando apresentados os estresses comumente usados para precipitar falhas, foram passadas algumas informações referentes aos equipamentos utilizados. A seguir este assunto será tratado mais especificamente.

4.2.4.1 Especificar a estrutura de aplicação de estresse

É importante que a estrutura seja considerada em relação à intenção primária do ensaio, que é prover o estresse ótimo no menor tempo possível. Portanto, mantendo o produto e os objetivos do ensaio como foco, é possível tomar uma aproximação lógica da especificação da estrutura.

Ensaio com a aplicação de estresse térmico, dependendo do tipo de carregamento de estresse, nível de estresse aplicado e volume necessário da estrutura, pode ser feito usando uma câmara térmica, estufa, ou uma sala de aquecimento [40]. Conforme já mencionado no item 3.2.8.2, inicialmente pode-se dizer que a técnica de ensaio chamada burn-in pode utilizar qualquer uma das três estruturas, sendo a sua escolha limitada pelas características de volume, capacidade de manter o estresse estável e uniforme, nível do estresse a ser aplicado e assim por diante. Em outras técnicas nem todas as estruturas são tecnicamente e economicamente viáveis, pois algumas exigem níveis de estresse muito altos ou baixos e carregamentos de estresse que só podem ser obtidos adequadamente em câmaras térmicas. A seguir estão listadas algumas informações que devem ser consideradas para a seleção e especificação da estrutura adequada [5]:

- o tipo e tamanho do produto a ser ensaiado;
- as quantidades a serem ensaiadas em qualquer tempo;
- o tempo disponível para realização dos ensaios;
- as características do estresse a ser aplicado, como por exemplo a faixa de temperatura e sua taxa de mudança, no caso de ciclagem térmica;
- o calor dissipado pelo produto, quando alimentado;
- as interconexões requeridas “para” e “do” produto, se ele deve ser alimentado;
- as taxas de transferências de dados do produto, se aplicável;
- o fluxo, velocidade e direção do ar para maximizar transferência de calor do produto;
- o manuseio do produto que pode afetar a sua confiabilidade e deve ser minimizado sempre que possível.

Alguns itens da estrutura merecem uma atenção especial para a sua especificação, como por exemplo:

- Sistema de controle dos parâmetros de ensaio: Deve ter *características metrológicas*²⁰ adequadas e conhecidas para que o ensaio planejado seja efetivamente realizado. Além disso deve ser projetado para facilitar a utilização e permitir a aquisição de dados pertinentes.
- Sistema de refrigeração: É peça fundamental para atingir as temperaturas mínimas desejadas, quando for o caso. Para estruturas com sistema de refrigeração de um estágio o valor usual alcançado é de -35 °C. Para temperaturas menores é utilizado um sistema de refrigeração em cascata para alcançar temperaturas de até -70 °C. É comum a realização de ensaios a -40 °C e alguns equipamentos com refrigeração de um estágio são ditos capazes de atingir essa temperatura. Contudo, para realizar ensaios a essa temperatura recomenda-se a utilização de sistemas em cascata, pois equipamentos de um único estágio perdem drasticamente a eficiência nos últimos cinco graus Celsius da faixa [52].
- Sistema de ventilação: Deve ser projetado para prover uma velocidade do ar adequada e distribuição uniforme do ar. O objetivo é garantir que as mesmas taxas de mudança de temperatura estejam ocorrendo em todos os produtos para que o impacto completo do estresse seja realizado [5]. Segundo MIL-HDBK-2164 [50], o item ensaiado deveria estar totalmente envolvido por um fluxo de ar, exceto nos pontos de suporte necessários. O

²⁰ Características distintas as quais podem influenciar nos resultados da medição [51].

gradiente de temperatura através deste fluxo, que é medido perto do item ensaiado, deve estar dentro de ± 2 °C da temperatura de ensaio e não exceder 1 °C por metro ou um máximo de 2,2 °C total com o produto não operando.

- Sistema de fixação: Deve ser pensado para segurar os produtos na orientação apropriada para o ensaio. Deve ser projetado para permitir facilidade de manuseio, ter flexibilidade e ser compatível com fontes de energia e interfaces eletrônicas. O manuseio de material é um aspecto ocasionalmente não observado mas decididamente importante que afeta a efetividade econômica, particularmente com produtos grandes envolvendo um alto nível de complexidade de ensaio. Dispositivos que automaticamente carregam ou descarregam o produto ou que facilitam manuseio manual do produto devem ser usados. Isto reduz a possibilidade de causar danos desnecessários ao produto fora do ensaio [5].
- Fontes de energia: Necessárias para alimentar o produto e realizar ensaios funcionais. Deve-se lembrar que todas as coisas que estão no ambiente estressante estão sujeitas ao mesmo estresse que o produto sob ensaio e isto inclui a fonte. Uma fonte de energia de qualidade é essencial, especialmente quando considerando ensaios que adicionam estresse elétrico. Uma fonte de energia deficiente poderia flutuar incorretamente e danificar o produto sob ensaio. Uma fonte de energia boa deve ser exata, programável, flexível, e confiável. A maioria das fontes de energia, comercialmente disponíveis hoje, têm as características requeridas para ensaios de estresse básicos. Existem também algumas fontes que permitem ensaios especializados, tais como flutuações de tensão programáveis, variações de frequência, harmônicos e várias outras funções [1][5].
- Interconexões: Levam sinais e linhas de energia para fora da estrutura e devem ser compatíveis com conexões eletrônicas e fontes de energia disponíveis [5].

4.2.4.2 Especificar a estrutura de monitoramento e avaliação do produto

Como visto na seção 4.3.3.3 o monitoramento de um produto pode ser feito de forma contínua, intermitente durante o ensaio ou após o ensaio. A primeira significa testar o produto continuamente durante o ensaio para identificar o momento em que ele falha. As duas últimas implicam em parar o ensaio e testar o produto para verificar se ele continua operando adequadamente sem se preocupar com o momento em que a falha aconteceu.

Como se pode concluir, o monitoramento contínuo é mais complexo e necessita de um sistema automatizado de monitoramento e aquisição de dados. Dependendo da quantidade de produtos

ensaiados e o nível de ativação do ensaio pode requerer o desenvolvimento de uma interface eletrônica para exercitar e monitorar o produto dentro da câmara. Em casos mais simples o sistema pode estar do lado de fora da câmara, ligado ao produto por cabos, que passam através de uma abertura na câmara vedada com espuma ou silicone. Em ambas as situações são necessários linhas de entrada e saída de sinais, sensores e inter-conectores .

Alguns aspectos que devem ser observados durante a definição desta estrutura são [1]:

- garantir que as interconexões não falhem, produzindo falhas falsas;
- primar pela facilidade de implementação: adicionar funções, programação simplificada e interface com outros equipamentos;
- buscar a flexibilidade.

A instrumentação para o monitoramento intermitente pode ser a mesma utilizada para avaliar o produto antes do ensaio. Ela consiste de jigs de teste, geradores de sinais e alguns instrumentos de medição, como osciloscópio e multímetro. Maiores informações sobre equipamentos de testes funcionais ou paramétricos podem ser encontrados na referência [49].

As especificações da instrumentação utilizada, tanto no monitoramento contínuo como no intermitente, devem ser pensadas em função dos parâmetros que se deseja medir e as funções que precisam ser testadas para avaliar se o produto está operando adequadamente, lembrando sempre de avaliar as características metrológicas e os custos envolvidos.

4.2.4.3 Especificar o sistema de coleta e análise de dados

O sistema de coleta e análise dos dados, pode ser algo tão simples quanto registrar manualmente em planilhas de papel as observações feitas, como uma estrutura com computador, placa de aquisição de dados, softwares de tratamento dos dados. Isto depende do tipo de dados que serão coletados e do tratamento destes dados para análise, os quais foram definidos previamente, das estruturas definidas para aplicação de estresse e monitoramento e avaliação do produto e os custos envolvidos.

Nos casos em que se deseja registrar os tempos para falha do produto, é importante considerar que segundo o handbook MIL-HDBK-2164 [50], estes devem ser medidos com uma incerteza de no máximo $\pm 1\%$ do valor medido e durante toda a operação do produto, parâmetros como tensão e corrente deveriam ser mantidos em valores nominais especificados.

4.2.4.4 Especificar o sistema para a avaliação e validação da estrutura de ensaio

Segundo o requisito 5.4.5.1 da norma ISO/IEC 17025 (2001): “Validação é a confirmação por exame e fornecimento de evidência objetiva de que os requisitos específicos para um determinado uso pretendido são atendidos” [53]. De forma geral todas as conexões devem ser verificadas, os softwares devem ser validados, a instrumentação de avaliação do produto como osciloscópio, multímetros e geradores de sinais devem ser calibrados, fontes de alimentação e hardwares de monitoramento do produto devem ser testados bem como o sistema de aplicação do estresse, enfim, tudo que pode ter influência no resultado do ensaio deve estar funcionando devidamente.

Quando se tratando de ensaios de estresse térmico, é extremamente relevante a avaliação do perfil térmico da estrutura de aplicação de estresse, para completa validação do ensaio. A temperatura no interior dessas estruturas podem apresentar variações no espaço, flutuações ao longo do tempo e desvios em relação ao valor ajustado [54], os quais devem ser conhecidos e avaliados com relação a sua influência nos resultados do ensaio. No III Congresso Brasileiro de Metrologia, realizado em 2003, foi apresentado pelo Engenheiro Júlio D. Brionísio, chefe do laboratório de higrometria do INMETRO, o trabalho denominado “Avaliação do Perfil Térmico de uma Câmara Climática” [54], no qual ele apresenta um método para esta avaliação que pode ser usado como orientação para a validação da estrutura aqui tratada.

A instrumentação e os métodos de medição das temperaturas para a avaliação do perfil térmico da estrutura deve ser definida com base em alguns requisitos como por exemplo: faixa de temperatura a ser medida, características metrológicas desejadas, velocidade de resposta dos sensores e custo. Informações sobre métodos de medição de temperaturas e transdutores utilizados podem ser encontradas nas referências [55] e [56]. De forma mais objetiva, será tratado aqui sobre os transdutores de temperatura geralmente utilizados na aplicação que está sendo discutida, os termorresistores de platina Pt100. Esses transdutores podem ser ligados a um indicador digital que permita a leitura das medições com a resolução desejada e uma baixa incerteza.

Os termorresistores (*Resistance temperature detectors* - RTD) são transdutores de temperatura formados por um fio de metal que apresentam um aumento da sua resistência com a temperatura [55]. Estes transdutores possuem alta estabilidade mecânica e térmica, resistência à contaminação, baixo índice de desvio pelo envelhecimento e tempo de uso, boas características

de reprodutibilidade, possuem menor incerteza dentro da faixa de utilização do que outros tipos de transdutores (por exemplo *termopares*²¹), e sua curva de resistência em função da temperatura é mais linear que a dos termopares [57]. Segundo a norma ASTM E1137 [58], o Pt-100 possui uma faixa de medição de (-200 a 650) °C, entretanto, a norma DIN IEC 751 [59] padronizou sua faixa de medição de (-200 a 850) °C. Como se pode perceber, ele é mais do que suficiente para a utilização na validação das estruturas de ensaios aqui tratadas.

Não pode ser esquecido que todo este processo de determinação do perfil térmico da câmara envolve uma avaliação das incertezas associadas. Algumas que podem ser citadas são: a incerteza do transdutor de temperatura, a resolução do dispositivo indicador, o desvio padrão experimental a variação espacial e a variação temporal [54]. Informações sobre incertezas associadas a transdutores de temperatura podem ser encontradas na referência [57].

4.2.5. Análise da viabilidade do ensaio

Esta etapa serve para avaliar se o ensaio planejado é economicamente e tecnicamente interessante e possível de ser realizado, com base nas informações obtidas até o momento. Uma alternativa para algum impedimento técnico e econômico na realização do ensaio pela empresa é realizar o ensaio em algum laboratório externo.

4.2.5.1 Analisar a viabilidade técnica

A viabilidade técnica pode ser limitada principalmente em função da infra-estrutura existente ou da capacidade técnica disponível. Através de uma análise simples do que é necessário para a realização do ensaio e do que a empresa dispõe, seja em estrutura ou conhecimento, deve ser possível identificar se alguma mudança nas condições de ensaio definidas ou algum investimento em capacitação precisam ser feitos para que o ensaio possa ser realizado [51].

4.2.5.2 Analisar a viabilidade econômica

O ensaio, assim como todo investimento, deve ser planejado dentro de um orçamento e visando um potencial de retorno do investimento (ROI) feito. O ensaio deve pagar-se em um período considerado razoável pela empresa e uma estimativa prévia dos resultados potenciais do ensaio

²¹ Consiste de dois condutores elétricos que são feitos de metais diferentes, possuem pelo menos uma conexão elétrica e possui uma relação entre a tensão de saída de seu circuito e a temperatura de junção [55].

em conjunto com a análise dos custos gerados com a sua implementação é uma boa forma de definir a sua viabilidade econômica. Essa análise pode levar à identificação de necessidade de mudanças nos parâmetros de ensaio definidos ou até mesmo à conclusão que o ensaio não é economicamente interessante para a empresa. Um programa propriamente considerado e aplicado irá gerar um ROI mensurável através de melhoria da qualidade do produto, taxa de falhas reduzidas e lucratividade aumentada. Uma boa referência para avaliar ROI é [60].

Um ponto importante a ser considerado na avaliação do ROI é o custo da qualidade. O custo da qualidade é uma medida dos custos associados especificamente com a obtenção ou não da qualidade desejada para um produto ou serviço (incluindo todos os requisitos estabelecidos pela empresa e seus contratos com os clientes e a sociedade). O custo da qualidade é a diferença entre o custo que se teria se a qualidade fosse perfeita. Eles podem ser divididos em [61][62]:

- Custos de falha interna: custo resultante dos defeitos encontrados antes de que o produto chegue ao usuário final;
- Custos de falha externa: custo resultante das falhas que se manifestam quando o produto já foi enviado ao usuário final;
- Custos de avaliação: custo de avaliar o nível de qualidade alcançado pela empresa;
- Custos de prevenção: custo das ações para prevenir os defeitos antes que eles sejam produzidos.

Existem alguns componentes relacionados a esses custos que não são simples de se determinar de forma exata, como por exemplo a perda de mercado, que integra o custo de falha externa. Porém é melhor realizar uma estimativa com os dados existentes, mesmo que grosseira, do que não considerá-los. Maiores informações sobre os componentes gerais dos custos associados à qualidade podem ser obtidas em [61][62].

Quanto aos ensaios que são tratados nesta dissertação, deve-se considerar os custos associados a implementação dos ensaios utilizados como forma de inspeção, seja em 100 % dos produtos ou não, devem ser considerados como custos de avaliação e os ensaios utilizados para desenvolver a confiabilidade do produto antes da produção como custos de prevenção.

4.2.6. Implementação do ensaio

A implementação do ensaio se inicia com a preparação dos recursos necessários para a realização do ensaio, os quais devem ser validados para permitir uma avaliação confiável dos dados e resultados que serão obtidos.

4.2.6.1 Preparar e validar a estrutura de ensaio

Para se ter um ensaio efetivo, um gerenciamento deve ser feito para prover tempo e recursos necessários para suportá-lo adequadamente. O papel de cada participante deve ser claramente definido, a estrutura para realização do ensaio deve ser adquirida e propriamente preparada, a calibração dos instrumentos de medição deve estar em ordem e o pessoal envolvido deve estar devidamente treinado. A estrutura deve ser verificada para determinar se ela atende os requisitos especificados para realização do ensaio.

Nos requisitos da norma NBR-ISO/IEC 17025 [53] encontram-se algumas orientações que podem ser usadas para auxiliar na validação da estrutura de ensaio. Algumas delas são transcritas a seguir:

Todo equipamento utilizado em ensaios e/ou em calibrações incluindo os equipamentos para medições auxiliares [...], que tenha efeito significativo sobre a exatidão ou validade do resultado do ensaio [...], deve ser calibrado antes de entrar em serviço. [...] (NBR-ISO/IEC 17025,2001, requisito 5.6.1)

[...] o programa de calibração do equipamento deve ser projetado e operado de forma que assegure que as calibrações e medições feitas pelo laboratório [ou responsáveis da empresa] sejam rastreáveis ao Sistema Internacional de Unidades (SI). (NBR-ISO/IEC 17025,2001, requisito 5.6.2.1)

A rastreabilidade ao SI é estabelecida por meio de uma cadeia ininterrupta de calibrações ou comparações, que liga os padrões utilizados na calibração do equipamento aos padrões primários das unidades de medida SI correspondentes. A ligação às unidades SI pode ser obtida pela referência aos padrões nacionais. Os padrões nacionais podem ser padrões primários, que são as realizações primárias das unidades SI ou representações acordadas das unidades SI baseadas em

constantes físicas fundamentais, ou podem ser padrões secundários que são padrões calibrados por outro instituto nacional de metrologia [53].

[...] devem aplicar procedimentos para cálculo [avaliação] das incertezas de medição. Em alguns casos a natureza do método de ensaio pode impedir o cálculo rigoroso, metrologicamente e estatisticamente válido da incerteza de medição. Nesses casos, o laboratório deve ao menos tentar identificar todos os componentes de incerteza [que podem afetar o resultado do ensaio] e fazer uma estimativa razoável.[...] (NBR-ISO/IEC 17025,2001, requisito 5.4.6.2)

[...] deve assegurar que as condições ambientais [externas a estrutura de ensaio] não invalidem os resultados [do ensaio] ou afetem adversamente a qualidade requerida de qualquer medição. (NBR-ISO/IEC 17025,2001, requisito 5.3.1)

Os cálculos e as transferências de dados devem ser submetidos a verificações apropriadas de uma maneira sistemática. (NBR-ISO/IEC 17025,2001, requisito 5.4.7.1)

Quando são utilizados computadores ou equipamento automatizado para aquisição, processamento, registro relato, armazenamento ou recuperação de dados de ensaio, o laboratório deve assegurar que: o software desenvolvido pelo usuário esteja documentado em detalhes suficientes e apropriadamente validados [...] (NBR-ISO/IEC 17025,2001, requisito 5.4.7.2)

Podem ser considerados suficientemente validados os softwares comerciais de prateleira [...], utilizados em aplicações de cunho geral dentro do campo de aplicação para o qual foram projetados. (NBR-ISO/IEC 17025,2001, nota do requisito 5.4.7.2)

Conforme já mencionado no item 4.2.4.4, em termos específicos da estrutura para aplicação de estresse térmico, deve-se avaliar ao menos os gradientes espacial e temporal de temperatura no espaço de trabalho, ou seja na região em que os produtos serão colocados sob ensaio. E também a diferença entre a temperatura definida pelos controles e a temperatura real no interior da estrutura. Todos os valores obtidos e suas faixas de incerteza devem estar dentro de limites aceitáveis preestabelecidos. Maiores detalhes sobre este assunto podem ser encontrados em [54].

4.2.6.2 Rodar ensaio

A realização do ensaio envolve três etapas principais: precipitação de falhas, detecção de falhas e análise de falhas. Esses tópicos são igualmente importantes, porém, a maioria das pessoas envolvidas nestes ensaios têm uma boa idéia de como induzir falhas mas compreendem pouco sobre a sua detecção e análise [1].

- A precipitação de falhas, já discutida ao longo desta dissertação, é a transformação de defeitos latentes no produto em falhas detectáveis. Ela é feita através da exposição dos produtos aos estresses estabelecidos e é apenas o ponto de partida para se obter algum resultado do ensaio. Deve-se observar que se as falhas forem precipitadas mas não detectadas nenhuma ação será feita no sentido de eliminá-las ou controlá-las e elas vão continuar ocorrendo [1].
- Detectar falhas significa identificar não apenas que um produto falhou mas também a localização da falha e de que forma ela se manifestou. De acordo com a estratégia de monitoramento do produto e a sua estrutura definida, a detecção de falhas pode ser mais ou menos eficiente e prover mais ou menos informações [1]. Um aspecto a ser considerado é que um certo percentual de defeitos pode somente ser detectável nos níveis de unidade ou sistema quando todos ou a maioria dos componentes estão conectados e operando. Um FMEA pode ser uma ferramenta interessante para auxiliar na estimação da eficiência de detecção [29].
- Após uma falha ser detectada, análises de modos de falha (FMA) podem ser realizadas. Isto requer conhecimento sobre o que falhou, porque falhou, quando falhou, onde falhou e como falhou. Após um FMA completo ser feito, pode-se aplicar o que foi aprendido para implementar ações corretivas [1].

Além destas três etapas principais, cada ensaio possui um fluxo próprio de realização do ensaio dependendo dos seus objetivos. A figura 4.7, ilustra os fluxos básicos para algumas das técnicas tratadas neste trabalho, considerando aos seus objetivos principais.

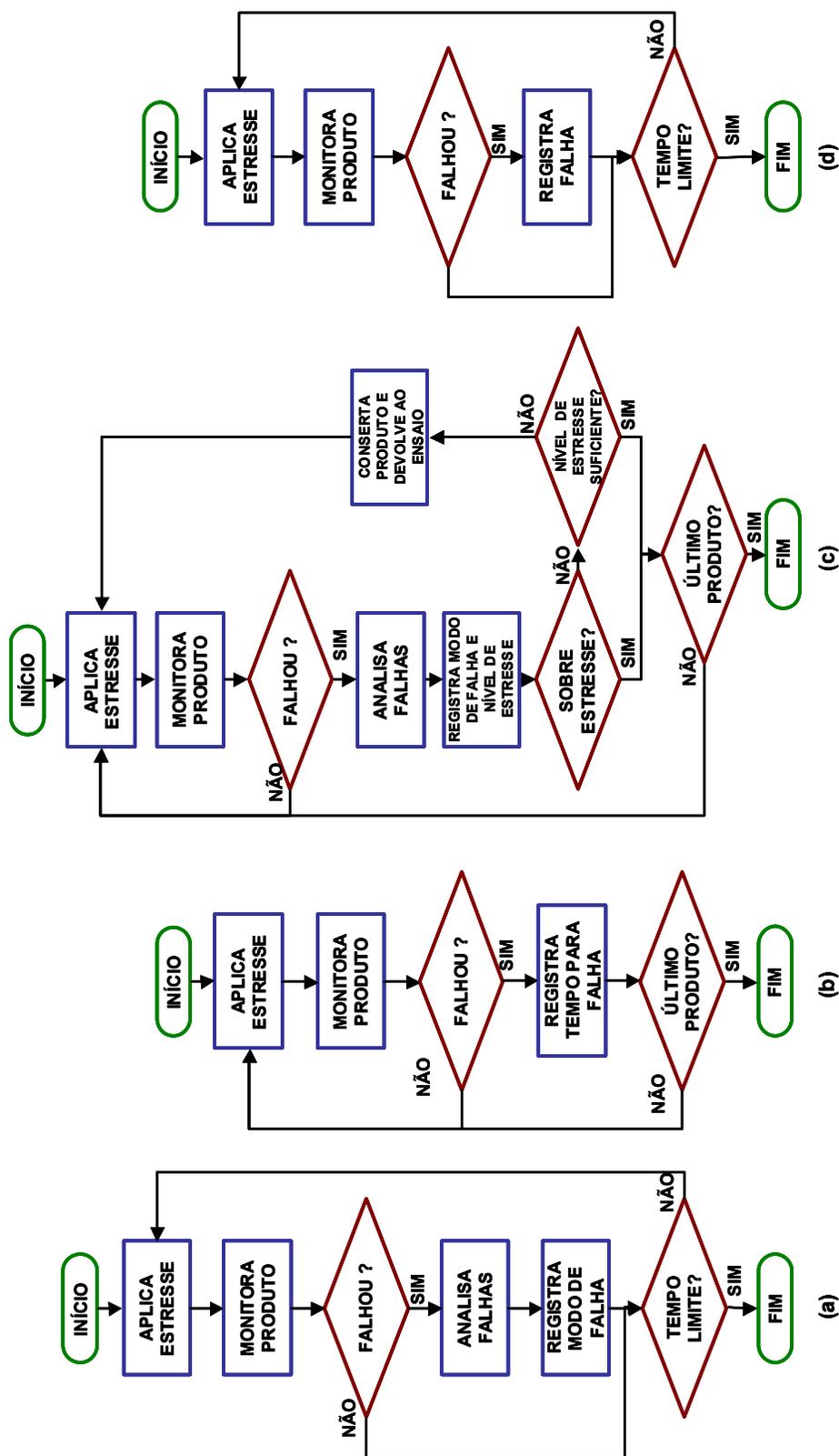


Figura 4.7 – Fluxos básicos para a realização dos ensaios (a) AST, HAST , (b) ALT, (c) HALT e (d) ESS, Burn-in, HASS.

Como pode ser observado nas figuras 4.7 *b* e *d*, algumas técnicas de ensaio não possuem o objetivo de encontrar modos de falha e portanto não incluem a etapa de análise de falhas citada anteriormente. Porém, a chave da melhoria da qualidade e confiabilidade é justamente esta: encontrar e eliminar ou minimizar a causa raiz das falhas [2] e portanto, sempre que possível, é interessante a sua realização, mesmo que seja uma etapa a parte do ensaio.

Este processo é um tipo de autópsia, no qual um produto inoperante ou operando inadequadamente é analisado para encontrar as partes falhadas, e então dissecá-las cuidadosamente para aprender o que causou a falha. Isto requer os serviços de um laboratório bem equipado e com profissionais experientes, com capacidade de aplicação de técnicas mecânicas e químicas de seccionar partes, de microscópios ópticos e eletrônicos, e outros equipamentos de teste especializados. Na prática, nem todas as partes falhadas podem ser analisadas e nem sempre uma causa provada pode ser obtida de todas as análises. Para estar realmente certo da causa, deve-se ser capaz de comprovar a análise pela prática de causar falhas similares em partes novas, particularmente onde sobre-estresse elétrico é suspeito [2].

Análises físicas de falhas são particularmente importantes quando se trata das relações na cadeia de fornecimento. Este é um ponto de discussões, onde no mundo dos fabricantes de semicondutores a maioria das falhas são causadas por sobre-estresse aplicado depois que a parte foi chegou ao cliente, enquanto o fabricante de equipamento eletrônico está igualmente certo que a maioria das falhas dos componentes envolvem partes que são fracas ou defeituosas quando recebidas do fornecedor. Este ponto delicado pode ser resolvido por uma análise talentosa de falhas que determine a sua causa raiz [2].

Idealmente os dados de falha devem ser capturados em tempo real. No mínimo, dados devem ser capturados no final de cada turno de produção para garantir que os detalhes pertinentes da falha não sejam esquecidos.

4.2.6.3 Registrar dados e resultados do ensaio

A aquisição e registro de dados relacionados ao ensaio são essenciais ao processo de definição e controle do ensaio. Eles ajudam a estabelecer a curva de aprendizagem requerida, integrada com os objetivos estabelecidos. Alguns dados e resultados que podem ser registrados são [5]:

- Sintomas das falhas;

- Parâmetros ambientais no momento da falha;
- Ciclo durante o qual a falha ocorreu;
- Tempo em que a falha ocorreu;
- Causa da falha, baseada em análises da parte falhada
- Anomalias observadas durante o ensaio.

Os dados e resultados do ensaio obtidos devem ser documentados de forma a facilitar análises futuras, seja para a comparação do que está sendo executado com o planejado, para avaliação dos resultados obtidos se podem ou não ser melhorados, ou identificar alguma situação particular que tenha afetado os resultados do ensaio. Além disso, estes registros servirão para o acompanhamento da efetividade e estabilidade do ensaio ao longo do tempo [2][5][29].

4.2.7. Avaliação do ensaio

A partir dos dados e resultados obtidos do ensaio, uma avaliação do comportamento dos seus parâmetros e uma estimativa da sua eficiência em relação aos objetivos estabelecidos podem ser feitas, e melhorias podem ser implementadas. A figura 4.8 ilustra um ciclo geral de avaliação e melhoria dos ensaios.

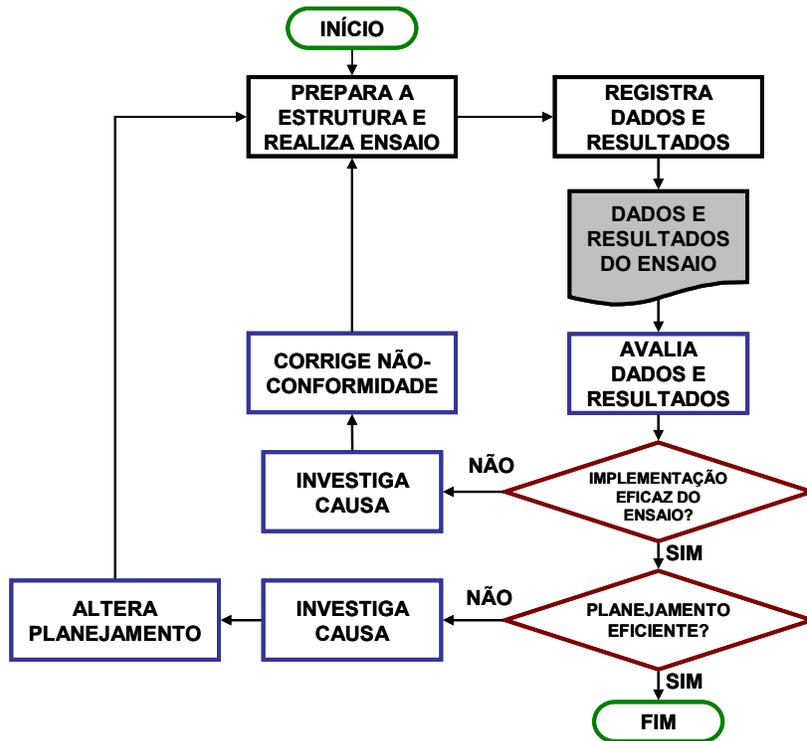


Figura 4.8 – Fluxo de avaliação do ensaio para liberação.

Este ciclo deve ser feito tanto quanto necessário e possível para identificar necessidades de correção ou modificação em alguma etapa da implementação ou do planejamento do ensaio antes da sua liberação.

Porém, para os ensaios tratados nesta dissertação, isto é válido apenas para os ensaios que terão uma continuidade, ou seja, que servirão como monitoramento do produto ou processo produtivo. Já para os ensaios utilizados para coletar informação sobre o produto durante a fase de desenvolvimento do mesmo, em geral, o primeiro ciclo é considerado o próprio ensaio pois, em função do tempo e itens disponíveis para serem ensaiados, não existe a possibilidade de se realizar o ensaio várias vezes até que ele esteja em uma situação supostamente ideal para a sua execução. No entanto, mesmo não havendo a possibilidade de se melhorar o ensaio em questão para o momento atual, os seus dados e resultados devem ser analisados para que seja possível o aprendizado para futuros ensaios que serão planejados.

4.2.7.1 Avaliar eficácia do executado

Apesar de a estrutura de ensaio ter sido previamente validada, apenas após rodar o ensaio completo é que o comportamento real do conjunto estrutura de ensaio, produto e parâmetros de ensaio pode ser totalmente avaliado. O ensaio deve ser avaliado, através de seus dados e resultados, no sentido de verificar a sua eficácia. Ou seja, se não está acontecendo alguma não conformidade em relação ao planejado em função de desvios durante a implementação, os quais podem gerar erros na avaliação dos produtos.

Erros de avaliação do produto podem ser divididos em três categorias maiores: aqueles relacionados a própria unidade sob avaliação, aqueles relacionadas ao sistema de teste, e aqueles relacionados a sobre-estresse [2]. O primeiro pode ser exemplificado por um problema aleatório no software do produto, o segundo por um mau contato nas conexões da estrutura de ensaio e o terceiro por uma sobre-tensão da rede. O que se deve ter em mente é que o sistema de ensaio deve ser totalmente validado antes de qualquer tomada de decisão em relação ao produto, ao processo produtivo ou ao próprio planejamento do ensaio em função dos resultados obtidos.

4.2.7.2 Avaliar eficiência do planejado

Supondo que as não conformidades da implementação do ensaio tenham sido corrigidas, resta avaliar se o que foi planejado é adequado para atender os objetivos do ensaio ou se ele pode ser otimizado.

Um aspecto que deve ser avaliado, por exemplo, é a eficiência econômica do ensaio considerando a propensão do item para defeitos e a habilidade do ensaio em precipitar esses defeitos em falhas. A propensão para defeitos é quase sempre dependente do projeto do produto e do processo produtivo utilizado [63]. Embora difícil de se prever, é possível citar alguns fatores que, em geral, a influenciam gerando oportunidades de defeitos [29]:

- Complexidade: a quantidade e tipo de partes e interconexões usadas no produto afetam a densidade de defeitos. Complexidade aumentada cria mais oportunidades de defeitos.
- Nível de qualidade das partes: este fator tem forte relação com a escolha adequada de fornecedores e materiais de classes superiores.
- Ambiente de estresse: as condições de estresse as quais o produto será exposto, afetará diretamente a proporção dos defeitos que serão precipitados ao longo da vida do produto. Isto tem uma relação direta com a margem de segurança.
- Maturidade do processo: produção nova requer tempo para identificar e corrigir problemas de planejamento e processos, treinar pessoal e estabelecer controles de processo e fornecedores. Maturidade é dependente de volume e tempo. Baixo volume de produção em um longo período teria uma taxa de maturidade baixa e teria impacto na densidade de defeito.
- Densidade de empacotamento: montagens eletrônicas com alta densidade de partes e ligações são mais susceptíveis à defeitos induzidos por processo, interação humana e temperatura, devido à menores margens de erros, dificuldade de re-trabalho aumentada e problemas de controle de temperatura.
- Engenharia Simultânea: análises de projeto apropriadas e aplicações dos princípios da engenharia simultânea durante a fase de projeto tenderá a garantir um produto confiável e de produção facilitada e reduzindo as possibilidades de geração de defeitos latentes e erros.

- Controles do processo produtivo: bons controles de processo tenderão a reduzir o número de defeitos que são introduzidos no produto.
- Qualidade da mão de obra: Reduz a introdução de defeitos de manufatura no produto.

Quando se identificar que a eficiência do ensaio precisa ser melhorada, algumas ações devem ser tomadas. No caso de o ensaio estar gerando um resultado aquém do esperado, considerando que a propensão para defeitos do produto não tenha sido superestimada, modificações devem ser feitas para melhorar a sua eficiência como, por exemplo, aumentar o nível de estresse. Por outro lado, se os resultados estiverem além do esperado, decisões devem ser tomadas no sentido de reduzir o regime de ensaio, como, por exemplo, reduzir a duração do ensaio. Quando se aplicam mais esforços do que o necessário, isto gera um impacto negativo em custo e cronograma [29].

4.3. Considerações Finais ao Modelo

O modelo apresentado contempla o planejamento do ensaio e não o seu monitoramento ao longo do tempo. No entanto deve-se enfatizar que uma vez que o ensaio seja liberado, nos casos em que isto faz sentido, o seu sucesso a longo prazo depende do monitoramento dos resultados ao longo do tempo e sua comparação com o que está acontecendo em campo. É somente através da alimentação retroativa de dados de campo que o programa pode manter-se balanceado em termos de remoção efetiva de defeitos latentes e custo. Isto é importante pois, variações nos resultados do ensaio podem aparecer em decorrência de vários fatores como por exemplo: mudanças de fornecedores, alteração do processo produtivo, novas tecnologias de montagem, planejamento inicial com bases pessimistas e ações corretivas tomadas ao longo do tempo. Resumindo, estas mudanças podem eliminar algum defeito existente ou introduzir novos defeitos, o que provoca diferenças entre o previsto e o ocorrido [5][29][31]. Controle estatístico de processo e gráficos de Pareto são ferramentas que podem auxiliar no monitoramento da performance do ensaio e permitir a sua avaliação e melhoria ao longo do tempo.

Nos casos em que o ensaio seja realizado apenas uma vez, os resultados também devem ser comparados com o que aconteceu em campo para checar a validade das conclusões obtidas do ensaio e gerar conhecimento para planejamentos futuros. A medida que dados acumulam, problemas podem ser mais rapidamente identificados e resolvidos, e perfis de ensaio alterados para garantir que o ensaio seja efetivo tanto tecnicamente como economicamente.

Como se pode concluir, o planejamento desses ensaios é um processo dinâmico e o seu comportamento varia de produto para produto e de processo para processo. O que se espera com esta dissertação é que com o modelo de planejamento, as informações acerca dos principais aspectos relacionados ao planejamento dos ensaios, as recomendações feitas para a aplicação de estresse térmico, os conhecimentos passados nos demais capítulos e as referências bibliográficas fornecidas, os profissionais que estejam iniciando neste tema sejam capazes de planejar alguns dos ensaios de estresse apresentados no capítulo 3 e adaptá-los de acordo com a sua realidade.

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1. Sobre a Dissertação

A proposta desta dissertação foi formulada dentro do contexto da melhoria da confiabilidade de produtos eletrônicos. No entanto, conforme visto no capítulo 1, o desenvolvimento da confiabilidade vai muito além do apresentado nesta dissertação. Existem outras ferramentas, técnicas, ensaios e análises que também podem e devem ser utilizadas para produzir um produto de alta qualidade e confiabilidade. Esta dissertação não foi desenvolvida com a intenção de propor uma solução completa ao problema da confiabilidade, mas sim, tratar da parcela que pode ser solucionada através da utilização dos ensaios de estresse térmico. O que se procurou fazer foi suprir uma carência de informações percebida através das pesquisas realizadas no desenvolvimento da dissertação e da observação do status do tema nas micro e pequenas empresas catarinenses.

Buscou-se desenvolver esta dissertação sem perder de vista seu objetivo geral que é auxiliar empresas que estejam se iniciando na aplicação de ensaios de estresse térmico no planejamento adequado destes ensaios. Ao final do desenvolvimento deste trabalho, pode-se afirmar que a dissertação, diferentemente das bibliografias existentes, reúne, em forma orientada à aplicação, uma gama de informações pertinentes ao tema que dificilmente são encontradas em conjunto. Além disto, entende-se que o modelo proposto para orientar o planejamento dos ensaios, bem como, os parâmetros iniciais fornecidos para a realização de alguns ensaios serão de grande utilidade para que seja dado um primeiro passo na direção da implementação de ensaios para melhoria da confiabilidade.

Procurou-se apresentar, mesmo que de forma superficial, as informações essenciais para o entendimento dos conceitos envolvidos na implementação dos ensaios. Tomou-se também um

cuidado especial em buscar bibliografias consistentes e, a medida do possível, amplamente utilizadas por profissionais do meio. Essas bibliografias poderão ser usadas como referência por aqueles que desejarem ir além do alcançado neste trabalho.

5.2. Sobre o Modelo de Planejamento Proposto

Apesar de não ter sido realizado um estudo de caso que validasse o modelo proposto, entende-se que ele atende o objetivo desta dissertação, visto que foi desenvolvido com base em alguns modelos consolidados de aplicação específica para determinadas técnicas de ensaio. Entre eles, os procedimentos utilizados pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos contidos no documento MIL-HDBK-344 [29]. Porém, buscou-se suprir algumas deficiências observadas nestes procedimentos em função da realidade das empresas ser bastante distinta daquela das entidades militares. Exemplos disto são a inexistência nas empresas de dados históricos sobre o comportamento dos produtos e a necessidade de se aplicar procedimentos menos complexos e burocráticos. Estas diferenças foram percebidas principalmente a partir da busca de uma solução de ensaio para uma empresa interessada no tema e das dúvidas geradas durante o desenvolvimento do trabalho.

Um outro aspecto a ser considerado, é que o modelo proposto foi pensado não para atender uma técnica específica de ensaio mas, pelo contrário, para orientar o profissional a refletir sobre as diferentes técnicas existentes e qual é a mais adequada para atender as suas necessidades reais, ao invés de apenas repetir o que é feito em outra empresa, como acontece em muitos casos. Apesar da mistura existente, tanto na literatura como no ambiente industrial, sobre a denominação das técnicas de ensaio, foi possível, a partir das características de cada uma delas e da orientação do Centro de Análises de Confiabilidade (RAC) [30], esclarecer e estabelecer uma comparação que facilita a seleção da técnica adequada para cada finalidade.

A maior dificuldade foi desenvolver um modelo que tivesse um âmbito de generalidade suficiente para englobar todos os ensaios apresentados, porém, com um nível de detalhamento mínimo para que não se tornasse um modelo puramente teórico, mas sim pudesse oferecer informações para a sua utilização prática. Como se sabe, as empresas são muito diferentes umas das outras, apresentando situações diversas como por exemplo:

- Disponibilidade ou não de dados de falha;
- Existência de diferentes necessidades a serem supridas pelos ensaios;

- Diferentes possibilidades na definição da estrutura de ensaio devido à fatores financeiros ou simplesmente pela existência a priori de alguma estrutura na empresa;
- Diferentes quantidades de produtos disponíveis para serem ensaiados.

Devido à esta variedade de situações que podem ser encontradas e principalmente ao desejo de desenvolver um modelo que atendesse a diferentes técnicas de ensaio, não foi possível fazer uma sistemática detalhada com um fluxo de operações a serem realizados. O modelo não deve ser visto como algo a ser seguido passo a passo. Existem etapas que podem simplesmente não fazer sentido em determinadas situações devido ao cenário de cada empresa.

O modelo proposto não diz qual técnica deve ser escolhida, qual o nível de montagem que deve ser ensaiado, qual o tipo de estresse que deve ser usado e muito menos a especificação da infraestrutura necessária, visto que estas definições podem variar de produto para produto e de empresa para empresa em função do cenário existente e da estratégia de atuação adotada. No entanto, o modelo busca fornecer informações e alguns direcionamentos que auxiliem o profissional a tomar as decisões mais acertadas a partir do seu conhecimento sobre a empresa e o produto.

Embora o modelo tenha sido definido com um caráter mais geral, ou seja não havendo restrição de técnica ou tipo de estresse, as recomendações fornecidas ao longo do seu detalhamento foram direcionadas para estresse térmico, visto que este é o foco da dissertação. As recomendações apresentadas para a aplicação de ensaios de estresse térmico visam a orientar os interessados no tema a aplicar de forma consciente as condições mais adequadas e seguras para o seu produto.

É importante ressaltar que a etapa de clarificação da tarefa é de suma importância. Isto fica evidente, principalmente, nos casos de *screening*, que são os ensaios mais utilizados. O que se percebe em muitas empresas é que não se tem bem definido o porquê da utilização destes ensaios. As empresas, em uma grande parte, não possuem dados sobre o comportamento de seus produtos em relação a falhas em campo, portanto, não sabem ao certo se este tipo de ensaio é realmente necessário e economicamente justificável.

Deve-se observar também, que a etapa de validação da estrutura, pode parecer rigorosa demais para profissionais que, em geral, realizam ensaios de *screening* sob condições completamente fora de controle e afirmam que mesmo assim obtêm resultados positivos. No entanto, este rigor permite uma avaliação consistente dos ensaios, visando a geração de ações de otimização do

mesmo. Isso permite, muitas vezes, minimizar tempo de ensaio, o que gera um impacto real em custo, o que não poderia ser feito com segurança sem o conhecimento adequado do comportamento da estrutura de ensaio.

Um aspecto que deve ser ressaltado sobre a implementação do modelo é a importância do envolvimento de representantes de diferentes áreas no planejamento dos ensaios. Por exemplo, o pessoal da qualidade pode examinar dados históricos de campo e reportar os tipos de falhas que ocorreram em cada período para serem analisadas, gerando assim informação sobre os defeitos necessários de serem precipitados. A engenharia pode fornecer informações sobre as tolerâncias dos produtos, limitações de manuseio e outros fatores. A produção pode apontar áreas de complexidade ou de risco do processo. O pessoal de ensaios e serviços de campo podem ajudar a selecionar o perfil mais apropriado de estresses para expor os defeitos latentes, bem como desenvolver expectativas de taxa de falhas de campo para novos produtos.

Uma consideração também deve ser feita com relação a adequação do ensaio acelerado, pois ensaios acelerados não expõem todos os problemas de confiabilidade e qualidade do produto. Por exemplo, a maioria dos defeitos de software não são detectados usando estresses físicos nos componentes eletrônicos. Entretanto, softwares são usados durante a avaliação do produto, e portanto os defeitos podem ser descobertos em função do uso. Conseqüentemente, é importante ter certeza que qualquer falha suspeita de software durante avaliação do hardware seja analisada e corrigida, além de realizar outros testes especificamente projetados para avaliar softwares.

Por fim, é importante ressaltar novamente que este modelo visa a dinamização dos ensaios os quais devem estar sempre sendo otimizados a partir dos dados e resultados obtidos tanto a partir de sua aplicação como das observações do comportamento do produto em campo.

5.3. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Estudar a integração dos ensaios apresentados aos sistemas de garantia da qualidade, como por exemplo a sistemática para implantação da garantia da qualidade em empresas montadoras de placas de circuito impresso proposta na referência [48].
- Estudar os aspectos metrológicos dos ensaios e a influência da variação dos parâmetros de ensaio para os resultados do mesmo, visando a estabelecer a variação permissível na sua implementação.

- Estudar mais a fundo as características de câmaras climáticas para estabelecer a especificação adequada das mesmas.
- Estudar e quantificar o impacto da utilização dos ensaios apresentados na confiabilidade dos produtos eletrônicos.

Referências Bibliográficas

- [1] THERMOTRON INDUSTRIES. **Fundamentals of Accelerated Stress Testing**. Holland, Michigan, United States of America: Thermotron Industries, 1998. 31p.
- [2] IRESON, W. Grant; COOMBS Jr., Clyde F.; MOSS, Richard Y. **Handbook of Reliability Engineering and Management**. 2. ed. New York, United States of America: McGraw-Hill, 1996. ISBN 0-07-012750-6.
- [3] MACHADO N., Vicente. **Metodologia para Garantia da Confiabilidade no Desenvolvimento de Produtos Mecatrônicos**. Maio de 2002. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [4] MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 3. ed. New York, United States of America: John Wiley & Sons, 1997. ISBN 0-471-30353-4.
- [5] THERMOTRON INDUSTRIES. **The Environmental Stress Screening Handbook**. Holland, Michigan, United States of America, 1988. 37p. Disponível em: <http://www.thermotron.com/_private/esshandbook.pdf> Acesso em :12 agosto 2003.
- [6] KECECIOGLU, Dimitri B.; SUN, Feng-Bin. **Burn-in Testing: Its Quantification and Optimization**. Pennsylvania, United States of America: DEStech Publications, 2003. 670 p. ISBN 1-932078-06-1.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Confiabilidade e Manutenibilidade: Terminologia, NBR 5462**. Rio de Janeiro, Brasil, Novembro de 1994.
- [8] UNITED STATES DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. U.S. Food and Drug Administration Agency (FDA). **Reliability of Manufactured Products**. Inspection Technical Guides n. 35, 1980. Disponível em: <http://www.fda.gov/ora/inspect_ref/itg/itg35.html> Acesso em: 7 maio 2003.
- [9] JENSEN, Finn; PETERSEN, Niels Erik. **Burn-in: An Engineering Approach to the Design and Analysis of Burn-in Procedures**. 1. ed. New York, United States of America: John Wiley & Sons, 1982. 167p. ISBN 0-471-10215-6.
- [10] WILKINGS, Dennis J. **The Bathtub Curve and Product Failure Behavior Part One: The Bathtub Curve, Infant Mortality and Burn-in**. n. 21, Novembro de 2002. Reliability Hotwire e-Magazine from Reliasoft Corporation. Disponível em: <<http://www.weibull.com/hotwire/issue21/hottopics21.html>> Acesso em: 7 maio 2003.

- [11] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Std 100: The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms**. 6. ed. Abril de 1997. 1278p. ISBN 1-55937-833-6.
- [12] AHMED, Josim U. **Modern Approaches to Product Reliability Improvement**. International Journal of Quality & Reliability Management, Birmingham, United Kingdom, v. 13, n. 3, May of 1996.
- [13] STAMATIS, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution**. Milwaukee, United States of America: ASQC Quality Press, 1995. p. 25-65. ISBN 0-87389-300-X.
- [14] BIBEN, Wolfgang. **Qualidade e Confiabilidade de Mostradores de Cristal Líquido e Produtos Eletrônicos**. In: CYTED VI-Seminário Ibero-americano de Mostradores de Informação. Trabalho apresentado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT-Brasil), Centro de Pesquisas Renato Archer (CenPRA), Divisão de Qualificação e Análise de Produtos Eletrônicos (DAPE). Campinas, Brasil. Apresentação, 45 slides.
- [15] RELIASOFT CORPORATION. **Understanding Accelerated Life-Testing Analysis**. In: Simpósio Internacional de Confiabilidade, 2003, Rio de Janeiro, Brasil. 16 p.
- [16] BIBEN, Wolfgang. Centro de Pesquisas Renato Archer (CenPRA), Divisão de Qualificação e Análise de Produtos Eletrônicos (DAPE). **RE: Dissertação Luciana** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <llu@labmetro.ufsc.br> em julho 2004.
- [17] INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL SCIENCES AND TECHNOLOGY (IEST). **Environmental Stress Screening Guidelines**. In: Environmental Stress Screening of Electronic Hardware Conference, 1981. Proceedings of the ESSEH.
- [18] FUNDAÇÃO CERTI. Centro de Metrologia e Inovação em Processos (CMIP). **Caracterização do Estado da Arte na Eletrônica de Produtos das PME's Catarinenses**. Janeiro de 2004. Florianópolis, Brasil. Pesquisa de Campo Realizada para o Projeto Start Up – LABelectron. Trabalho não publicado.
- [19] RELIASOFT CORPORATION. **Ensaio Acelerados**. 2001. Apostila de Treinamento.
- [20] RELIASOFT CORPORATION. **Life Data Analysis Reference**. 404 p., 2001. E-textbooks of reliability. Disponível em: <<http://www.weibull.com/lifedatawebcontents.htm>> Acesso em: 10 fevereiro 2004.
- [21] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). Information Technology Laboratory (ITL). Statistical Engineering Division (SED); SEMATECH. **e-Handbook of Statistical Methods**. Capítulo 8, Seção 1. Disponível em: <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr16.htm>> Acesso em: 9 fevereiro 2004.
- [22] BURY, K. V. **Statistical Models in Applied Science**. New York, United States of America: John Wiley & Sons, 1975.
- [23] PAPOULIS, Athanasios. **Probability Random Variables and Stochastic Process**. New York, United States of America: McGraw-Hill, 1965. 583 p.

- [24] ADVANCED INPUT DEVICES (AID). **Highly Accelerated Life Testing (HALT) and Highly Accelerated Stress Screening (HASS)**. 2000. White Paper. Disponível em: <<http://www.advanced-input.com/AIDpdfDownloads/HALT-HASS.pdf>> Acesso em: 28 maio 2003.
- [25] INMETRO. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM)**. Rio de Janeiro: INMETRO/DIMCI, 1995. 52 p.
- [26] WAYNE, Nelson. **Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses**. New York, United States of America: John Wiley & Sons, 1990.
- [27] RELIASOFT CORPORATION. **Quantitative Accelerated Life Testing Data Analyses Software: Alta 6. Versão Corrente 6.0.12**.
- [28] KUO, Dr. Way; KIM, Taeho. **An Overview of Manufacturing Yield and Reliability Modeling for Semiconductor Products**. In: Proceedings of the IEEE, Agosto 1999, v. 87, n. 8. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isNumber=16849&puNumber=5>> Acesso em: 7 maio 2003.
- [29] DEPARTMENT OF DEFENSE (U.S.A.). **Military Handbook: Environmental Stress Screening of Electronic Equipment, MIL-HDBK-344A**. Washington, United States of America, August of 1993.
- [30] RELIABILITY ANALYSES CENTER (RAC). **RE: RAC Inquiry Form/ Definitions** [mensagem pessoal enviada por Bruce W. Dudley, Senior Reliability Engineer]. Mensagem recebida por <llu@labmetro.ufsc.br> em 20 janeiro 2004.
- [31] RELIABILITY ANALYSES CENTER (RAC). **Environmental Stress Screening**. In: Selected Topics in Assurance Related Technologies (START), Volume 7, Número 3, 2000. Disponível em: <<http://rac.alionscience.com/pdf/Ess.pdf>> Acesso em: 12 agosto 2003.
- [32] LAKSHMINARAYANAN, V. **Environmental Stress Screening Improves Electronic Design Reliability**. Bangalore, India: Centre for Development of Telematics (C-DOT), 20 de Setembro de 2001. Disponível em: <<http://www.reed-electronics.com/ednmag/archive/2001>> Acesso em 12 agosto 2003.
- [33] TURIN NETWORKS. **High Reliability Challenge of Broadband Equipment: Optimizing Hardware Reliability with HALT and HASS**. 2002, 8 p. White Paper. Disponível em: <<http://www.turinnetworks.com/highreliabilitychallenge.pdf>> Acesso em: 06 maio 2003.
- [34] LECKLIDER, Tom. **How to Avoid Stress Screening**. In: Evaluation Engineering Magazine (EE), Maio de 2001. Technical Article. Disponível em: <<http://www.navicpmart.com/advice/advicetmp.cfm/s/>> Acesso em: 21 janeiro 2004.
- [35] TUTORIALS WEB. **Reliability and Accelerated Testing**. Disponível em: <<http://www.tutorialswb.com/reliability/reliability.htm>> Acesso em: 12 agosto 2003.
- [36] BIBEN, Wolfgang. **Burn-in**. Campinas, Brasil: Ministério da Ciência e Tecnologia, Centro de Pesquisas Renato Archer (CenPRA), Divisão de Qualificação e Análise de Produtos Eletrônicos (DAPE), 2003. 8 slides, color.

- [37] BIBEN, Wolfgang. **Burn-in**: Estágio realizado na Divisão de Qualificação e Análise de Produtos Eletrônicos (DAPE) do Centro de Pesquisas Renato Archer (CenPRA) do Ministério da Ciência e Tecnologia, Novembro de 2003. Anotações de Estágio.
- [38] UNITED STATES DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. U.S. Food and Drug Administration Agency (FDA). **Screening Electronic Components by Burn-in**. Inspection Technical Guides n. 19, 1975. Disponível em: <http://www.fda.gov/ora/inspect_ref/itg/itg19.html> Acesso em: 12 maio 2003.
- [39] KUO, Dr. Way. **Optimal Burn-in for Percentile Residual Life**. In: Seminário de Primavera do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Illinois em Chicago (UIC), 29 de Março de 2001, Chicago, United States of América. Artigo. Disponível em: <http://mfnl.xjtu.edu.cn/edu-uic-me/seminars/spring_2001/> Acesso em: 7 maio 2003.
- [40] DEPARTMENT OF DEFENSE (U.S.A.). **Military Standard**: Test Methods Standard Microcircuits, MIL-STD-883E. Washington, United States of America, December of 1996.
- [41] PFEIFER, Tilo; TORRES, Fernando. **Manual de Gestión e Ingeniería de la Calidad**. Zaragoza, Espanha: Mira Editores, 1999. p.28. ISBN 84-89859-43-4.
- [42] BESTERFIELD, Dale H. **Quality Control**. 5. ed. New Jersey, United States of America: Prentice-Hall, 1998. p. 219-390. ISBN 0-13-673831-1.
- [43] GONÇALVES Jr., Armando A. **Metrologia**: Parte I - 2001.1. Florianópolis, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Metrologia e Automatização, 2001. Apostila do Curso de Pós-graduação de Metrologia Científica e Industrial.
- [44] JOHNSON, Richard A. **Miller & Freund's Probability & Statistics for Engineers**. 15. ed. New Jersey, United States of America: Prentice-Hall, 1994. p. 216-267. ISBN 0-13-721408-1.
- [45] GONÇALVES Jr., Armando A. **Inferências Relativas à Média**. Florianópolis, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Metrologia e Automatização (LABMETRO), Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Disciplina de Fundamentos de Metrologia e Estatística (FME), 2002. 14 slides.
- [46] THEISEN, Álvaro M. de Farias. **Fundamentos da Metrologia Industrial**: Aplicação no Processo de Certificação ISO 9000. Porto Alegre, Brasil: LABELO, PUC-RS, 1997. p. 190.
- [47] SOARES Jr., L. **Confiabilidade Metrológica no Contexto da Garantia da Qualidade Industrial**: Diagnóstico e Sistematização de Procedimentos. 1999. 120 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [48] PARKER, T. Paul. **ESS Case Study of a High Density Surface Mount Circuit Card**. In: Proceedings of the Institute of Environmental Sciences Annual Technical Meeting, p. 393-402, May of 1991.

[49] DORO, Marcos M. **Sistemática para Implantação da Garantia da Qualidade em Empresas Montadoras de Placas de Circuito Impresso**. Maio de 2004. 150 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[50] DEPARTMENT OF DEFENSE (U.S.A.). **Military Handbook: Environmental Stress Screening Process for Electronic Equipment**, MIL-HDBK-2164A. Washington, United States of America, June of 1996.

[51] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Measurement Management Systems: Requirements for Measurement Processes and Measuring Equipment**, NBR ISO 10012. Rio de Janeiro, Abril de 2003.

[52] MACIEL, Carlos A. **Câmaras Climáticas são Indicativos do Controle de Qualidade**. São Paulo, Brasil: Material disponibilizado por BASS Equipamentos Ltda. (artigo fornecido em 2003).

[53] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Requisitos Gerais para Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração: NBR ISO/IEC 17025**. Rio de Janeiro, Janeiro de 2001. 20 p.

[54] BRIONISIO, Júlio Dutra. **Avaliação do Perfil Térmico de uma Câmara Climática**. In: III Congresso Brasileiro de Metrologia – Metrologia para a Vida, Setembro de 2003, Recife. Anais em CD-ROM: Sociedade Brasileira de Metrologia.

[55] FIGLIOLA, Richard S.; BEASLEY, Donald E. **Theory and Design for Mechanical Measurements**. 2. ed. New York, United States of America: John Wiley & Sons, 1995. p.283-343, Capítulo 8.

[56] DOEBELIN, E. O. **Measurement Systems: Application and Design**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1990.

[57] FLESCHE, Carlos A.; BARP, A. M. **Avaliação a Priori da Incerteza em Sistemas Modulares de medição de Temperatura**. In: IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIDIM/99. Anais em CDROM. Santiago de Chile, 23 a 26 novembro. 1999.

[58] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Specification for Industrial Platinum Resistance Thermometers: ASTM E1137-97**.1997. 6p.

[59] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **Reference platinum precision resistance thermometers: DIN IEC 751**.

[60] CASAROTTO FILHO, Nelson; KOPITZKE, Bruno Hartmut. **Análise de Investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2000. 458p. ISBN 8522425728.

[61] DONATELLI, Gustavo D. **Evaluación de la Calidad en Producción**. Comahue: Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Grupo de Metrología y Aseguramiento de la Calidad, 2002. 55 slides, color.

[62] BENBOW, Donald W.; BERGER, Roger W.; ELSHENNAWY, Ahmad K.; WALKER, H. Fred. **The Certified Quality Engineer Handbook**. Milwaukee, United States of America: ASQC Quality Press, 2002. p. 38-48. ISBN 0-87389-502-9.

[63] DENSON, Willian K. **Is burn-in cost effective?** RAC Journal, 1º quartil 1995, v. 3, n. 1, Ask the RAC. Disponível em: <http://rac.alionscience.com/DATA/JOURNAL/4TH_Q1993/ask_rac.html> Acesso em: 04 maio 2003.