

**DAS** Departamento de Automação e Sistemas  
**CTC** **Centro Tecnológico**  
**UFSC** Universidade Federal de Santa Catarina

# **Planejamento e Execução de Ensaios de Confiabilidade de Componentes Eletromecânicos**

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para a aprovação na disciplina  
**DAS 5511: Projeto de Fim de Curso***

***Antônio Miguel Salla Neto***

*Florianópolis, Fevereiro de 2014*

# **Planejamento e Execução de Ensaios de Confiabilidade de Componentes Eletromecânicos**

***Antônio Miguel Salla Neto***

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina  
**DAS5511: Projeto de Fim de Curso**  
e aprovada na sua forma final pelo  
**Curso de Engenharia de Controle e Automação**

***Prof. Ubirajara Franco Moreno***

---

Assinatura do Orientador

Banca Examinadora:

<nome do orientador na empresa/instituto>  
*Orientador na Empresa*

Prof. <nome do orientador na UFSC>  
*Orientador no Curso*

<nome do orientador na empresa/instituto>  
*Orientador na Empresa*

Prof. <nome do professor avaliador>  
*Avaliador*

<nome aluno 1>  
<nome aluno 2>  
*Debatedores*

## **Agradecimentos**

Agradecimento aos meus pais, pelo amor e paciência durante esses anos. Aos meus professores pelo conhecimento compartilhado. Aos meus amigos pelos momentos compartilhados. E para a equipe de controles pelos ótimos momentos que eu vivi durante o meu tempo de estágio.

## Resumo

O trabalho realizado dentro da empresa Whirlpool Latin America, localizada em Joinville, SC, na área de Tecnologia de Produtos Cocção no subsistema de Controles, é focado na aplicação de técnicas de avaliação de confiabilidade para componentes eletromecânicos e eletrônicos. Visando melhorar a qualidade e custo de produção, os testes de confiabilidade são projetados de forma a produzir dados que tanto informem sobre a qualidade atual dos componentes ou sistemas avaliados quanto produzam novas informações a serem utilizadas para a melhoria tanto da especificação quanto da utilização dos mesmos.

Devido à passagem do tempo, novos componentes são introduzidos nos novos projetos e novas especificações dos mesmos tornam-se necessárias. Com o objetivo de revisar as normas internas para facilitar a avaliação da qualidade dos componentes e para abrir o mercado a diferentes fornecedores, os testes de confiabilidade são projetados visando tanto às normas internacionais quanto as necessidades de utilização dos componentes dentro do escopo da área de cocção. Portanto o projeto e execução dos testes de confiabilidade para a geração de conhecimento tornam-se importante.

O objetivo final desse projeto é desenvolver uma versão preliminar da revisão das normas internas para componentes eletromecânicos e eletrônicos.

## **Abstract**

The crescent demand for better quality products results in studies turned to increase the reliability while decreasing cost and time to market. With the emprises always looking to cut costs and increase profits, the necessity to produce better quality is critical since the better quality products can cut costs at long term in the form of avoiding excess of maintenance calls, recalls and redesign of products. This project has the objective of utilizing reliability tests to create new knowledge and apply this knowledge in the revision of the internal norms for components. This project will focus in the presentation of the technics o reliability tests and the statistical analysis of the data acquired through them.

## Lista de Figuras

Figura 1 – Função de densidade da probabilidade de uma distribuição normal. .....	18
Figura 2 – Função de densidade da probabilidade de falha para várias representações normais. ....	19
Figura 3 – Função de distribuição cumulativa para varias distribuições normais.....	20
Figura 4 – Curva da banheira. ....	21
Figura 5 – Função de densidade da probabilidade da falha para distribuição Weibull. ....	22
Figura 6 – Função de distribuição cumulativa da distribuição Weibull.....	23
Figura 7 – Representação diagramática do processo de aprendizado interativo.....	29
Figura 8 – Ciclo do raciocínio crítico [ 6].....	30
Figura 9 – Exemplo do fluxo de um Mapa do Processo. ....	32
Figura 10 – Etapas do teste ALT. ....	36
Figura 11 – Modelo do Mapa de Raciocínio. ....	40
Figura 12 – Modelo do ventilador. ....	41
Figura 13 – Variáveis do ventilador. ....	41
Figura 14 – Valores de tensão para o teste ALT. ....	43
Figura 15 – Mapa do Processo do teste ALT. ....	44
Figura 16 – Tabela exemplo da análise dos dados ....	47
Figura 17 – Distribuição Weibull das variáveis do exemplo.....	47
Figura 18 – Fator de aceleração.....	48
Figura 19 – Calculo da função de densidade de falha.....	48
Figura 20 – Circuito de chaveamento acionado por Arduino. ....	49
Figura 21 – Interface de comando da câmara de temperatura.....	50
Figura 22 – Configuração da análise. ....	54
Figura 23 – Curva resultante da distribuição Weibull dos dados obtidos.....	54
Figura 24 – Equação da densidade da falha. ....	55

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Descrição dos projetos .....	28
Tabela 2 – Modelos matemáticos de falha para componentes eletrônicos [ 10]. .....	37
Tabela 3 – Parâmetros do Teste HALT .....	43
Tabela 4 – Tabela de coleta de dados exemplo. ....	46
Tabela 5 – Aquisição dos dados.....	53



# Sumário

Capítulo 1: Introdução .....	11
Capítulo 2: Operational Excellence .....	13
2.1: Operational Excellence em controles.....	13
2.2: Problema a ser atacado .....	14
Capítulo 3: Confiabilidade.....	15
3.1: Qualidade Interna.....	15
3.2: Qualidade Externa .....	15
3.3: Definição de confiabilidade .....	16
3.4: Melhorias internas x melhorias externas.....	16
3.5: Ferramentas estatísticas para análise de dados de vida .....	17
3.6: A função Falha.....	18
3.6.1: Função de densidade da probabilidade da falha .....	18
3.6.2: Função de distribuição cumulativa .....	19
3.7: Análise da Falha .....	20
3.8: Distribuição Weibull.....	21
3.8.1: Modo de falha.....	23
3.8.2: Limite destrutivo .....	24
3.9: Problemática .....	24
Capítulo 4: Determinação das Técnicas Utilizadas .....	26
4.1: Levantamento de referências.....	26
4.2: Mapa de Raciocínio .....	26
4.2.1: Aprendizado interativo.....	28
4.2.2: Caminhos paralelos.....	30

4.3: Mapa de Produto.....	31
4.4: Mapa do Processo .....	31
4.5: Teste de Vida Acelerado (ALT).....	32
4.5.1: Testes Acelerados Qualitativos .....	33
4.5.2: Testes Acelerados Quantitativos .....	33
Capítulo 5: Aplicação das Técnicas.....	39
5.1: Levantamento de referências.....	39
5.2: Mapa de Raciocínio .....	40
5.3: Mapa do Produto.....	41
5.4: Planejamento dos testes.....	42
5.5: Mapa do processo.....	44
5.6: JMP .....	45
5.7: Dispositivos de teste desenvolvidos.....	49
Capítulo 6: Resultados .....	52
Capítulo 7: Conclusões e Perspectivas .....	58
Bibliografia:.....	59

# Capítulo 1: Introdução

Em um mercado cada vez mais competitivo, fatores como qualidade, preço e time to Market são fatores importantíssimos para uma empresa ganhar espaço no mercado.

Visando melhorar a qualidade e diminuir os custos de produção, as empresas cada vez mais procuram maneiras para resolver ou reduzir problemas resultantes em falhas do produto. Essas falhas acarretam custos tantos de manutenção, recall e até mesmo a necessidade da adaptação do projeto já existente. Outro fator que é afetado pela qualidade é a imagem da empresa para os clientes.

Com o intuito de reduzir os custos da produção e tornar possível o acréscimo de novos fornecedores para seus componentes, o trabalho de testes de confiabilidade de componentes eletromecânicos e eletrônicos é um trabalho muito importante.

O trabalho realizado na empresa Whirlpool Latin America em Joinville, na área de Tecnologia de Produtos Cocção dentro do subsistema de Controles, tem como objetivo a geração e revisão de versões preliminares de normas para componentes eletromecânicos e eletrônicos para uma melhor adaptação dos componentes à necessidade da empresa e dos produtos em que serão utilizados.

A área de Tecnologia de Produtos Cocção é a área da empresa dedicada ao projeto e produção de eletrodomésticos como fogões, fornos micro-ondas, fornos elétricos e cooktops. O subsistema de Controles tem como trabalho o projeto da parte eletrônica utilizada dentro dos produtos da área de cocção e a avaliação da qualidade tanto das lógicas usadas como dos componentes que constituem o produto.

Esse documento apresentará em seus capítulos, primeiramente os conceitos de Operational Excellence e sua importância dentro da empresa junto com uma definição mais específica do problema a ser atacado no Capítulo 2:, o Capítulo 3: apresentará os conceitos de confiabilidade e das funções de falha que são utilizados na resolução do problema.

Dentro do Capítulo 4: é explicado o procedimento pelo qual o problema foi atacado, dentro do contexto de confiabilidade dentro da Operational Excellence, com a apresentação do Mapa de Raciocínio e dos Testes Acelerados de Vida.

O Capítulo 5: apresenta como o procedimento do Capítulo 4: foi aplicado na resolução do problema, também são apresentados o software utilizado para a análise estatística e uma pequena nota dos dispositivos de teste utilizados.

Os resultados da aplicação dos métodos são expostos no Capítulo 6:, junto com a análise dos dados estatísticos obtidos pelo software e sua aplicação na construção da versão preliminar da norma. Por fim o Capítulo 7: apresenta as conclusões obtidas pela realização do trabalho e as perspectivas futuras de desenvolvimento do mesmo.

## **Capítulo 2: Operational Excellence**

Operational Excellence é um elemento de liderança organizacional voltado para aplicação de princípios, sistemas e ferramentas para uma melhoria sustentável de parâmetros de desempenho, sendo que esses parâmetros, em gerenciamento de projeto, consistem de sete critérios que são: segurança, tempo, custo, recursos, escopo, qualidade e ações.

A Whirlpool começou investigar o conjunto de práticas seis sigma logo após a GE. A iniciativa, então nomeada de Operational Excellence, se expandiu para a corporação inteira em 1997 e envolve um conjunto de metodologias. Essas metodologias são aplicadas extensivamente da forma de reduzir o tempo de ciclo e enquanto melhorando a qualidade e custo.

### **2.1: Operational Excellence em controles**

Dentro do subsistema de controles, a aplicação da Operational Excellence é focada dentro dos estudos de confiabilidade, sendo tanto a confiabilidade de componentes quanto a confiabilidade de sistemas.

Os estudos de confiabilidade permitem a realização de melhorias de qualidade externa. A qualidade externa está ligada melhoria do desempenho experimentado pelos clientes.

Através dos estudos de confiabilidade abrem-se as portas para novos fornecedores e novos fornecedores significam competição, o que resulta em melhoria do custo e qualidade para o cliente.

Para os estudos realizados dentro de controles são visados o aprendizado sobre o componente ou sistema analisado. Isso envolve desde a modelagem do componente ou sistema como um modelo com respectivas variáveis, variáveis essas que podem ou não ser controladas, e dentro do estudo dessas variáveis são modelados os ensaios que servirão para a aquisição de dados sobre o componente ou sistema.

A análise desses dados resulta na geração de conhecimento aplicado tanto no projeto quanto na especificação. A geração da especificação é um ponto chave dentro do subsistema de controles uma vez que ele é direcionado ao desenvolvimento de produtos.

## **2.2: Problema a ser atacado**

Conforme o tempo passa os componentes utilizados nos produtos são trocados e esses novos componentes possuem suas próprias novas especificações.

Dentro da empresa esses componentes estão sujeitos às normas internas da empresa, chamadas de NTW (Norma Técnica Whirlpool), e essas normas são escritas com base tanto das normas internacionais, IEC, quanto nas normas brasileiras, NTB, e também aos requisitos de projeto.

Os requisitos do projeto levam em conta desde a garantia do produto, quanto tempo de vida médio e mais importante ainda segurança. A segurança é um fator determinante na escrita das NTWs uma vez que um defeito em um produto proveniente de uma falha de segurança gera não só um prejuízo monetário direto à empresa quanto um prejuízo à imagem da mesma, resultando em um prejuízo em longo prazo também.

Levando em conta o desfasamento das normas internas à medida da modificação dos componentes e até mesmo proveniente da atualização das normas internacionais e nacionais, necessita-se a revisão das normas para a adequação das normas internas as normas atuais.

A revisão das normas internas se dá através da avaliação das atualizações das normas internacionais utilizadas na confecção da norma interna e da avaliação dos componentes atualmente utilizados de acordo com as condições de utilização dos produtos onde ele é utilizado.

O objetivo do trabalho realizado é a revisão na norma para componentes eletromecânicos e eletrônicos através da realização do estudo de confiabilidade nos componentes. Esse estudo é aplicado seguindo uma metodologia explicada nos capítulos subsequentes.

## **Capítulo 3: Confiabilidade**

Visando a melhoria da qualidade, os estudos de confiabilidade são desenvolvidos para expressar em graus qualitativos e quantitativos. A melhora em qualidade pode se dar de duas formas, a melhoria na qualidade interna e na qualidade externa.

### **3.1: Qualidade Interna**

A qualidade interna é um fator de preocupação do produtor, pois a melhoria da mesma envolve com a redução do scrap, retrabalho e custos de inspeção. Por exemplo, um fornecedor tentará ao máximo produzir de acordo com as especificações do cliente, sejam elas especificações dimensionais, estéticas e até de modo de produção.

Essa melhoria possui um grande benefício para a empresa na forma de lucro imediato, devido ao fato que produzir o mais próximo possível da meta diminui consideravelmente o scrap e melhora a relação com o cliente.

### **3.2: Qualidade Externa**

A melhoria na qualidade externa está focada em melhorar o desempenho observado pelo consumidor. O consumidor estará menos focado no modo de produção e no scrap do que na qualidade e durabilidade do produto final.

Os benefícios associados com a melhoria da qualidade externa não são imediatos, mas são acumuláveis ao longo do tempo. Algumas das vantagens podem ser mensuradas como a redução dos custos de garantia, mas os principais ganhos são vistos na forma de redução de custos ao se evitar consertos de campo, recall e a necessidade de projetar novamente o produto.

Outro grande benefício é o aumento das vendas gerado pela qualidade do produto e pelo reconhecimento dos clientes. Se a empresa é uma empresa atuante em várias áreas os clientes podem vir a comprar os produtos das outras áreas baseados na qualidade dos produtos já adquiridos.

O foco principal do trabalho desenvolvido está na confiabilidade de componentes eletromecânicos. Como a confiabilidade está conectada com a melhoria da qualidade externa, o estudo das formas de melhoras a qualidade externa é parte fundamental do estudo de confiabilidade.

### **3.3: Definição de confiabilidade**

Confiabilidade é descrita com qualidade ao longo da vida [ 1]. Uma definição mais formal pode ser a habilidade do produto de desempenhar satisfatoriamente sua função pretendida durante a sua vida.

A não confiabilidade pode ser exemplificada pela inabilidade do produto de funcionar na entrega, por exemplo, um interruptor não realizar a sua função, seja ela a de ligar uma lâmpada ou de acionar outra carga qualquer. Outro exemplo são deformações e quebras não programadas de equipamentos causando a interrupção de um serviço. Um produto ou serviço confiável são o desejo de qualquer consumidor.

### **3.4: Melhorias internas x melhorias externas**

A relação entre as melhorias das qualidades internas e externas não se dá sempre de maneira proporcional. Um comportamento comum na indústria é o de considerar que uma melhoria na qualidade interna sempre resultará na melhoria da qualidade externa. Esse caso é válido quando a melhoria interna é obtida através da identificação e remoção da causa do problema.

Em casos onde a melhoria de qualidade interna é focada apenas na redução de custos, essa redução de custos pode afetar diretamente a qualidade externa pelo fato de que a troca de material ou de meio de produção pode afetar a habilidade de seguir as especificações funcionais do produto. No caso de um termoplástico, obter a cor desejada pelo cliente não garante que não haja deterioração da cor ao longo do tempo. Essa deterioração deve ser estudada quando o processo for modificado relativo a custo.



A principal meta da análise de dados da vida do produto não é a da demonstração da confiabilidade, mas a de melhoria proativa da confiabilidade, preferencialmente antes do lançamento do produto.

Os testes devem ser usados desde o início, não apenas para demonstrar a confiabilidade, mas para a obtenção de informações para uma melhora fundamental. Testes regulares de confiabilidade de produtos recém-manufaturados também garantem que o produto atende ou excede os padrões previamente demonstrados nas unidades de protótipos.

### **3.5: Ferramentas estatísticas para análise de dados de vida**

A análise de dados estatísticos de vida requer o uso de ferramentas diferentes das usadas na maioria das outras áreas de melhoria de qualidade. Essas ferramentas devem ser diferentes porque os dados disponíveis são geralmente censurados, isto é, algumas unidades não apresentam falhas durante a análise e somente se conhece o tempo de sobrevivência destas unidades. Seria incorreto desconsiderar esse valor ou tratar ele como o tempo até a falha.

Para o caso da distribuição normal, ela não tem um papel chave como o de um modelo para o tempo de falha, sendo assim sugeria uma distribuição distorcida para vários produtos uma vez que tempos de falhas pequenos podem ocorrer, mas tempo negativos são impossíveis. A distribuição mais notável utilizada entre elas é a Weibull.

As porcentagens mais baixas na extremidade de distribuição, isto é, o tempo em que certa porcentagem do produto irá falhar, e a probabilidade de falha por um tempo determinado são normalmente de maior interesse do que o tempo médio até a falha.

Um fator mais interessante tem relação com os testes acelerados de vida, que procuram determinar o tempo de vida de um componente ou produto através do stress acentuado de uma das suas variáveis de entrada. Por exemplo, no caso das resistências térmicas para aquecimento de fornos elétricos, alimentar a resistência com uma tensão superior à especificada poderá fornecer dados proporcionais ao da vida útil dessa resistência quando aplicada a tensão nominal.

### 3.6: A função Falha

Dentro da análise estatística das falhas duas funções são importantíssimas para a determinação do comportamento, elas são as funções de densidade da probabilidade da falha, geralmente representada por  $f(t)$ , e a função de distribuição cumulativa geralmente representada por  $F(t)$ .

#### 3.6.1: Função de densidade da probabilidade da falha

A função de densidade da probabilidade da falha é uma função que descreve a chance de uma variável assumir um devido valor. A probabilidade de uma variável cair um determinado intervalo de valores é expressa pela integral da densidade dessa variável ao longo desse intervalo [ 2]. Um exemplo de uma função de densidade da probabilidade da falha pode ser observado na Figura 1.

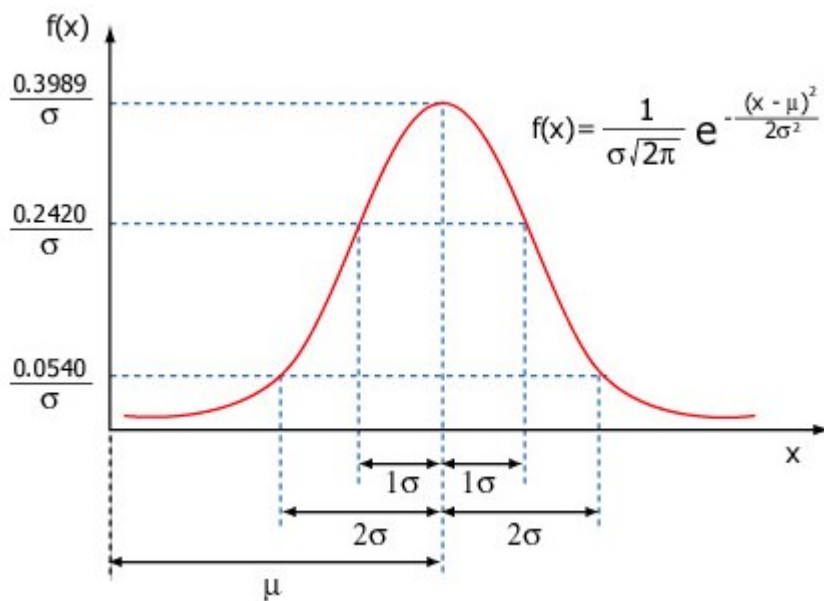


Figura 1 – Função de densidade da probabilidade de uma distribuição normal.

Para o caso da distribuição normal a equação mostrada na Figura 1  $f(x)=f(t)$  para uma comparação com a explicação apresentada na seção 3.6., então a equação é apresentada da seguinte forma:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Onde:

$t$  = tempo

$\mu$  = média ou expectativa da distribuição

$\sigma$  = desvio padrão

No contexto da confiabilidade pode se pensar nela como um histograma dos tempos até a falha para uma grande amostragem do produto.

### 3.6.2: Função de distribuição cumulativa

A função de distribuição cumulativa determina a probabilidade de uma variável real randômica  $X$  com uma dada distribuição de probabilidade ser encontrada com um valor menor ou igual  $x$  [ 3]. Um exemplo de uma função de distribuição cumulativa para a função de densidade da probabilidade da falha de varias representações normais da *Figura 2* pode ser observada na Figura 3.

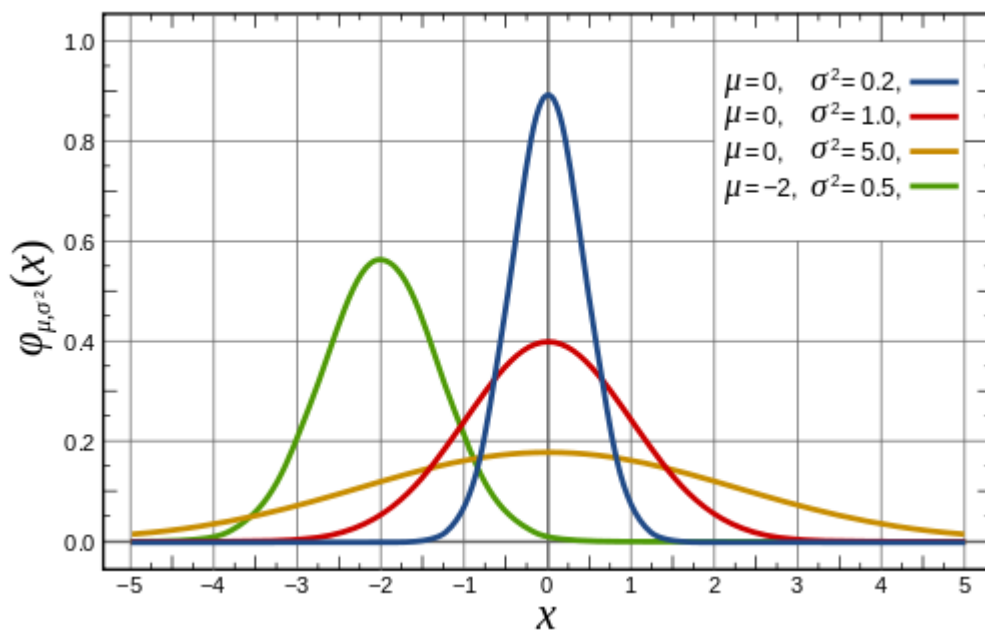


Figura 2 – Função de densidade da probabilidade de falha para várias representações normais.

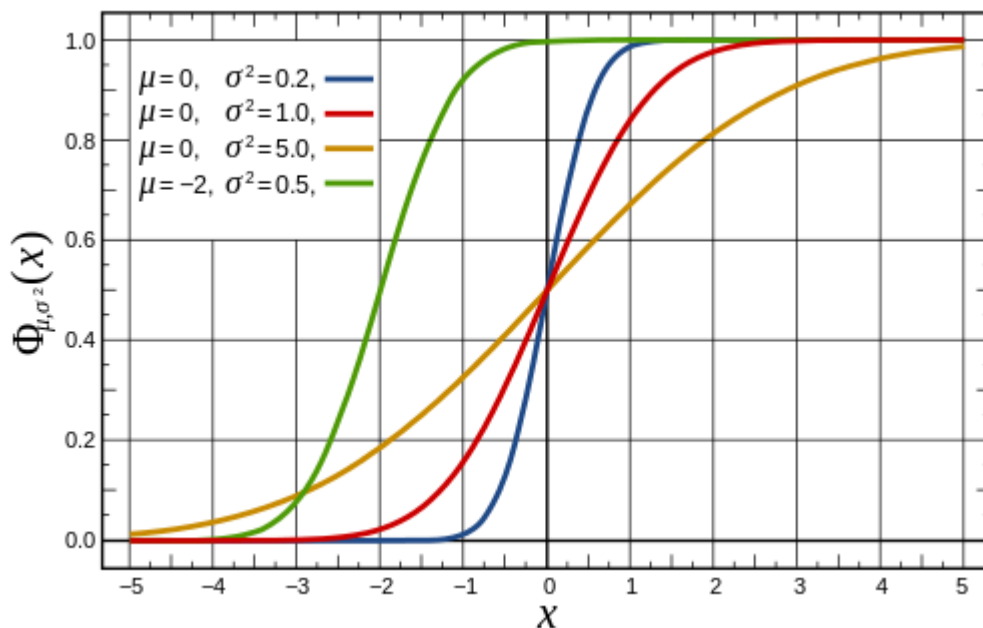


Figura 3 – Função de distribuição cumulativa para varias distribuições normais.

No contexto da confiabilidade esta função fornece a probabilidade de falha do produto por um tempo especificado  $t$ . Desta forma  $1-F(t)$  é a probabilidade de sobrevivência no tempo  $t$ , também conhecida como função de confiabilidade.

Quando conduzir uma análise de dados da vida do produto é aconselhável considerar a função da taxa de falha ou da taxa de falha instantânea:

$$h(t)=f(t)/[1-F(t)]$$

### 3.7: Análise da Falha

Dentro do caso de análise de falhas, dois casos interessam mais ao analista. O caso de taxa de falha crescente e de taxa de falha decrescente.

O caso de taxa de falha crescente sugere um fenômeno onde as falhas ocorrem em um tempo crescente à medida que o componente ou produto envelhecem. A incidência desse tipo de falha pode acarretar em uma manutenção programada, ou troca periódica de componente. Com esses dados é possível estimar os custos da manutenção e de visitas de campo dentro do período de garantia.

A taxa de falha decrescente pode ser um demonstrativo de fenômenos como mortalidade infantil, com possíveis causas como defeitos de fabricação, e isso

significa que as falhas ocorrerão em menor número quanto o maior o tempo passado.

A incidência desse tipo de falha pode ser diminuída com ensaios de burn in a fim de eliminar as amostras mal fabricadas.

Em casos reais, podem ser observadas ambas as taxas de falhas resultando em uma curva da banheira mostrada na Figura 4.

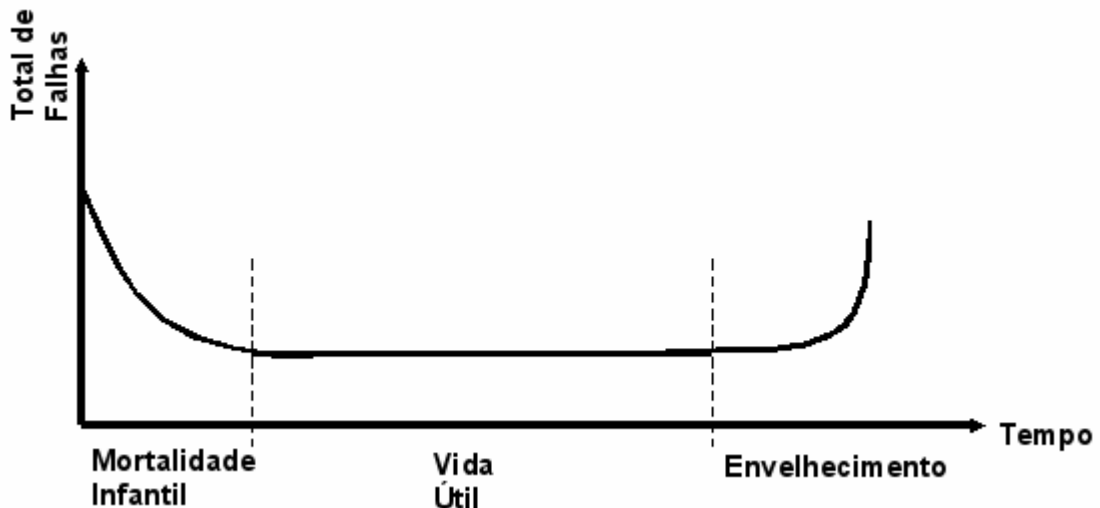


Figura 4 – Curva da banheira.

A curva da banheira apresenta um comportamento que exibe alta taxa de falha no início da vida, depois uma estabilização da falha e ao fim um acréscimo da taxa de falha proveniente do envelhecimento do produto. Essa curva apresenta um comportamento similar ao da vida humana.

### 3.8: Distribuição Weibull

A distribuição Weibull é uma função contínua de probabilidade, nomeada em homenagem a Waloddi Weibull é um dos modelos mais utilizados para o tempo até a falha devido a boa representatividade do comportamento de falha de vários tipos de produto.

A função de densidade da probabilidade da falha da distribuição Weibull é dada por:

$$f(t) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(t/\lambda)^k}$$

Onde  $k$  é o parâmetro de forma e  $\lambda$  o parâmetro de escala. O parâmetro de falha  $k$  indica o tipo taxa de falha que caracteriza a função. Se  $k < 1$  então a falha é decrescente, o que é uma característica de mortalidade infantil. Se o valor de  $k$  for 1 então a taxa de falha é constante e se  $k > 1$  a taxa de falha apresentada é a de falha crescente, característica de falha relacionada com envelhecimento.

A função de densidade da probabilidade da falha para diferentes distribuições Weibull pode ser observada na Figura 5.

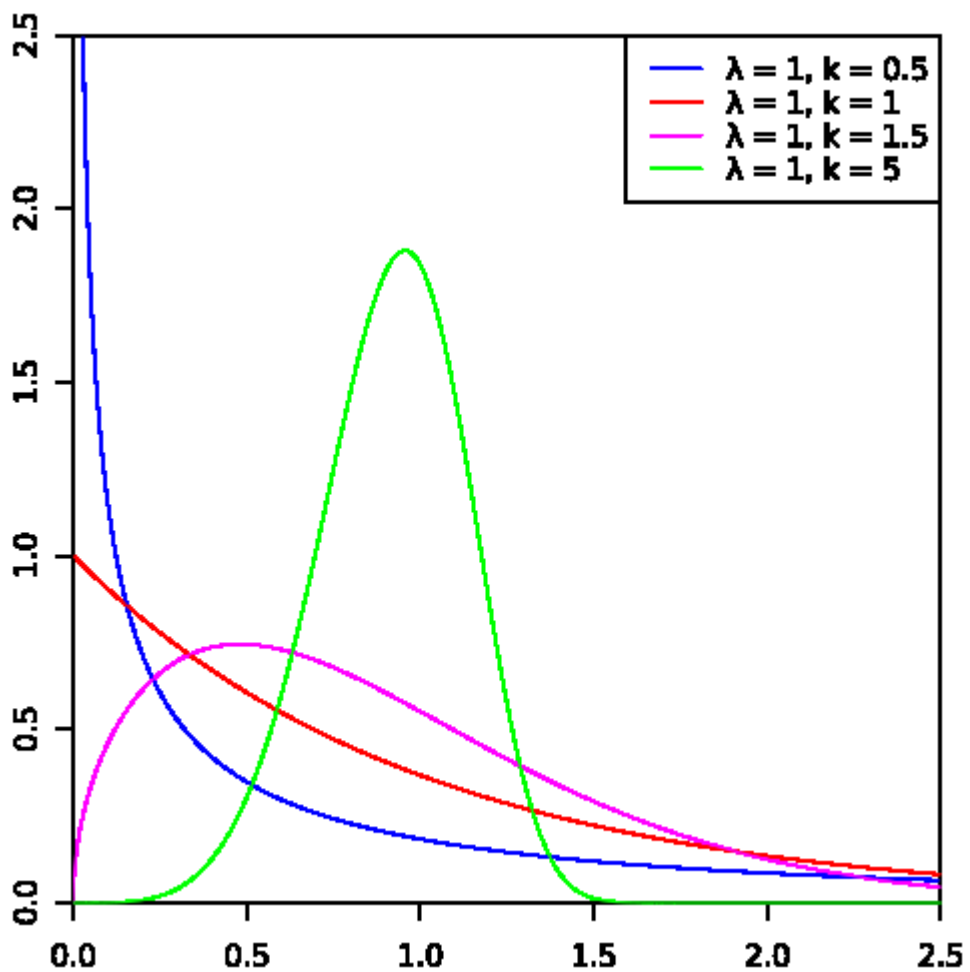


Figura 5 – Função de densidade da probabilidade da falha para distribuição Weibull.

A função de distribuição cumulativa da distribuição Weibull é dada por:

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\lambda)^k}$$

A representação da função de distribuição cumulativa da distribuição Weibull relativa a representação da Figura 5, pode ser observada na Figura 6.

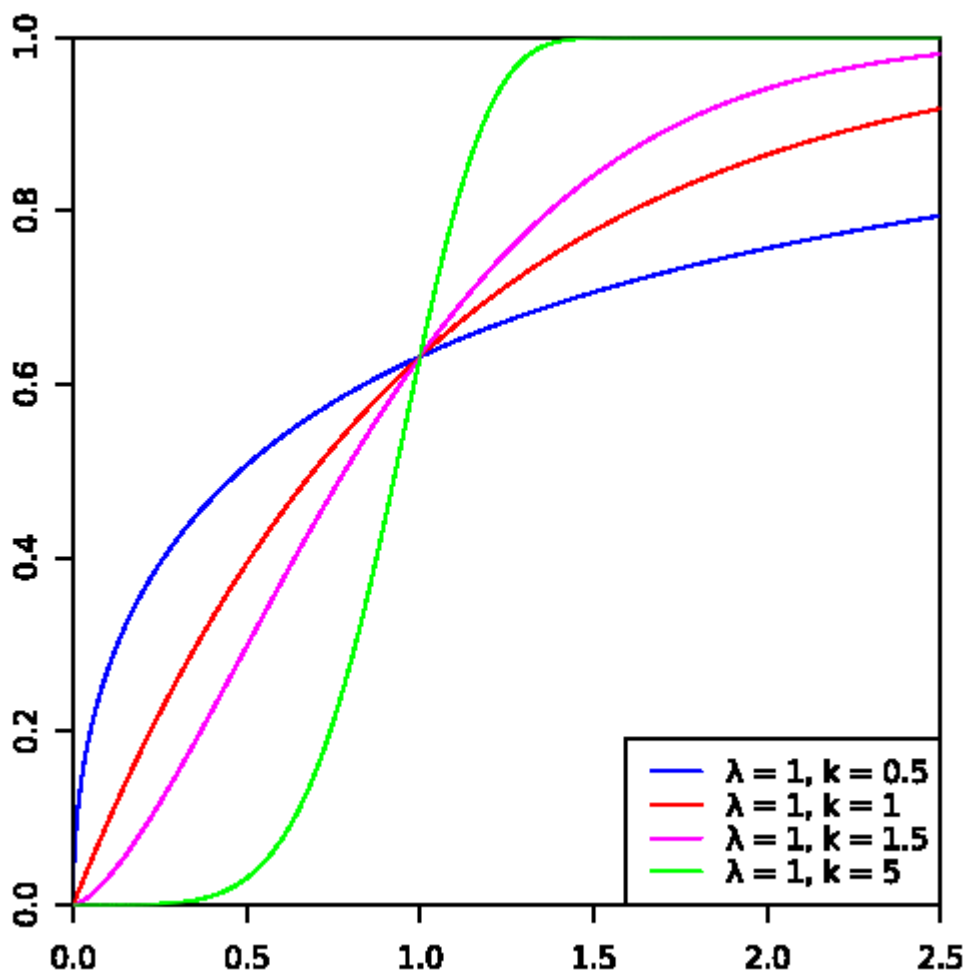


Figura 6 – Função de distribuição cumulativa da distribuição Weibull.

Ao contrário da curva da banheira, uma distribuição Weibull não pode representar os dois tipos de taxa de falha simultaneamente. Contudo devido ao fato da curva da banheira normalmente ser uma consequência da ação de dois ou mais modos de falha, é possível representar cada modo de falha diferente através de diferentes distribuições Weibull. Essas representações separadas só podem ser feitas se a conclusão que os modos de falha forem independentes for obtida.

### 3.8.1: Modo de falha

Modo de falha é o tipo de falha que o componente ou produto testado apresenta. Um produto pode exibir diferentes modos de falha provenientes do

mesmo tipo de estímulo. Por exemplo, uma resistência para fornos pode sofrer deformações devido a alta temperatura resultante de uma alimentação de tensão inadequada, mas a resistência também pode sofrer uma ruptura também devida a alta temperatura quando essa temperatura assume valores ainda mais altos.

### **3.8.2: Limite destrutivo**

Chama-se de limite destrutivo o valor limite em que um estímulo pode ser aplicado em um componente ou sistema até que o sistema sofre instantaneamente uma falha. Por exemplo, uma lâmpada incandescente pode ter o seu filamento rompido devido a uma alta tensão instantânea aplicada sobre ela, como no caso de aplicarmos 220 V em uma lâmpada de 127 V, nesse caso a lâmpada instantaneamente entra em modo de falha.

Uma das maneiras de se determinar esse limite destrutivo é aumentar o stress da condição, partindo do valor de operação e registrando cada passo de aumento do stress se houve falha.

### **3.9: Problemática**

O problema a ser resolvido é o da revisão das normas internas de componentes eletromecânicos.

Com o passar do tempo, diferentes componentes são empregados no projeto de novos produtos dentro da empresa, e por consequência disso as normas internas ficam desatualizadas. Essa desatualização acontece quando ocorrem mudanças nas normas internacionais ou quando o componente é substituído e sua especificação muda.

Quando ocorre a mudança de componente, as normas internas, muitas vezes escritas com um tipo de especificação de componente em mente, sofrem defasagens. Essas defasagens acarretam em alguns casos que os testes realizados para aprovação de componentes não se apliquem aos novos componentes.

Logo uma reavaliação periódica das normas é necessária para a manutenção e melhoramento da qualidade dos produtos. Essa reavaliação se dá através dos ensaios de confiabilidade.



Esses ensaios são realizados através da coleta e análise de dados mostrados acima. Através dessas análises e da consulta às versões atuais das normas internacionais alinhadas com as necessidades de desempenho dos componentes dentro do escopo dos projetos, as normas são revisadas.

Para o planejamento dos ensaios deve-se levar em consideração, tanto as regras de testes internacionais e as condições a que os componentes estarão submetidos no produto.

O problema a ser resolvido é o de planejar e realizar os ensaios de confiabilidade e produzir conhecimento necessário para a revisão preliminar das normas sobre componentes eletromecânicos.

## **Capítulo 4: Determinação das Técnicas Utilizadas**

Dentro do contexto da área de cocção, fatores de desgaste como exposição a altas temperaturas, contaminação devida à utilização, corrosão devido a exposição à umidade são fatores presentes em cada produto. Com a adição de componentes eletrônicos somados com os eletromecânicos já existentes no produto, a necessidade da realização de testes que verifiquem o comportamento dos componentes é um passo importantíssimo no processo de projeto.

Com o problema em mãos, a necessidade de ensaios de confiabilidade bem projetados para que os resultados gerem conhecimento. Para gerar conhecimento os testes não podem ser randomicamente realizados. Nesse contexto a organização é um fator importantíssimo no planejamento dos ensaios.

### **4.1: Levantamento de referências**

A primeira etapa para o projeto dos ensaios e um dos mais importantes está em entender o funcionamento dos componentes. Essa compreensão deve ser de uma maneira física, de forma a entender quais variáveis atuam dentro dos componentes e quais dessas variáveis podem ser controladas.

Além da compreensão do funcionamento dos componentes, deve-se fazer uma busca por documentos já escritos sobre os componentes ou componentes similares, uma vez que ensaios documentados possuem informações importantes sobre avaliações anteriores que podem evitar caminhos improdutivos quando os ensaios forem projetados.

### **4.2: Mapa de Raciocínio**

A maior ferramenta de organização utilizada na realização de testes de confiabilidade na Whirlpool é o Mapa de Raciocínio.

O Mapa de Raciocínio é uma documentação contínua do conhecimento existente, das perguntas feitas, dos caminhos paralelos de trabalho necessário para responder àquelas perguntas, das ferramentas aplicadas para responder as

perguntas, do conhecimento obtido a partir do trabalho executado e da direção do trabalho futuro [ 4].

Além disso, o Mapa de Raciocínio também tem o papel de tornar visível o raciocínio por trás das decisões, processos e do projeto do produto. Essa visibilidade leva à autocrítica e permite a revisão dos colegas.

A literatura ilustra que não existe uma definição comumente usada do raciocínio crítico, mas dentro do contexto dos testes de confiabilidade a aplicação do raciocínio crítico é focado nos seguintes pontos:

- Desejo de fazer perguntas
- Pensamento Sequencial (Processo de indução/dedução)
- Caminhos paralelos de investigação
- Uso de dados para desenvolver teorias e suportá-las
- Uso de dados para invalidar teorias
- Uso do conhecimento do assunto
- Disciplina para refletir sobre o aprendizado
- Habilidade para organizar o raciocínio tanto ampla como profundamente

Uma visão simplificada dos projetos pode ser obtida ao se imaginar uma linha contínua. Em uma extremidade dessa linha estão os projetos de descobertas, focados na aquisição de conhecimento novo. Na outra extremidade da linha estão os projetos de execução, que consistem na compilação da execução bem sucedida das tarefas que são bem entendidas[ 5].

Projetos de confiabilidade estão mais centrados no tipo de projetos de descobertas. E projetos de descoberta necessitam de habilidades, ferramentas e atitudes diferentes das necessárias para trabalhar com um conhecimento já existente.

A descrição inicial do projeto é um ponto principal para a determinação do escopo e do objetivo do mesmo, a Tabela 1 apresenta exemplos de descrição inicial de projetos e das descrições alternativas que apresentam um detalhamento maior que as iniciais. Essa descrição detalhada serve para melhor situar o projeto.

Tabela 1 – Descrição dos projetos

<b>Descrição Inicial do Problema</b>	<b>Descrição Alternativa do Problema</b>
Instalar um equipamento novo no gargalo para melhorar o WIP e a capacidade.	Entender os fatores críticos de manufatura e processo, contribuindo para o WIP no local em particular da linha e recomendar soluções alternativas.
Reduzir os erros de previsão.	Entender o processo de previsão, influências internas e externas: identificar melhorias alternativas adequadas e implementar como orientados.
Melhorar o projeto do fabricante de gelo.	Entender o processo de fabricação do gelo.
Melhorar o processo de detecção de vazamento.	Entender que nível de vazamento precisa ser detectado, qual o nível atual, quais as fontes, estabelecer um sistema de medição válido, recomendar melhorias alternativas para o processo /produto pra reduzir o número e severidade dos vazamentos.

#### **4.2.1: Aprendizado interativo**

Todo o processo de projeto e implementação de testes de confiabilidade envolvem um aprendizado interativo. O aprendizado interativo envolve o processo de fazer perguntas, procurar a resposta para essas perguntas e com a resposta fazer novas perguntas é uma parte vital da geração de conhecimento. O fluxo seguido é mostrado na Figura 7.

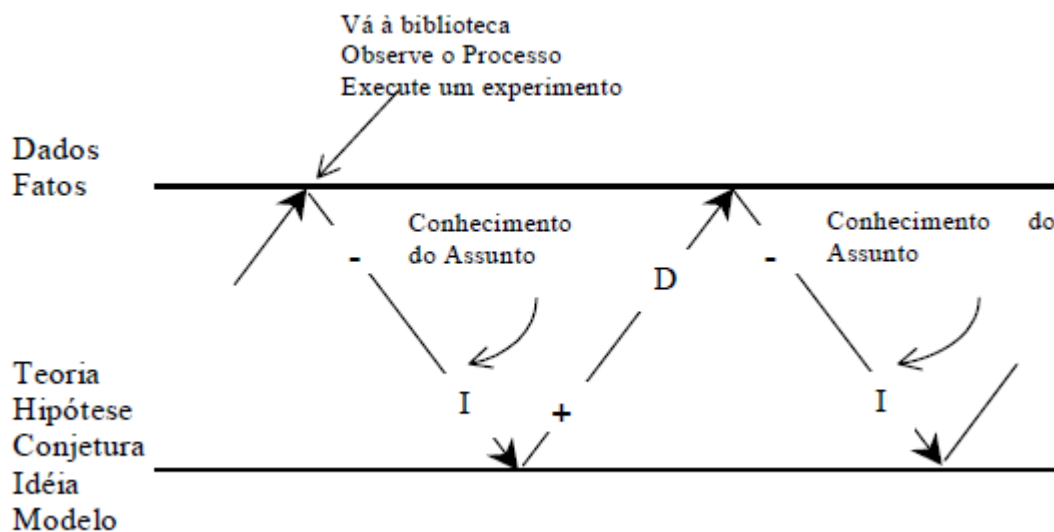


Figura 7 – Representação diagramática do processo de aprendizado interativo.

Este processo de aprendizado é verificado no Mapa de Raciocínio, tanto na forma de teorias quanto na forma de perguntas. Uma pergunta pode ser respondida e uma teoria pode ser comprovada ou invalidada tanto com resultados de experimentos quanto com dados bibliográficos, por isso é salientado mais uma vez a necessidade do levantamento de referências.

Quando uma teoria é invalidada são propostos novos caminhos a serem seguidos para a continuação da avaliação. O ciclo de raciocínio crítico que é utilizado dentro dos estudos de confiabilidade é embasado nos conceitos da Operational Excellence e mostrado na Figura 8.

Esse ciclo permite a exploração de vários caminhos diferentes e mostra a utilização do Mapa de Raciocínio como uma ferramenta interativa. O Mapa de Raciocínio é uma ferramenta que deve ser atualizada constantemente à medida que o estudo for se desenvolvendo, garantindo assim seu papel organizacional.

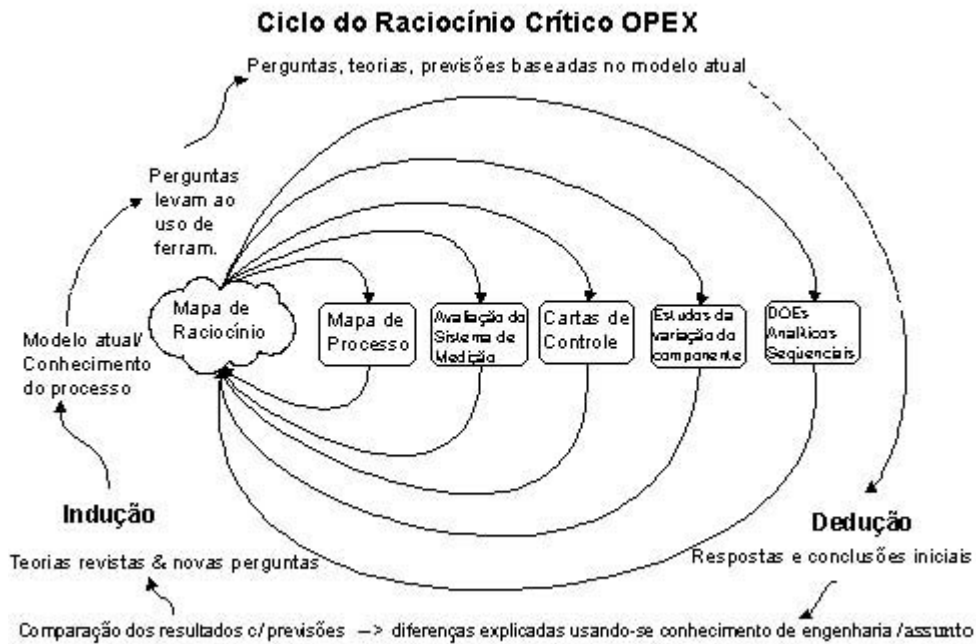


Figura 8 – Ciclo do raciocínio crítico [ 6]

#### 4.2.2: Caminhos paralelos

Uma grande parte do estudo de confiabilidade e do papel do Mapa de Raciocínio é exploração de caminhos paralelos.

Quando se estuda um componente ou um sistema, são várias as condições que podem resultar em falhas e essas falhas podem ter vários fatores de causa tanto conjuntos quanto isolados.

Pensando de uma forma a identificar todos os modos de falha são utilizados recursos como o FMEA [ 11] e mapas de produto, de forma a tentar entender o funcionamento do componente ou produto de uma forma matemática como uma função. Como uma função pode ter múltiplas variáveis esse conceito é aplicado da mesma forma aos componentes e sistemas analisados.

Existe a chance que quando seguindo um dos caminhos paralelos, ele tenda a convergir com outro caminho, esse fenômeno pode indicar que uma falha pode ter múltiplas causas e seus efeitos devem ser reavaliados.

### 4.3: Mapa de Produto

Uma das ferramentas de modelagem utilizadas junto com o Mapa de Raciocínio é o Mapa de Produto. Dentro do Mapa de Produto é aonde é feita a modelagem do componente ou sistema a ser estudado.

Essa modelagem é feita de forma a tentar expressar o componente ou sistema de uma forma matemática na forma de funções  $Y=f(x)$ , com Y sendo as funções principais do componente ou sistema.

Seguindo esse modelo, quando cada vez maior o sistema pode-se estender a função como mostrado a seguir:

$$Y=f(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$$

$$y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Onde Y são as funções principais do sistema ou componente, y são as funções secundárias e x as variáveis que influem nessas funções. É possível que a mesma variável x esteja presente em duas funções y diferentes possivelmente se tornando uma variável crítica e ela deve ser analisada.

As variáveis x podem ser classificadas em controláveis e não controláveis. Dentro do contexto da confiabilidade é muito importante identificar e classificar essas variáveis. As variáveis controláveis são importantes no contexto do planejamento dos ensaios de confiabilidade uma vez que elas podem ser determinadas como os fatores a serem estressados.

### 4.4: Mapa do Processo

Quando um teste é projetado ele deve ser metodicamente registrado em cada etapa. Desde o básico de selecionar as amostras até colocar as amostras no diapositivo, informações sobre os ciclos, variáveis que serão controladas e monitoradas e o setup e modificações a serem feitas nas amostras.

O Mapa de Processo serve para representar o procedimento de teste na forma de um diagrama. Esse diagrama deixa explícito o procedimento, desde a

sequência de inicialização e a sequência de tarefas a serem realizadas durante o teste.

Um exemplo do fluxo do Mapa do Processo pode ser visualizado na Figura 9.

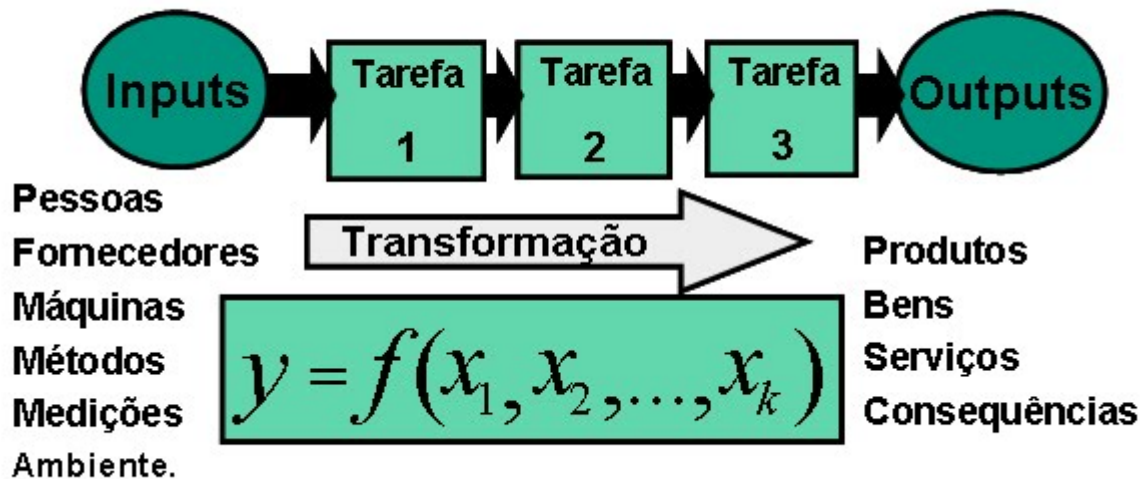


Figura 9 – Exemplo do fluxo de um Mapa do Processo.

O Mapa do Processo também serve de registro de como os testes foram aplicados e deve ser revisado caso o teste não apresente o comportamento esperado.

#### 4.5: Teste de Vida Acelerado (ALT)

Com a demanda crescente de produtos com alta qualidade, é extremamente importante assegurar a confiabilidade de cada produto antes de disponibilizá-lo para os clientes. Confiabilidade, custo e Time to Market são os três fatores mais importantes que devem ser otimizados de alguma maneira [ 7].

Tradicionalmente, conseguir um produto altamente confiável sempre resulta em um alto Time to Market porque as técnicas não foram desenvolvidas. Para garantir a alta qualidade do produto e mesmo assim manter pequeno o Time to Market, técnicas de Teste de Vida Acelerado são utilizadas atualmente.

Os Testes de Vida Acelerados pode ser aplicados durante as fases de design/fabricação ou depois da fase de fabricação e são divididos em duas grandes categorias:



- Testes Acelerados Qualitativos
- Testes Acelerados Quantitativos

#### **4.5.1: Testes Acelerados Qualitativos**

Os testes Acelerados Qualitativos são focados basicamente em identificar os maiores modos de falhas e mecanismos de um produto. Esses testes são primariamente utilizados para revelar os prováveis modos de falha e eliminar possíveis defeitos inerentes do produto. Eles são largamente classificados como:

- Highly Accelerated Life Testing (HALT)
- Highly Accelerated Stress Screening (HASS)

Ambos os testes são focados em reduzir os espaços de tempo do ensaio de teste por meio da aplicação de estímulos muito mais altos do que existem nas condições de uso. Isso força a ocorrência da falha em um tempo muito menor que o previsto em condições normais de operação.

Os testes HALT são primariamente utilizados para determinar as condições limite de operação e resistência dos produtos. Ele é usado para identificar possíveis pontos fracos no projeto ou na fabricação dos produtos encontrando as falhas predominantes do produto.

Já os testes HASS são aplicados na fase de produção para rapidamente identificar defeitos nos produtos que podem ser gerados durante a fase de fabricação ou de projeto.

#### **4.5.2: Testes Acelerados Quantitativos**

Os Testes Acelerados Quantitativos são basicamente voltados para a predição do tempo de vida de um produto. Esses testes são projetados para quantificar as características de vida de um componente, sistema ou produto dentro das condições de uso normais e prover informações confiáveis que incluem a probabilidade de falha de um produto dentro das condições de uso.

O tipo de teste mais utilizado dentro do escopo desse projeto é o Teste de Envelhecimento/Degradação Acelerado (AAT/ADT) que consiste em estudar o efeito

do processo de degradação por certos tipos de estímulos em componentes eletromecânicos e eletrônicos.

#### **4.5.2.1: Teste de Degradação Acelerado (ADT)**

O termo “Acelerado” implica em fazer o tempo passar mais rapidamente para que a informação sobre a confiabilidade possa ser obtida de maneira mais rápida [ 8].

Os testes ADT aplicam uma variedade de métodos de teste com alto stress para diminuir a vida de um produto ou acelerar a degradação do mesmo. O objetivo desse tipo de teste é obter dados de desempenho de uma forma eficiente, que quando analisados possa prover estimativas razoáveis do tempo de vida do produto ou do desempenho do produto dentro das características de utilização normais.

Entre os exemplos de estímulos que podem ser aplicados, dentro da área de cocção são aplicados: stress de temperatura, de umidade e de tensão primeiramente. Contaminação também é um fator avaliado.

Para os componentes eletromecânicos e eletrônicos, além dos principais fatores acima, foi verificado corrosão e chance de corrosão galvânica devido à passagem de corrente pelos componentes.

O efeito dos estímulos escolhidos na aplicação do teste deve ser de forma a que o teste apresente o módulo de falha previsto de quando o teste foi projetado. Os modos de falha que serão acelerados devem corresponder aos inicialmente previstos no projeto do ensaio, logo se o modo de falha apresentado durante o ensaio for outro, o projeto do ensaio deve ser repensado.

Uma maneira de determinar a que modo de falha o componente ou sistema estará sujeito é realizando anteriormente um teste do tipo HALT para verificar que modo de falha o determinado estímulo aplicado com uma determinada amplitude provoca.

Normalmente os níveis de stress caíram fora dos limites de especificação do produto, mas dentro dos limites de projeto. Isso significa que o produto não sofrerá uma falha automaticamente quando exposto aos níveis de stress dos testes.

Os tipos de stress aplicados podem ser classificados como de Stress Constante, Step Stress, Stress Cíclico ou Stress Progressivo [ 9].

Dentro dos testes ADT o desempenho do componente ou produto é observado dentro do tempo ao invés da vida. O desempenho do produto é observado durante varias eras e um modelo para a degradação do desempenho é obtido oriundo dos dados. Esse modelo pode ser utilizado futuramente para extrapolar o desempenho e tempo até a falha. Podendo assim prever a falha ou a distribuição da vida do componente antes que algum deles realmente falhe. Esses dados são utilizados para o calculo de períodos de manutenção e troca de componentes.

O teste ADT possui uma metodologia de três passos. O primeiro consiste e determinar o perfil do ambiente do ciclo de vida do produto ou componente, assim definindo os parâmetros de teste e o fator de aceleração para os testes específicos.



Figura 10 – Etapas do teste ALT.

O segundo passo consiste na realização do teste e o terceiro passo consiste na subsequente análise da falha ou degradação dos componentes ou produtos testados. Todos os passos estão expostos na Figura 10.

Após a aquisição dos dados e extrapolação dos limites com o auxílio de modelos matemáticos torna-se necessário realizar a validação dos ensaios. A validação pode ser feita através da comparação com modelos matemáticos já existentes ou pela repetição do teste e comparação com os resultados previstos no modelo obtido.

Alguns modelos de comportamento para componentes eletrônicos estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Modelos matemáticos de falha para componentes eletrônicos [ 10].

Tipo de Stress	Relação da Vida e Stress
Temperatura	<p>Relação de Arrhenius:</p> $L(V) = Ce^{-Ea/kT}$ $AF = e^{-\frac{Ea}{k} \left( \frac{1}{T1} - \frac{1}{T0} \right)}$
Humidade	<p>Relação de Eyring:</p> $t_{50\%} = Ae^{\left[ \frac{E}{kT} F(V) F(RH) \right]}$ $A = e^{\left[ \left( \frac{-Ea}{k} \right) \left( \frac{1}{T0} - \frac{1}{T} \right) - B \left( \frac{1}{RH0} - \frac{1}{RH} \right) \right]}$
Tensão	<p>Relação Inversa de Potência:</p> $L(V) = \frac{A}{(V)^Y}$ $A = \left( \frac{V_a}{V_u} \right)^Y$ <p>Modelo de Eletro migração (para dispositivos semicondutores):</p> $Tf = AJ^{-n} e^{\left( \frac{\Delta H}{kT} \right)}$
Temperatura – Humidade	<p>Relação de Hallberg Peck:</p> $Af = \left[ \frac{RH0}{RH1} \right]^3 e^{\left[ \frac{Ea}{k} \left( \frac{1}{T1} - \frac{1}{T0} \right) \right]}$ <p>Modelo de Hakim:</p> $A = e^{\left[ \frac{-E}{k} \left( \frac{1}{(T0+RH0)} - \frac{1}{(T+RH)} \right) \right]}$

Ciclo de Temperatura	Relação de Coffin Manson: $Af = \left[ \frac{(\Delta T_0)}{(\Delta T_1)} \right]^n$
----------------------	--

Após a validação dos resultados obtidos, pode-se proceder para o próximo estágio do trabalho.

## **Capítulo 5: Aplicação das Técnicas**

Partindo do problema apresentado nos capítulos anteriores, aplicamos a metodologia apresentada no Capítulo 4: começamos pela primeira parte.

### **5.1: Levantamento de referências**

Primeiramente a busca começa pela identificação de uma das normas internas já existentes na empresa, e foi verificada que a norma encontrada já se estava vencida.

A seguir foi realizado um levantamento de todos os relatórios e testes já realizados a respeito do componente a ser estudado e também o levantamento das normas internacionais e nacionais utilizadas de referência para norma interna. Para exemplo nessa etapa seguiremos utilizando as normas para lâmpadas incandescentes, a norma nacional é a NBR 5033/88 relativa às rosca Edison utilizadas pela maioria das lâmpadas incandescentes e a norma internacional IEC 60432-1 que trata da utilização de lâmpadas com filamento de tungstênio para usos gerais e domésticos.

Através da comparação com as normas nacionais e internacionais percebe-se a divergência de algumas normas internas com as normas internacionais. O passo a seguir é identificar se essas divergências proveem da defasagem da norma devido a não atualização ou a um requisito necessário para a aplicação dos componentes aos produtos.

Essa identificação se dá pela pesquisa dos testes anteriores já realizados nos componentes e armazenados no sistema interno da empresa. Uma forma complementar de investigar as diferenças compreende na investigação das especificações de produtos anteriores que já utilizam o mesmo tipo do componente analisado. Por exemplo, um forno elétrico produzido cinco anos atrás pode utilizar uma resistência de aquecimento diferente da utilizada atualmente nos fornos elétricos, essa mudança da resistência pode acarretar em mudanças necessárias na norma interna.

Após a verificação das divergências foi criado o Mapa de Raciocínio para a organização das teorias e determinação dos objetivos a serem atingidos.

## 5.2: Mapa de Raciocínio

Primeiramente define-se o objetivo principal, como exemplo ilustrativo de uma primeira versão de um Mapa de Pensamento relativo a uma placa de circuito utilizada dentro de um eletrodoméstico.

Essa placa está experimentando problemas de funcionamento dentro do produto em que ela é utilizada, mas funcionava corretamente nas fases de desenvolvimento.

O primeiro modelo do Mapa de Raciocínio compreende primeiramente as perguntas e hipóteses iniciais. O modelo apresentado na Figura 11 é um modelo de exemplo e reduzido para um entendimento mais fácil do problema exemplo.

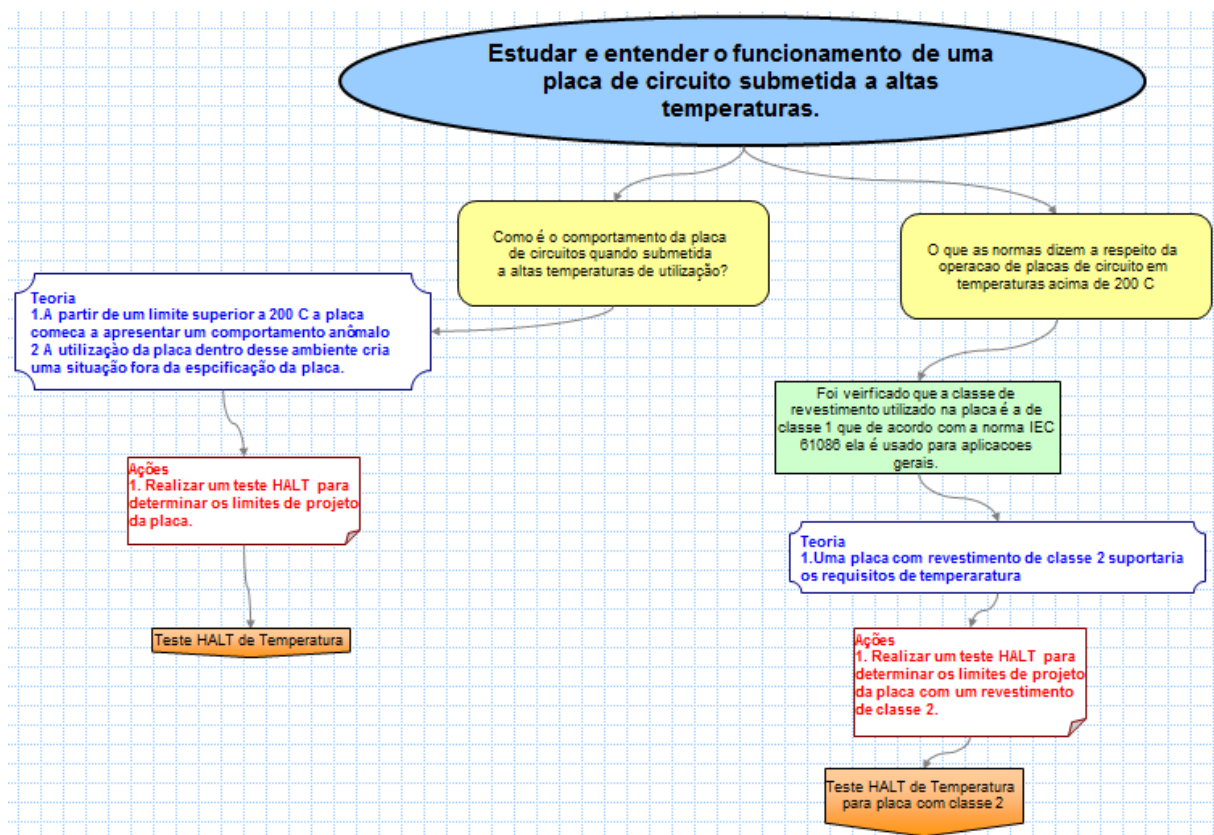


Figura 11 – Modelo do Mapa de Raciocínio.

Nota-se que as primeiras hipóteses do motivo da falha são todas primeiramente ligadas às condições térmicas a qual a placa está submetida. Os



testes a serem realizados deverão proporcionar mais informações sobre as causas das falhas.

Com as primeiras hipóteses levantadas agora partimos para a montagem do Mapa do Produto.

### 5.3: Mapa do Produto

Como apresentado na seção 4.3., o mapa do Produto Consiste em modelar e classificar o componente ou sistema a ser analisado.

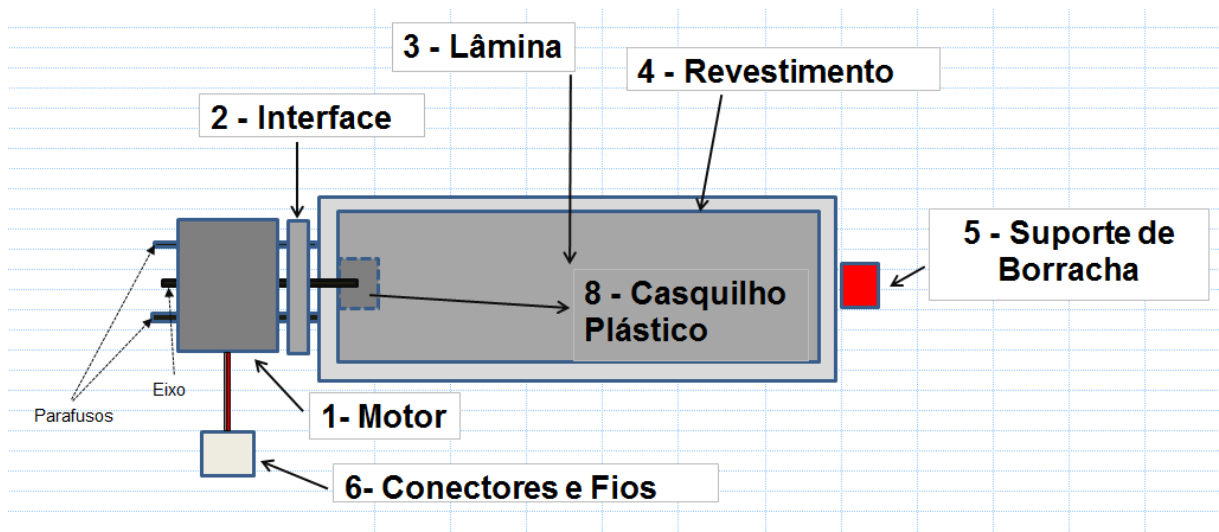


Figura 12 – Modelo do ventilador.

<i>Blower</i>	<i>3 - Lâmina</i>	<i>6 - Conectores e Fios</i>
Y1 - Circular o Ar (CFM)	y1 - Transformar energia cinética em fluxo de ar (CFM)	y1 - Conduzir energia elétrica para as bobinas do motor
Y2 - Ser silencioso (DB)	x1 - Número de lâminas	x1 - Capacidade de corrente do fio
Y3 - Confiabilidade (R%)	x2 - Peso das lâminas	x2 - Isolação do material
<b>1 - Motor</b>	x3 - Formato das lâminas	x3 - Crimpagem térmica dos fios
y1 - Prover energia mecânica para o eixo (Watts)	x4 - Perfil das lâminas	y2 - Prover uma boa conexão elétrica
x1.1 - Torque	x5 - Espessura das lâminas	x1 - Força de inserção/extração
x1.2 - RPM	x6 - Distância das lâminas para o centro geométrico	<b>8 - Casquilho Plástico</b>
x1.3 - Temperatura dos rolamentos	<b>4 - Revestimento</b>	y1 - Segurar o eixo do motor
x1.4 - Eficiência de conversão elétrica-mecânica	y1 - Criar o caminho para a passagem do ar	x1 - Folga entre o motor e o casquilho
x1.5 - Tensão de entrada	x1 - Dimensão	x2 - Folga entre o furo da lâmina e da casquilho
<b>2 - Interface</b>	y2 - Cria a conexão do ventilador com o chassi do forno	y2 - Gerar energia para a lâmina
y1 - Conexão do motor com o revestimento (Espaço nulo entre motor-interface-revestimento)	x1 - Número de pontos de junção	x1 - Fricção elástica do casquilho com o eixo
x1 - Torque dos parafusos	x2 - Distância entre os furos dos parafusos	y3 - Absorver a vibração das lâminas
x2 - Number de parafusos	x3 - Resistência mecânica	x1 - Constante elástica do casquilho
y2 - Centralização do eixo	y3 - Segurar a escova e as lâminas	
x1 - Distância entre a interface e o furo no centro da lâmina	x1 - Pequena folga entre o casquilho e o revestimento	
y3 - Prover a centralização do eixo	<b>5 - Suporte de borracha</b>	
x1 - Torque dos parafusos	y1 - Segurar o eixo do motor	
x2 - Paralelismo das faces das lâminas	x1 - Folga entre o eixo e a casquilho/Gap between axis and bushing	
	x3 - Constante elástica do casquilho	
	x4 - Folga entre o casquilho e o furo do revestimento	

Figura 13 – Variáveis do ventilador.

Para esse caso será utilizado o exemplo de um ventilador de convecção utilizado dentro de alguns modelos de fornos. Essa modelagem é mostrada na Figura 12 e as variáveis na Figura 13.

É evidente pelo exemplo demonstrado que quanto maior a complexidade do sistema estudado maior será a quantidade de variáveis atuando sobre ele. Para grandes sistemas é indicado analisar separadamente suas partes de modo a diminuir a complexidade de ter de analisar toda a grande quantidade de variáveis e suas relações.

#### **5.4: Planejamento dos testes**

Agora que já existe um modelo do componente ou sistema com as suas devidas variáveis e já é conhecido tanto os produtos em que o componente faz parte e as condições de utilização do mesmo pode-se passar para a parte de planejamento dos testes.

Para a ilustração dessa parte serão tomados como exemplo testes realizados sobre elementos resistivos usados no aquecimento de fornos elétricos. O principal fator de stress aplicado ao elemento será a tensão elétrica, devido à necessidade da resistência de suportar tensões elétricas por um período equivalente ao de várias utilizações dos fornos.

O modo de falha escolhido é o de deformação da resistência, o modo foi escolhido devido ao perigo para o consumidor de uma possível deformação na resistência acarretando assim danos ao produto e por consequência perigo ao consumidor.

Para a determinação dos parâmetros de teste foi proposto uma rodada de teste do tipo HALT para a avaliação dos valores de tensão que podem ser aplicados em uma resistência até que haja deformação ou que o modo de falha mude para uma possível ruptura.

O teste HALT foi realizado com os níveis de stress apresentados na Tabela 3 a seguir, para uma resistência de 127 V.

Tabela 3 – Parâmetros do Teste HALT

Tempo (min)	Tensão (V)
0	120
10	130
20	140
30	150
40	160

Para os valores de incremento foram escolhidos um incremento de 10 V a cada 10 min até que aconteça um modo de falha. A inspeção é feita visualmente levando em conta que o modo de falha esperado é o de deformação.

Após a tensão de 250 V foi notada a presença do modo de falha de deformação, então foi determinado que o limite do teste fosse de 250 V, uma vez que nessa tensão a falha acontece em um tempo muito pequeno.

Logo para o projeto do teste ALT foi determinado que fossem trabalhados nas seguintes tensões a modo de determinar uma equação para o comportamento da falha da resistência, expressos na Figura 14.

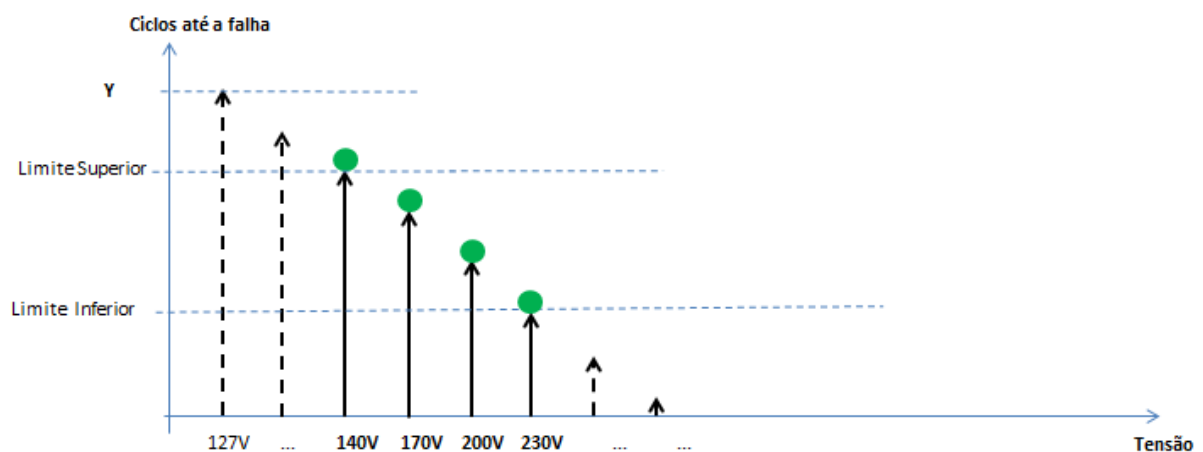


Figura 14 – Valores de tensão para o teste ALT.

O ciclo escolhido foi determinado com auxílio da pesquisa de modo de uso da resistência, focado em um tempo médio de assamento compreendendo uma hora e meia sendo que dentro desse perfil a resistência fica ligada até atingir a temperatura de equilíbrio de 200 graus Celsius e depois fica em um ciclo de on-off por pelo restante do tempo. No final de cada ciclo a resistência é desligada até atingir a temperatura ambiente e depois que ela atinge a temperatura ambiente outro ciclo começa em seguida.

## 5.5: Mapa do processo

Continuando o exemplo do teste ALT para a resistência o Mapa do Processo referente ao procedimento é exposto na Figura 15.

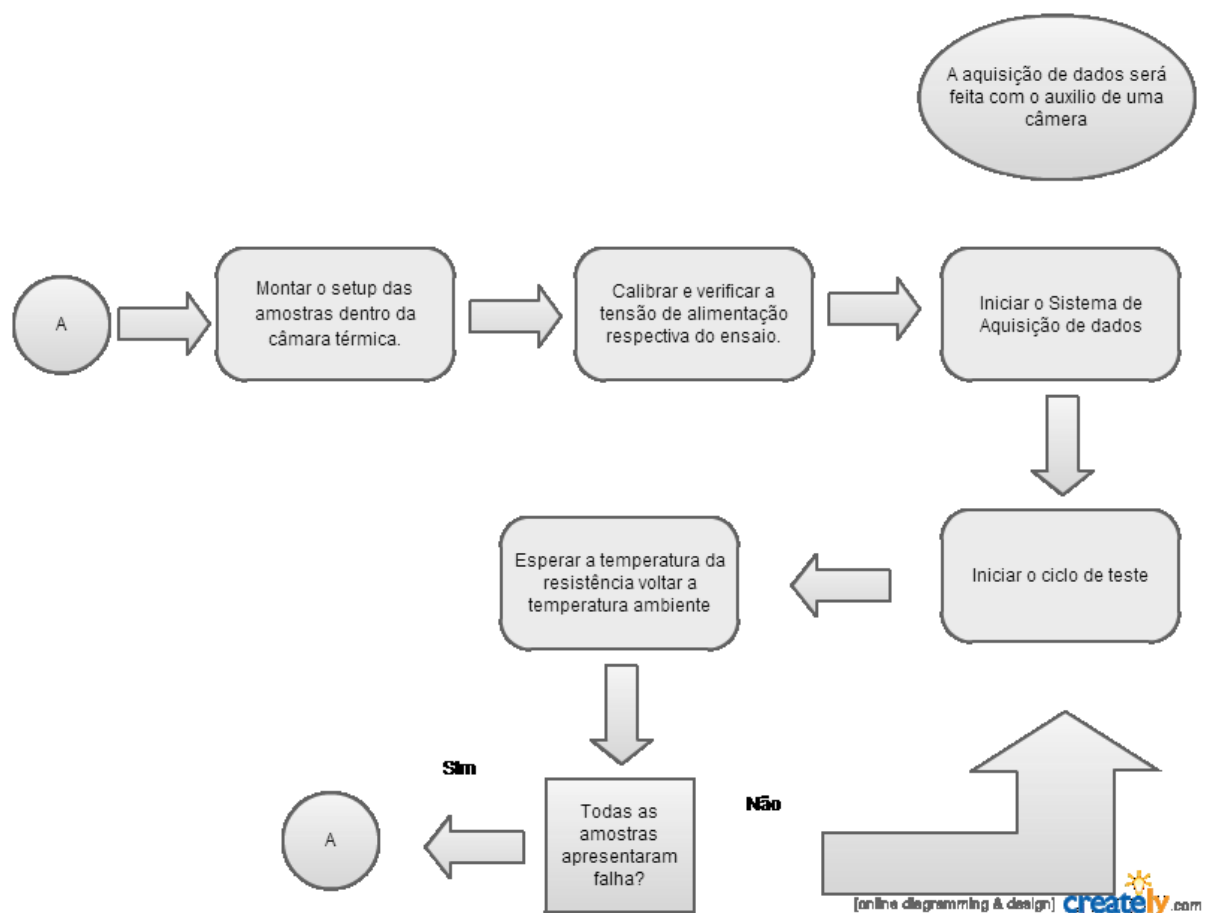


Figura 15 – Mapa do Processo do teste ALT.

Após os resultados dos testes os dados coletados são analisados pelo programa de descoberta estatística JMP.

## 5.6: JMP

O programa utilizado para a realização dos cálculos e para a determinação dos modelos matemáticos é o JMP. O JMP é um programa de análise estatística que combina análise estatística com gráficos dinâmicos.

Quando os dados recebidos dos testes sofrem o primeiro tratamento, eles são expostos ao JMP para que o mesmo calcule a suas distribuições e um modelo matemático da sua curva de densidade. Os parâmetros do modelo da curva de densidade são então comparados com o modelo matemático previamente selecionado para então gerar o modelo matemático de vida do componente.

Esse modelo será então utilizado na realização dos testes de validação e se comprovada a validação será empregada na atualização da norma, que é o objetivo final desse trabalho.

O JMP possui um ambiente próprio voltado para testes de confiabilidade, aonde se podem realizar as comparações e análise dos dados obtidos através dos ensaios. Esse ambiente próprio mostra perfis de distribuição, calcula o fator de aceleração e calcula a probabilidade de falha relativa aos parâmetros analisados.

A análise dos dados retirados do exemplo presente no JMP servirá de ilustração de como o programa realiza a análise dos dados. O caso contém os resultados de um teste ALT realizados em um dispositivo operando em altas temperaturas. As temperaturas variaram de 40, 60 e 80 graus Celsius. E os dados filtrados e organizados estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Tabela de coleta de dados exemplo.

	Horas	Status	Peso	Temperatura	Censura	x
1	5000	Censurado	30	10	0	40,9853435
2	1298	Falhou	1	40	0	37,0589175
3	1390	Falhou	1	40	0	37,0589175
4	3187	Falhou	1	40	0	37,0589175
5	3241	Falhou	1	40	0	37,0589175
6	3261	Falhou	1	40	0	37,0589175
7	3313	Falhou	1	40	0	37,0589175
8	4501	Falhou	1	40	0	37,0589175
9	4568	Falhou	1	40	0	37,0589175
10	4841	Falhou	1	40	0	37,0589175
11	4982	Falhou	1	40	0	37,0589175
12	5000	Censurado	90	40	0	37,0589175
13	581	Falhou	1	60	0	34,8341588
14	925	Falhou	1	60	0	34,8341588
15	1432	Falhou	1	60	0	34,8341588
16	1586	Falhou	1	60	0	34,8341588
17	2452	Falhou	1	60	0	34,8341588
18	2734	Falhou	1	60	0	34,8341588
19	2772	Falhou	1	60	0	34,8341588
20	4106	Falhou	1	60	0	34,8341588
21	4674	Falhou	1	60	0	34,8341588
22	5000	Censurado	11	60	0	34,8341588
23	283	Falhou	1	80	0	32,8613903
24	361	Falhou	1	80	0	32,8613903
25	515	Falhou	1	80	0	32,8613903
26	638	Falhou	1	80	0	32,8613903
27	854	Falhou	1	80	0	32,8613903
28	1024	Falhou	1	80	0	32,8613903
29	1030	Falhou	1	80	0	32,8613903
30	1045	Falhou	1	80	0	32,8613903
31	1767	Falhou	1	80	0	32,8613903
32	1777	Falhou	1	80	0	32,8613903
33	1856	Falhou	1	80	0	32,8613903
34	1951	Falhou	1	80	0	32,8613903
35	1964	Falhou	1	80	0	32,8613903
36	2884	Falhou	1	80	0	32,8613903
37	5000	Censurado	1	80	0	32,8613903

Os dados da tabela acima são colocados na interface do programa como mostrado na Figura 16.

Após a configuração selecionada, notem que o modelo de relação selecionado foi o de relação de Arrhenius Celsius, que é um modelo matemático relativo a estudos de temperatura, procede-se com a análise do sistema.

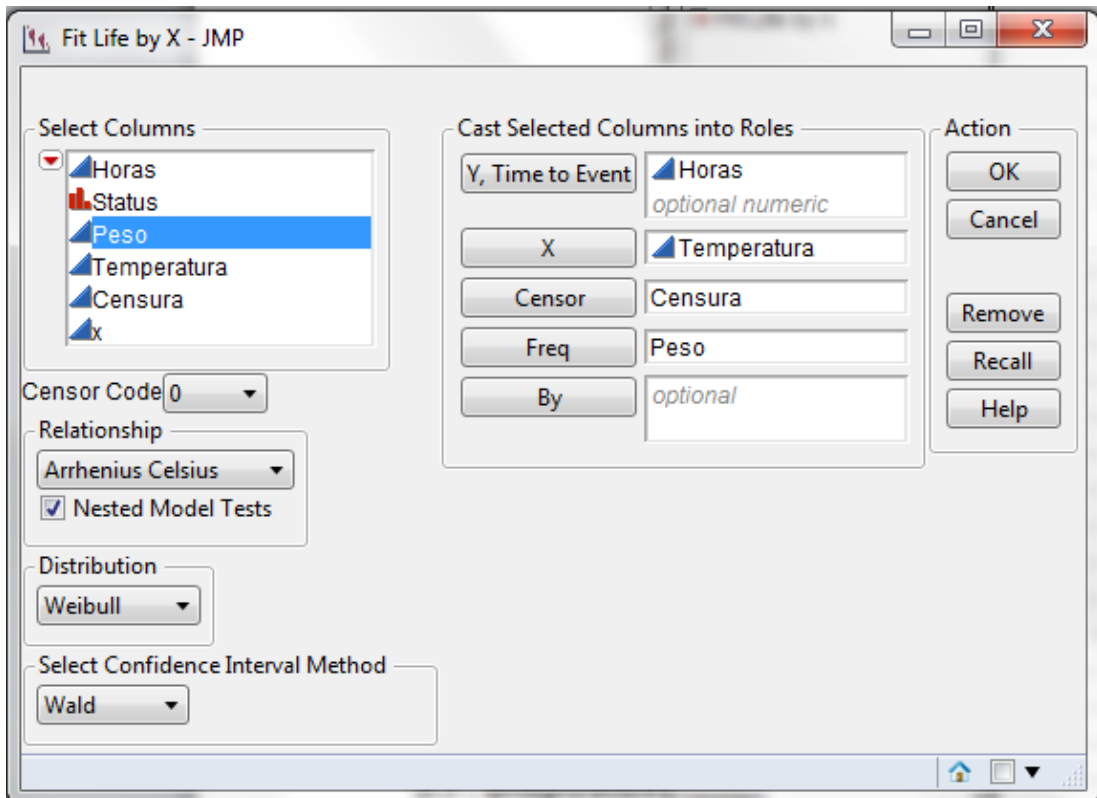


Figura 16 – Tabela exemplo da análise dos dados

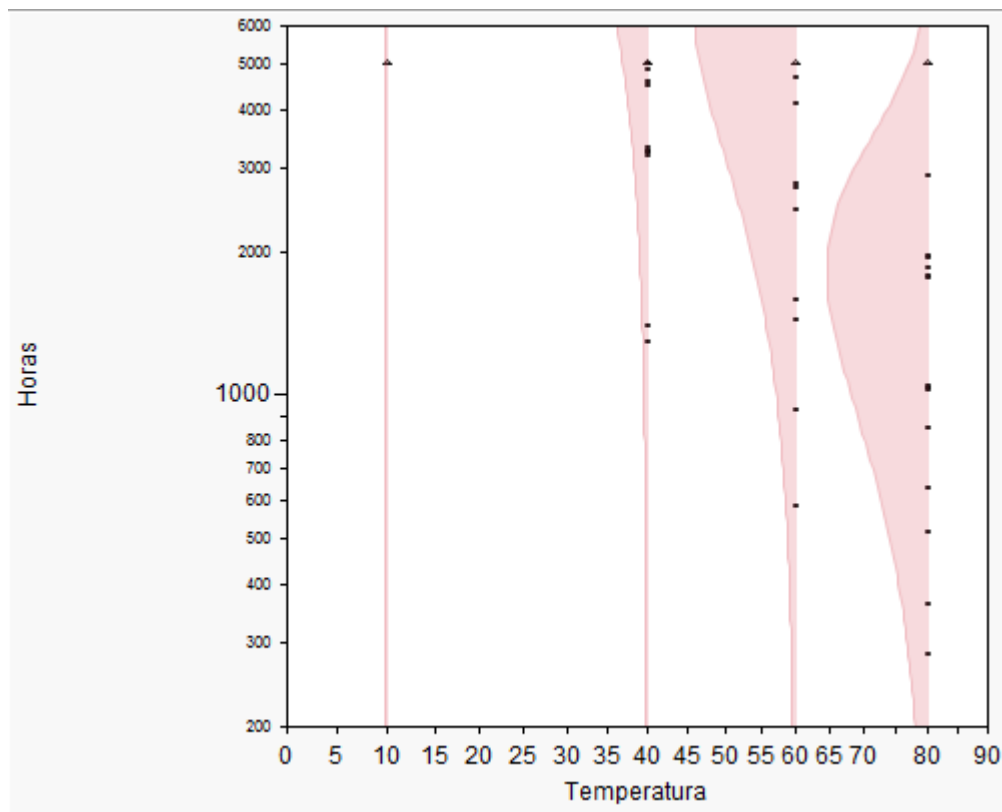


Figura 17 – Distribuição Weibull das variáveis do exemplo.

A distribuição Weibull dos dados é apresentada na Figura 17, o perfil de aceleração calculado é de 73,98733 para a distribuição Weibull e é mostrado na Figura 18.

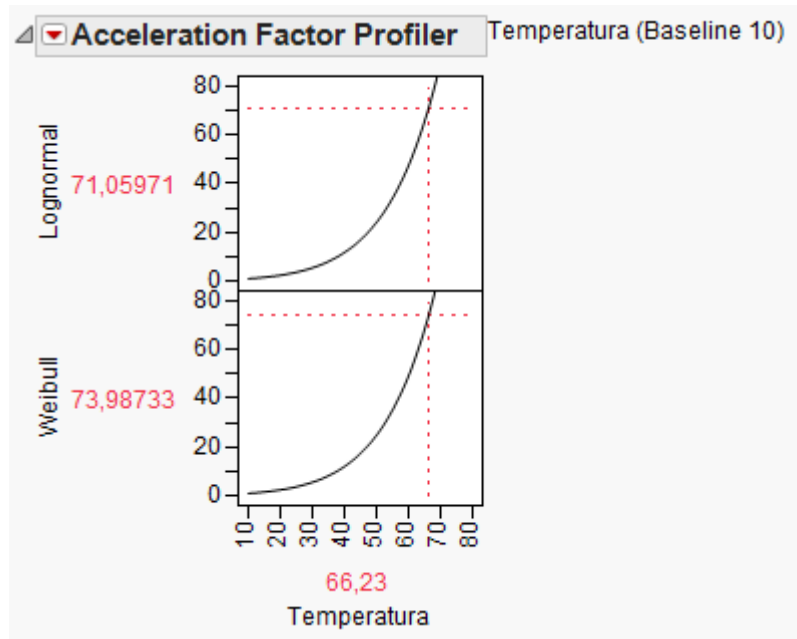


Figura 18 – Fator de aceleração.

O programa também pode calcular a função de densidade de falha. Os parâmetros e a função são mostrados na Figura 19. Essa função de densidade de falha é própria do modelo Arrhenius Celsius utilizado na análise do exemplo. Diferentes modelos possuem diferentes funções. A função é calculada tendo relação somente com a Temperatura nesse caso.

Parameter	Estimate	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
$\beta_0$	-13,31683	3,3131294	-19,81045	-6,823218
$\beta_1$	0,63380	0,0968873	0,44390	0,823694
$\sigma$	0,70698	0,1028819	0,50534	0,908628

$$\mu = -13,31683 + \frac{(0,6337984 * 11605)}{(Temp + 273,15)}$$

Figura 19 – Calculo da função de densidade de falha.

Percebe-se que os parâmetros possuem valores diferentes para abaixo de 95% e acima de 95% o que corresponde que a falha pode ocorrer muito mais facilmente nos momentos próximos do fim do período analisado.



## 5.7: Dispositivos de teste desenvolvidos

Durante a realização dos testes de confiabilidade foi necessário desenvolvimento de dois dispositivos de teste. Um deles foi um circuito de acionamento remoto ativado por Arduino, para o acionamento de cargas AC.

O circuito desenvolvido apresenta uma lógica bem simples, com a utilização de um relé como chave do circuito e pode ser programado para assumir comportamentos controlados tanto por lógicas temporais quanto por estímulos externos que podem ser processados pelo Arduino. Sua alimentação é feita apenas pelo Arduino e seu esquema é mostrado na Figura 20.

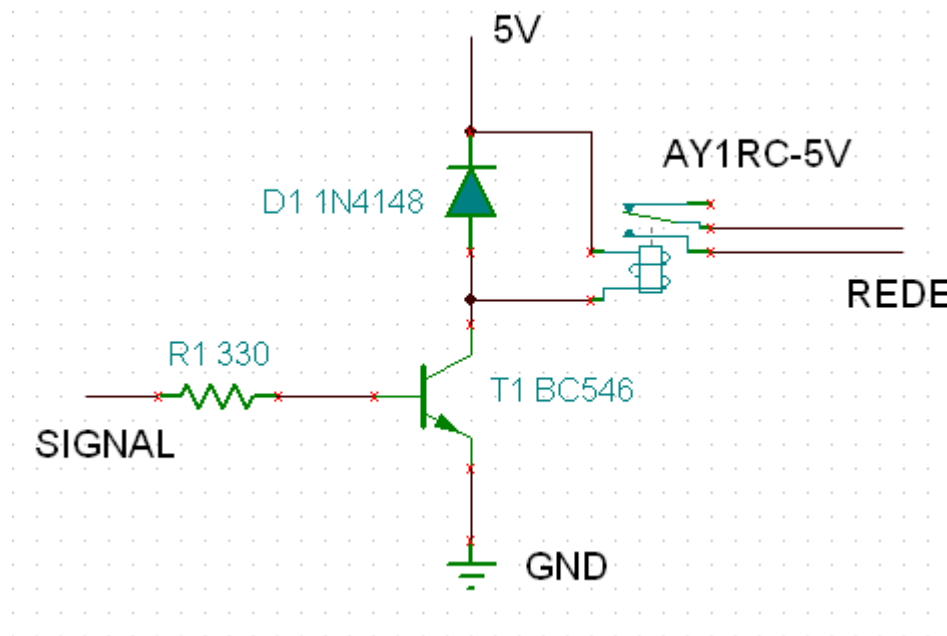


Figura 20 – Circuito de chaveamento acionado por Arduino.

As conexões de 5 V e GND devem ser feitas nos pinos correspondentes do Arduino e o sinal recebido vem de uma das portas de saída digitais.

O outro dispositivo desenvolvido foi uma câmara de aquecimento controlada por LABVIEW e desenvolvida utilizando um modelo de fogão protótipo com um sistema de controle externo e comunicação serial.

A controle utilizado é de modo on-off com histerese regulável pela interface de utilização. A interface de utilização está exposta na Figura 21.

O sistema é composto de duas placas diferentes, consistindo de uma placa de controle e uma placa de potência. A placa de controle conta com a comunicação com o computador através de comunicação serial RS-232 e possui um micro controlador PIC16F877A para o processamento dos sinais e ativação dos atuadores da placa de potência. A placa de controle é alimentada por uma fonte de 12 V chaveada e é também a placa que recebe a informação dos medidores acoplados a câmara.

A placa de potencia é alimentada diretamente pela placa de controle e tem o papel de atuador do sistema. Ela conta com três reles para o chaveamento dos circuitos das resistências. Futuros desenvolvimentos incluem um controle de umidade, já representado na interface e de ativação do ventilador interno da câmara.

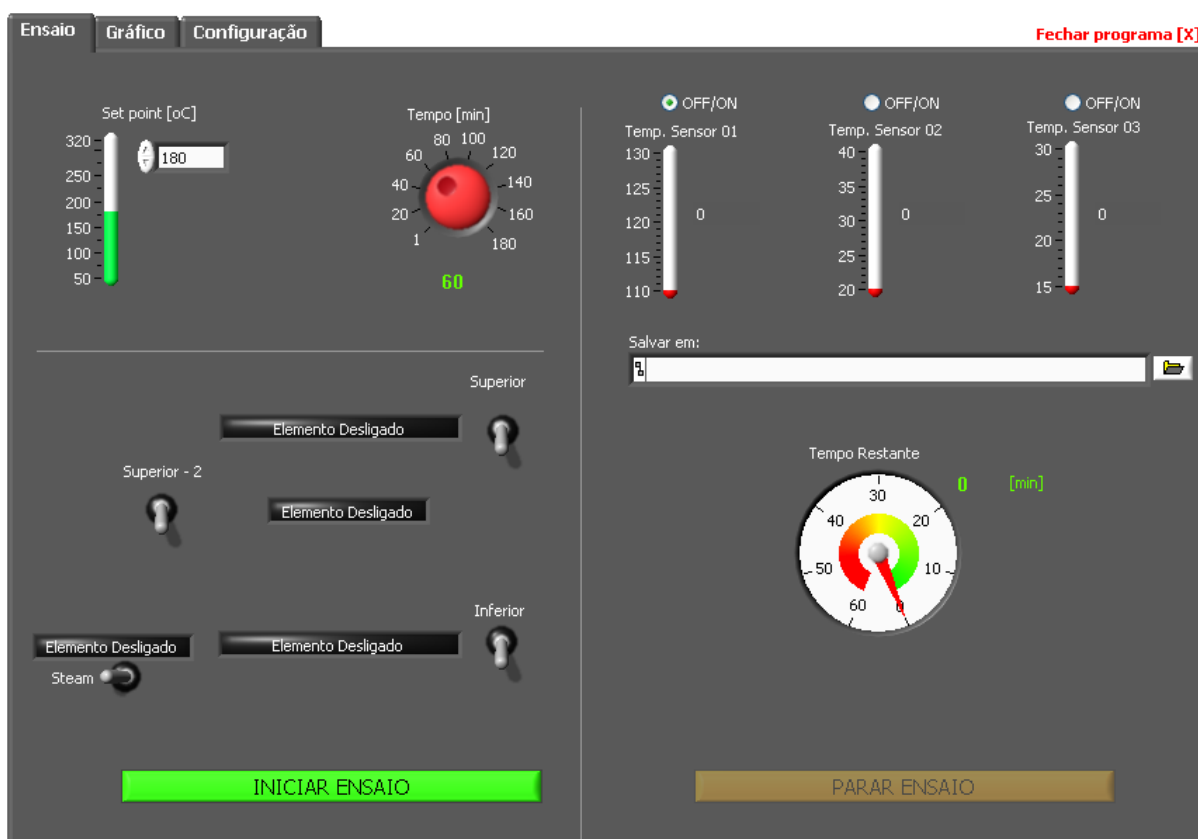


Figura 21 – Interface de comando da câmara de temperatura.

A câmara é capaz de chegar e manter uma temperatura de até 300 graus Celsius quando todas as resistências estão habilitadas. O sensor que serve de medidor pode ser escolhido deixando a oportunidade da utilização dos outros

sensores como aquisição de dados. Somente um sensor pode ser selecionado com o medidor do controle.

É permitida a execução de ensaios que durem um tempo que for regulado na interface. Tanto o tempo de ensaio quanto o valor de temperatura de set point podem ser modificados manualmente durante o teste.

A câmara exibe um gráfico do ensaio quando é acessada a aba Gráfico e a histerese e porta de comunicação com o computador pode ser configurados na aba Configuração.

O sistema também conta com um log da leitura dos sensores que é criado quando o teste é iniciado, atualizado de acordo com o tempo configurado na aba Configuração e salvo no destino mostrado na caixa Salvar em.

## Capítulo 6: Resultados

Serão utilizados como exemplo os resultados obtidos através de um comportamento simulado de um Teste de Vida Acelerado de lâmpadas de 127 V com o modo de falha selecionado de rompimento do filamento.

As amostras foram expostas a diferentes níveis de tensão e submetidas à temperatura constante de 200 graus Celsius durante o ensaio. O ciclo utilizado compreende de um ciclo on-off em que as lâmpadas são ligadas por 30 segundos e desligadas por 30 segundos.

O teste prosseguiu ininterruptamente até que fosse constatada falha em todas as amostras. Foram analisadas um total de 40 amostras sendo que cada grupo de 10 amostras estava submetido a uma tensão diferente que variava de 150 V até 180 V com o acréscimo de 10 V a cada conjunto de amostras.

Os eventos significativos estão expressos na Tabela 5.

Como pode ser constatado, apenas a diferença de 10 V em cada grupo de amostras é capaz de diminuir significativamente a vida do componente, sendo que o limite superior de 180 V foi selecionado após uma rodada de teste com as amostras em 190 V e a constatação que os dados gerados dessa rodada não apresentariam informações suficientes para a determinação das equações do sistema.

Tabela 5 – Aquisição dos dados.

	Tempo (min)	Status	Tensao (V)	Peso
1	969	Falhou	180	1
2	1007	Falhou	180	1
3	1244	Falhou	180	1
4	1278	Falhou	180	1
5	1372	Falhou	180	1
6	1408	Falhou	180	1
7	1577	Falhou	180	1
8	1669	Falhou	180	1
9	1723	Falhou	180	1
10	1860	Falhou	180	1
11	3102	Falhou	170	1
12	3205	Falhou	170	1
13	3376	Falhou	170	1
14	3455	Falhou	170	1
15	3469	Falhou	170	1
16	3621	Falhou	170	1
17	3890	Falhou	170	1
18	4022	Falhou	170	1
19	4359	Falhou	170	1
20	4496	Falhou	170	1
21	5970	Falhou	160	1
22	6003	Falhou	160	1
23	6119	Falhou	160	1
24	6454	Falhou	160	1
25	6792	Falhou	160	1
26	7045	Falhou	160	1
27	7456	Falhou	160	1
28	7899	Falhou	160	1
29	8502	Falhou	160	1
30	8947	Falhou	160	1
31	21617	Falhou	150	1
32	22543	Falhou	150	1
33	25766	Falhou	150	1
34	27980	Falhou	150	1
35	29544	Falhou	150	1
36	31002	Falhou	150	1
37	32455	Falhou	150	1
38	32699	Falhou	150	1
39	34982	Falhou	150	1
40	35703	Falhou	150	1

A seguir são configurados os parâmetros para análise, percebe-se que aqui o modelo utilizado é o de tensão o que corresponde com o caso exemplo estudado. A configuração esta exposta na Figura 22.

Através da utilização do software JMP para a análise dos dados a seguinte curva de distribuição Weibull obtida é mostrada na Figura 23.

Select Columns

- Tempo (min)
- Status
- Tensao (V)
- Peso

Censor Code

Relationship

Voltage

Nested Model Tests

Distribution

Weibull

Select Confidence Interval Method

Wald

Cast Selected Columns into Roles

Y, Time to Event: Tempo (min) *optional numeric*

X: Tensao (V)

Censor: *optional*

Freq: Peso

By: *optional*

Action

OK

Cancel

Remove

Recall

Help

Figura 22 – Configuração da análise.

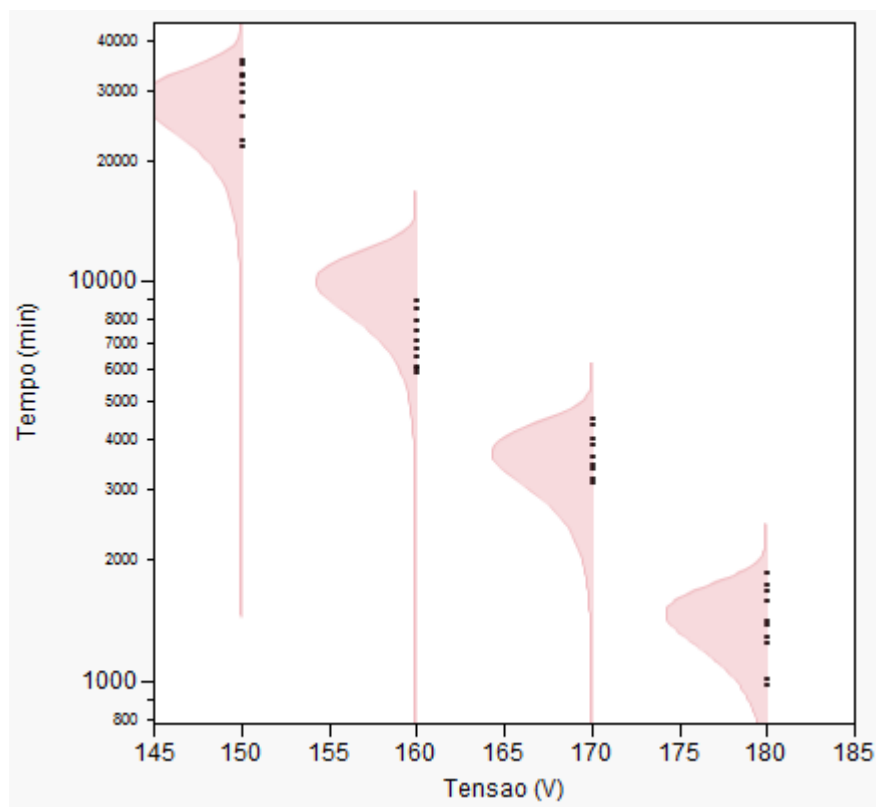


Figura 23 – Curva resultante da distribuição Weibull dos dados obtidos.

Através da curva o programa determinou os parâmetros e o modelo da equação densidade da falha relativa ao modelo de tensão, mostrada na Figura 24.

Parameter	Estimate	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
$\beta_0$	91,90382	1,9465093	88,08874	95,71891
$\beta_1$	-16,29324	0,3813113	-17,04060	-15,54588
$\sigma$	0,18521	0,0230838	0,13997	0,23046
$\mu=91,90382-16,29324*\text{Log}(\text{Tensao (V)})$				

Figura 24 – Equação da densidade da falha.

O modelo da equação de densidade da falha mostrada na Figura 24, é exposto de uma forma genérica[ 8] abaixo:

$$\mu=\beta_0+\beta_1\log(V) \quad (1)$$

Com a equação de densidade e seus parâmetros determinados, pode-se então determinar a relação entre o tempo de vida e a tensão para estimar o tempo de vida do componente quando submetido a uma tensão diferente da nominal.

Nota-se que os parâmetros têm valores diferentes para acima de 95% e abaixo de 95%, o que caracteriza uma mudança de comportamento entre essas duas regiões. Como  $\beta_0$  e  $\beta_1$  são os parâmetros que contribuem diretamente para o aumento da taxa de falha, percebe-se então que nos momentos finais, acima do tempo de 95% o componente entra na área de maior probabilidade de falha.

Esse fator é observado tanto pelos pontos expressos na distribuição da Figura 23, quando pela equação de densidade da falha exposta na Figura 24.

Já o contrário, isto é, a densidade de falha para pontos abaixo de 95% do tempo possui um valor menor, o que acarreta em uma probabilidade menor da chance da ocorrência da falha, devido aos valores menores assumidos por  $\beta_0$  e  $\beta_1$ .

Para a determinação do modelo matemático através da relação com o modelo parametrizado da relação inversa de potência [ 8], consideramos a estimativa calculada a fim de diminuir o erro no cálculo do tempo.

A determinação do modelo se dá da seguinte forma, primeiro relacionamos a equação de densidade da falha com a relação inversa de potência descrita na Tabela 2 da seguinte forma:

Primeiramente utilizamos o modelo calculado pelo JMP e exposto em (1).

Depois aplicamos os parâmetros calculados pelo JMP no modelo de densidade de falha mostrado abaixo:

$$\mu = \left(\frac{V}{V_u}\right)^{-\beta_1} \quad (2)$$

Para retirarmos a relação com o tempo levamos em consideração que  $\mu = t_u/t$  e quando aplicamos a equação acima e isolamos o t obtemos o seguinte resultado:

$$t_u = t \left(\frac{V}{V_u}\right)^{-\beta_1} \quad (3)$$

Onde:

$t_u$  = tempo de vida na tensão nominal.

t = tempo de vida na tensão estressada.

$V_u$  = tensão nominal.

V = tensão estressada.

$\beta_1 = -16,29324$ .

A equação (3) será utilizada na parte da norma relativa ao tempo de vida necessário para a aprovação, após a sua validação que pode ser realizada com a aplicação de um novo teste ALT em um valor não utilizado nos testes anteriores para verificar a eficácia da equação.

Para a determinação do tempo de vida necessário para o componente leva-se em conta o tempo de vida médio dos produtos, a frequência da utilização do componente pelo produto e chega-se na conclusão de que o componente deve suportar:

$$T_{vm} = T_{vp} C_t T_c$$

Onde:

$T_{vm}$  = Tempo de vida médio.

$T_{vp}$  = Tempo de vida do produto.

$C_t$  = Números de ciclo no tempo de vida do produto.

$T_c$  = Tempo de um ciclo.



Se esse valor for inferior ao valor estabelecido em uma das normas internacionais, tem precedência o valor da norma internacional, mas se o valor for superior esse valor deve ser utilizado ao invés da norma.

Em casos onde não existem normas escritas descrevendo a situação então esse valor calculado é aplicado.

Com a introdução desses novos dados as normas internas então, abrem-se as possibilidades de avaliações mais corretas de novos componentes oriundos de novos fornecedores.

Para a modificação da norma, agora que existem resultados, compara-se novamente com o que está definido na norma, se existe diferença, a parte relativa ao ensaio é substituída. Por exemplo, agora que possuímos o modelo matemático de tempo de vida para lâmpadas incandescentes de 127 V e verificamos que a curva descrita na norma não corresponde a curva descrita na norma. Então substituímos a seção da norma com os resultados obtidos através do teste realizado.

Outro ponto importante na revisão da norma é descrever exatamente como se realiza o procedimento de teste, a fim de que ele possa ser reproduzido como método de teste do fornecedor para a avaliação da conformidade com a norma. Essa descrição deve contar com a descrição dos ciclos, quantidade de amostras, margem de variação para os resultados obtidos e se necessário diagramas sobre os dispositivos e setup do teste.

A adição de novos fornecedores possui um efeito positivo dentro da dinâmica da empresa uma vez que com a adição desses novos fornecedores é gerada uma competição que impacta em custos menores e melhor qualidade de componentes.

## Capítulo 7: Conclusões e Perspectivas

Através dos estudos da confiabilidade podem-se diminuir os custos e melhorar a qualidade dos produtos. Com a aplicação dos métodos de testes acelerados também se cria uma melhora no Time to Market.

A organização através da utilização das ferramentas como o Mapa de Raciocínio, Mapa do Produto e Mapa do Processo permitem uma visão global do processo e com isso a geração de novas ideias para a solução do problema gerado através da necessidade da revisão da norma, que é o objetivo central do trabalho.

O método utilizado produz resultados, mas muitas vezes esses resultados demoram a ser conseguidos. Principalmente quando são realizados ensaios em componentes de grande tempo de vida. Não existe uma forma confiável de realizar testes muito acelerados sem a perda significativa da informação e de grandes imprecisões no modelo.

O pensamento paralelo permite que várias áreas e modos de falha dos componentes sejam analisados separadamente, mas ao mesmo tempo, isso é convertido em um grande acréscimo de tempo que pode ser utilizado durante as etapas de projeto do produto.

Garantindo a confiabilidade em nível de componentes, pode-se aumentar a confiabilidade do produto como um todo, resultando em ganhos em longo prazo, oriundos da menor frequência de chamados de campo e de manutenção durante a garantia do produto.

O método utilizado permitiu a geração de conhecimento baseado em dados reais, e esses dados foram utilizados na revisão da norma para a determinação de novas maneiras de realizar os testes de avaliação e de maneiras de determinar o atendimento da conformidade de uma maneira mais rápida, e com essa diminuição do tempo resultando em diminuição de custo.

## Bibliografia:

- [ 1] G. J. Hahn, N. Doganaksoy e W. Q. Meeker, “Melhoria da Confiabilidade – Questões e Ferramentas.
- [ 2] D. Stirzaker “Elementary Probability”, capítulos 7 a 9, 2003.
- [ 3] D. Zwillinger e S. Kokoska, “CRC Standard Probability and Statistics Tables and Formulae”, CRC press p. 49, 2010.
- [ 4] C. Hilder, D. Sanders e B. Ross, “Quality Engineering 12(1)”, 2000.
- [ 5] D. Sanders e B Ross, “Considerations for Six Sigma Project Selection”, Six Sigma Associates Training Project Selection.
- [ 6] D. Sanders e G. Clark “O Papel dos Mapas de Raciocínio para Promover o Raciocínio Crítico nas Atividades Empresariais”
- [ 7] M. Silverman “HALT vs. ALT, When to use which Technique”
- [ 8] L. A. Escobar e W. Q. Meeker “A Review of Accelerated Test Models”, Statistical Science, Vol. 21, No. 4, 2006.
- [ 9] W. B. Nelson “Accelerated Testing Statistical Models”, Wiley Series in Probability and Statistics
- [ 10] J. Zeb, G. Kalsoom e N. Muhammad, “Accelerated Life Testing of Electronic Components”, Proceedings of International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology, 2011.
- [ 11] D. Capaldo, V. Guerrero, H. Rozenfeld, “FMEA (Failure Model and Effect Analysis)”, disponível em <[http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos\\_port/pag\\_conhec/FMEAv2.htm](http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/FMEAv2.htm)>. Acesso em 27 fev. 2014.