

**Estudo e Implementação de um Teste de Aceleração Térmica
para a Melhoria da Qualidade e Confiabilidade
de Componentes e Sistemas.**

Setembro - 1993

Autor
Felippe Carneiro [Leão 426]

Orientador
Prof. Dr. Peter Jürgen [Tatsch]

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica
Departamento de Semicondutores, Instrumentação e Fotonica

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da
Universidade Estadual de Campinas - FEE/UNICAMP,
como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por FELIPPE CARNEIRO LEÃO

... e aprovada pela Comissão
Julgadora em 28 09 1993.

Peter Jürgen Tatsch
Orientador

Comissão Julgadora

Composição	Nome	Departamento
Presidente	Prof. Dr. Peter Jügen Tatsch	FEE/DSIF
Membro Titular	Prof. Dr. Luis Carlos Barbosa	IFGW
Membro Titular	Prof. Dr. Edmundo da Silva Braga	FEE/DEMIC
Membro Suplente	Prof. Dr. Vilmar Bueno de Moraes	FEE/DEMIC

Agradecimentos

A todos que os que, de uma alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial:

À Luz, Diego e Caio pelo amor e carinho.

Ao Meu Orientador e Amigo Peter por ter acreditado neste trabalho.

À Paulinha pelas correções de Português e ao Juquinha e Marina por terem cedido o seu tempo para essas correções. (Os erros que permanecem são de minha responsabilidade).

Aos meus colaboradores Eduardo Moura, Vaqueiro, Fernanda e Ruth pelas orientações, esclarecimentos e valiosas ajudas sem as quais as dificuldades seriam maiores.

Aos meus amigos Teani, Guilherme, Nativio, Gilson Raeder, Marisa e família pelo apoio, incentivo e principalmente pela torcida.

Aos que, através da IBM, financiaram este trabalho.

Em especial ao Nelio e a Tereza cujo incentivo na hora certa não deixaram que eu desistisse.

E a Deus que me deu a Vida.

Índice

Capítulo 1. Conceitos Básicos de Qualidade e Confiabilidade⁵	1
1.1 Definições Básicas	1
1.1.1 Qualidade e Confiabilidade	1
1.1.2 Função Exigida	2
1.1.3 Intervalo de Tempo Determinado	2
1.1.4 Falha	2
1.1.5 Unidades de Confiabilidade	4
Capítulo 2. Distribuição de Vida ou Distribuição de Falha²	5
2.1 Funções Confiabilidade	5
2.1.1 Funções Distribuição e Função Densidade de Probabilidade.	5
2.1.2 Taxa de Falhas Médias e Instantâneas	6
2.1.3 Curva de Distribuição de Falhas - Curva da Banheira	11
2.2 Um Caso Típico	13
Capítulo 3. Aceleração Térmica da Distribuição de Vida⁵ - "Burn-In".	14
3.1 Modelo de Arrhenius	17
3.2 Comparando Resultados	23
3.3 Modelo de Arrhenius Aplicado a Sistemas ⁹	25
3.4 Tipos de "Burn-In".	28
3.5 Estratégias de "Burn-In".	29
Capítulo 4. Análise de Custo⁸	30
Capítulo 5. Procedimento Experimental	34
5.1 Um Roteiro Básico para a Definição de um Procedimento de "Burn-In".	35
5.2 Aplicação do Roteiro a uma Fonte de Alimentação	36
5.2.1 Descrição da Fonte de Alimentação	36
5.2.2 Lista de Materiais e Resultados de Laboratório.	37
5.2.3 Definição do Tempo de Vida a ser Coberto pelo Teste.	42
5.2.4 Identificação dos Pontos Críticos do Sistema.	44
5.2.5 Definição da Temperatura de Teste.	45
5.2.6 Cálculo do Tempo de Teste.	46
5.3 Comparando os Resultados.	48
5.4 Equipamentos Utilizados.	50
5.5 Procedimento Experimental Utilizado.	51
Capítulo 6. Considerações Finais	54
Capítulo 7. Bibliografia e Referências	56

Figuras

1.	Esquema Circular na Realização de um Produto.	vii
2.	Aspectos da Engenharia Moderna.	ix
3.	Evolução da Qualidade no Fluxo de Desenvolvimento	x
4.	Distribuição Exponencial de Falha	10
5.	Curva da Banheira	11
6.	Exemplo de Curva de Distribuição de Falha	13
7.	Curva de Distribuição de Falha de um 74LS00.	14
8.	Decomposição de uma Curva de Distribuição de Falha Trimodal	15
9.	Curva de Fator de Aceleração pela Temperatura	20
10.	Curva de Energia de Ativação pelo Fator de Aceleração	21
11.	Teste de Aceleração Térmica	23
12.	Distribuição de Custo por unidade de Peças produzidas.	31
13.	Otimização de Custo.	32
14.	Representação Esquemática do Procedimento de "Burn-In"	52
15.	Esquema Físico da Câmara de "Burn-In"	53

Tabelas

1. Energias de Ativação Típicas	19
2. Quadro comparativo dos Fatores de Aceleração	48

Introdução¹¹

Com a tendência mundial de se desenvolver um mercado livre, as indústrias são obrigadas não apenas a otimizar sua produção para minimizar seus custos e conseqüentemente obter um ganho na sua competitividade. O momento em que as indústrias estão entrando é o de integração das diversas fases que compõem o ciclo de realização ou desenvolvimento de um produto. Isto implica dizer que as decisões referentes à definição de um produto não estão mais restritas a uma ou duas funções dentro deste ciclo, ou Vendas ou Engenharia. É necessário que todos os grupos, ou funções, se integrem ao contexto do ciclo de desenvolvimento, colaborando para que o usuário final, o cliente, tenha em suas mãos um produto não apenas de baixo custo mas, também, que atenda às suas necessidades de aplicação.

A Figura 1 nos mostra como esta interação ocorre. Cada área dentro do ciclo de um produto recebe informações da área antecessora e a realimenta com novas informações, que são passadas para as áreas sucessoras que seguirão o mesmo procedimento. Este ciclo de alimentação e realimentação de informações vai aprimorando o processo de realização de um produto, tendo como conseqüência um produto final que atenderá de forma mais adequada às necessidades de seus clientes.

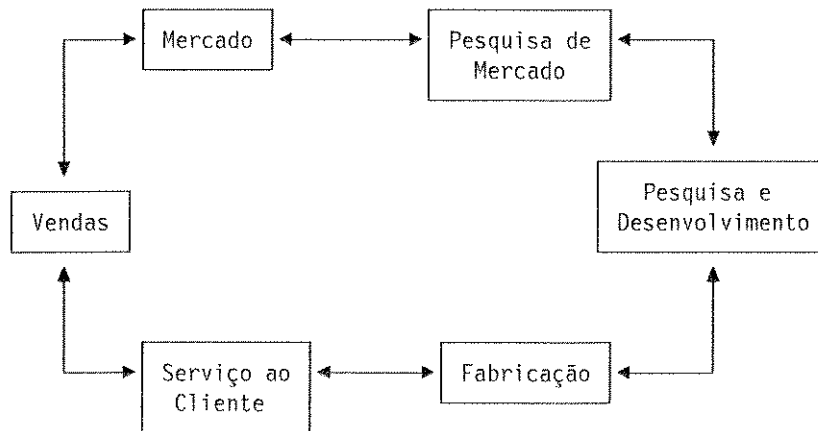


Figura 1. Esquema Circular na Realização de um Produto.

O Mercado compõe-se essencialmente pelos consumidores, em geral, de um determinado produto ou família de produto. Muito embora estes consumidores sejam entidades físicas, é usual quantificar este mercado em volume de dinheiro, pois desta forma é refletida a capacidade de consumo de cada entidade, assim como a capacidade de expansão deste mesmo mercado. Estas informações são obtidas pela Pesquisa de Mercado, que busca caracterizar a composição deste, como se divide e quais são as suas tendências.

Esta Pesquisa volta ao Mercado em forma de dados tabulados, nos quais cada consumidor pode se situar e montar estratégias de investimentos para as novas tendências que surgirão à sua frente, na tentativa de se manter em uma posição favorável frente aos seus concorrentes.

A Pesquisa de Mercado é quem vai permitir ao fabricante reavaliar sua posição neste mercado e redirecionar as Pesquisas e Desenvolvimento de novos produtos, sendo que estas alterações são revalidados com novas Pesquisas. Estas idas e vindas são constantes para se ter sempre produtos competitivos e capazes de melhorar a sua posição novamente.

Produtos Desenvolvidos devem ser de fácil fabricação, pois quanto mais fácil, menores serão os custos de produção. Para isso a Fabricação interage com Desenvolvimento para que, ainda em projeto, preocupações de montagem e teste do produto sejam avaliados na prancheta.

Por outro lado, Suporte ao Cliente entra na fabricação para conhecer o produto e representar os interesses do Cliente dentro do ciclo de realização do produto.

Suporte ao Cliente é o braço técnico de Vendas que vai até o mercado apresentar o seu produto.

Dentro deste contexto há dois pontos importantes a serem destacados:

- Características básicas do mercado.
- Fatores de competitividade.

O mercado moderno se caracteriza por uma urgência na satisfação de suas necessidades. Esta urgência se dá pela velocidade com que o mercado sofre modificações e conseqüentemente a adaptação a estas mudanças se torna um fator primordial na continuação dos negócios de cada indústria, fabricante ou usuário do produto.

Além disto, é preciso levar em conta que cada cliente tem sua própria capacidade de investimento e necessidades específicas. Isso implica dizer que cada produto tem uma capacidade de venda associada, ou seja, dentro de um balanceamento entre o investimento realizado, ou a ser realizado, na obtenção do produto (Custo) e o retorno esperado deste investimento (Benefício) o deslocamento deve ser favorável ao segundo prato da balança.

Este Benefício é expresso pelo cliente por intermédio de sua expectativa da capacidade de funcionamento do produto. Isto se dá através das funções que o produto realiza, mas também pela expectativa do tempo em que este produto é capaz de manter estas funções (Confiabilidade).

Para que o fabricante possa acompanhar este ritmo de mudanças de mercado, é necessário que ele tenha uma agilidade adequada no desenvolvimento de seus produtos. Neste aspecto a tendência é que cada fabricante se dedique a um nicho do mercado, no qual ele desenvolva uma especialização tal que haja uma redução no ciclo de realização de produto, pois quanto maior melhor. Porém, a dedicação a um nicho de mercado não é suficiente para garantir uma capacidade de competitividade. É necessária a implementação de novas técnicas de desenvolvimento de um produto, nos quais se incluem ferramentas dedicadas e, principalmente, a integração cliente/fabricante para que as necessidades do cliente estejam sendo plenamente atendidas, sem funções desnecessárias e indesejadas.

Esta interação faz com que haja uma otimização maior dos custos do produto, assim como uma qualidade maior no seu desempenho. Estes são fatores de competitividade dos quais nenhum fabricante pode se furtar, se realmente deseja se manter no mercado.

Aspectos da Engenharia Moderna¹³

Para acompanhar a tendência do mercado, a Engenharia Moderna tem que reestruturar seu processo de desenvolvimento, para poder incorporar elementos que permitam atender ao mercado dentro dos aspectos acima descritos.

A Figura 2 mostra como ela deve ser estruturada, de modo a integrar todas as características de mercado.

Como elementos de entrada temos as necessidades do mercado, nas quais o cliente define as funções desejáveis que devem ser incorporadas ao produto a ser desenvolvido. O fabricante agrega a isso os parâmetros de rendimento e informações dos concorrentes, de modo a incluir ou eliminar elementos desejáveis ou indesejáveis ao produto, para melhorar o seu fator competitividade dentro do nicho escolhido. Estas entradas serão forjadas pelo conhecimento prévio do fabricante em produtos similares, formadas a partir da sua base tecnológica.

São estes dois fatores que tornam um fabricante cada vez mais especializado em uma determinada tecnologia, ou mais especificamente, em um mercado muito reduzido. Porém, isto permite uma flexibilidade maior frente às mudanças deste mercado e este é um cuidado que o fabricante deve tomar para não se tornar obsoleto com o surgimento de novas tecnologias.

Este cuidado não deve ser apenas voltado para a atualização do conhecimento, mas também para o desenvolvimento de novas tecnologias, que servirão de fator de competitividade e até mesmo indicando ao mercado novas tendências. O fabricante que consegue impôr a sua tecnologia abre uma vantagem sobre os seus competidores, tanto a nível de produto como a nível tecnológico.

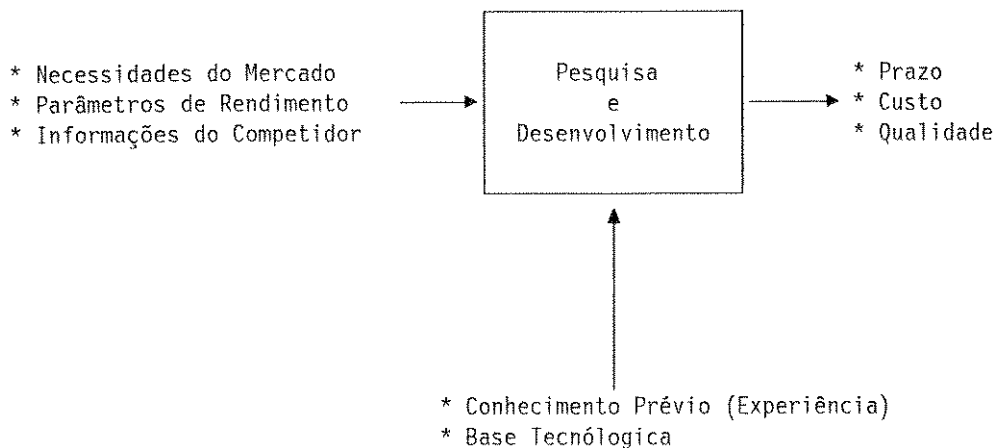


Figura 2. Aspectos da Engenharia Moderna.

Prazo, Custo e Qualidade passa a ser um trinômio fundamental que o fabricante deve ter como objetivo para conquistar mercado. Porém, este trinômio não pode ser analisado em separado, uma vez que, Qualidade e Prazo tem seu Custo. Cabe ao Fabricante buscar, dentro do processo de realização de produtos (Fig. 1), o equilíbrio desta balança de três braços. Este equilíbrio não necessariamente significa igualdade entre os três, Fabricante pode optar, dependendo dos seus dados de entrada (Fig. 2), por dar ênfase a um ou dois deles.

Em tempos passados, no equilíbrio desta balança, era freqüentemente desprezado o elemento Qualidade. No início da história da indústria não havia preocupação com este elemento. Com o tempo, o mercado foi se tornando cada vez mais exigente, e o Fabricante passou a utilizar os primeiros métodos de Controle da Qualidade, realizando uma Inspeção final em toda a sua produção.

Notou-se então, que a perda no processo, produtos inadequados ao uso, era muito alta e um desvio só era detectado quando já não havia meios de recuperar o produto e quando isso era possível, acarretava em operações extras, o que entrava a produção. Em ambas as situações, o Custo que isto implicava era necessariamente repassado ao Custo final do produto.

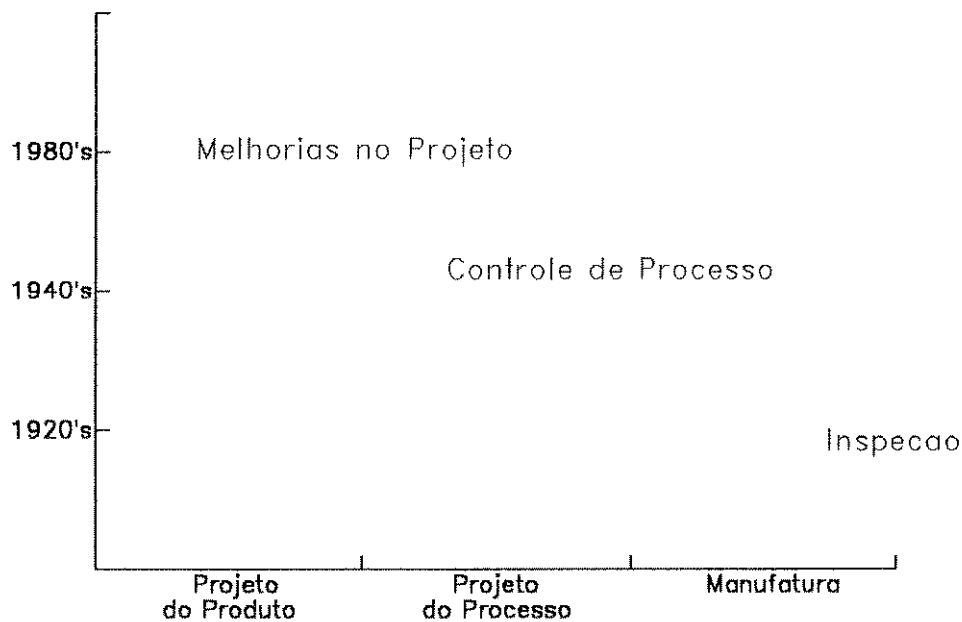


Figura 3. Evolução da Qualidade no Fluxo de Desenvolvimento

A partir da Estatística, foram sendo desenvolvidas ferramentas matemáticas que permitiram ao Fabricante mudar o controle da qualidade de uma inspeção final em toda a produção, para controles intermediários, ou seja, controles no final de cada fase da produção. Isso otimizou a detecção de problemas antes mesmo do produto estar pronto, identificando os mais freqüentes e auxiliando na melhoria do processo de fabricação. Este método é denominado Controle Estatístico de Processo.

Porém, para uma aplicação eficiente destas ferramentas foi necessário olhar o processo de um produto com uma nova perspectiva, a de controlar o processo de fabricação e não mais o produto, ou seja, se o processo estiver controlado e estabilizado, o resultado dele, que é o produto, também estará controlado e estabilizado.

Os resultados finais deste desenvolvimento foram acima do esperado. Com o processo sob controle há uma certeza de que todos os produtos fabricados saiam com a Qualidade desejada. No entanto, muito embora o índice de rejeição (perdas) de produtos tenha caído, esses controles ainda colaboram para um aumento no custo final do produto.

Para minimizar este problema, as preocupações de Qualidade começaram a ser embutidas no desenvolvimento do produto, deixando de ser exclusivas da área de Fabricação (Processo), adequando assim, o processo ao produto e vice versa. Para isso foram desenvolvidas novas ferramentas de projeto que permitem uma variação maior do processo, sem que com isso haja uma perda de qualidade do produto final e conseqüente acréscimo no custo do produto, pois permite uma diminuição dos controles de processo. Esta nova preocupação passa a fazer parte do Conhecimento Prévio do Fabricante.

Neste contexto, o projetista passa também a se preocupar com o usuário final, o seu principal cliente. Durante o desenvolvimento, são incluídos testes de verificação de conformidades funcionais. Além destes testes, são realizados testes de qualidade e de manutenção desta qualidade ao longo do tempo pela simulação da vida do produto.

Estes testes de vida permitem saber como se distribuem as falhas do produto ao longo do tempo. Com estas informações em mãos, o engenheiro decide qual a melhor estratégia a ser seguida para garantir que o cliente tenha um produto confiável desde o início de sua utilização.

Um teste funcional simples, simulando as condições reais de uso por algumas horas, comumente denominado por "Run-In", pode não ser suficiente para determinar se o produto final atinge ou não seus objetivos de performance desejado pelo cliente. Além disto, este tempo de simulação de uso do produto pode ser muito longo, o que aumentaria o tempo de produção, conseqüentemente aumentando o custo e o prazo de entrega do produto.

Para otimizar este tempo são utilizados métodos de aceleração térmica, nos quais o "Run-In" é realizado a uma temperatura acima da ambiente em condições normais de uso.

Esta técnica de aceleração térmica é denominada de "Burn-In". É acerca desta técnica que este trabalho discorre.

Objetivo do Trabalho.

O objetivo deste trabalho é apresentar a aplicação do teste de "Burn-In" em produtos eletrônicos, utilizando o exemplo prático da aplicação deste teste em uma Fonte de Alimentação e fazer uma análise da aplicação deste teste em uma linha de fabricação mostrando as vantagens e desvantagens de sua implementação. Para isso é feita uma breve apresentação dos conceitos básicos de Qualidade e Confiabilidade. A partir destes conceitos são apresentados os modelos estatísticos utilizados em Confiabilidade, que descrevem o comportamento de vida de produtos e componentes. Além de mostrar, a partir do modelo de velocidade de reação química, a influência da temperatura sobre esta Confiabilidade.

Iniciemos, portanto, com os conceitos básicos de Qualidade e Confiabilidade.

Capítulo 1. Conceitos Básicos de Qualidade e Confiabilidade⁵

Quando se discute sobre Qualidade e Confiabilidade muitas vezes estes conceitos são mal compreendidos e consistentemente intangíveis. Este capítulo tem por objetivo alinhar as definições básicas que envolvem estes dois termos que são fundamentais para a compreensão do trabalho aqui apresentado.

1.1 Definições Básicas

1.1.1 Qualidade e Confiabilidade

Qualidade e Confiabilidade são conceitos básicos que muitas vezes são vistos como sendo independentes. Porém, suas definições mostram algo oposto. Consideremos as seguintes^a:

Qualidade - é o grau de adequação de um item (ex: produtos, componentes etc) ou serviço à finalidade a que se destina.

Confiabilidade - é a capacidade de um item desempenhar uma função exigida, sob condições e intervalos de tempo predeterminados^b.

Comparando ambas definições notamos que **a Confiabilidade de um item é a manutenção da sua Qualidade ao longo de um Tempo predeterminado**. Portanto há uma relação direta entre os dois termos, embora cada um tenha seu próprio sistema de medida.

A confiabilidade é mensurável utilizando-se ferramentas estatísticas, através de modelos do comportamento de itens, sistemas e subconjuntos.

A utilização de ferramentas e modelos estatísticos deve-se ao fato de que, embora um determinado item (ex: um resistor) tenha um conjunto de características básicas iguais (ex: resistor de carbono 2K Ω), há uma variação natural destas características entre os elementos do conjunto (ex: $\pm 5\%$). Esta variação segue um padrão estatístico típico que depende da tecnologia de fabricação do item (ex: eletrônico, mecânico, etc.). Nesta situação podemos medir e comparar a Qualidade dos itens entre si: quanto mais próximo for o valor nominal de um item do valor exigido ou quanto menor for a variação deste valor dentro dos limites permitidos, melhor a Qualidade.

A Confiabilidade segue um padrão similar (estatístico), ou seja, dentro de um conjunto de itens haverá itens mais confiáveis que outros, e, muito embora um item possa ter um bom grau de Qualidade, pode não ser equivalentemente Confiável. Por exemplo, um item pode ter os seus valores nominais muito próximos aos exigidos (boa qualidade) e não manter estes valores por um longo período, vindo a falhar em um curto espaço de tempo (baixa confiabilidade).

Isto torna a Confiabilidade algo objetivo e mensurável, o que permite comparar diferentes itens entre si, facilitando a tomada de decisões no momento da escolha dos componentes que farão parte de um sistema. As ferramentas mais usuais relacionadas à Confiabilidade são as Funções de Probabilidade Acumulada e Funções de Distribuição de Probabilidade, que são as principais bases de todos os modelos matemáticos utilizados.

^a Os termos aqui usados são basicamente definidos pelo Dicionário Brasileiro de Eletricidade¹ - ABNT/COBEI 1986, salvo referências específicas

^b Muito embora estejamos utilizando o Tempo como unidade de medida, em diversos casos outras unidades se ajustam melhor, ex: distância, ciclos de operação etc..

Com estas ferramentas podemos então redefinir o termo Confiabilidade para:

Confiabilidade é a característica de um item expressa quantitativamente pela probabilidade de que executará uma função exigida, sob condições estabelecidas e por um intervalo de tempo determinado.

1.1.2 Função Exigida

Podemos definir a Função Exigida de um item por Especificação, ou seja, um conjunto de requisitos que um item deve cumprir dentro de condições estabelecidas.

A Função Exigida de um item está intrinsecamente associada às condições limites nas quais ela deve ser realizada. Estas Condições estabelecem as solicitações as quais o item poderá ser submetido para que a Função Exigida seja cumprida em seu uso normal. O estabelecimento das condições limites de uso se faz necessário para determinar em que condições, quando e como, estas funções podem ser exigidas. Portanto, tanto a Qualidade como a Confiabilidade, são, por definição, dependentes do modo como cada item é, ou pode ser, utilizado (em outras palavras, a aplicação de um item deve ser adequada aos seus requisitos e limites).

Desta forma, a Confiabilidade é a capacidade de um item manter-se dentro dos requisitos de Qualidade, ou seja, de desempenhar com **êxito**, sem falhas, as funções especificadas para este item durante um período de tempo determinado. Neste caso esta característica é também chamada de **Taxa de Êxito**.

1.1.3 Intervalo de Tempo Determinado

O Tempo é, por definição, o elemento básico a qual a Confiabilidade está associada. Muito embora isto possa parecer trivial, a determinação do tempo, ou período, de uso de um item é um fator importante, pois é ele quem definirá até quando se pode esperar que um item desempenhe suas funções exigidas. Para um usuário deste item, este parâmetro dará as condições para estabelecer uma logística de manutenção, preventiva ou não, na sua aplicação (sistemas ou subsistemas), ou seu tempo de utilização sem prejuízo da sua função.

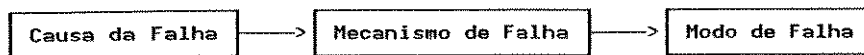
1.1.4 Falha

Falha é o término da capacidade de um item de desempenhar a sua Função Exigida, isto é, o item deixa de obedecer às especificações exigidas para o uso ao qual foi designado.

Há dois tipos básicos de falhas, as reparáveis e as não reparáveis. Se considerarmos um item isolado (ex.: um circuito integrado), a ocorrência de uma falha faz com que o item como um todo deixe de obedecer à sua função exigida sem possibilidade de recuperação desta função. Este tipo de falha é denominada Falha Não Reparável.

Em casos de sistemas e subsistemas, que são formados por um conjunto de itens, um item falho pode ser trocado (reparado) por um outro de mesma especificação, de modo que a função exigida do sistema, ou subsistema, pode ser recuperada. Neste caso, a falha é denominada Reparável.

Embora a ocorrência de falha possa se dar devido a uma diversidade de oportunidades, existem três elementos comuns a todas estas situações e estes elementos seguem uma seqüência típica:



Causa de Falha é a circunstância que induz ou ativa um Mecanismo de Falha.

Mecanismo de Falha é o conjunto dos processos físicos, químicos ou outros, que conduzem a uma falha.

Modo de Falha é o conjunto dos efeitos pelos quais uma falha é observada.

Podemos classificar as Falhas do seguinte modo:

Aleatória	Falha cujo instante de ocorrência é imprevisível.
Catastrófica	Falha simultaneamente repentina e completa.
Completa	Falha que resulta de desvios das características, além dos limites especificados, a ponto de causar perda total da função requerida.
Crítica	Falhas que podem produzir condições perigosas ou inseguras para quem usa, mantém ou depende do equipamento, ou falha que pode causar grandes danos materiais.
De Fabricação	Falha devido a não conformidade da fabricação com o projeto de um item, ou com os processos de fabricação especificados.
Dependente	Falha causada direta ou indiretamente pelas falhas de itens associados.
De Projeto	Falha devido ao projeto inadequado de um item.
Gradual	Falha que poderia ser prevista por um exame anterior ou monitoração de um item.
Grave	Falha, não crítica, que pode reduzir a capacidade de um item executar a função requerida.
Independente	Falha que ocorre sem se relacionar direta ou indiretamente às falhas de itens associados.
Intermitente	Falha que persiste por um intervalo de tempo limitado, após o qual o item retorna à sua habilidade de exercer a função requerida, sem qualquer ação externa.
Irrelevante	Falha a ser excluída da interpretação dos resultados do ensaio, ou do cálculo do valor de uma característica de confiabilidade, por não afetar a função exigida de um item.
Não Crítica	Falha de um item que normalmente não causa lesões a pessoas ou dano material significativo.
Parcial	Falha que resulta de desvios das características, além dos limites especificados, mas não a ponto de causar perda total da função requerida.
Por Degradação	Falha simultaneamente Gradual e Parcial, podendo ao longo do tempo tornar-se Completa.
Por Deterioração	Falha que ocorre como resultado de processos de deterioração característicos de um conjunto de itens e cuja probabilidade de ocorrência aumenta com o tempo.

Por Fragilidade Inerente	Falha atribuível à fragilidade inerente ao item quando submetido à condição de solicitação, dentro da capacidade para ele estabelecida.
Por Manuseio	Falha causada por manuseio incorreto de um item.
Por Uso Incorreto	Falha atribuível à aplicação de condições além dos limites especificados.
Relevante	Falha a ser incluída na interpretação dos resultados do ensaio, ou no cálculo do valor de uma característica de confiabilidade.
Repentina	Falha que não poderia ser prevista por um exame anterior ou monitoração.
Tolerável	Falha, não crítica, que não reduz a capacidade de um item de executar a função requerida.

1.1.5 Unidades de Confiabilidade

Podemos expressar a Confiabilidade de um item de várias maneiras. Conforme a maneira expressa teremos um conceito associado a ela. As mais usadas são:

Tempo Médio Até Falha (MTTF)	Razão do tempo total de funcionamento de um conjunto de itens com falhas não reparadas, pelo número total de falhas detectadas durante este intervalo de tempo. É usual a utilização da sigla MTTF, que vem da língua inglesa "Mean Time To Failure". Este conceito é normalmente usado para itens e sistemas não reparáveis.
Tempo Médio Entre Falhas (MTBF)	Produto do número de itens por seus tempos de funcionamento, dividido pelo número total de falhas detectadas durante este período. Usado para itens que são reparados após a ocorrência de uma falha. Também é usual a utilização da sigla MTBF, que vem da língua inglesa "Mean Time Between Failure". Este conceito é utilizado para caracterizar lotes de um determinado item e sistemas reparáveis.
Taxa de Falha (FR)	Razão do incremento do número de falhas pelo incremento correspondente do tempo total acumulado, em qualquer instante da vida de um item. Utiliza-se a sigla FR, da língua inglesa "Failure Rate".

Pela definição dos termos acima temos que tanto a unidade de MTTF como de MTBF é dada por Horas por Falha ($[Horas] / [Falhas]$), é de FR e dado por Falhas por Horas ($[Falhas] / [Horas]$). Podemos então relacioná-las pela seguinte expressão matemática:

$$MTTF \text{ ou } MTBF = \frac{1}{FR}$$

Capítulo 2. Distribuição de Vida ou Distribuição de Falha²

O comportamento de um item ou conjunto de itens ao longo do tempo é chamado de Distribuição de Vida, olhando pelo ponto de vista do tempo de funcionamento (vida), ou Distribuição de Falha, olhando pelo ponto de vista dos momentos em que as falhas ocorrem.

Dados experimentais mostram que este comportamento pode ser descrito por padrões estatísticos. Se considerarmos como parâmetro a probabilidade de falha ao longo do tempo podemos, uma vez que definimos a Confiabilidade como sendo a capacidade de um item em atender às especificações requeridas ao longo do tempo, estudar o comportamento deste item utilizando ferramentas estatísticas como Funções de Distribuição de Probabilidade (Distribuição Normal, Weibull etc.), Funções de Distribuições Acumuladas e Médias.

2.1 Funções Confiabilidade

2.1.1 Funções Distribuição e Função Densidade de Probabilidade.

Para modelar o comportamento (vida/ falha) de um item, ou conjunto de itens, devemos levantar a distribuição destas falhas ao longo do tempo. Esta distribuição pode ser de falhas instantâneas, neste caso teremos uma distribuição de frequência de falha, ou podemos ter a somatória das falhas até o tempo considerado, neste caso teremos uma distribuição de frequência de falhas acumuladas.

A distribuição de frequência e a distribuição de frequência acumulada são calculadas a partir de dados de amostras representativas do conjunto (população) de um item. Coleta-se, desta população, dados acerca do comportamento do item em relação as funções exigidas. Como estamos estudando a confiabilidade, os dados principais são: tamanho da amostra ou população, número de falhas dentro desta amostra ou população e período de tempo até a ocorrência da falha. Com estes dados podemos levantar tanto o histograma (número de falhas dentro de intervalos de tempo) como a função frequência acumulada (frequência acumulada das falhas ao longo do tempo).

A distribuição de frequência corresponde à Função Densidade de Probabilidade (FDP), denotada por $f(x)$ onde a variável x é o valor de interesse. A FDP pode ser interpretada da seguinte maneira: $f(x) dx$ é a fração da população cujos dados estão no intervalo dx .

Em confiabilidade freqüentemente o valor de interesse é o tempo (t) e $f(t) dt$ é a função de FDP de falha. A FDP pode ser definida como sendo a frequência relativa da ocorrência de falhas por unidade de tempo. Então temos que $f(t) dt$ é a fração da população que falhou dentro do período dt .

Para o caso de uma distribuição de frequência de um determinado item seguir um padrão exponencial, temos:

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

tal que:

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$$

Onde λ é uma constante, característica do comportamento do item. Este padrão ou modelo é largamente usado nos estudos de confiabilidade, pois uma grande gama de itens e sistemas em diversas tecnologias seguem este padrão de comportamento com relação a falhas ao longo do tempo.

A partir de $f(t)$ pode-se definir a Função de Distribuição Acumulada (FDA), que representa a probabilidade de falha no intervalo $(0,t)$ e é denotada por $F(t)$, cuja relação com a FDP pode ser expressa pela seguinte igualdade:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt, \quad 0 \leq t \leq \infty \quad (1)$$

Para a distribuição exponencial no tempo tem-se:

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = -e^{-\lambda t} \Big|_0^t = 1 - e^{-\lambda t} = \frac{\lambda - f(t)}{\lambda}$$

Uma vez que estas funções representam distribuições de probabilidades de falhas dentro de uma amostragem de um item, os itens restantes terão um comportamento, também estatístico, de sobrevivência. Este comportamento é denominado Função Confiabilidade, e se relaciona com as demais funções por:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (2)$$

que representa a probabilidade de não haver falha no intervalo de tempo $(0,t)$.

2.1.2 Taxa de Falhas Médias e Instantâneas

Dentro de uma população genérica, que entra em operação no tempo inicial 0, itens começarão a falhar a partir de um instante qualquer. Tomando um tempo t , a partir do tempo inicial t_0 , podemos estimar a Taxa de Falha Média (FR - Failure Rate) desta população como sendo o número de itens falhos dentro do período de tempo considerado.

$$FR = \frac{F(t)}{\Delta t}, \quad \Delta t = t - t_0 \quad (3)$$

Porém poderemos desejar saber qual a Taxa de Falha dentro de um intervalo genérico de tempo (Δt) dentro do período total de operação. Neste caso, devemos eliminar, da população, os itens que falharam fora deste período, e considerar somente os *sobreviventes até o tempo t* . E se ainda fizermos com que o intervalo de tempo considerado tenda a 0 ($\Delta t \rightarrow 0$) teremos a probabilidade condicional de falha (excluídas as falhas que já ocorreram) por unidade de tempo $h(t)$.

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(\text{falha em } (t, t + \Delta t) \mid \text{sobreviventes até } t)}{\Delta t} \quad (4a)$$

Sendo

$$P(\text{falha em } (t, t + \Delta t) \mid \text{sobreviventes até } t) = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)}$$

a probabilidade de falhas dos itens sobreviventes dentro do período de tempo $t + \Delta t$.

Substituindo a Equação (3) em (4a) e aplicando a definição de derivada podemos concluir que:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4b)$$

Que é a expressão da Taxa de Falha Instantânea, ou simplesmente Taxa de Falha, dentro de uma população qualquer em um intervalo de tempo dt .

A unidade por definição é Falhas por Unidade de Tempo, porém as unidades mais usuais são:

- %/KPOH - Percentagem de falhas por mil horas de operação ("Kilo Power On Hour").
- FIT - "Fails In Time" que corresponde a uma falha por 10^9 horas.
- PPM/KPOH - Partes por Milhão de Falhas por mil horas.

Como a Taxa de Falha não é uma Probabilidade, seu valor pode ser um número maior que 1, embora, por definição, nunca negativo, e, em geral, variável em função do tempo.

A Distribuição de Vida ou a Distribuição de Falha pode ser melhor compreendida através da função taxa de falhas instantâneas, $h(t)$, pois esta reflete o efeito do tempo sobre a população de itens sobreviventes.

Se a taxa de falha for crescente com o tempo, os itens sobreviventes ficam, no decorrer do tempo, mais propensos a falhas, o que caracteriza um processo de deteriorização destes itens. No caso inverso, os itens ficam menos propensos a falhas, pois a probabilidade de falha cai ao longo do tempo e, neste caso, temos um processo de depuração. Caso a taxa de falha se mantenha constante, o tempo de operação não tem qualquer influência na probabilidade de ocorrência de falhas.

A relação entre a taxa de falha e a confiabilidade pode ser obtida derivando-se a equação (2):

$$f(t) = - \frac{dR(t)}{dt}$$

Substituindo em (4b):

$$h(t) dt = - \frac{dR(t)}{R(t)}$$

Então:

$$R(t) = e^{-\int_0^t h(t) dt}$$

Como a integral de $h(t)dt$ é $H(t)$, podemos escrever:

$$R(t) = e^{-H(t)}$$

Isolando $H(t)$:

$$\ln R(t) = -H(t) \Rightarrow H(t) = -\ln R(t) \quad (5)$$

Sabendo-se que a taxa de falha varia com o tempo, é mais útil determinar um valor médio para representar o comportamento de um item ao longo de um período.

A maneira mais natural de se definir a taxa de falha média (AFR - Average Failure Rate) dentro de um intervalo de tempo ($\Delta t = t_2 - t_1$) é calcular a integral da taxa de falha instantânea para este intervalo e dividir o resultado por Δt .

A partir da equação (5) temos:

$$AFR(t_1, t_2) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} h(x) dx}{t_2 - t_1} = \frac{H(t_2) - H(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\ln R(t_2) - \ln R(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

Se considerarmos um intervalo de 0 a T:

$$AFR(T) = \frac{H(T)}{T} = \frac{\ln R(T)}{T}$$

A taxa de falha média, embora seja útil para se ter uma visualização do comportamento de vida de um item em um intervalo de tempo, não espelha totalmente este comportamento, porém, por simplificação, é este valor que normalmente os fabricantes, projetistas e engenheiros de diversas áreas, especificam e utilizam nas mais variadas aplicações.

Uma maneira usual de medir confiabilidade é usar o tempo médio até falhas (MTTF) de um item, o qual pode ser expresso por:

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt$$

Que representa o tempo médio que um item sobrevive até a sua falha (no caso de itens não reparáveis).

Podemos então resumir a relação entre as principais funções usadas em confiabilidade:

<i>Função Densidade de Probabilidade de Falha:</i>	$f(t) = h(t)e^{-\int_0^t h(t)dt}$
<i>Função Confiabilidade:</i>	$R(t) = e^{-\int_0^t h(t)dt}$
<i>Função Taxa de Falha:</i>	$h(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$
<i>Tempo Médio até Falha:</i>	$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt$

Aplicando estas equações ao modelo exponencial, que caracteriza um processo de falhas puramente aleatório, temos:

<i>Função Densidade de Probabilidade de Falha:</i>	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
<i>Função Confiabilidade:</i>	$R(t) = e^{-\lambda t}$
<i>Função Taxa de Falha:</i>	$h(t) = \lambda$
<i>Tempo Médio até Falha:</i>	$MTTF = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$

Como λ é uma constante, característica do comportamento de um item, pelas equações acima temos que esta constante é a taxa de falha para o modelo exponencial ^c.

A Figura 4 representa as curvas típicas de um item com comportamento que segue o modelo ou padrão exponencial. É importante notar que o Eixo Y está adimensional devido ao fato da Fig. 4 estar representando genericamente as três principais Funções utilizadas no modelamento de Confiabilidade, sem a preocupação de dimensioná-las.

^c Para ver o desenvolvimento de outros modelos de distribuição de falhas ver "Applied Reliability"², P. A. Tobias e D. Trindade pp. 63-102.

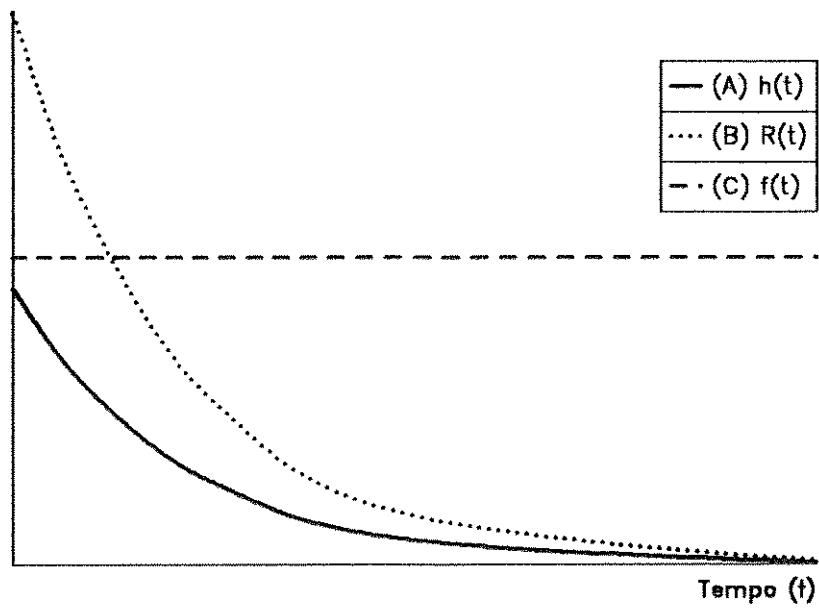


Figura 4. Distribuição Exponencial de Falha. (A) Função Taxa de Falha; (B) Função Confiabilidade; (C) Função Densidade de Probabilidade de Falha.

2.1.3 Curva de Distribuição de Falhas - Curva da Banheira

Dados práticos demonstram que o que ocorre com a maioria dos itens, ou grupos de itens que compõem um sistema, é que as curvas de distribuição de falhas (taxa de falha instantânea ao longo do tempo) tendem a ter um comportamento bastante similar. Uma curva típica deste comportamento da taxa de falha é apresentada na Figura 5. Esta curva, comumente denominada de **Curva da Banheira**, é caracterizada por três regiões distintas.

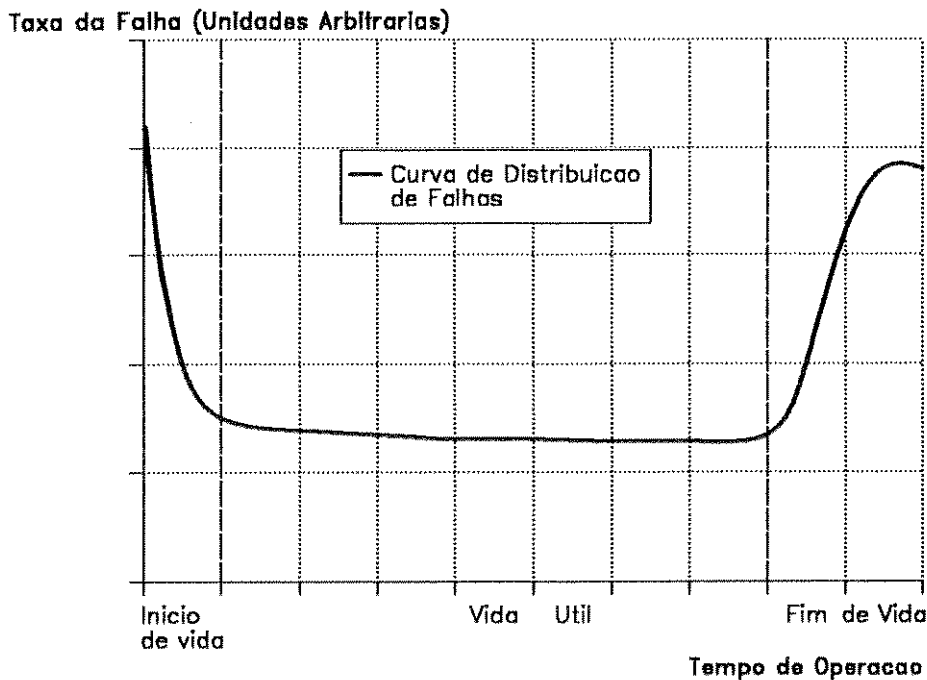


Figura 5. Curva da Banheira. Curva de Distribuição de Falha típica para a maioria dos itens ou grupos de itens utilizados em sistemas.

A primeira parte (Início de Vida), conhecida por período de falhas prematuras ou *mortalidade infantil*, é um período onde a taxa da falha cai rapidamente até um período de estabilização. Este período inicial é caracterizado pelas falhas de itens fracos resultantes da marginalidade de suas características em relação às especificações funcionais. Normalmente isto ocorre devido a desvios do processo de fabricação. Os fabricantes geralmente evitam que os itens que possam apresentar estas falhas sejam usados. Para isso se utilizam de testes de seleção dos itens durante o processo fabril, minimizando as ocorrências de falhas com o consumidor.

O segundo período (Vida útil) é um período de estabilização. Neste, as falhas são intrínsecas à tecnologia e ocorrem de forma aleatória, mantendo um padrão uniforme ou constante. É esta região que compõe o principal tempo de vida útil de um item, por isso os fabricantes desejam que neste intervalo de tempo a taxa de falha seja próxima de zero e que o período seja o mais extenso possível, o que significa um longo tempo de vida útil para o item.

Na terceira parte da curva (Fim de Vida) a taxa de falha volta a crescer. É o período em que os itens já sofreram desgastes ou fadigas e, portanto, a probabilidade de falha aumenta. A determinação deste ponto é importante para os fabricantes de sistemas de alta confiabilidade, pois é com este dado que se faz a manutenção preventiva dos sistemas, de modo que para o usuário final a disponibilidade do sistema não seja afetada.

Na maioria dos manuais em que o fabricante fornece o tempo de vida útil de seus itens, este se compõem somente do Início de Vida e Vida Útil (primeira e segunda parte da curva, e, não raro, somente da segunda).

É interessante notar que, embora a função $h(t)$ venha a representar de forma geral a curva completa, na prática ela é utilizada para modelar somente a primeira e no máximo a segunda parte da curva, pois, para a maioria dos estudos e aplicação, são estas as regiões de interesse e, portanto, estes modelos são suficientes. A função $h(t)$ deve ser não negativa, cuja integral $H(t)$ aproxima-se do infinito ($H(t) \rightarrow \infty$) quando o tempo também se aproxima do infinito ($t \rightarrow \infty$).

O modelo Exponencial, demonstrado genericamente pela Figura 4, representa o comportamento típico de componentes passivos como indutores, resistores etc.

Quando o produto ou sistema for composto por componentes ativos (semicondutores) o modelo mais usado é o de Weibull ^d, que tem a grande vantagem de ter um elemento denominado *fator de forma* que adequa a curva à característica de comportamento de cada item e quando este fator é igual a 1 ela se torna um modelo exponencial. Em outras palavras, o Modelo Exponencial é um caso particular do Modelo de Weibull.

^d Para ver o desenvolvimento do modelo de Weibull de distribuição de falhas ver "Applied Reliability"², P. A. Tobias e D. Trindade pp. 63-81.

2.2 Um Caso Típico

Para exemplificar, consideremos uma memória não volátil (UVEPROM) de 512K x 8 150 ns, tecnologia CMOS, encapsulamento CDIP (CMOS Dual In Line Package) de 32 pinos.

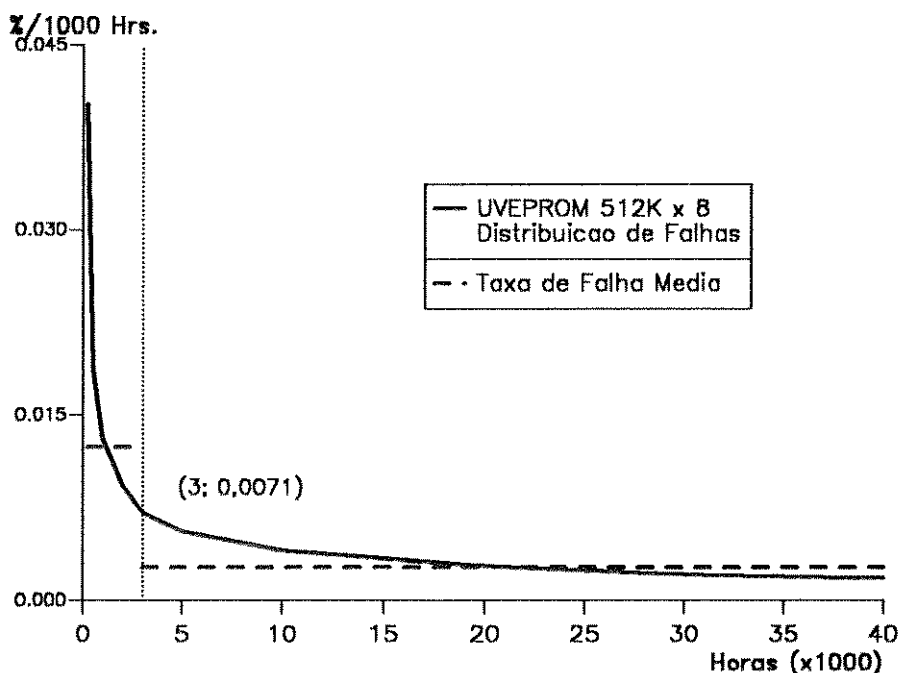


Figura 6. Exemplo de Curva de Distribuição de Falha. Componente UVEPROM 512K x 8 CMOS.

A distribuição de falhas deste componente é mostrada na Figura 6. Neste caso a curva foi levantada para o tempo de vida de 40.000 Horas. Podemos notar que a curva apresenta duas características distintas: a primeira, anterior ao eixo pontilhado (3.000 Hrs.), como sendo uma curva com uma forte descendência. Este trecho é o período inicial da vida do produto, na qual a incidência de falhas é alta, porém decrescente com o tempo. O segundo período, de 3.000 Hrs. a 40.000 Hrs., é de estabilização cuja taxa de falha se mantém em um patamar quase constante. É o período de vida útil.

Notamos que na segunda parte da curva, segundo período, a distribuição da taxa de falha instantânea tende a ser igual ao valor médio da taxa de falha do mesmo período, por isso, para efeito de simplificação, é comum a utilização das taxas de falhas médias dentro destes períodos, o que é representado pelas linhas tracejadas na curva da Figura 6.

Capítulo 3. Aceleração Térmica da Distribuição de Vida⁵ - "Burn-In".

Consideremos a curva mostrada na Figura 7. Esta é a curva de um componente TTL 74LS00 (NAND GATE LOW POWER SCHOTTKY).

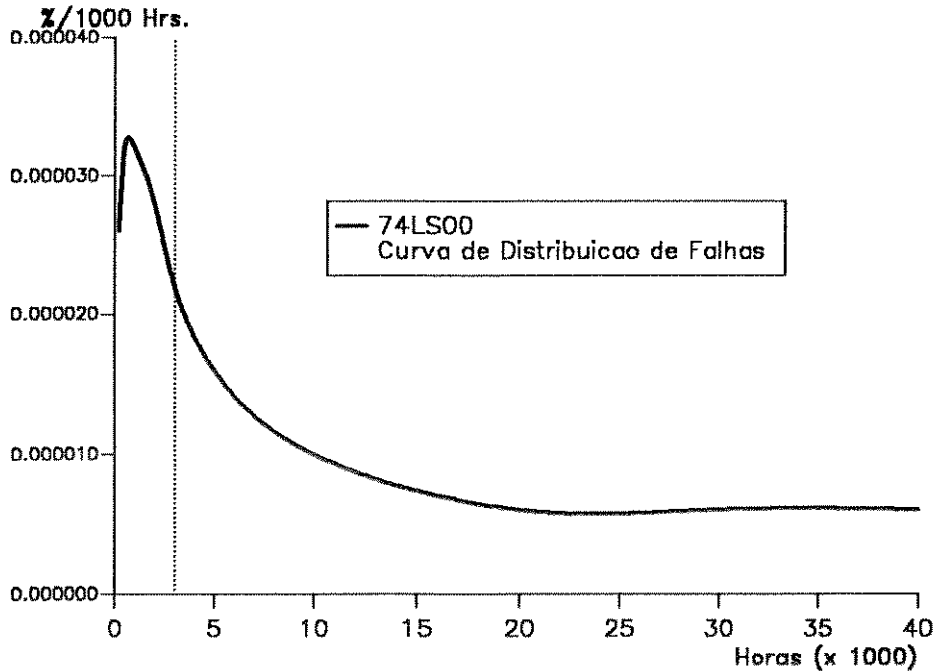


Figura 7. Curva de Distribuição de Falha de um 74LS00.

Podemos notar, neste caso, que a curva tem um comportamento diferente da Curva da Banheira (Figura 5), que é teórica e genérica.

Esta diferenciação deve-se ao fato da primeira parte da curva, do instante 0 até a linha pontilhada, ser composta pela soma de três componentes como mostra a Figura 8:

- Uma componente formada por falhas de itens fracos, decorrentes da marginalidade de suas características resultante do processo de fabricação (Curva (A)). Estes itens possuem as características básicas de um Item considerado bom, porém elas sofrem um processo de fadiga e desgaste em um tempo muito mais curto que os demais. A excentricidade destes itens aparece logo nas primeiras horas de vida, daí a denominação na língua inglesa de "Freak Failure".
- Outra componente formada por falhas prematuras de itens, típica em todas as tecnologias (é a mortalidade infantil representada pela Curva (B)).
- E uma componente formada por falhas aleatórias de itens, que permanece durante o período de vida (Curva (C)). Este componente corresponde à probabilidade aleatória de falha de um item e é característico para cada tecnologia.

Na Curva da Banheira, apresentada anteriormente, não são representadas as Falhas de Excentricidade, somente as Falhas Prematuras e as Aleatórias.

Devido a estas três componentes, ou modos, esta característica da curva é denominada Trimodalidade.

Graficamente podemos representar pela Figura 8:

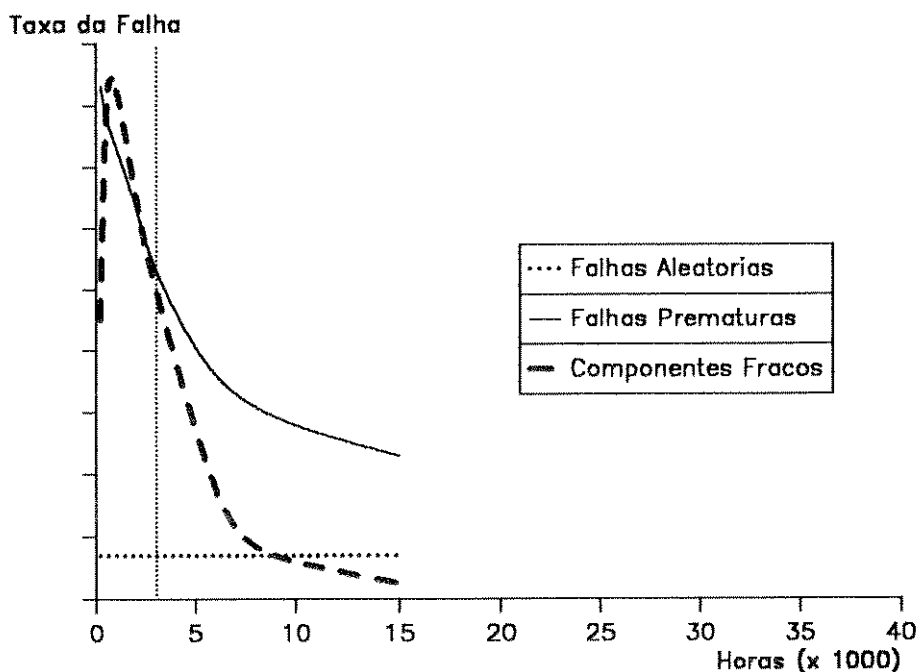


Figura 8. Decomposição de uma Curva de Distribuição de Falha Trimodal. (A) Componentes Fracos. (B) Falhas Prematuras. (C) Falhas Aleatórias.

A utilização dos itens fracos (Freak Failure) por parte do usuário é indesejável. Para tanto, o fabricante deseja eliminá-los antes de colocá-los no mercado. Neste momento há um dilema que o fabricante deve solucionar:

Para eliminar estes defeitos, seriam necessárias muitas horas de uso do produto (no caso do Exemplo da Fig. 7, este tempo seria no mínimo de 5.000 horas), que seria feito por simulação, ainda durante o processo fabril. Porém, esta solução se torna inviável economicamente (o custo final do produto não seria viável), pois necessitaria um grande investimento e, quanto maior a produção, maior o investimento, além do tempo de simulação de vida. Se desejamos a eliminação destes defeitos de forma rápida e simplificada, devemos encontrar meios de acelerar os mecanismos causadores destas falhas.

Analisando as falhas ocorridas em produtos e itens, observamos que há basicamente cinco elementos que ativam e aceleram os mecanismos de falhas: Temperatura, Tensão, Corrente, Umidade e Ciclagem Térmica. Cada um destes elementos atua em mecanismos de falha típicos, como por exemplo a Ciclagem Térmica, variação rápida entre alta temperatura e baixa temperatura, atua sobre os coeficientes de dilatação dos encapsulamentos de circuitos integrados.

Aceleração de vida é uma ferramenta útil, se conhecemos os mecanismos de falhas e os modos de acelerá-los. Para isso, estudos de observações e análises de falhas devem ser realizados antes que um novo item esteja disponível no mercado para sua utilização.

Como o processo de fabricação de um componente eletrônico, principalmente os circuitos integrados, é baseado em reações físico-químicas, muitos destes mecanismos de falhas podem ser acelerados pela temperatura. Portanto, podemos utilizar as leis que regem essas reações, e assim o dilema acima fica fácil de ser solucionado.

3.1 Modelo de Arrhenius

Experiências demonstram que o comportamento de vários processos que descrevem muitos dos mecanismos capazes de levar um componente eletrônico a falha, como por exemplo, contaminação iônica, impurezas de difusão, formação de compostos intermetálicos, eletromigração etc, dependem exponencialmente da temperatura.

O modelo mais utilizado, que relaciona o tempo de vida de um componente com a temperatura, é o de Arrhenius. O modelo descreve este fenômeno por uma exponencial que relaciona a temperatura com a taxa de reação química:

$$r = Ae^{-\frac{E_A}{kT}} \quad (7)$$

Onde:

- r** = Taxa de Reação Química
- k** = $8,62 \times 10^{-5} \text{eV}/^\circ\text{K}$ (Constante de Boltzman)
- T** = Temperatura de Reação ($^\circ\text{K}$)
- E_A** = Energia de Ativação da Reação Química

O modelo acima, conhecida por Equação de Arrhenius, nos mostra que a confiabilidade de componentes eletrônicos varia com o tempo e também com a temperatura. A elevação da temperatura faz com que os componentes sofram um desgaste maior, devido ao fato da força de degradação, que leva um componente a falha, ser governada por processos químicos e físicos, portanto, aumentando a taxa de falha.

Se a taxa de ocorrência do mecanismo de falha seguir este comportamento, a relação entre temperatura e tempo de vida será:

$$t = Ce^{\frac{E_A}{kT}}$$

onde C é uma constante independente da temperatura.

No caso de um teste com alta temperatura (comumente denominado de "Burn-In" ou "HTB - High Temperature and Bias"), temos que a maioria dos mecanismos de falhas é acelerada com este aumento de temperatura e pode ser descrita pelo modelo acima.

Seguindo o modelo de Arrhenius, se considerarmos a temperatura como sendo a de operação, temos o tempo em que os mecanismos de falhas serão acionados em sua condição normal de operação. Se a temperatura for elevada, este tempo será exponencialmente menor.

O processo de "Burn-In", ou teste térmicamente acelerado, é baseado no modelo de reação de Arrhenius, pois a partir desta equação podemos estabelecer uma correlação entre o tempo de vida de um item em diversas temperaturas. Se tomarmos por base a temperatura de uso do item, e tomarmos uma segunda temperatura, por exemplo acima da de uso, podemos determinar a relação entre os tempos de vida nas duas temperaturas. A relação entre estes dois tempos é denominado de Fator de Aceleração (FA). O tempo de teste de "Burn-In" é definido a partir das temperaturas de uso e de teste, utilizando, para tanto, o Fator de Aceleração:

$$FA = \frac{t_{oper.}}{t_{teste}}$$

O FA é quanto o tempo de teste equivale ao tempo real de operação. Desta forma:

$$t = Ce^{\frac{E_A}{kT}}$$

$$FA = \frac{Ce^{\frac{E_A}{kT_{oper.}}}}{Ce^{\frac{E_A}{kT_{teste}}}}$$

No caso de um Circuito Integrado, tomar-se como referência a temperatura de Junção. É na região das junções que a solitação térmica é maior, devido a formação da região de depleção, passagem de corrente, campo elétrico, formação de capacitâncias etc. É esta região que sofre, portanto, a maior solitação dentro do componente e, na prática, onde há maior incidência de falha (geralmente por ruptura da junção).

$$FA = e^{\frac{E_A}{k}} \left[\frac{1}{T_{j(oper.)}} - \frac{1}{T_{j(teste)}} \right]$$

Onde:

- FA** = Fator de Aceleração
- k** = $8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}$ (Constante de Boltzman)
- T_{j(oper.)}** = Temperatura de Junção de Operação ($^\circ\text{K}$)
- T_{j(teste)}** = Temperatura de Junção de Teste ($^\circ\text{K}$)
- E_A** = Energia de Ativação do Mecanismo de Falha

Dentro deste modelo o parâmetro crítico é a Energia de Ativação, E_A , que está relacionada, pela equação de Einstein²⁰, com a mobilidade das impurezas e com as energias de formação de complexos defeitos-impurezas. Este parâmetro é determinado experimentalmente pela observação de tempos até falhas em diversas temperaturas. Além disto, a Energia de Ativação varia com os modos de falhas, portanto este levantamento deve ser complementado com uma análise de falha, de modo a associar a Energia de Ativação com o mecanismo de falha correspondente.

Embora cada fabricante tenha os seus próprios valores típicos de Energia de Ativação para os componentes que fornecem, eles tendem a ficar próximos, devido a processos de fabricação semelhantes e aos métodos utilizados para cálculo de E_A .

Como exemplo, os Órgãos Militares Americanos utilizam a Norma Militar MIL-STD-883 (Military Standard 883, Test Methods and Procedures for Microelectronics) para cálculo do Fator de Aceleração, na qual o valor 1 eV para a Energia de Ativação é padronizado¹⁹. Este valor é considerado um valor médio entre as tecnologias típicas envolvidas no levantamento das taxas de falhas apresentadas na Military Handbook 217E. *

Alguns outros mecanismos, menos frequentes, são praticamente independentes do aumento da temperatura (ex: *hot electron*). Nestes casos, é necessário uma análise para se determinar qual o modelo mais adequado e como estes mecanismos podem ser acionados: tensão, corrente, umidade, ou combinações destes. Para cada caso temos modelos apropriados, como o modelo de Eyring, Coffin-Manson etc. O modelo de Eyring, que foi teorizado a partir da mecânica quântica, representa uma extensão do modelo de Arrhenius, pois inclui outros elementos além da temperatura. Este modelo é usado quando se tem uma solitação térmica e uma não-térmica (ex: tensão).

* A Military Handbook 217E é um manual de levantamento de taxas de falhas de componentes utilizado pelos Órgãos Militares Americanos em produtos militares e disponível para o mercado em geral.

A Tabela 1 apresenta as Energias de Ativações típicas relacionadas com as tecnologias e com os mecanismos de falha.

Tabela 1. Energias de Ativação Típicas.	
Dispositivos e Mecanismos de Falha	E_A (eV)
Transistor:	
Germânio	0,88-1,24
Silício Bipolar com falhas de inversão de superfície	1,02
falhas intermetálicas (Au - Al)	1,02-1,04
penetração de metal no Silício	1,65
Circuitos Integrados	
defeito de óxido	0,3
defeitos no Silício	0,3
eletromigração	1,0-1,1
contaminação	1,0-1,4
cargas superficiais	0,5-1,0
injeção de cargas	1,3
corrosão eletrolítica	0,3-0,7
Capacitores	0,12-1,00
Transistores	0,4-0,5
Diodos	0,5
LED	0,8
Resistores de Carbono	0,34-0,60
TTL	
Bipolar	0,3
NMOS	0,7-0,8
CMOS	0,95

Uma observação importante é que as Energias de Ativação, para um mesmo mecanismo de falha, variam com os Fabricantes e com a metodologia de obtenção destes. Porém, conforme os métodos de testes para levantamento destes valores vão sendo padronizados e as tecnologias vão se estabilizando, estes valores tendem a se aproximar.

As Figuras 9 e 10 representam respectivamente a variação do Fator de Aceleração com a Temperatura, tendo a Energia de Ativação como parâmetro (no caso, estão representados as curvas de 1 eV e 2 eV), e a variação do Fator de Aceleração com a Energia de Ativação, tendo a Temperatura como parâmetro.

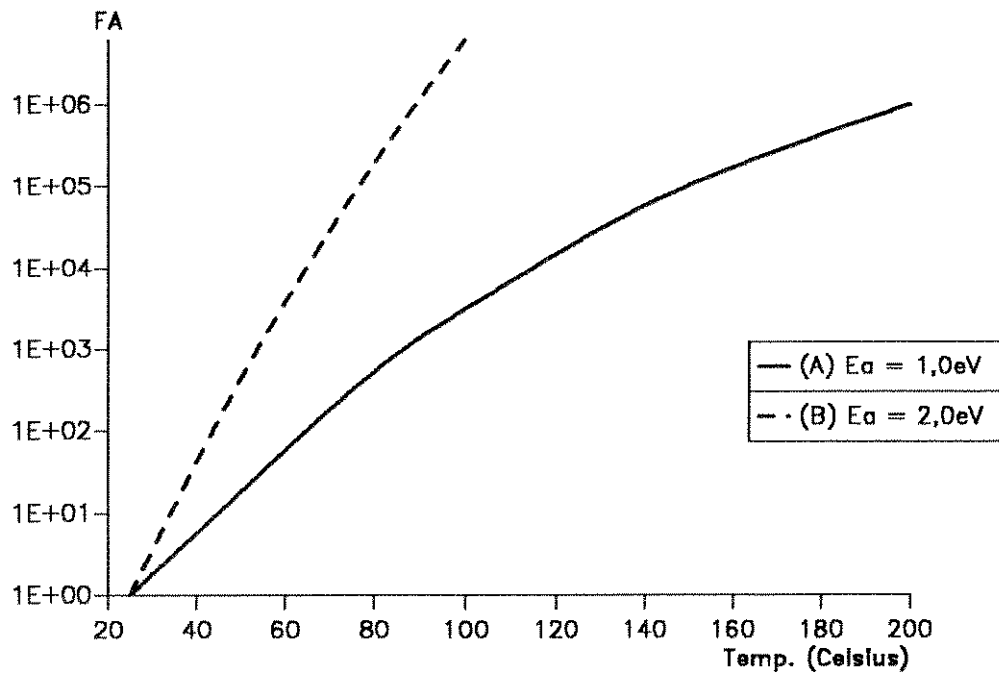


Figura 9. Curva de Fator de Aceleração pela Temperatura. A curva relaciona a variação do Fator de Aceleração com a variação de Temperatura para uma $E_A = 1,0\text{eV}$ e $E_A = 2,0\text{eV}$.

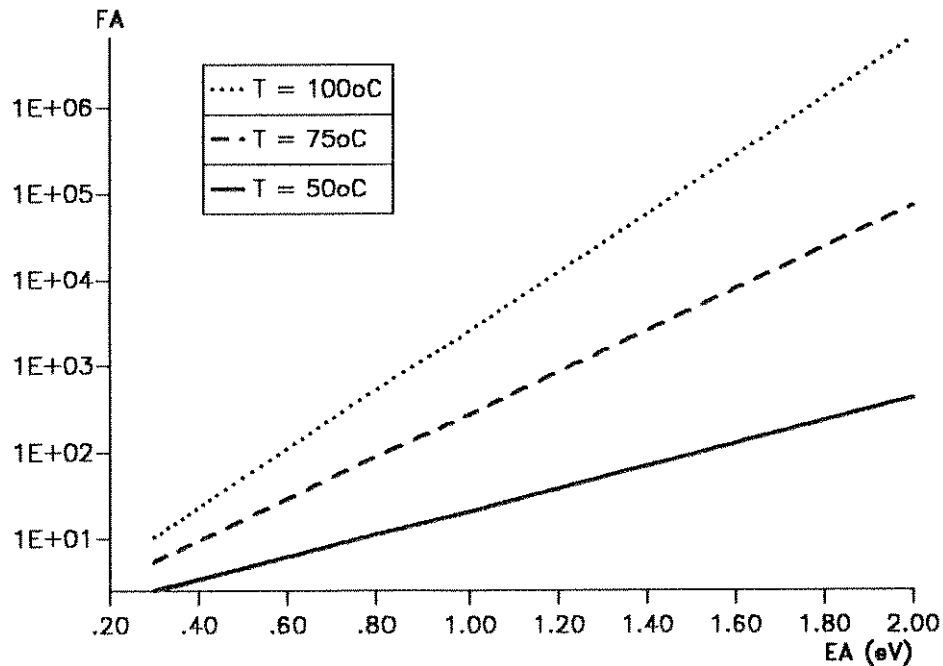


Figura 10. Curva de Energia de Ativação pelo Fator de Aceleração. A curva mostra como o Fator de Aceleração varia com a Energia de Ativação.

Quando se tem Tabelas e Gráficos disponíveis, o cálculo de Fator de Aceleração se torna uma tarefa simples. Desejando saber qual o FA para um teste a ser realizado, basta entrar no Gráfico da Fig. 9 ou 10, dependendo qual o parâmetro ou curva disponível, uma vez que ambas são complementares.

Conhecendo o mecanismo de falha típica de um item, a Tabela 1 nos dá qual a Energia de Ativação para este mecanismo. Entretanto pelo eixo X da curva representada na Fig. 10, podemos escolher qual a Temperatura mais adequada, levando-se em conta as limitações térmicas do item e o Fator de Aceleração mais otimizado dentro destas circunstâncias.

É importante notar que ambas as curvas tem em seu eixo X uma escala linear (Temperatura no caso da Fig. 9 e Energia de Ativação no caso da Fig. 10) e logarítmica em Y (Eixo do Fator de Aceleração).

Exemplificando, tomemos uma tecnologia cujo mecanismo de falha típico seja contaminação iônica. Deseja-se realizar um teste a uma temperatura de 50°, qual o Fator de Aceleração nestas condições?

Pela Tabela 1 temos que para Contaminação Iônica a E_A varia de 1,0 a 1,4 eV. Tomemos o valor médio de 1,2 eV.

Entrando pelo Eixo X da Fig. 10 no ponto de 1,2 eV subimos até encontrar a curva de temperatura de 50°. Deste ponto temos o valor correspondente no eixo Y, que neste caso é 37,2. Isto significa que cada hora de teste a 50° equivalerá a 37,2 horas de uso, na temperatura de operação de 25°.

Caso se deseje obter um valor de Fator de Aceleração de uma Temperatura ou Energia de Ativação não representadas pelo gráfico, dois caminhos podem ser seguidos:

- O primeiro é fazer uma interpolação entre as curvas e, neste caso, uma interpolação logarítmica.
- O segundo é utilizar diretamente o Modelo de Arrhenius, que é mais vantajoso pela precisão do cálculo e no caso de tanto a Temperatura quanto a Energia de Ativação não estarem sendo representadas.

3.2 Comparando Resultados

Para exemplificar a utilização e o efeito do teste de "Burn-In", tomemos o exemplo descrito no início do capítulo: TTL 74LS00 (NAND GATE LOW POWER SCHOTTKY) e comparemos as curvas de distribuição de falha antes e depois do teste. As condições de testes foram:

Temperatura de Teste	125°C (398°K)
Tempo de Teste	178 Hrs.
Energia de Ativação	0,6 eV
Fator de Aceleração	200

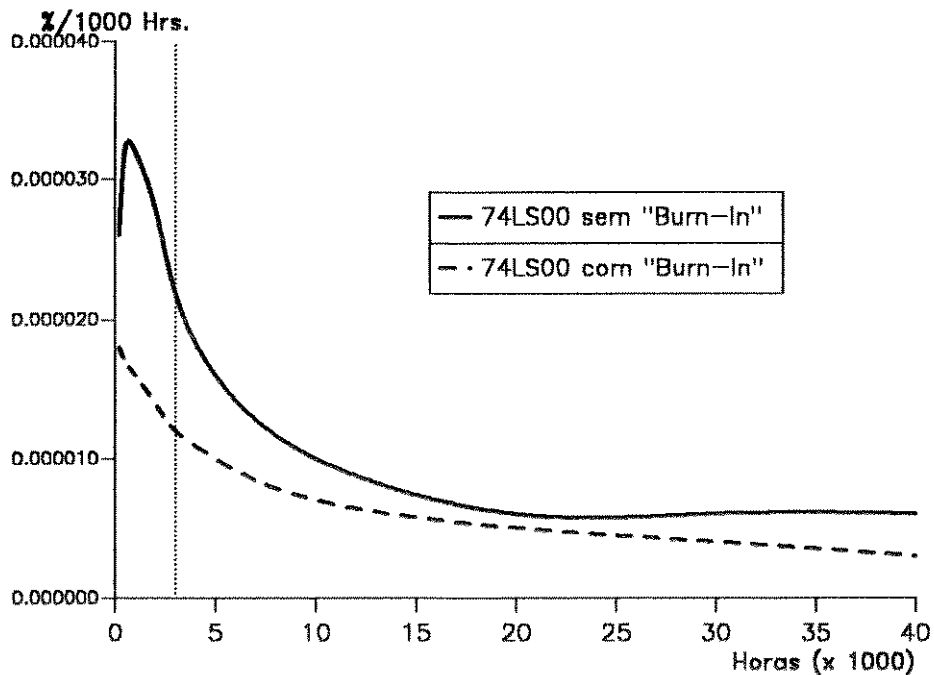
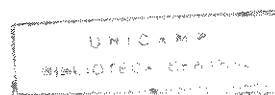


Figura 11. Teste de Aceleração Térmica. Comparação de Curvas de Distribuição de Falhas.

Pela Figura 11 podemos notar que o componente antes do teste (Linha Cheia) apresentava uma população de componentes fracos, ainda na parte inicial da curva (entre 500 a 1000 Hrs.). Estes componentes foram eliminados pela ativação térmica dos mecanismos de falhas (no caso, tipicamente contaminação iônica), os itens sobreviventes apresentam a taxa de falha intrínseca à tecnologia (falhas aleatórias).



Este resultado é semelhante a outras tecnologias. Notamos também que a taxa de falha média caiu ao longo da curva, isto se deve à eliminação dos itens que contribuíam para que a taxa de falha fosse alta, mesmo após o período inicial de vida (falhas aleatórias).

Esta curva nos leva a pensar sobre o que realmente aconteceu; a curva se deslocou em relação ao eixo y (taxa de falhas menor) ou em relação ao eixo x (deslocamento do eixo dos tempos)?

A resposta depende do que consideramos como instante 0, o momento em que um item sai da linha de fabricação, antes do "Burn-In", ou o momento em que o item é utilizado pelo cliente.

Devemos ter sempre o usuário final como referência, pois é ele quem vai ser afetado pela qualidade e confiabilidade do item em questão. E sob este ponto de vista, a curva representada pela Figura 11 deve considerar o instante 0 como sendo o início da utilização do item pelo cliente ou, do ponto de vista do fabricante, considerar que o teste de aceleração térmica faz parte do processo de fabricação do item.

3.3 Modelo de Arrhenius Aplicado a Sistemas⁹.

O Modelo de Arrhenius é bastante simples de ser aplicado para cálculos de Fator de Aceleração para itens isolados. Porém, desejamos também aplicá-lo para o caso de sistemas, onde há uma diversidade de itens em tecnologias distintas. Isto implica na presença de diversas Energias de Ativação e itens sob condições de temperatura diferentes. Conseqüentemente, definir qual valor a ser usado para calcular o Fator de Aceleração em questão, pode não ser uma tarefa simples.

O assunto é polemico não tanto pela temperatura em que deve ser considerada no modelo, mas pela definição (que valor usar e como calcular) da energia de ativação (EA). Para solucionar este problema podemos seguir três caminhos:

1. Em sistemas digitais, nos quais há uma predominância de uma determinada tecnologia, pode ser assumida a EA típica para tal. Sendo assim, se temos um sistema cujos circuitos TTLs são predominantes consideramos EA típico de 0,6 eV. Este método tem suas limitações quando dentro do mesmo sistema temos uma variedade de tecnologias, que é o que geralmente ocorre nos sistemas atuais, nos quais temos tecnologias CMOS, NMOS, BIPOLAR e componentes passivos como resistores e capacitores, pois nestes casos há diferenças grandes entre as EA destas tecnologias. Este método não é aconselhável para sistemas analógicos cujas diferenças são maiores e mais agravantes.
2. Quando se tem sistemas com tecnologias mistas, devemos levar em consideração as diferentes energias de ativação. Neste caso, há dois caminhos a seguir:
 - a. Considerar um Fator de Aceleração (FA) média dos componentes utilizados:

$$FA_m = \frac{\sum_{n=1}^l FA_n}{n}$$

- b. Considerar uma Energia de Ativação (EA) média das tecnologias em questão:

$$EA_m = \frac{\sum_{n=1}^l EA_n}{n}$$

Em ambos os casos a dificuldade é definir uma metodologia de calculo destas médias, como, por exemplo, levar em consideração as diferenças de temperatura nos diversos itens em suas respectivas aplicações.

No primeiro caso este problema pode ser contornado utilizando a taxa de falha média (AFR) de cada componente na condição de uso. Este método é o que melhor corresponde a realidade, porém há ainda uma limitação que é as condições de uso de cada peça, pois se tivermos dois transistores iguais, mas em aplicações diferentes, a fadiga em que ambos estarão sujeitos será diferente e conseqüentemente a taxa de falha também será diferente, pois esta varia com as condições de uso. Para resolver este problema temos um terceiro método.

3. Este método leva em consideração a tecnologia do componente, a sua aplicação e a sua taxa de falha nesta aplicação. O método, porém, depende de um teste funcional do sistema para se levantar as temperaturas em que cada componente estará sujeito.

O Modelo leva em consideração que as falhas ocorrentes são independentes, ou seja, os mecanismos de falhas em um dado componente se desenvolvem sem a influência dos mecanismos que afetam os componentes remanescentes e que a falha de um componente causa uma falha catastrófica no subsistema do qual faz parte.

O Fator de Aceleração é determinado pela razão entre o tempo de operação acumulado na condição de uso e o tempo do teste térmico:

$$FA = \frac{t_u}{t_s} \quad (1)$$

onde:

- t_s é o tempo de teste no subconjunto.
- t_u é o tempo equivalente de operação na condição de uso.

Para uma distribuição de vida genérica, a seguinte relação é válida:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda(0,t)t} \quad (2)$$

onde:

- $F(t)$ são as falhas acumuladas no instante t
- $\lambda(0,t)$ a taxa de falha média no intervalo de tempo t

de onde obtemos:

$$t = \frac{-\ln[1 - F(t)]}{\lambda(0,t)} \quad (3)$$

Considerando que, por definição, os valores das Distribuições Acumuladas de Falhas são iguais tanto na operação normal como na condição de teste e substituindo a equação (1) em (3), temos:

$$FA = \frac{\lambda_s}{\lambda_u} \quad (4)$$

Tomando por base as considerações iniciais, a taxa de falha total será a somatória das taxas de falhas individuais dos componentes:

$$\lambda_T = \sum_{i=1}^m n_i \times \lambda_i \quad (5)$$

Substituindo (5) em (4), para as condições de uso e teste temos:

$$FA = \frac{\sum_{i=1}^m n_i \times \lambda_{si}}{\sum_{i=1}^m n_i \times \lambda_{ui}} \quad (6)$$

Desde que a equação (4) é também válida para cada tipo de componente em um subsistema, para um deste podemos escrever:

$$\lambda_{si} = \lambda_{ui} \times FA_i \quad (7)$$

Substituindo (7) no numerador de (6), obtemos:

$$FA = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_{ui} \times n_i \times FA_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_{ui} \times n_i} \quad (8)$$

Pode-se notar que o fator de aceleração equivalente é resultado da média ponderada dos fatores de aceleração de cada tipo de tecnologia, cada peso como sendo a contribuição de cada tecnologia em relação a taxa de falha total. Assim, o FA de cada componente corresponde a uma fração do FA final do sistema.

Este método é bastante eficiente principalmente em circuitos analógicos, nos quais a diversidade de tecnologias e aplicações é fator preponderante.

Em todos estes métodos um problema insolúvel permanece, sempre haverá componentes que estarão em condições mais agressivas que outros. Porém, neste caso, ao utilizar a taxa de falha como fator de ponderação, temos que, em termos de confiabilidade todos os componentes estarão térmicamente estressados de forma proporcional. É este fato que torna o último método mais realista que os outros dois anteriores.

3.4 Tipos de "Burn-In".

Ao se aplicar um teste de "Burn-In" necessariamente deve-se ter o produto com algum tipo de alimentação. Testes térmicos sem esta alimentação são denominados de "Estocagem", que tem por objetivo apenas avaliar as condições de um produto após um longo período em um estoque.

Esta alimentação pode ser de dois tipos:

1. Estático. Nesta situação aplica-se ao produto uma condição mínima de alimentação para se garantir que os subsistemas do produto estejam ativos mesmo que não executem alguma função.

Este tipo de teste é utilizado principalmente em subsistemas, placas de circuitos eletrônicos, fontes de alimentação linear etc., e em altas temperaturas, pois nestas condições os circuitos que contenham osciladores podem ter as suas funções afetadas e, até mesmo, interrompidas, devido ao fato dos circuitos osciladores terem suas frequências alteradas e com isso todo o circuito perder o sincronismo. As limitações de temperatura serão discutidas no Item 5.4 e 5.5 deste trabalho.

2. Dinâmico. Neste tipo de teste, além da aplicação da alimentação ao produto são também aplicados testes funcionais, de modo que o produto execute algumas funções. Quando estas funções são realizadas pelo próprio produto, sem auxílio externo, são denominados de Auto-Teste. Em alguns casos, estes testes são monitorados externamente, de onde, sinais simulando funções de entrada são injetados no produto e as respostas a este estímulo são analisadas pelo testador, de forma a reproduzir um funcionamento convencional do produto. Estas respostas são então analisadas e diagnosticadas instantaneamente pelo testador e, no caso de falhas, estas são armazenadas em bancos de dados para estudos futuros. Este tipo de teste é denominado "In-Situs".

A forma de se exercitar dinamicamente um produto vai depender das funções que o produto irá realizar. Este tipo de teste é usualmente aplicado em baixas temperaturas ou quando em altas temperaturas as funções do produto não são afetadas.

Há casos em que o teste dinâmico se compõe de ciclos de alimentação, ou seja, ciclos de LIGA/DESLIGA, que simulam as condições nas quais algumas funções são acionadas quando há uma intervenção externa.

3.5 Estratégias de "Burn-In".

Dentro de um sistema devemos identificar quais os componentes que são críticos para este sistema, tanto a nível funcional como em termos de confiabilidade. Esta identificação permite que se escolha estratégias de "Burn-In" mais econômicas. Vejamos um exemplo.

Suponhamos que temos um sistema que se componha de uma única placa de circuito cuja o MTBF projetado seja de 5 anos (48 Khs.), e que esta placa se componha basicamente de circuitos lógicos TTL, capacitores cerâmicos, resistores de carbono de uso geral e um microprocessador. Neste caso o microprocessador é o único componente crítico tanto a nível funcional como em confiabilidade (Por exemplo: EFR: TTL = 0.00005%/Khs; Cap. Cer. = 0.00003%/Khs; Res. = 0.000001%/Khs; μ Proc. = 0.002%/Khs.).

Neste caso investir em câmaras pode elevar o custo de fabricação do produto a níveis indesejáveis. A solução seria realizar o "Burn-In" a nível de componente, sendo feito apenas no microprocessador, por ter este uma taxa de falha elevada em relação aos demais componentes, e onde o investimento é menor que no primeiro caso.

Uma outra situação, em que a análise econômica é importante, é quando dentro do sistema há componentes críticos em termos de temperatura. Segundo a Equação de Arrhenius, quanto maior a temperatura menor o tempo de teste. Caso em um sistema haja componentes que tenham limitações de temperatura (ex: ventiladores, alguns tipos de cabos etc.) e que devem ser respeitados, o tempo de teste pode se tornar longo novamente elevando o custo de fabricação. Nestas situações a solução pelo "Burn-In" individualizado pode ser também a solução mais conveniente.

Como podemos ver, a decisão por um teste de "Burn-In" pode conter muitos elementos e a definição da melhor estratégia de sua realização depende de muitas variáveis em que deve-se decidir qual o fator primordial a ser levado em conta. Há casos em que a substituição de componentes por tecnologias de melhor confiabilidade seja a que unirá todas estas considerações.

Capítulo 4. Análise de Custo⁸

O grande questionamento que se faz no momento de se decidir pela implementação ou não de um teste de "Burn-In", é qual é a relação entre custo e benefício desta decisão. Esta relação está diretamente associada aos investimentos necessários para sua implementação em uma linha de produção e a probabilidade de falha aceitável que um determinado produto pode ter uma vez instalado no cliente.

Para se medir esta probabilidade partimos da taxa de falha média do produto no primeiro período de vida de um produto ou item, período este que varia de fabricante a fabricante. Para cada falha que ocorrer será necessário uma Ação de Reparo (AR). Se considerarmos estas ações em um período de um mês por máquina (MM) temos AR/MM (Ações de Reparo por Mês por Máquina). Desta maneira:

$$AR/MM = EFR \times \Delta t$$

Onde a taxa de falha (EFR) é dado em falhas (número absoluto) por hora, e Δt o tempo, em horas, em que o equipamento está em operação por mês.

Às Ações de Reparo estão associados um custo que é a composição do custo da parte com defeito (custo da peça) com o custo do técnico de manutenção realizar este reparo. Todos estes custos são de fácil dimensionamento.

Multiplicando o custo de cada Ação de Reparo pelo Inventário de campo (total de máquinas instaladas em clientes que ainda estejam dentro do período inicial de vida) temos o custo total destas falhas para o fabricante. Assim quanto menor o AR menor o custo de manutenção.

Associado ainda a isto temos o custo de estocagem (inventário, giro e juros de estoque, operadores, sistemas de controle, área etc.), de fabricação, distribuição, embalagem e embarque destas peças.

Todos estes custos são altos e para se ter uma otimização é necessário garantir que estas falhas, na sua maioria, seja detectada antes do produto ser embarcado para os clientes, e a aplicação do teste de "Burn-In" é um dos métodos de se garantir isto. Porém não podemos perder de vista que mesmo com estes testes e controles dentro do fluxo de produção, as falhas ainda assim ocorrerão, porém esta metodologia irá apenas garantir que haja uma otimização dos custos relacionados com a manutenção dos equipamentos.

Dependendo da complexidade do produto um refinamento neste custeamento se faz necessário. O principal é o tempo de duração da manutenção. Este tempo envolve dois aspectos importantes.

O primeiro é o diagnóstico da falha; muitas vezes um produto é composto por diversas partes (subsistemas) e a velocidade e a precisão do diagnóstico é de extrema relevância.

O segundo aspecto é o grau de dificuldade que o técnico de manutenção terá para trocar a parte defeituosa.

A relação destes dois aspectos fica mais claro quando após o reparo, o equipamento é testado para se verificar se a ação de reparo tomada foi a correta. Caso não tenha sido, o procedimento de reparo deve ser refeito tantas vezes quanto necessário.

Os custos de implementação deste teste também são facilmente determinados: câmaras, área fabril, insumos, operadores, controles etc. Assim se compararmos os custos de reparo no campo com os custos de implementação deste teste teremos um ponto de partida para uma tomada de decisão em bases financeiras.

Porém alguns pontos ficam em base intangíveis, por exemplo: satisfação do cliente, imagem da empresa, tempo de atendimento do cliente (indisponibilidade do equipamento), contratos de garantia, concorrência etc. Estes pontos, difíceis de serem mensurados, normalmente pesam mais na decisão do que uma simples análise de custo, embora estes de forma alguma deva ser desprezado.

Uma vez decidido pela implementação do teste a análise de custo não deve ser deixada de lado, muito pelo contrario, são os resultados técnicos que darão subsídios para que uma reavaliação de custo seja feita.

Um dos componentes do custo de implementação é o tempo de teste, quanto maior o tempo maior são as despesas. Um acompanhamento dos resultados destes equipamentos, tanto a nível de produção como a nível de cliente, vai permitir que a estratégia de "Burn-in" seja reavaliada e uma nova decisão seja tomada.

As bases técnicas devem ser fundamentadas em objetivos claros e acompanhados com análises criteriosas. Para isto é definido um objetivo de falhas para o teste e cada vez que este objetivo é alcançado o tempo de teste é reduzido, e o procedimento é retomado até que ou se elimine por completo o teste ou se atinja o ponto de otimização máxima.

Não se pode perder de vista a possibilidade do caminho inverso, ou seja, em algum momento ser necessário aumentar o tempo de teste para que a sua eficiência seja suficiente para que os objetivos estabelecidos sejam alcançados.

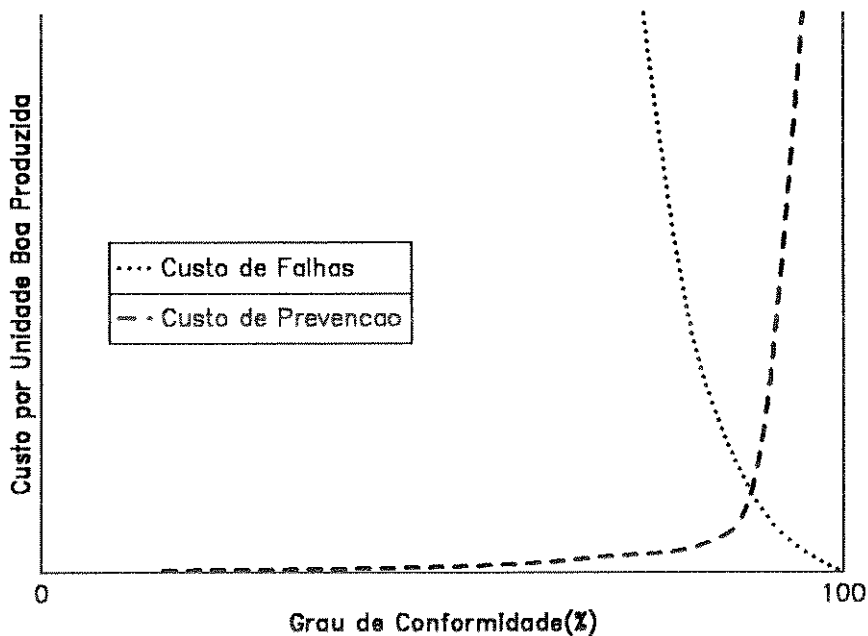


Figura 12. Distribuição de Custo por unidade de Peças produzidas.

A Figura 12 representa a distribuição de custo por unidade de peças produzidas, no eixo X temos o Grau de Conformidade que indica o quanto um produto esta dentro da sua conformidade.

Os custos de falha é igual a zero quando 100% das peças produzidas são boas (produto conforme, grau de conformidade 100%), e tende a infinito quando 100% das peças produzidas são defectivos (produto não conforme, grau de conformidade 0%). Por outro lado o custo de prevenção e avaliação se comporta de modo inverso, ele cresce muito a medida que o número de falhas fica menor. De outra maneira, o custo por unidade boa produzida aumenta conforme aumenta a aplicação de sistemas de controle e prevenção de falhas.

Em ambos os casos há situações em que o custo por unidade boa produzida é elevado, e um ponto ótimo deve ser considerado. É o caso em que ambas as situações devem ser otimizadas conforme modelo da Figura 13.

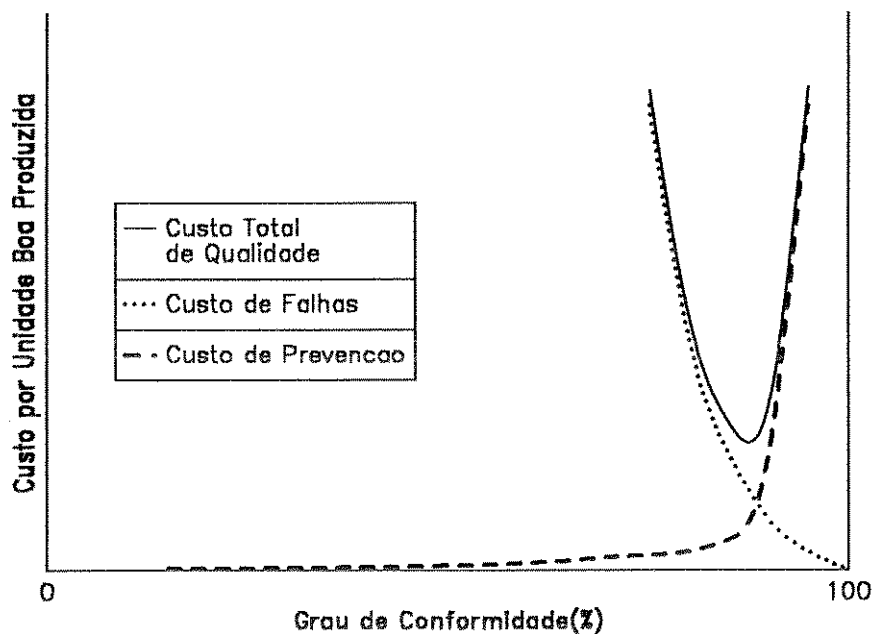


Figura 13. Otimização de Custo.

O gráfico central é o que melhor representa a realidade pois na maioria das industrias sempre há a aplicação de sistemas de controle mesmo que sejam rudimentares. Os diferentes níveis de aplicação vão posicionar os custos de qualidade dentro de um ponto, ou região, da curva.

O ponto ideal é onde temos a otimização dos custos de prevenção e de falhas, uma vez que sempre haverá falhas dentro ou fora do processo. No lado esquerdo da curva temos que os custos de falhas é maior que os custos de prevenção, neste caso investimentos na área de prevenção de falhas é justificado. No lado direito temos o inverso, os custos de prevenção é maior que os custos de falhas, neste caso uma revisão nos procedimentos deve ser realizada visando uma otimização dos controles de modo que os custos sejam racionalizados.

O ponto ideal é o ponto mínimo da curva, ou da zona central, onde pequenas variações são permitidas sem que os custos entre a prevenção e as falhas sejam equilibradas. Uma vez neste ponto os investimentos para melhoria de custo devido a qualidade deve ser feito em ambas as áreas: prevenção e falhas.

Embora este modelo possa ser considerado genérico, a realidade de algumas indústrias não permite a utilização deste modelo pois há outros fatores a serem considerados. É o caso de indústrias onde os riscos de acidentes são altos, como por exemplo indústrias do setor nuclear, aeronáutica etc; indústrias altamente automatizadas, onde as falhas humanas são reduzidas; etc. Cabe a cada indústria analisar a sua realidade e dentro destas buscar o seu ponto de equilíbrio.

Capítulo 5. Procedimento Experimental

O propósito da implementação de um procedimento de "Burn-In" é fazer que componentes ou sistemas, ainda na linha de fabricação, sejam colocados em funcionamento durante um tempo e sob condições determinadas, de modo que a maior parte dos que estão sujeitos a falhas prematuras realmente falhem. É preferível que estas falhas ocorram durante o procedimento de "Burn-In" ao invés de ocorrerem quando o produto final estiver instalado e sendo usado pelo cliente.

As condições durante o "Burn-In" aceleram os mecanismos de falha e devem eliminar um número máximo de componentes defeituosos. A definição de um procedimento de "Burn-In" deve aliar eficiência na eliminação destes componentes, simplicidade na sua aplicação e baixo custo.

Na prática existe uma grande dificuldade em determinar o tempo e as condições de um teste de "Burn-In" que seja otimizado. Propõe-se, neste capítulo, um roteiro básico para se definir um teste de maneira simples, analisando suas vantagens e indicando caminhos que permitam o seu aprimoramento a fim de aumentar a sua eficiência, levando em consideração aspectos tecnológicos e econômicos. Este roteiro nos leva às condições necessárias para a aplicação de um procedimento de "Burn-In" em um produto.

Este roteiro é aplicado a um produto, uma Fonte de Alimentação Chaveada, para a definição de um teste de "Burn-In". Os resultados da aplicação do teste definido ao produto são analisados e avaliados ao final do capítulo.

Este roteiro é apresentado como alternativa da utilização do Método Gráfico, conforme exemplificado no Item 3.1, em que se utilizam tabelas de Energia de Ativação (Tab. 1) e Curvas de Temperatura versus Fator de Aceleração (Fig. 9) ou Energia de Ativação (Fig. 10).

5.1 Um Roteiro Básico para a Definição de um Procedimento de "Burn-In".

Um roteiro básico para a definição de um procedimento de "Burn-In" deve considerar os fatores que cubram, de um modo geral, os principais pontos que determinam este procedimento. No roteiro proposto a seguir todos os aspectos fundamentais do procedimento são cobertos, quais sejam: tempo de vida, temperatura de operação máxima dos componentes, temperatura ambiente, funções do produto etc.

1. Definir o tempo de vida a ser coberto pelo teste.
 - a. Analisar a Taxa de Falha preliminar.
 - b. Calcular da Taxa de Falha Real do Produto.
 - c. Comparar as Taxas de Falha e Definir do tempo de vida a ser coberto pelo teste.
2. Identificar os pontos críticos do sistema: temperaturas, dissipações etc.
3. Definir a temperatura de teste.
4. Calcular o tempo de teste, pelos métodos descritos no Item 3.3.

Calcular o tempo de teste usando os FAs e o tempo de vida para cada método pela equação (1) apresentada no Item 3.3:

$$t_{BI} = \frac{t_{cobertura}}{FA}$$

5. Definir o tipo de "Burn-In" (Item 3.4):
 - a. Se Estático: estipular a alimentação necessária para garantir a polarização de todo o sistema (sempre que possível).
 - b. Se Dinâmico: definir o modo operacional (alimentação, programa de teste e monitoração) de modo a simular a função básica do sistema.

5.2 Aplicação do Roteiro a uma Fonte de Alimentação

Na aplicação de um roteiro de teste devemos levar em consideração pontos importantes que muitas vezes passam despercebidos, mas que merecem cuidados na hora da definição do teste.

São estas considerações que são apresentadas e analisadas a seguir usando como exemplo a Fonte de Alimentação descrita nos dois próximos itens.

5.2.1 Descrição da Fonte de Alimentação

A Fonte de Alimentação Chaveada de 135W de Potência é projetada para uma vida útil de 5 anos (43.200 horas). Uma vez conectada na rede elétrica ela permanece alimentada, porém sem alimentar o equipamento em que será usada. Isto ocorre quando a chave LIGA/DESLIGA (L/D) do sistema é acionada. No circuito primário desta Fonte há um "loop" onde a chave L/D interrompe ou fecha este circuito. Acionando a chave (L/D) para a posição LIGA (L) o circuito é fechado permitindo o retorno do sinal à Fonte. Este sinal aciona o circuito secundário da Fonte liberando a alimentação para o equipamento.

A Fonte de Alimentação possui um Exaustor de ar quente, gerado internamente com o aquecimento natural dos componentes devido às dissipações térmicas de uso e é este acréscimo de temperatura que é refletido no Fator de Aceleração, o qual deve operar em uma temperatura inferior a 70°C. Este é o componente limitante, em termos de temperatura, para a definição do teste, como veremos mais a frente. A temperatura ambiente média de operação do equipamento deve ser de 25°C, que é a temperatura a ser considerada para efeito de cálculo dos Fatores de Aceleração.

No item a seguir é apresentada a lista de materiais que compõe a Fonte, com os dados das medidas térmicas de uso dos componentes, realizadas em laboratório. Estas medidas foram obtidas utilizando-se sensores térmicos (Termopares) colocados sobre os componentes com a Fonte em funcionamento em temperatura ambiente e com resistores nas saídas (cargas passivas), dissipando a potencia máxima permitida pelo Produto.

As temperaturas medidas (TM - Temperatura Média de uso do componente) pelos termopares são enviadas por intermédio de um Conversor A/D para um Computador Pessoal (PC), que possui a lista destes componentes com suas respectivas Energias de Ativação (EA) e Taxas de Falha (FR) fornecidas pelos fabricantes dos componentes ou obtidas por tabelas (vide Item 5.2.3 sub-item b).

Ao final da coleta destes dados, um aplicativo calcula automaticamente os demais dados, como Fator de Aceleração (AF) e valores intermediários, necessários para o cálculo do Fator de Aceleração que desejamos obter seguindo o Modelo de Arrhenius discutido no Item 3.1

Cada item do roteiro é analisado detalhadamente e aplicado na Fonte de Alimentação.

5.2.2 Lista de Materiais e Resultados de Laboratório.

Abreviações utilizadas:

Comp.	Identificação do componente no sistema
Crt.	Circuito dentro do qual o componente está aplicado
Tecn	Tecnologia do componente
Valor	Definição das características do componente
TM	Temperatura Medida de uso no componente
EA	Energia de Ativação típica para o componente
FR(ppm)	Taxa de Falha do componente em Partes Por Milhão (PPM)
AF	Fator de Aceleração do componente
FR*AF	FR do componente multiplicado por seu respectivo AF

Comp.	Crt.	Tecn.	Valor	TM	EA	FR(ppm)	AF	FR*AF
C	1	EMC CAP FILM	1uF 250V	10%	32	0.6	0.0016	6.831 .010930
C	3	EMC CAP CERAMIC	2.2nF 400V	20%	34	0.6	0.0007	6.675 .004672
C	4	EMC CAP CERAMIC	2.2nF 400V	20%	34	0.6	0.0007	6.675 .004672
C	40	BULK CAP ELECTROL.	1000UF 250V	20%	32	0.6	0.0720	6.831 .491836
C	41	BULK CAP ELECTROL.	1000UF 250V	20%	34	0.6	0.0720	6.675 .480591
C	50	CTRL CAP FILM	330nF 63V	10%	34	0.6	0.0014	6.675 .009345
C	51	CTRL CAP FILM	330nF 63V	10%	34	0.6	0.0014	6.675 .009345
C	52	SNB CAP CERAMIC	220PF 1KV	10%	41	0.6	0.0006	6.176 .003705
C	53	SNB CAP CERAMIC	220PF 1KV	10%	42	0.6	0.0006	6.110 .003666
C	100	+5V CAP ELECTROL.	4700uF 10V	20%	30	0.6	0.0572	6.994 .400049
C	101	+5V CAP ELECTROL.	4700UF 10V	20%	33	0.6	0.0572	6.752 .386223
C	102	+5V CAP FILM	10NF 400V	10%	29	0.6	0.0010	7.078 .007078
C	103	+5V CAP FILM	10NF 400V	10%	36	0.6	0.0010	6.525 .006525
C	104	EMC CAP FILM	10NF 400V	10%	30	0.6	0.0010	6.994 .006994
C	105	PWG CAP FILM	100NF 100V	10%	31	0.6	0.0015	6.912 .010367
C	120	+12V CAP FILM	2.2NF 400V	10%	27	0.6	0.0010	7.251 .007251
C	121	+12V CAP FILM	2.2NF 400V	10%	32	0.6	0.0010	6.831 .006831
C	122	+12V CAP ELECTR.	1000UF 25V	20%	27	0.6	0.0264	7.251 .191435
C	123	+12V CAP FILM	1NF 400V	10%	27	0.6	0.0010	7.251 .007251
C	124	+12V CAP FILM	100NF 100V	10%	26	0.6	0.0015	7.341 .011011
C	125	+12V CAP ELECTROL.	2200UF 25V	20%	31	0.6	0.1059	6.912 .731939
C	126	FAN CAP ELECTROL.	470UF 16V	20%	37	0.6	0.0815	6.452 .525862
C	140	-12V CAP ELECTROL.	220UF 35V	20%	30	0.6	0.0252	6.994 .176245
C	141	-12V CAP ELECTROL.	470UF 16V	20%	33	0.6	0.0815	6.752 .550301
C	170	PWG CAP FILM	100NF 100V	10%	31	0.6	0.0015	6.912 .010367
C	180	VCC CAP ELECTROL.	47UF 50V	20%	30	0.6	0.0293	6.994 .204920
C	181	CTRL CAP FILM	1NF 400V	10%	29	0.6	0.0010	7.078 .007078
C	182	CTRL CAP ELECTROL.	0.47UF 50V	20%	33	0.6	0.0057	6.752 .038487
C	183	CTRL CAP FILM	2.2NF 63V	5%	31	0.6	0.0010	6.912 .006912
C	185	CTRL CAP FILM	1NF 400V	10%	28	0.6	0.0006	7.164 .004298
C	186	CTRL CAP FILM	330nF 63V	10%	31	0.6	0.0015	6.912 .010367
C	187	CTRL CAP FILM	100NF 100V	10%	31	0.6	0.0015	6.912 .010367
C	188	CTRL CAP CERAMIC	470PF 63V	10%	32	0.6	0.0006	6.831 .004099
C	189	CTRL CAP FILM	100NF 100V	10%	31	0.6	0.0015	6.912 .010367
C	190	CTRL CAP FILM	100NF 100V	10%	29	0.6	0.0015	7.078 .010617
C	208	BIAS CAP FILM	100NF 100V	10%	30	0.6	0.0015	6.994 .010491
C	209	BIAS CAP ELECTROL.	220UF 10V	20%	35	0.6	0.0252	6.599 .166299
C	210	BIAS CAP FILM	4.7NF 400V	10%	30	0.6	0.0015	6.994 .010491
C	302	PROT CAP FILM	100NF 100V	10%	30	0.6	0.0015	6.994 .010491
C	304	PROT CAP FILM	100NF 100V	10%	30	0.6	0.0015	6.994 .010491
C	305	PROT CAP FILM	4700PF 400V	10%	30	0.6	0.0040	6.994 .027975
C	306	PROT CAP ELECTR.	2.2UF 50V	20%	30	0.6	0.0040	6.994 .027975

Comp.	Crt.	Tecn.	Valor	TM	EA	FR(ppm)	AF	FR*AF		
C	308	PROT CAP ELECTR.	1UF	50V	20%	30	0.6	0.0015	6.994	.010491
C	309	PROT CAP FILM	100NF	100V	10%	30	0.6	0.0015	6.994	.010491
C	310	PROT CAP FILM	100NF	100V	10%	30	0.6	0.0132	6.994	.092319
C	311	PROT CAP ELECTR.	10UF	50V	20%	30	0.6	0.0099	6.994	.069239
C	313	PROT CAP ELECTR.	0.47UF	50V	20%	30	0.6	0.0015	6.994	.010491
C	314	PROT CAP FILM	100NF	100V	10%	30	0.6	0.0015	6.994	.010491
C	315	CTRL CAP FILM	330nF	63V	10%	30	0.6	0.0132	6.994	.092319
C	316	PROT CAP ELECTR.	10UF	50V	20%	30	0.6	0.0015	6.994	.010491
C	317	PROT CAP FILM	100NF	100V	10%	30	0.6	0.0006	6.994	.004196
C	318	CTRL CAP CERAMIC	470PF	63V	10%	30	0.6	0.0010	6.994	.006994
C	401	EMC CAP Film	0.22UF	250V	0%	30	0.6	0.0007	6.994	.004896
C	402	EMC CAP CERAMIC	1000PF	400V	0%	30	0.6	0.0007	6.994	.004896
C	403	EMC CAP CERAMIC	1000PF	400V	0%	30	0.6	0.0023	6.994	.016086
D	40	BULK DIOD BRIDGE 8A	800V			53	1.0	0.0048	16.946	.081342
D	50	DRV DIOD ZENER	13V	1/2W	5%	41	1.0	0.0028	20.787	.058205
D	51	DRV DIOD ZENER	13V	1/2W	5%	49	1.0	0.0028	18.098	.050674
D	52	SNB DIOD FSW	1KV	1A		55	1.0	0.0001	16.412	.001641
D	53	SWT DIOD FSW	1KV	1A		56	1.0	0.0001	16.154	.001615
D	54	SNB DIOD FSW	1KV	1A		38	1.0	0.0001	21.953	.002195
D	55	SWT DIOD FSW	1KV	1A		77	1.0	0.0001	11.927	.001193
D	100	+5V DIOD SCHOTTKY	30A	45V		56	1.0	0.0007	16.154	.011308
D	101	+5V DIOD SCHOTTKY	30A	45V		45	1.0	0.0007	19.373	.013561
D	120	+12V DIOD FSW 16A	200V			53	1.0	0.0004	16.946	.006779
D	121	+12V DIOD ZENER	18V	1/2W	5%	41	1.0	0.0028	20.787	.058205
D	122	+12V DIOD ZENER	13V	1/2W	5%	44	1.0	0.0028	19.712	.055195
D	123	+12V DIOD ZENER	5.1V	1/2W	2%	40	1.0	0.0028	21.165	.059263
D	141	-12V DIOD FSW 1A	200V			47	1.0	0.0001	18.719	.001872
D	142	-12V DIOD RECTIFIER	50V	1A		47	1.0	0.0004	18.719	.007488
D	180	VCC DIOD RECTIFIER	400V	1A		34	1.0	0.0004	23.663	.009465
D	181	CTRL DIO FSW 200MA	75V			40	1.0	0.0001	21.165	.002117
D	183	CTRL DIOD SCHOTTKY	1A	50V		32	1.0	0.0004	24.593	.009837
D	185	ACST DIOD FSW	400V	1A		33	1.0	0.0004	24.122	.009649
D	187	CTRL DIOD FSW 200MA	75V			36	1.0	0.0001	22.784	.002278
D	207	BIAS DIOD FRR	100V	1A		35	1.0	0.0004	23.217	.009287
D	208	BIAS DIOD FRR	100V	1A		35	1.0	0.0004	23.217	.009287
D	209	BIAS DIOD FRR	100V	1A		35	1.0	0.0004	23.217	.009287
D	210	BIAS DIOD FRR	100V	1A		35	1.0	0.0004	23.217	.009287
D	211	BIAS DIOD FRR	100V	1A		35	1.0	0.0004	23.217	.009287
D	212	BIAS DIOD FRR	100V	1A		35	1.0	0.0004	23.217	.009287
D	213	BIAS DIOD FRR	100V	1A		35	1.0	0.0004	23.217	.009287
D	214	BIAS DIOD FSW	1KV	1A		35	1.0	0.0004	23.217	.009287
D	215	BIAS DIOD FRR	100V	1A		35	1.0	0.0004	23.217	.009287
D	216	BIAS DIOD FRR	100V	1A		35	1.0	0.0004	23.217	.009287
D	217	BIAS DIOD FRR	100V	1A		35	1.0	0.0004	23.217	.009287
D	218	BIAS DIOD FRR	100V	1A		35	1.0	0.0004	23.217	.009287
D	302	PROT DIOD ZENER	13V	1/2W	2%	30	1.0	0.0001	25.578	.002558
D	303	PROT DIOD FSW	75V	200mA		30	1.0	0.0001	25.578	.002558
D	304	PROT DIOD FSW	75V	200mA		30	1.0	0.0001	25.578	.002558
D	306	PROT DIOD FSW	75V	200mA		30	1.0	0.0028	25.578	.071618
D	307	PROT DIOD ZENER	5.1V	1/2W	2%	30	1.0	0.0028	25.578	.071618
D	309	PROT DIOD ZENER	13V	1/2W	5%	30	1.0	0.0001	25.578	.002558
D	310	PROT DIOD FSW	75V	200mA		30	1.0	0.0001	25.578	.002558
D	312	PROT DIOD FSW	75V	200mA		30	1.0	0.0001	25.578	.002558
D	313	PROT DIOD FSW	75V	200mA		30	1.0	0.0010	25.578	.025578
F	1	SAFT FUSE FUSE UL/CS	5A	250V		30	0.5	0.0012	5.057	.006069
L	1	EMC COMM MODE CHOK				42	0.5	0.0012	4.519	.005423
L	2	EMC CHOK 100uH			10%	38	0.5	0.0012	4.685	.005622

Comp.	Crt.	Tecn.	Valor	TM	EA	FR(ppm)	AF	FR*AF	
L	3	EMC	CHOK 100uH	10%	40	0.5	0.0012	4.601	.005521
L	100	+5V	COUPE INDUCTOR T130-26		41	0.5	0.0012	4.559	.005471
L	101	+5V	CHOK		39	0.5	0.0012	4.643	.005571
MOV	1	BULK	VARITOR ZNOXD 150V		35	1.0	0.0010	23.217	.023217
MOV	2	BULK	VARITOR ZNOXD 150V		40	1.0	0.0010	21.165	.021165
Q	50	SWT	FET SI N MOS T0-220A		55	1.0	0.0139	16.412	.228126
Q	51	SWT	FET SI N MOS T0-220A		55	1.0	0.0139	16.412	.228126
Q	120	+12V	FET SI N MOS T0-220A		59	1.0	0.0297	15.418	.457922
Q	121	+12V	XSTO SI NPN T0-92		41	1.0	0.0055	20.787	.114331
Q	122	+12V	XSTO SI NPN T0-92		35	1.0	0.0055	23.217	.127696
Q	123	FAN	XSTO SI NPN T0-92		36	1.0	0.0055	22.784	.125313
Q	124	FAN	XSTO SI NPN T0-92		36	1.0	0.0055	22.784	.125313
Q	170	FAN	XSTO SI NPN T0-92		41	1.0	0.0055	20.787	.114331
Q	171	FAN	XSTO SI NPN T0-92		39	1.0	0.0055	21.554	.118545
Q	180	CTRL	XSTO SI PNP T0-92		31	1.0	0.0055	25.078	.137931
Q	181	CTRL	SCR SCR 100V T0-92		31	1.0	0.0012	25.078	.030094
Q	205	BIAS	XSTO SI NPN T0-220A		60	1.0	0.0000	15.184	.000000
Q	302	PROT	XSTO SI NPN AMP T0-92		30	1.0	0.0055	25.578	.140677
Q	303	PROT	XSTO SI PNP AMP T0-92		30	1.0	0.0055	25.578	.140677
Q	304	PROT	XSTO SI PNP AMP T0-92		30	1.0	0.0055	25.578	.140677
Q	305	PROT	XSTO SI NPN AMP T0-92		30	1.0	0.0000	25.578	.000000
R	1	EMC	RES METAL FILM 150K 2W	5%	43	0.56	0.0017	4.479	.007614
R	10	BULK	RES WIRE WOUND 1R8 5W	5%	67	0.56	0.0225	3.700	.083254
R	11	BULK	RES WIRE WOUND 1R 7W	5%	31	0.56	0.0225	5.008	.112676
R	12	BULK	RES WIRE WOUND 1R8 5W	5%	67	0.56	0.0225	3.700	.083254
R	13	BULK	RES WIRE WOUND 1R8 5W	5%	67	0.56	0.0225	3.700	.083254
R	40	BULK	RES METAL OXID 100K 1W	5%	39	0.56	0.0015	4.643	.006964
R	41	BULK	RES METAL OXID 100K 1W	5%	53	0.56	0.0015	4.117	.006175
R	50	DRV	RES CARBON FIL 10K 1/4W	5%	34	0.56	0.0010	4.864	.004864
R	51	DRV	RES CARBON FIL 10R 1/4W	5%	37	0.56	0.0010	4.729	.004729
R	52	DRV	RES CARBON FIL 10K 1/4W	5%	40	0.56	0.0022	4.601	.010121
R	53	DRV	RES CARBON FIL 10R 1/4W	5%	40	0.56	0.0022	4.601	.010121
R	54	SNB	RES METAL FILM 3.3K 3W	5%	60	0.56	0.0180	3.897	.070141
R	55	SNB	RES METAL FILM 3.3K 3W	5%	47	0.56	0.0180	4.327	.077877
R	100	+5V	RES METAL OXID 47R 2W	5%	63	0.56	0.0022	3.810	.008382
R	101	+5V	RES METAL OXID 47R 2W	5%	65	0.56	0.0022	3.754	.008259
R	102	+5V	RES METAL OXID 10R 1W	5%	37	0.56	0.0022	4.729	.010404
R	103	+5V	RES METAL OXID 10R 1W	5%	37	0.56	0.0022	4.729	.010404
R	120	+12V	RES METAL OXID 56R 1W	5%	35	0.56	0.0022	4.818	.010601
R	121	+12V	RES METAL OXID 56R 1W	5%	35	0.56	0.0022	4.818	.010601
R	122	+12V	RES CARBON FIL 750R 1/4W	5%	39	0.56	0.0010	4.643	.004643
R	123	+12V	RES CARBON FIL 1K 1/4W	5%	32	0.56	0.0010	4.959	.004959
R	124	+12V	RES CARBON FIL 750R 1/4W	5%	30	0.56	0.0010	5.057	.005057
R	125	+12V	RES METAL FILM 8.87K 1/4W	1%	28	0.56	0.0022	5.160	.011351
R	126	+12V	RES CARBON FIL 4.7K 1/4W	5%	31	0.56	0.0010	5.008	.005008
R	127	+12V	RES CARBON FIL 68K 1/4W	5%	32	0.56	0.0010	4.959	.004959
R	128	+12V	RES METAL FILM 11.8K 1/4W	1%	28	0.56	0.0022	5.160	.011351
R	129	+12V	RES METAL OXID 560R 1W	5%	57	0.56	0.0022	3.988	.008773
R	130	+12V	RES CARBON FIL 1R 1/4W	5%	30	0.56	0.0010	5.057	.005057
R	131	FAN	RES CARBON FIL 15R 1/2W	5%	44	0.56	0.0010	4.440	.004440
R	132	FAN	RES CARBON FIL 3.3K 1/4W	5%	29	0.56	0.0010	5.108	.005108
R	133	FAN	RES CARBON FIL 10K 1/4W	5%	28	0.56	0.0010	5.160	.005160
R	134	FAN	RES CARBON FIL 2.2K 1/4W	5%	29	0.56	0.0010	5.108	.005108
R	135	+12V	RES WIREWOUND 0.05R 1W	5%	36	0.56	0.0046	4.773	.021957
R	140	-12V	RES CARBON FIL 1K 1/4W	5%	49	0.56	0.0010	4.254	.004254
R	141	-12V	RES METAL OXID 1R 2W	5%	47	0.56	0.0022	4.327	.009518
R	170	PWG	RES CARBON FIL 12K 1/4W	5%	30	0.56	0.0010	5.057	.005057

Comp.	Crt.	Tecn.	Valor	TM	EA	FR(ppm)	AF	FR*AF
R	172	PWG RES	CARBON FIL 1K	1/4W	5%	32 0.56 0.0010	4.959	.004959
R	181	CTRL RES	METAL FILM 4.75K	1/4W	1%	35 0.56 0.0022	4.818	.010601
R	182	CTRL RES	METAL FILM 4.75K	1/4W	1%	31 0.56 0.0022	5.008	.011017
R	183	CTRL RES	CARBON FIL 1K	1/4W	5%	32 0.56 0.0010	4.959	.004959
R	184	CTRL RES	METAL FILM 4.75K	1/4W	1%	33 0.56 0.0022	4.911	.010805
R	185	CTRL RES	CARBON FIL 100K	1/4W	5%	27 0.56 0.0010	5.212	.005212
R	186	CTRL RES	CARBON FIL 330R	1/4W	5%	31 0.56 0.0010	5.008	.005008
R	187	CTRL RES	CARBON FIL 1K	1/4W	5%	31 0.56 0.0010	5.008	.005008
R	188	CTRL RES	CARBON FIL 4.7R	1/2W	5%	34 0.56 0.0010	4.864	.004864
R	189	CTRL RES	CARBON FIL 330R	1/4W	5%	35 0.56 0.0010	4.818	.004818
R	190	CTRL RES	METAL FILM 15R	1/4W	1%	28 0.56 0.0010	5.160	.005160
R	191	VCC RES	METAL OXID 1.5K	2W	5%	39 0.56 0.0022	4.643	.010214
R	192	CTRL RES	CARBON FIL 22K	1/4W	5%	32 0.56 0.0010	4.959	.004959
R	193	CTRL RES	METAL FILM 45.3R	1/4W	1%	43 0.56 0.0010	4.479	.004479
R	214	BIAS RES	METAL OXID 12R	2W	5%	50 0.56 0.0022	4.219	.009282
R	215	BIAS RES	METAL FILM 470K	1W	5%	45 0.56 0.0022	4.401	.009683
R	216	BIAS RES	METAL OXID 180R	2W	5%	40 0.56 0.0022	4.601	.010121
R	217	BIAS RES	METAL OXID 20K	1W	5%	50 0.56 0.0022	4.219	.009282
R	218	BIAS RES	METAL OXID 8.2R	1W	5%	40 0.56 0.0022	4.601	.010121
R	303	PROT RES	CARBON FIL 240R	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	304	PROT RES	CARBON FIL 100R	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	307	PROT RES	CARBON FIL 4.7K	1/4W	5%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	310	PROT RES	METAL FILM 1K58	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	311	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	312	PROT RES	CARBON FIL 22K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	313	PROT RES	CARBON FIL 100K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	314	PROT RES	CARBON FIL 33K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	315	PROT RES	CARBON FIL 33K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	316	PROT RES	CARBON FIL 10K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	317	PROT RES	CARBON FIL 33K	1/4W	5%	30 0.56 0.0017	5.057	.008598
R	322	PROT RES	CARBON FIL 1.2M	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	323	PROT RES	CARBON FIL 10K	1/4W	5%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	324	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	325	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	326	PROT RES	METAL FILM 4.32K	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	327	PROT RES	METAL FILM 1K	1/4W	1%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	328	PROT RES	CARBON FIL 22K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	329	PROT RES	CARBON FIL 10K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	330	PROT RES	CARBON FIL 56K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	331	PROT RES	CARBON FIL 10K	1/4W	5%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	332	PROT RES	METAL FILM 1K	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	333	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	334	PROT RES	METAL FILM 12.1K	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	335	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	337	PROT RES	CARBON FIL 1.5K	1/4W	5%	45 0.56 0.0010	4.401	.004401
R	338	PROT RES	CARBON FIL 1K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	339	PROT RES	CARBON FIL 10K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	340	PROT RES	CARBON FIL 4.7K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	342	PROT RES	CARBON FIL 510R	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	345	PROT RES	CARBON FIL 47K	1/4W	5%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	348	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	349	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	350	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	351	PROT RES	METAL FILM 51.1K	1/4W	1%	30 0.56 0.0012	5.057	.006069
R	352	PROT RES	CARBON FIL 470K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	353	PROT RES	CARBON FIL 5.6K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	354	PROT RES	CARBON FIL 68K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057

Comp.	Crt.	Tecn.	Valor	TM	EA	FR(ppm)	AF	FR*AF
R	355	PROT RES	CARBON FIL 10K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	356	PROT RES	CARBON FIL 22K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	357	PROT RES	CARBON FIL 4.7K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	358	PROT RES	CARBON FIL 470R	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	365	PROT RES	CARBON FIL 1.5K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	366	PROT RES	CARBON FIL 10K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	367	PROT RES	CARBON FIL 100K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	368	PROT RES	CARBON FIL 10K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	369	PROT RES	CARBON FIL 1K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	370	PROT RES	CARBON FIL 10K	1/4W	5%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	371	PROT RES	METAL FILM 16.2K	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	372	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	373	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	374	PROT RES	CARBON FIL 1K5	1/4W	5%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	375	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0011	5.057	.005563
R	376	PROT RES	CARBON FIL 100K	1/4W	5%	30 0.56 0.0010	5.057	.005057
R	378	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	380	PROT RES	METAL FILM 432R	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	381	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	382	PROT RES	METAL FILM 432R	1/4W	1%	30 0.56 0.0022	5.057	.011126
R	383	PROT RES	METAL FILM 10K	1/4W	1%	30 0.56 0.0011	5.057	.005563
R	384	PROT RES	CARBON FIL 47K	1/4W	1%	30 0.56 0.0028	5.057	.014161
T	50	SWT XFMR	POWER ER42			37 0.5 0.0105	4.729	.049654
T	180	VCC XFMR	BIAS EE19H			35 0.5 0.0105	4.818	.050594
T	181	DRV XFMR	DRIVER EE19H			32 0.5 0.0018	4.959	.008926
T	182	CTRL XFMR	CURRENT UU10.5			34 0.5 0.0018	4.864	.008756
U	140	-12V IC	Linear REG			42 0.7 0.0010	8.261	.008261
U	180	CTRL IC	Linear			37 0.7 0.0010	8.804	.008804
U	301	PROT IC	OP-AMP			30 0.7 0.0010	9.672	.009672
U	302	PROT IC	COMPARATOR			30 0.7 0.0010	9.672	.009672
U	303	PROT IC	COMPARATOR			30 0.7 0.0010	9.672	.009672
U	304	PROT IC	COMPARATOR			30 0.7 0.0055	9.672	.053194
V	1	FAN	FAN 12V DC			35 --- -----	-----	-----

5.2.3 Definição do Tempo de Vida a ser Coberto pelo Teste.

a) Análise preliminar da Taxa de Falha.

A definição de um teste de "Burn-In" para um produto se inicia ainda na fase de projeto. Uma das definições importantes utilizadas neste caso é qual a taxa de falha, ou o MTBF, esperada para o produto em questão. Os fatores usados para definir a taxa de falhas são vários, entre eles estão: tipos da falha, descritos no Item 1.1.4, como por exemplo, as falhas críticas em aplicações aeroespaciais, as quais não podem ocorrer tanto devido aos custos que isto implica, como em vôos tripulados onde a vida de pessoas está envolvida (vide o caso do acidente do ônibus espacial americano "Challenger"); fator de concorrência, pois produtos com maior confiabilidade tem maior aceitação no mercado; tempo de vida do produto etc.

Estes critérios são ponderados pelo engenheiro de produto e desta ponderação é que se define qual a taxa de falha que o produto deve ter. Inicialmente este estudo se limita a um levantamento teórico, porém, conforme o desenvolvimento do produto vai evoluindo, estes estudos devem ser reanalisados de modo a determinar a diferença entre o que está sendo implementado e o especificado. A reavaliação se faz levantando a taxa de falha real do produto em desenvolvimento e que pode ser tanto teórica, por intermédio de algoritmos ou dados de confiabilidade de cada componente utilizado no projeto do produto, como por dados resultantes de testes experimentais realizados em laboratórios.

Isto se faz necessário para que o engenheiro de produto possa determinar se o caminho escolhido inicialmente no desenvolvimento do produto lhe trará o resultado desejado, ou seja, atingir a taxa de falha esperada. São comuns as situações em que se faz necessária a substituição de componentes de menor confiabilidade, inicialmente considerados para o produto, por componentes de maior confiabilidade e não raro o caso em que é necessário refazer algumas partes do projeto, para manter a taxa de falha do produto conforme projetada.

Para a Fonte de Alimentação a taxa de falha especificada é de 0,25%/KPOH na condição de utilização de 80% de sua carga máxima (108W), a uma temperatura ambiente de 35°C e um tempo de vida útil mínimo de 40.000 horas.

b) Cálculo da Taxa de Falha Real do Produto.

Após o projeto ter sido concluído é calculada a taxa de falha real do produto, a partir da lista de material que a compõe.

Para se calcular a taxa de falha de um produto devemos inicialmente obter as taxas de falhas de cada componente individualmente.

Atualmente, a grande maioria dos fabricantes de componentes faz o levantamento das taxas de falhas de seus produtos e fornecem estes valores aos seus clientes. Porém, caso não se disponha destes dados, há ainda a possibilidade de usarmos algoritmos que façam uma estimativa destas taxas de falha. Um destes algoritmos é o descrito na "Military Handbook 217-E". Este manual possui para cada tipo de componente e suas respectivas tecnologias, algoritmos nos quais os dados de entrada são as condições de uso do componente em suas respectivas aplicações e os dados de saída são as taxas de falha dos componentes nas respectivas condições.

Como alternativa para se obter a taxa de falha podem ser realizados testes de confiabilidade em laboratório. Este método pode ser utilizado tanto a nível de Componente como a nível de sistema.

Com as taxas de falhas de cada componente em mãos, o próximo passo é analisar o circuito onde o componente atua: se é um circuito série ou paralelo.

Esta informação é importante, pois, no caso de circuito série, a falha de um componente implica na falha total do circuito. Nesta situação, a taxa de falha do circuito será a somatória das taxas de falhas dos componentes que a compõem.

Para o caso de circuitos paralelos, a falha de um componente não implica necessariamente na falha total do circuito, para que isto ocorra é necessário que todos os circuitos, que estão em paralelo, falhem. Nesta situação a taxa de falha do circuito será o produto das taxas de falha dos componentes que a compõem.

Com todos os circuitos analisados e as taxas de falha devidamente computadas, temos como número final a taxa de falha total do produto. Este número é a taxa de falha real do produto que deverá ser comparado com o desejado, conforme descrito no item anterior.

No caso da Fonte em questão para se calcular a taxa de falha real foi necessário utilizar vários meios de obtenção das taxas de falhas dos componentes. Parte destas taxas foram obtidas utilizando dados fornecidos pelos fabricantes que mantêm controles da confiabilidade dos componentes por eles fabricados. Outra parte, mais significativa, foi obtida através de testes de qualificação, sendo que estes valores fazem parte dos resultados de teste. E, por último, foi necessária a estimação por meio da MIL-HDBK-217E.

O resultado obtido foi de 0,7%/KPOH.

c) Comparação entre as Taxas de Falha e Definição do Tempo a ser coberto pelo Teste.

Uma vez definida qual a taxa de falha que se deseja ter para o produto e a sua taxa de falha real, o passo seguinte é comparar os resultados a fim de se determinar qual o tempo de "Burn-In" necessário para a eliminação das falhas indesejáveis e fornecer o produto com a confiabilidade igual ou maior que a definida.

A comparação pode resultar em duas possibilidades; primeira: a taxa de falha real ser menor ou igual a desejada, e segunda: a taxa de falha real ser maior que a desejada.

Caso a taxa de falha real seja menor ou igual a desejada não haveria, a princípio, a necessidade de realizar o procedimento de "Burn-In". Porém, como vimos no Capítulo 2, a taxa de falha é na realidade uma probabilidade de falha, desta maneira toma-se a precaução de se utilizar um teste preventivo e para tanto utiliza-se um tempo médio de 0,5% do tempo de vida útil do produto como o tempo a ser coberto pelo "Burn-In"³.

No caso da taxa de falha real ser maior que a desejada, deve-se verificar quão diferente ela é da desejada. Se esta diferença é muito grande a aplicação do procedimento de "Burn-In" pode se tornar inviável, pois seria necessário um tempo muito longo de procedimento para que a taxa de falha fique abaixo ou igual a desejada, o que inaceitável. Neste caso todas as análises e decisões tomadas até então devem ser reanalisadas.

Se esta diferença é pequena então o tempo de "Burn-In" deve ser o necessário para que o produto tenha ao seu final uma taxa de falha menor ou igual a desejada.

Em termos práticos é quase que padrão a utilização da cobertura de 0,5% da vida útil para testes de "Burn-In", mesmo na situação da taxa de falha real ser muito maior que a desejada, isto para produtos não críticos na sua aplicação. Embora este procedimento seja bastante simples, ela implica numa maior incerteza da eficiência do teste e um acompanhamento maior se faz necessário, embora muitos fabricantes não sigam este caminho.

No caso da Fonte a diferença entre as taxas era muito grande, fazendo necessário um trabalho de redefinição de componentes e nova análise da confiabilidade para determinar se as alterações implementadas resultariam na melhora da taxa de falha.

Foram verificados os componentes que mais contribuíam para o aumento da taxa de falha no produto final. Eles foram substituídos por componentes mais confiáveis e na nova análise foram consideradas as condições de uso de cada componente na sua aplicação. Com isso, foi obtida uma significativa melhora na taxa de falhas real.

Muito embora não se tenha chegado aos números desejáveis foi assumido, baseado na diferença entre as taxas de falha e resultados reais de outras fontes de alimentação (experiência prévia), que a taxa objetivo seria alcançada. Testes de qualificação foram realizados baseados nesta abordagem e os resultados confirmaram as expectativas. Assim, o tempo de cobertura de "Burn-In" seria apenas o suficiente para cobrir 0,5% da vida útil do produto, ou seja, 220 horas de operação.

5.2.4 Identificação dos Pontos Críticos do Sistema.

Os limites térmicos de operação, sejam de produtos sejam de componentes, são sempre fornecidos pelos fabricantes. Na aplicação de um "Burn-In", a temperatura máxima permitida para a realização do teste será determinada pelos componentes cuja limitação térmica for maior. Porém não pode se perder de vista que os componentes também dissipam calor e que isto contribuirá com a elevação da temperatura interna da câmara onde o "Burn-In" é realizado.

Por isso, ao se definir a temperatura de teste, deve-se considerar também que as dissipações térmicas dos componentes elevarão a temperatura interna da câmara e que portanto, um sistema de retirada de calor (exaustor) ou resfriamento (ventilação forçada) deve ser implementado.

Estes cuidados são necessários para que, durante o teste, não haja falhas que tenham ocorrido devido ao fato de algum componente ter sido literalmente queimado por ter excedido involuntariamente o seu limite de dissipação térmica. Neste caso, dizemos que houve um "Burn-Out" e não um "Burn-In".

No caso do "Burn-In" ser em um produto há outros elementos que limitam a temperatura máxima de teste, tão ou mais críticos quanto os limites impostos pelos componentes eletrônicos: são as peças mecânicas. Há produtos que possuem ventiladores, discos flexíveis e até mesmo partes plásticas, para as quais o efeito da temperatura pode ser danoso. Todos estes pontos devem ser analisados com cuidado para se obter os resultados desejados do teste.

Na Fonte são utilizados componentes que, em condições normais de uso, sofrem altas elevações de temperatura devido à corrente elétrica. No caso do componente D55 (vide lista de material descrito no Item 5.2.2) este acréscimo é de 52°C. Como os fabricantes de semicondutores especificam a temperatura máxima de 125°C, isso já nos dá o primeiro limitador de temperatura, que é de 73°C (125 menos 52).

5.2.5 Definição da Temperatura de Teste.

Uma vez determinada a temperatura máxima permitida, podemos determinar qual a temperatura de teste. Na maioria dos casos a temperatura de teste é a própria temperatura máxima permitida, porém pode-se optar por uma temperatura menor. Um exemplo disto é quando já se tem uma câmara com uma temperatura ajustada para um outro produto cuja temperatura de "Burn-In" é menor que a desejada. Contudo, nesta situação, muito embora o tempo de teste deva ser maior, não haverá necessidade da aquisição de uma nova câmara ou de se realizar vários ajustes na mesma câmara, somente para adequá-la às necessidades de um produto. Esta decisão cabe ao engenheiro que está projetando o teste, levando em conta os fatores econômicos na otimização da produção.

No caso da Fonte de Alimentação verifica-se, pela listagem de componentes apresentada no Item 5.2.2, que ela possui um exaustor (componente VI) cuja temperatura máxima de operação é de 70°C. Considerando que o seu próprio aquecimento eleva a sua temperatura em 5°C, incluindo uma margem de segurança, a temperatura de teste foi definida em 65°C. Esta temperatura permite que o componente D55 também trabalhe dentro de um limite seguro de temperatura, pois nesta condição a temperatura máxima que atingiria seria de 120°C, com uma margem de 5°C em relação ao seu limite especificado.

Tendo, então, a temperatura em que será realizado o teste e o tempo de vida útil que o teste deve cobrir, conforme determinado no Item 5.2.3, e que para a Fonte é de 220 hrs. (0,5% da vida útil que é de 43.000 hrs.), podemos calcular o Fator de Aceleração e o tempo de teste.

5.2.6 Cálculo do Tempo de Teste.

Para se obter o tempo de teste temos inicialmente que calcular o Fator de Aceleração (FA) na temperatura definida no Item 5.2.5.

Como vimos no Item 3.3, para se calcular o Fator de Aceleração podemos escolher vários métodos. Para efeito de comparação aplicaremos estes métodos a Fonte de Alimentação utilizando a lista de materiais do Item 5.2.2.

As condições definidas para os cálculos foram: temperatura ambiente de operação de 25°C, temperatura de teste de "Burn-In" de 65°C, conforme definido no Item 5.2.5, e que os componentes, com exceção do ventilador, tenham um acréscimo médio de 10°C acima da temperatura ambiente, seja de operação, seja de teste, devido à dissipação térmica natural dos componentes. Nesta condição, os componentes atingem as temperaturas de 308°K na operação e 348°K no teste.

1. Método da Energia de Ativação Típica.

Consideremos o primeiro método descrito no Item 3.3, onde a Energia de Ativação típica para o cálculo do Fator de Aceleração é de 0,6eV. Pelo modelo de Arrhenius, temos que:

$$FA = e^{\frac{E_A}{k}} \left[\frac{1}{T_{j(oper.)}} - \frac{1}{T_{j(teste)}} \right]$$

Sendo:

$$\begin{aligned} k &= 8,62 \times 10^{-5} \text{eV}/^\circ\text{K} \text{ (Constante de Boltzman)} \\ T_{j(oper.)} &= 308^\circ\text{K} \text{ (Temperatura de Junção de Operação)} \\ T_{j(teste)} &= 348^\circ\text{K} \text{ (Temperatura de Junção de Teste)} \\ E_A &= 0.6 \text{ eV} \text{ (Energia de Ativação)} \end{aligned}$$

Substituindo os valores temos:

$$FA = e^{\frac{1,0}{8,62 \times 10^{-5}}} \left[\frac{1}{308} - \frac{1}{348} \right] = 13.4$$

Isto significa dizer que cada hora de teste corresponde a 13,4 hrs. de uso, em condições normais de operação. Tomando em conta que queremos cobrir 0,5% da vida útil do produto e que este foi projetado para 43.000 horas, ou seja, 220 horas, temos que, segundo este método, seriam necessários 16,4 horas de teste.

2. Métodos das Médias Simples.

Podemos calcular o Fator de Aceleração utilizando médias simples das seguintes formas:

a. Método do Fator de Aceleração Médio.

Neste caso o Fator de Aceleração considera a temperatura em que cada componente realmente se encontra, sendo necessário medir a temperatura em cada componente. Estas medidas para a Fonte estão apresentadas no Item 5.2.2. A partir destes resultados podemos calcular o Fator de Aceleração para cada componente, fazendo a somatória dos FA_n e dividindo pelo número total de componentes, o que nos dará o FA médio.

$$FA = \frac{\sum_{n=1}^i FA_n \times AFR_n}{n}$$

Sendo:

FA_n	Fator de Aceleração do componente
AFR_n	Taxa de Falha Média do Componente n
i	Número total de Componentes

Fazendo estes cálculos obtemos, neste caso, um FA igual a 9,5 resultando um tempo de teste de aproximadamente 23 horas.

b. Método da Energia de Ativação Média.

Este segundo método considera uma Energia de Ativação média, não típica como no primeiro método, adequada aos tipos de componentes presentes. Se levantarmos as Energias de Ativação de cada componente (utilizando, por exemplo, a Tabela 1 do Item 3.1) podemos calcular para estes componentes uma Energia de Ativação média, que nesta aplicação é de 0,68 eV (Conforme Item 5.2.2, somando a coluna das Energias de Ativação (EA) e dividindo pelo número total de componentes). Com este valor, aplicando novamente a equação de Arrhenius, temos que o Fator de Aceleração é de 19,0. Nesta condição o tempo de teste seria de aproximadamente 11,5 horas.

3. Método do Fator de Aceleração Ponderada.

Tomemos o ultimo método descrito no Item 3.1 deste trabalho.

Este método tem a vantagem de embutir a confiabilidade e a condição real de uso (temperatura e aplicação) de cada componente no cálculo do FA. Isto significa dizer que se dois componentes tiverem elevações de temperatura diferentes, estas estarão refletidas diretamente no cálculo do FA. Assim como o componente com maior taxa de falha será considerado com maior peso no mesmo cálculo. Esta ponderação faz com que cada componente esteja sendo acelerado de uma forma a apresentar um maior respeito pela condição de uso de cada componente, evitando exceder as características de cada componente.

A taxa de falha de cada componente, neste método, é utilizada como elemento ponderador. Podemos, então, calcular o Fator de Aceleração do produto multiplicando o FA de cada componente pela sua taxa de falha, fazendo a somatória e dividindo o resultado pela somatória das taxas de falhas.

$$FA = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_{ui} \times n_i \times FA_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_{ui} \times n_i} \quad (8)$$

Sendo:

FA	Fator de Aceleração
λ	Taxa de Falha Média do Componente
n	Número total de Componentes

Para fazer este cálculo é necessário colocar o produto em operação e medir a temperatura no corpo de cada componente. Com esta temperatura, com a temperatura em que se deseja realizar o teste, neste caso 65°C, e com a Energia de Ativação típica para cada componente, obtemos o seu respectivo FA.

Para se calcular o FA do produto é ainda necessário ter as taxas de falhas de cada componente. Estes valores podem ser obtidos pelos modos descritos no item 5.2.3.

Com a taxa de falha e com os FAs de cada componente, podemos, então, utilizar a Equação 8 para obtermos o FA final do produto.

Este método é o que foi aplicado à lista de materiais descrita no Item 5.2.2 e que contém as medidas realizadas em laboratório, assim como a compilação dos dados para este método. Por ele encontramos um Fator de Aceleração de 7,9 resultando, assim, um tempo de teste de 28 horas.

5.3 Comparando os Resultados.

Na Tabela 2 temos um quadro com os resultados dos cálculos dos Fatores de Aceleração pelos vários métodos, aplicados à Fonte e descritos no item anterior.

Método	FA.	Horas de Teste
1. Energia de Ativação Típica	13,4	16,4
2.a. EA Média Simples	19.0	11.5
2.b. FA Média Simples	9.5	23.2
3. FA Média Ponderada	7.9	27.8

Comparando os resultados concluímos que o método que for escolhido é de vital importância, pois o tempo de teste entre estes métodos varia consideravelmente. Porém não se pode perder de vista que o teste deve ser acompanhado com avaliações periódicas para verificação de sua eficácia.

Esta avaliação se resume na verificação dos objetivos de confiabilidade definidos para o produto. Caso o tempo de teste se mostre insuficiente é necessário que este tempo seja aumentado gradualmente até que se atinja o objetivo desejado. O caminho inverso também deve ser considerado. Ou seja, caso o tempo seja excessivo a diminuição se faz necessária.

Desta maneira, independentemente do método inicial utilizado e com sucessivos ajustes, os tempos de testes irão convergir para um mesmo tempo, que é o ponto de máxima otimização.

Comparando os resultados da Tabela 2, notamos que estes podem ser divididos em dois grupos com os tempos de testes mais próximos; os métodos 1. e 2.a. em um grupo e 2.b. e 3 em outro. Também notamos que os extremos são formados pelo método 2.a., com o menor tempo de teste, e o 3., com o maior tempo de teste.

Uma análise, baseada na confiabilidade dos componentes, nos ajuda escolher qual tempo de teste que se deve usar para o caso da Fonte de Alimentação.

Observando os resultados das medidas de laboratório descritas no Item 5.2.2 notamos que os componentes D302 a D313 e Q302 a Q305 tem as suas Energias de Ativação igual a 1 eV, enquanto o dos Resistores R10, R12 e R13 são de 0,56 eV (aproximadamente a metade dos componentes acima). O que nos dá como Fator de Aceleração, respectivamente, 25.578 e 3,7 (cerca de 7 vezes menor). Isto porque, embora a EA do primeiro seja duas vezes maior que a do segundo, como o modelo de Arrhenius é exponencial, esta diferença aumenta exponencialmente.

Por esta análise os dois primeiros métodos (1. e 2.a.) são desaconselháveis para esta aplicação. Este resultado é típico de produtos em que tecnologias muito diversas de componentes se faz presente, como por exemplo em circuitos lineares. No caso de produtos onde há uma predominância de um mesmo tipo de tecnologia, caso típico de circuitos digitais, estes dois métodos são mais empregados, pois as EAs dos componentes são próximas. Resta-nos, então, decidir entre os dois últimos métodos.

Os tempos obtidos pelos métodos 2.b. e 3. estão próximos, poderíamos até mesmo escolher aleatoriamente qualquer um dos dois. Porém é importante lembrar que, no caso do método 3., as características de confiabilidade de cada componente são consideradas.

Vejam os componentes C125. Este componente tem uma EA de 0,6 eV, que pode ser considerada pequena em comparação, por exemplo, ao Diodo D302, porém a sua taxa de falha é a maior da lista de materiais. A composição destes dois dados nos dá um fator de 0,73 eV%/KPOH que também é o maior fator da somatória do modelo do método 3., e, conseqüentemente, o maior contribuidor do Fator de Aceleração.

Por estas considerações, o método 3. é o que foi escolhido para ser aplicado na Fonte de Alimentação. Porém outras análises se fazem necessárias.

Na definição de um teste de "Burn-In" devem ser levados em conta outros fatores. Um deles é ter o conhecimento de aplicações deste teste em produtos similares e os resultados obtidos, pois desta forma pode-se fazer um aprimoramento preliminar do tempo de aplicação do teste ainda na fase de definição.

Um outro fator é o fator logístico da produção. Um teste de 28 hs representa três turnos completos de trabalho (24 horas) mais 4 horas (meio turno), o que economicamente é bastante dispendioso, pois geraria um acúmulo de produção e dificuldades no gerenciamento do controle das Fontes que estariam em teste. Para solucionar este impasse, ou diminui-se o tempo de teste para 24 hs, fechando em números inteiros de turnos de trabalho, facilitando o gerenciamento da produção, ou investe-se em câmaras e em mão-de-obra para resolver o problema do acúmulo de produção, o que elevaria o custo de produção. Ainda haveria a possibilidade de aumentar a temperatura de teste, porém, pela limitação do próprio produto, os riscos da elevação da temperatura são suficientes para se eliminar esta possibilidade. A solução mais viável, nesta situação, é definir o teste em 24 hs.

Porém, esta solução implica em diminuir 31,5 horas do tempo a ser coberto, ou seja, se o tempo de uso a ser coberto for de 220 horas, nesta condição estaria sendo de apenas 188,5 horas. Cabe ao engenheiro tomar a decisão de diminuir o tempo de teste em função da criticidade da confiabilidade do produto e dos custos de produção.

É interessante notar, neste ponto, que, com as considerações acima e a decisão de se utilizar um tempo de 24 horas no procedimento da Fonte de Alimentação, o resultado do método 2.b. e 3. se confundem, diferenciando apenas no valor de FA que está sendo considerado. Isto será importante no momento de fazer as reavaliações do tempo de teste.

5.4 Equipamentos Utilizados.

O equipamento utilizado é, usualmente, denominado de estufa ou câmara de "Burn-In" e tem seu tamanho e sua complexidade dependente do tipo de produto que estará sendo testado.

Para cada produto e condições de procedimento, o engenheiro de teste deve descrever com detalhes todas as características que são necessárias para que o teste seja realizado, pois, desta forma, ao se projetar a câmara, todos estes detalhes deverão ser contemplados, personalizando a câmara. O custo destas câmaras vai depender desta personalização.

Muitas destas câmaras possuem controles via Computador Pessoal (PC), que medem as condições destas, temperatura, tempo de teste, permitem controlar o processo de teste utilizando métodos estatísticos com os dados da câmara, determinam exatamente a que momento um produto falhou, controlam as alimentações no caso de haver flutuações de rede e da temperatura interna, testam os produtos periodicamente e levantam vários outros dados acerca do teste (eficiência, consumo da câmara etc.). Estes dados se tornam valiosos para o acompanhamento e avaliação dos resultados, assim como do ajuste dos tempos de teste.

Para se aplicar um teste de "Burn-In" é necessário escolher o tipo de equipamento mais adequado. Este equipamento deve ter a capacidade de elevar e controlar a temperatura interna para manter os produtos a serem testados a uma temperatura constante em qualquer ponto em que este produto esteja fisicamente alocado dentro do equipamento.

No caso de ser um produto pequeno, como por exemplo pequenos cartões de circuitos eletrônicos, estufas comerciais podem ser adquiridas a um custo razoável que varia com o seu tamanho e a temperatura máxima desejada.

Para produtos de grandes dimensões, ou de grandes volumes de produção, são utilizadas câmaras personalizadas construídas em alvenaria com controles inteligentes, via microprocessadores, de temperatura e com sistemas contra sobrecargas, tanto de energização dos produtos como de sobreaquecimento interno indesejado. Estas câmaras requerem investimentos altos.

Em algumas situações particulares há soluções menos custosas para aplicações do teste. Isto se dá quando a temperatura de teste é baixa (por exemplo 40°C) e o próprio produto tem uma elevada dissipação térmica. Neste caso é mais apropriado utilizar capas plásticas que retêm o calor dissipado pelo próprio produto. No entanto, mesmo neste caso, é necessário um controlador de temperatura que retire o excesso de calor gerado, evitando que a temperatura ultrapasse o valor determinado para o teste.

Neste trabalho, a câmara de teste de "Burn-In" foi construída em alvenaria, com controles de temperatura. O aquecimento interno se faz através de processo artificial, pela insuflação de ar aquecido para dentro da câmara e pelo aquecimento natural das Fontes de Alimentação. Além disto, controles de segurança foram instalados para o caso de sobrecargas de tensão e temperatura. No Item 5.5, Procedimento Experimental Utilizado, será apresentado maiores detalhes desta câmara.

5.5 Procedimento Experimental Utilizado.

Como descrito no Item 5.3 foi aplicado à Fonte de Alimentação um teste de 24 hrs. à temperatura de 65°.

Foi definido que a alimentação de entrada seria feita em ciclos de uma hora de LIGA/DESLIGA. Este ciclo se compõe de duas fases; a primeira fase de 45 minutos, no qual a Fonte é alimentada em funcionamento estático (ligada em cargas estáticas sem variação de carga na saída), a segunda fase de 15 minutos, na qual a Fonte é desligada.

Esta ciclagem tem a função de simular as condições em que algumas funções são acionadas quando há uma intervenção externa, por exemplo, queda da energia elétrica com conseqüente desligamento da Fonte. Ao ser energizada, os circuitos de entrada da Fonte são acionados entrando em regime de funcionamento normal. A seqüência da ciclagem equivale aos sucessivos LIGA/DESLIGA que o equipamento eventualmente terá após sua instalação e utilização por parte do cliente.

Durante o teste, em cada parte do ciclo (L/D) a temperatura da Fonte entra em equilíbrio térmico com o ambiente, no caso a câmara que está a 65°C. Portanto, a Fonte em qualquer condição, ligada ou desligada, estará sempre a uma temperatura mínima de 65°C o que ocorre durante a fase DESLIGA. Na fase LIGA há o aquecimento dos componentes aumentando a temperatura interna da câmara devido à dissipação térmica destes. Para fazer este controle, de LIGA/DESLIGA, foram instalados temporizadores que realizam esta função.

Esta ciclagem permite um controle de tempo simples, pois o tempo de teste já executado é igual ao número de ciclos corridos do teste. No caso de haver uma falha, durante o teste, o tempo de sua ocorrência é igual, com erro máximo de 45 min., ao número de ciclos já realizados.

Dependendo das características e da aplicação do produto, este tempo pode ser modificado, como por exemplo 30 minutos ligados e 30 minutos desligados.

Para se detectar uma falha há dois caminhos possíveis. O primeiro é monitorar o funcionamento dos produtos em testes, este monitoramento pode ser periódico, em intervalos de tempos determinados, ou contínuo, no qual são necessário equipamentos dedicados a esta função. Em ambos os casos, os dados a serem monitorados vão depender das funções que o produto pode realizar. A vantagem deste caminho é a determinação exata da falha, podendo levantar curvas de falhas por tempo, auxiliando a análise de eficiência do teste, conforme descrito no Item 5.3.

Um exemplo deste caminho é a aplicação do "Burn-In" ao produto onde a Fonte de Alimentação é utilizada. Neste caso foi implementado um teste cíclico, rodando em "loop", onde as principais funções do produto são exercitadas pelo próprio produto (este tipo de teste é denominado de "Self-Test"). Ao fim de cada ciclo é registrado, em uma memória não volátil do produto, o resultado do teste. Caso haja uma falha é guardado o código de erro, que vai indicar o tipo de falha e o tempo em que esta ocorreu. Após o "Burn-In", o produto passa por um teste funcional, na qual o conteúdo da memória é lido para análises posteriores.

O segundo caminho é realizar um teste funcional após a realização do teste. Este caminho é utilizado principalmente quando o tempo de teste é relativamente curto (apenas algumas horas), embora isto fique a critério do engenheiro que esteja especificando o teste. A desvantagem é que somente teremos dados finais e o número de falhas acumuladas, o que dificulta a análise da eficiência do teste.

No caso da Fonte de Alimentação a detecção da falha se dá ao final do teste, com a realização de um teste funcional.

Na Figura 14 temos a representação esquemática da realização do procedimento implementado para a Fonte de Alimentação. De forma simplificada temos que a Fonte (FA) é alimentada por um sistema de alimentação (A) controlada externamente (CA) de forma a realizar os ciclos LIGA/DESLIGA conforme definido.

A fim de simular uma carga de saída da FA é colocada uma Carga Estática (CE) que dissipa 90 W de potência. O Controle de Temperatura automático (CT) mantém a temperatura interna dentro de uma faixa de variação, no caso $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Este controle é realizado utilizando sensores (Termopares) que detectam a temperatura interna da câmara e suas variações, que são enviadas para o controlador de temperatura, através de um conversor Analógico/Digital, realizando as correções necessárias.

O aquecimento interno se faz artificialmente pela insuflação de ar aquecido para dentro da câmara e pelo aquecimento natural das Fontes de Alimentação, para garantir o seu funcionamento.

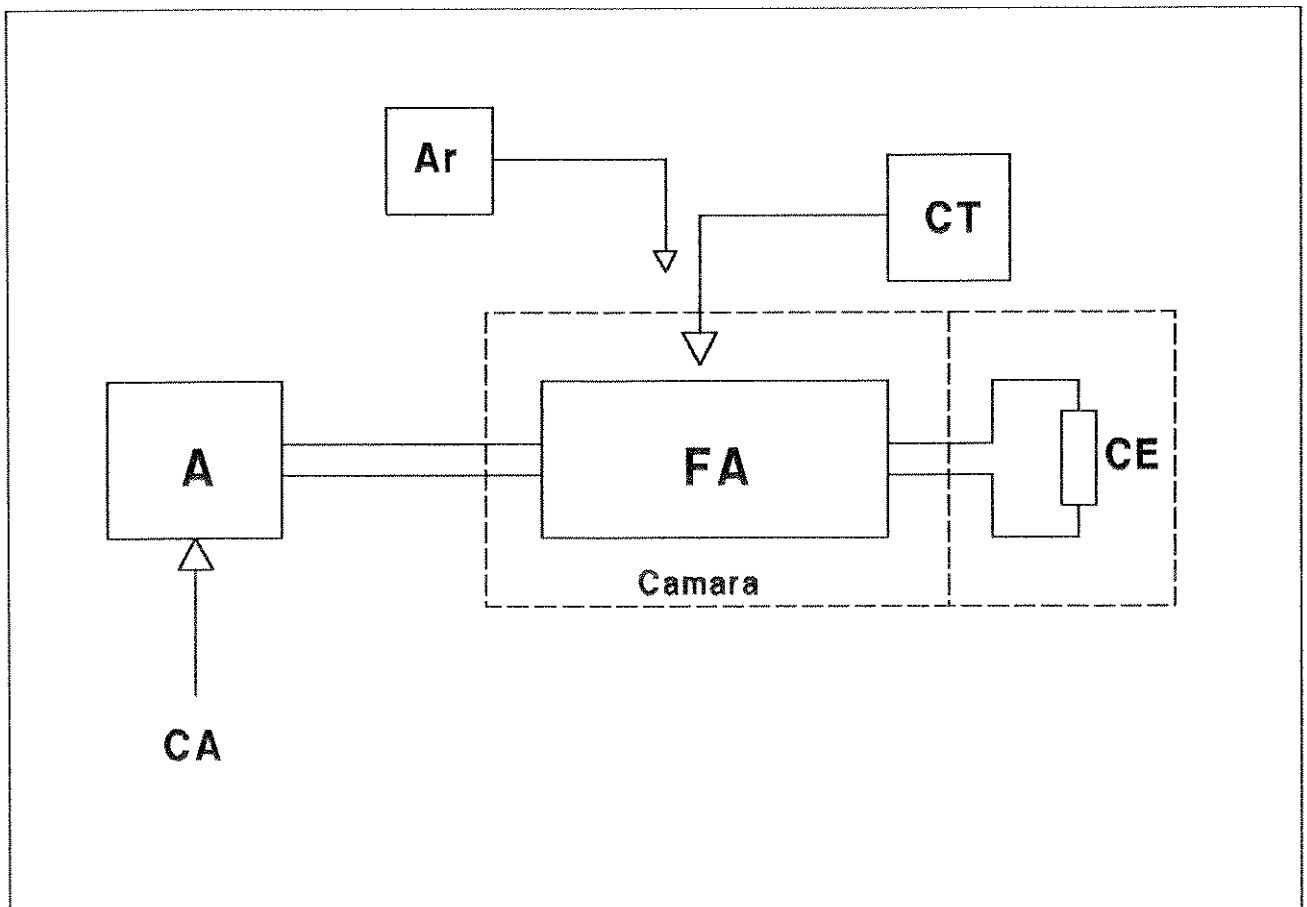


Figura 14. Representação Esquemática do Procedimento de "Burn-In"

Na Figura 15 temos a representação das instalações físicas da Câmara (C) construída em alvenaria. Na entrada da Câmara há uma Ante-Câmara (AC) cuja finalidade é isolar termicamente o ambiente fabril, na qual a temperatura oscila entre 25° e 30°C, enquanto no interior da câmara a temperatura é de 65°C. Foram instaladas prateleiras para acomodar até 196 Fontes. Na parte superior há válvulas de escape do excesso de ar quente e sensores de temperatura (termopares).

Conjugada à Câmara há uma sala onde as Cargas Estáticas foram alocadas (CE). Esta separação é para evitar que haja um aquecimento indesejado devido à dissipação térmica destas cargas, dificultando o controle de temperatura.

O aquecimento da Câmara (C) é feita por insuflação de ar quente com fluxo constante (SA), e a temperatura é controlada por um sistema próprio (CT), incluindo um sistema de segurança para detecção de sobrecarga térmica (incêndio).

Para sustentar a carga máxima da Câmara foi instalada uma Sub-Estação (SE) composta basicamente por transformadores isoladores de rede e que permite flutuações de corrente que ocorrem na rede no momento em que as Fontes são ligadas e desligadas. Além disto, controles de segurança foram instalados para casos de sobrecargas de tensão.

Todos os controles são monitorados por um Painel de Controle (PC) que permite alterar as condições ambientais da Câmara, assim como monitorar o teste que está sendo realizado.

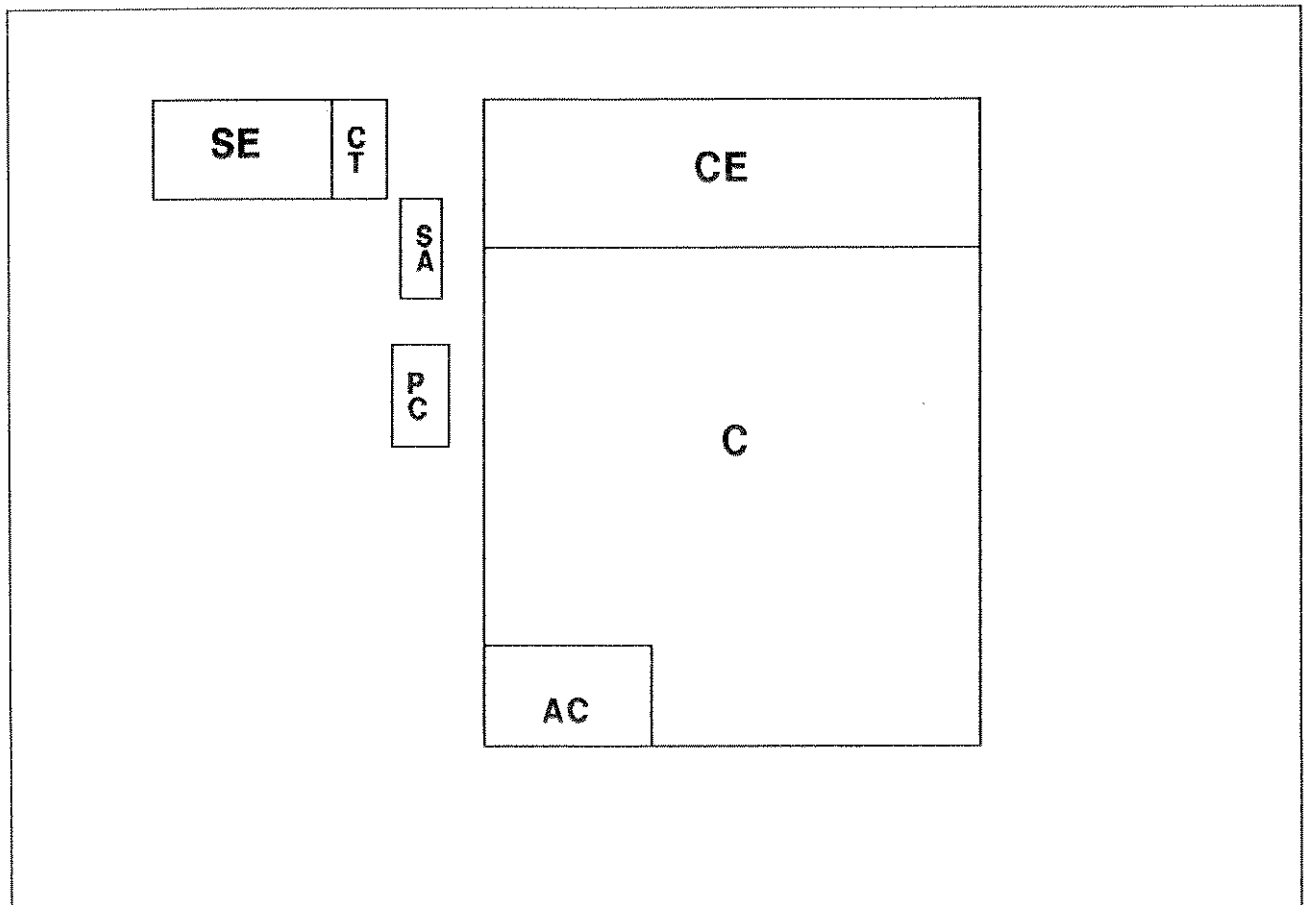


Figura 15. Esquema Físico da Câmara de "Burn-In"

Capítulo 6. Considerações Finais

A tendência, na moderna tecnologia de semicondutores, têm sido de exagerar os problemas de manutenção de altos índices de aproveitamento no processo de fabricação e confiabilidade. Progressos nesta área têm conseguido atingir um bom dimensionamento de custo, processos mais complexos e a introdução de novos e mais complexos materiais. Tudo isto nos leva inicialmente a um alto índice de defeitos. Identificar, caracterizar e, ultimamente, eliminar as causas da falha do circuito e baixo rendimento da linha é uma parte necessária para o desenvolvimento de novas tecnologias.

De forma similar, o custo do progresso será produtos operando com altos campos elétricos, altas densidades de correntes e altas dissipações térmicas. Todos estes fatores irão acelerar as falhas dos componentes devido a seus mecanismos de falha previamente identificados e caracterizados.

Somando-se a isso, constantemente são introduzidos novos materiais, componentes e tecnologias. O sucesso do desenvolvimento de novas tecnologias deve incluir a identificação e a caracterização destes processos. A combinação desde esforço em paralelo com análises de rendimento e de modos de falha proverá a tecnologia necessária para a produção de produtos usáveis em um sistema economicamente viável.

O teste de "Burn-In" têm permitido que a indústria coloque no mercado produtos cada vez mais confiáveis, de melhor qualidade e de custo reduzido. O cliente têm recebido em troca condições mais favoráveis de escolha, pois não é somente o custo do equipamento a ser adquirido que é levado em conta.

O teste de "Burn-In" têm permitido ao fabricante ter uma visibilidade maior de sua performance, tanto de curto como de longo prazo, e assim se programar melhor na área de manutenção, permitindo com isso a implementação de planos de manutenção preventiva, pois sabe, com um bom grau de precisão, quando as falhas poderão ocorrer. Isto também têm sido um instrumento nas definições das garantias que os fabricantes oferecem aos seus clientes. Produtos com garantia de cinco anos, ou mais, já são rotineiramente anunciados nos meios de comunicação.

Com a implementação do procedimento de "Burn-In", conforme o descrito no capítulo anterior, na linha de fabricação da Fonte de Alimentação esta têm se mostrado com uma confiabilidade superior a esperada. A média da taxa de rejeição após o procedimento, que equivale à taxa de falha no período de 188 hs de operação em condições normais, mostrou ser 68% melhor que a estimada. E o produto final mostrou ter uma confiabilidade pelo menos 2,5 vezes melhor que o inicialmente projetado. Relatórios de campo têm confirmado estes dados.

A Fonte de Alimentação aqui utilizada, passou recentemente por um reprojeto e estes dados já foram incorporados ao novo produto, diminuindo em cerca de 30% o seu custo sem que com isso tenha tido um prejuízo de sua confiabilidade.

Este mesmo procedimento têm sido aplicado em outros produtos e os resultados, variando de produto para produto, também têm sido bastante positivos. Estes resultados têm ajudado os engenheiros a aprimorarem seus projetos de forma a racionalizar os custos do produto sem que com isso a sua confiabilidade seja prejudicada.

Outros testes têm sido incluídos dentro do processo de produção, como por exemplo o teste de ciclagem térmica que permite verificar o processo de montagem das placas de circuitos, principalmente em tecnologias de montagem sobre superfície. Além disto, nos novos produtos as preocupações de qualidade e confiabilidade já são incluídas ainda na fase de projeto, onde testes de performance são realizados para se prever o comportamento futuro destes. Um destes testes é o "Guard Band" (Margem de Segurança), no qual o produto é colocado em condições variadas de operação (temperatura, variação de tensão, umidade etc) e se determina quais são as condições máximas reais em que o equipamento se mantém operacional.

Todos estes testes vão assegurar que o cliente, ao receber um produto, terá a garantia de estar recebendo um produto realmente confiável.

É importante enfatizar que as análises e recomendações aqui feitas visa apenas a eliminação das falhas prematuras. Se o fabricante tiver razões para crer que as falhas que possam ocorrer no ambiente do usuário forem altas o suficiente para se tornarem inaceitáveis, uma política de aplicação de um procedimento de "Burn-In" deve ser implementada.

As indústrias de fabricação de componentes semicondutores têm utilizado, por muitos anos, um procedimento de 168 hrs. a 125°C. Este procedimento tem-se tornado, entre estas indústrias, um "padrão" já consagrado, muito embora haja quem duvide de sua eficiência.

A razão da insatisfação dos críticos para com o teste têm origem no fato de que, se por um lado o processo de seleção usual não é severo o suficiente para eliminar totalmente as falhas indesejáveis, por outro lado, nenhuma quantidade de componentes selecionados pode eliminar as falhas prematuras introduzidas pelos equipamentos do fabricante. Infelizmente, nem todos estão a par disto.

Capítulo 7. Bibliografia e Referencias

- [1]: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
Dicionário Brasileiro de Eletricidade - Conforme Normas Técnicas Brasileiras.
COBEI - Comitê Brasileiro de Eletricidade.
Marco de 1986.
pp. 186-187.
- [2]: Paul A. Tobias; David Trindade.
Applied Reliability.
Van Nostrand Reinhold Company - 1986.
pp. 21-35; 36-81; 127-161.
- [3]: Finn Jensen; Niels Erik Petersen.
Burn-In - An Engineering Approach to the Design and Analysis of Burn-In Procedures.
John Wiley & Sons - August 1986.
pp. 3-20; 47-59; 75-87; 89-98; 99-121.
- [4]: Richard J. Allen; William J. Roesch.
"Reliability Prediction: The Applicability of High Temperature Testing."
Solid State Technology - September 1990.
pp. 103-108.
- [5]: Eduardo C. Moura.
Confiabilidade de Componentes.
QUALITEC - Treinamento em Qualidade - 1990.
- [6]: IBM Corp. Standards Program
Glossary of Terms Applying to Hardware Quality & Reliability.
IBM Corporate Practice - July 1978.
- [7]: United States Department of Defense.
Military Handbook.
Military Handbook - Reliability Prediction of Electronic Equipment (MIL-HDBK 217E).
U.S. Government Printing Office, 1986 Revision 1990.
- [8]: J. M. Juran; Frank M. Gryna.
Juran's Quality Control Handbook.
McGraw-Hill Book Company - 4th. Edition 1988.
pp. 4.1-4.29.
- [9]: Eduardo C. Moura.
"A Method to Estimate the Acceleration Factor for Subassemblies"
IEEE Reliability - 1992; Cópia Original.
- [10]: Ruth Myriam Ramirez Pongo.
Confiabilidade Bayesiana.
Instituto Latino Americano de Tecnologia.
Novembro de 1991.

- [11]: Garvin, David A.
"What Does "Product Quality" Really Means?"
Harvard University.
Sloan Management Review.
Fall 1984.
pp. 25-43.
- [12]: Jorge A. Achcar;Francisco Louzada Neto.
Accelerated Life Tests with one Stress Variable.
Instituto de Ciencias Matematicas de Sao Carlos - USP Sao Carlos.
ISSN-0103-2577 1991
- [13]: Dehnad, Khosrow
Quality Control, Robust Design and the Taguchi Method (Coletânea).
W&B/C - Pacific Grove, California - 1989.
- [14]: S. M. Sze.
VLSI Technology.
McGraw-Hill 2nd Edition 1984
pp. 177;507-550; 599-635.
- [15]: Jim Crawford.
"Burn-In: How Much Is Enough?"
Cahners Publication.
Semiconductor International - October 1991
p. 82.
- [16]: Jean Bodinaud; Javier Ramirez.
Dispositivos a Semicondutores: Caracterização, Método de Ensaio e Confiabilidade de Componentes Eletrônicos.
Microcircuitos Projetos e Consultoria - 1988
- [17]: Ricardo Fortes de Andrade.
Confiabilidade de Componentes Semicondutores.
ELEBRA Eletrônica - 1989
- [18]: Helio Teixeira Rodrigues.
Teoria e Projeto de Fontes Chaveadas.
Instituto Latino Americano de Tecnologia - 1989
- [19]: United States Department of Defense.
Military Standard.
Test Methods and Procedures for Microelectronics (MIL-STD-883C).
U.S. Government Printing Office, 1983.
- [20]: Ivor Brodie and Julius J. Muray.
The Physics of Microfabrication.
Plenum Press, New York 4th Printing 1987
pp. 232-237;259;369.