



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Modelagem da confiabilidade de produtos eletrônicos a
partir de dados de garantia**

Gustavo Silveira de Oliveira

Itajubá, março de 2013

Dissertação de Mestrado	Gustavo Silveira de Oliveira	2013
--------------------------------	-------------------------------------	-------------



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Gustavo Silveira de Oliveira

**Modelagem da confiabilidade de produtos eletrônicos a
partir de dados de garantia**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de *Mestre em Engenharia de Produção*.

Orientador: Prof. João Batista Turrioni, Dr.

Itajubá
2013

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

O48m

Oliveira, Gustavo Silveira de

Modelagem da confiabilidade de produtos eletrônicos a partir
de dados de garantia / Gustavo Silveira de Oliveira. -- Itajubá,
(MG) : [s.n.], 2013.

90 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. João Batista Turrioni.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Confiabilidade. 2. Modelagem. 3. Dados de garantia. I. Tur_
rioni, João Batista, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III.
Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Gustavo Silveira de Oliveira

**Modelagem da confiabilidade de produtos eletrônicos a
partir de dados de garantia**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 06/03/2013, conferindo ao
autor o título de mestre em Engenharia de Produção

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João Batista Turrioni (Orientador)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches da Silva

Prof. Dr. Ricardo Coser Mergulhão

Itajubá
2013

*À minha mãe Alenir Silveira de Oliveira, meu pai João Tarcisio de
Oliveira Jr e minha irmã Lilian Silveira de Oliveira.*

AGRADECIMENTOS

Para a realização deste trabalho necessitou-se de estudos, pesquisas e determinação, porém, sem o auxílio de diferentes pessoas, cada qual do seu jeito, este não estaria concluído. Durante todo o tempo, tais pessoas se tornaram fundamentais e contribuíram em tudo para com este pesquisador, sendo que não há espaço suficiente para agradecer a todos, porém, aqui, lembro de alguns sempre presentes em minha vida.

Primeiramente agradeço a Deus, a oportunidade e a graça e concluir este trabalho. Preciso dizer-lhe que senti a tua presença na minha vida em todos os momentos durante esses dois anos, nos piores e nos melhores. Agradeço por ter me dado a capacidade e a força de vontade necessárias para concluir esta etapa.

Agradeço a minha família, que é base de toda minha formação, é sustento nos momentos de queda e é tranquilidade nos momentos de paz. Agradeço o apoio e o suporte das pessoas que mais fazem parte e exercem influencia sem igual na minha vida.

Agradeço aos professores, mestres do conhecimento, que agregaram tanto valor ao nosso próprio conhecimento ao longo desses dois anos de aprendizagem contínua.

Agradeço aos colegas de mestrado, que por muitas vezes me guiaram em minhas dúvidas e me ajudaram a chegar a este ponto, em especial agradeço a Michele de Santana Carmelossi, José Junior, Paulo Henrique Campos e Julian Lopes pela companhia e amizade durante toda esta jornada.

Agradeço também os amigos Paulo Roberto Formigoni, Danillo Lopes Nunes, Rober, João Carvalho e Amanda Affá por me ajudarem a continuar caminhando próximo a Deus e me ajudarem a segui nesta vida cada vez mais próximo do céu, motivo único da nossa existência.

Por fim, sou grato a CAPES, UNIFEI, e CNPq pelo incentivo financeiro e estrutural para a realização deste trabalho, além das outras empresas e profissionais que fizeram parte do mesmo.

“Toda sabedoria vem do Senhor Deus, ela sempre esteve com ele”

Ecle 1,1

RESUMO

O estudo de confiabilidade teve sua origem na área militar em meados de 1950, período pós-guerra, nos Estados Unidos e sua importância vem crescendo com o passar dos anos. Hoje se encontram estudos de confiabilidade nas mais diversas áreas tais como indústria química, no setor de energia e no setor de transportes. Estudos de confiabilidade tem importância fundamental para as empresas nos dias de hoje e ocupam posição estratégica em boa parte das organizações. Primeiramente porque a confiabilidade do produto tem se tornado atualmente, uma característica analisada pelo cliente na hora da compra. O oferecimento de garantias tem se tornado uma característica diferencial em produtos dos mais diversos ramos. Em segundo lugar, porque a definição de um período de garantia não compatível com a confiabilidade do produto pode gerar sérios prejuízos financeiros a empresa fabricante. Pode-se afirmar então que a confiabilidade dos produtos oferecidos tem impacto na imagem do fabricante em relação ao seu cliente, e impacto nos custos organizacionais, tornando esta característica, estratégica em grande parte das empresas. Este trabalho objetivou o estudo da confiabilidade e os métodos para modelagem da confiabilidade. O objetivo foi propor um modelo matemático que descreve-se a confiabilidade de um produto eletrônico com o passar do tempo. Utilizou-se de dados de falha coletados no período de garantia e uma série de técnicas para que a modelagem seja feita com sucesso. O trabalho também abordou dificuldades de se trabalhar com dados de campo, principalmente dados de garantia e propõe soluções para sobrepor esses problemas com base na literatura existente sobre o tema. Um exemplo prático é conduzido para ilustrar essas dificuldades e as técnicas utilizadas para solucioná-las. Como resultados, podemos dizer que o modelo matemático foi definido com sucesso e todos os testes estatísticos foram feitos. Apesar das dificuldades encontradas, havia sempre na literatura alguma solução proposta. O trabalho, porém, questionou algumas das técnicas utilizadas tal como o uso de opinião de especialistas no modelo e contribui com recomendações para próximos estudos em confiabilidade.

Palavras-Chave: Confiabilidade, modelagem, dados de garantia, produtos eletrônicos.

ABSTRACT

The reliability study had its origins in the military in the mid-1950s, the postwar period, in United States and its importance has grown over the years since then. Today we can find reliability studies in many fields such as chemical industry, in the energy sector and in the transport sector, to name a few examples. Nowadays, reliability studies have great importance in business area and stand in a strategic position in most organizations. Primarily because product's reliability has become a feature considered by the customer at purchase time and providing warranties has become a good way to attract these clients. Secondly, when the warranty period given by the supplier is not compatible with product's reliability, there is a good possibility for the product to fail financially. Then it can be assured that product's reliability have impact on the manufacturer's image and organizational costs. This work comes to meet the need for further studies on reliability and methods to model product's reliability. The main objective of this work is to generate a mathematical model that describes an electronic product's reliability. Using failure data collected during the warranty period and a number of techniques, it is possible to access reliability information. The dissertation also discusses difficulties of working with field data, especially warranty data and proposes solutions to overcome these problems based on existing literature on the subject. A practical example is conducted to illustrate the difficulties and the techniques used to solve them. The work finally, questions some of the techniques such as the use of expert opinion in the model and helps with recommendations for future studies on reliability.

Keywords: reliability, modeling, warranty data, electronic products

Lista de Ilustrações

Figura 1.1 - Evolução de Citações em Confiabilidade	18
Figura 2.1 - Variação das taxas de falha dentro do ciclo de vida do produto.....	24
Figura 2.2 - Gráficos Hipotéticos das quatro principais medidas de confiabilidade.....	25
Figura 2.3 - Tipos de degradação - adaptado de Oliveira e Colosimo (2004).....	37
Figura 3.1 - Método de reamostragem combinado com uso de distribuições não paramétricas - adaptado de Marcorin e Abackerly (2006)	55
Figura 3.2 - Distribuição hipotética de tempos de falha provenientes de dados de garantia sem censura	57
Figura 3.3 - Distribuição Hipotética de tempos até falha provenientes de dados de garantia com censura	58
Figura 3.4 - Modelo utilizando opinião de especialistas	59
Figura 3.5 - Histograma de frequência de falhas típico de um modo de falha prematuro	61
Figura 3.6 - Histograma de frequência de falhas típico de um modo de falha por desgaste	62
Figura 3.7 - Histograma de frequência de falhas na presença de ao menos dois modos de falha distintos.....	62
Figura 4.1 - Fases do método Modelagem e Simulação - adaptado de Bertrand e Fransoo (2002)	65
Figura 4.2 - Histograma dos tempos até falha coletados no período de garantia	69
Figura 4.3 - Teste de adequação para principais distribuições de probabilidade	69
Figura 4.4 - Teste de adequação - outras distribuições.....	70
Figura 4.5 - Teste de adequação para o modo de falha "Display Intermitente" - principais distribuições.....	72
Figura 4.6 - Teste de adequação para o modo de falha "Display Intermitente" - outras distribuições.....	72
Figura 4.7 - Validação da opinião de especialista	74
Figura 4.8 - Teste de adequação da opinião de especialistas.....	76
Figura 4.9 - Parâmetros da distribuição de weibull - opinião de especialistas.....	77
Figura 4.10 - Histograma de dados completos	77
Figura 4.11 - Teste de adequação dos dados completos.....	79
Figura 4.12 - Curva de confiabilidade do produto	80
Figura 4.13 - Função densidade de probabilidade acumulada do produto	80
Figura 4.14 - Teste de adequação dos tempos médios até falha.....	81
Figura 4.15 - Distribuição dos tempos médios até falha calculados, com intervalos de confiança.....	81

Sumário

1. Introdução.....	14
1.1. Confiabilidade.....	14
1.2. Justificativa	17
1.3. Objetivos.....	19
1.4. Limitações do trabalho.....	19
2. Confiabilidade	21
2.1. Breve histórico e definição	21
2.2. Medidas de Confiabilidade	22
2.3. Estimacão da Função Confiabilidade	26
2.3.1. Estimacão utilizando modelos paramétricos	27
2.3.2. Estimacão utilizando modelos não-paramétricos	30
2.4. Confiabilidade e a manutencão de equipamentos.....	34
2.5. Estudos de degradacão de componentes.....	36
2.6. Testes de Vida Acelerados.....	40
2.6.1. Modelo de Aceleracão de Arrhenius	42
2.6.2. Modelo de Aceleracão de Eyring	42
2.6.3. Modelo de Aceleracão da lei da potência inversa	43
2.6.4. Modelos combinados de aceleracão	43
3. Confiabilidade e garantia de produtos.....	44
3.1. Confiabilidade para desenvolvimento de produtos.....	44
3.2. Modelos de garantia de produtos	47
3.3. Dados de campo.....	49
3.3.1. Confiabilidade sem dados de falha.....	52
3.3.2. Confiabilidade com poucos dados de falha	53
3.3.3. Confiabilidade com alta censura de dados	56
3.3.4. Presença de muitos modos de falha em estudos de confiabilidade	60
4. Análise de dados para modelagem de confiabilidade: um exemplo	64
4.1. Metodologia de pesquisa	64
4.2. Caracterizacão do sistema.....	66
4.3. Coleta de dados de falha em garantia	66
4.4. Análise preliminar dos dados.....	68

4.5. Análise dos modos de falhas predominantes	70
4.6. Incluindo a opinião de especialistas no modelo.....	73
4.7. Cálculo da confiabilidade do produto	78
5. Conclusões	82
6. Referências Bibliográficas	88
Anexo 1	92

1. Introdução

1.1. Confiabilidade

O estudo de confiabilidade desenvolveu-se desde meados de 1950, quando o termo confiabilidade foi utilizado pela primeira vez, e o tema tem evoluído em diversos setores. Nos dias atuais, fala-se em confiabilidade não só na área militar, de onde surgiu, mas em uma gama de aplicações diferentes e nos mais diversos ramos industriais.

Atualmente notam-se aplicações do estudo de confiabilidade no setor energético, em linhas de transmissão, em linhas férreas, aplicada em manutenção de equipamentos em fábricas dos mais diversos setores da economia e aplicada no estudo de componentes de produtos mais complexos.

No seu surgimento, a confiabilidade foi definida como a probabilidade da não ocorrência de uma falha e tal conceito continua mesmo após o passar do tempo, apesar da evolução do tema (MURTHY, 2007). Confiabilidade usualmente é associada a uma distribuição de probabilidade que tem o intuito de expressar matematicamente ou modelar o que ocorre na realidade com os objetos estudados..

A modelagem pode ser paramétrica ou não paramétrica. Modelos paramétricos exigem a pré-suposição de uma distribuição de probabilidades que melhor se adequa aos dados em estudo. Essa pré-suposição pode ser feita com base na literatura existente sobre o tema ou através de um teste de adequação ou *fitting* dos dados ao modelo suposto. Modelos não paramétricos são mais flexíveis, não seguem uma distribuição com formato já definido, mas contém limitações que o modelo paramétrico não enfrenta, tais como impossibilidade de extrapolação das conclusões sobre o modelo e problemas para calcular um intervalo de confiança aceitável. Detalhes sobre a modelagem paramétrica e não paramétrica também são encontradas no capítulo 2.

A escolha da aplicação de uma modelagem paramétrica ou não paramétrica da função confiabilidade é feita independentemente do objeto de estudo ou das fontes de dados citadas e depende muito mais da distribuição de frequência de falhas do que da aplicação propriamente dita (MARCORIN e ABACKERLI, 2006).

Uma aplicação de destaque dentro do estudo de confiabilidade acontece no setor de manutenção de equipamentos onde a confiabilidade encontrou um ambiente que favoreceu seu desenvolvimento e crescimento. Atualmente estudos de confiabilidade são conduzidos para determinar a probabilidade de um equipamento falhar em um determinado tempo “t” e com essa informação fazer todo o planejamento das manutenções centradas na confiabilidade calculada.

Uma das abordagens para o estudo da confiabilidade voltada para a função manutenção é a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC). A adoção dessa prática tem como principal objetivo reduzir custos e melhorar o planejamento e eficácia da função manutenção através de uma análise cuidadosa dos mecanismos e dos dados históricos de falha dos equipamentos em estudo. (SELVIK e AVEN, 2011). A incorporação do estudo de confiabilidade como área estratégica das organizações reforça importância do estudo do tema confiabilidade.

Na manutenção ou mesmo no estudo de confiabilidade de produtos onde o modo de falha predominante é o desgaste, a modelagem da confiabilidade pode fazer uso de dados de degradação ou desgaste de componentes. O uso de dados de degradação é importante nos casos onde a falha não acontece abruptamente ou ainda nos casos onde a falha não ocorre, mas o desempenho da unidade em estudo fica comprometido com o passar do tempo. É o caso particular dos trilhos de trem, onde a falha pode demorar muito tempo para ocorrer, mas um desgaste excessivo nos trilhos pode comprometer a segurança da linha férrea. Nesses casos a falha deve ser declarada como um desempenho abaixo do especificado ou alguma grandeza monitorada que acaba, por desgaste, saindo do intervalo admissível para aquela operação.

Estudos de degradação têm sido muito utilizados na parte de componentes mecânicos visto que estes apresentam o desgaste como um dos principais modos de falha. Em produtos eletrônicos, por exemplo, onde a falha geralmente não ocorre por desgaste, é mais difícil utilizar dados de degradação. Existem casos onde a falha é instantânea e o desgaste (ou outra medida de desempenho) não pode ser monitorada com o passar do tempo, nesses casos o uso de dados de degradação fica comprometido.

A modelagem de confiabilidade nos casos onde a falha é instantânea deve se basear na análise de dados de falha. Em outras palavras, espera-se que a falha ocorra, mede-se o tempo até cada falha e faz-se posteriormente uma análise dos tempos até falha coletados. Essas falhas podem ser aceleradas em laboratório, de modo a acontecerem mais rapidamente ou podem ocorrer nos produtos em uso, já nas mãos do consumidor final. As falhas geralmente

são aceleradas como forma de antecipação de modo que as falhas não ocorram nas mãos do cliente, gerando impacto negativo à imagem da empresa.

Existem aspectos positivos e negativos de se utilizar dados de falhas aceleradas. O principal aspecto negativo é que o produto não estará funcionando em condições reais e sim em condições extremas, o que automaticamente insere uma parcela de erro no modelo. Além deste motivo, a aceleração de uma falha exige laboratório específico de testes de confiabilidade, o que pode exigir investimentos em equipamentos, infraestrutura e pessoal qualificado para condução dos testes além do custo da própria unidade testada, se o teste for destrutivo.

Dentre os aspectos positivos destaca-se a possibilidade de o estudo de confiabilidade ser feito antes de o produto ser efetivamente desenvolvido, em estágios do processo de desenvolvimento. Isso é importante para o processo de desenvolvimento, pois contribui para o desenvolvimento de um produto confiável antes de se pensar nos processos produtivos que realizarão esse produto, evitando assim custos posteriores com redesenho da linha ou dos processos produtivos. Quando falhas no projeto são descobertas depois do lançamento do produto no mercado ou mesmo depois do desenho dos processos produtivos, os custos para alteração desse projeto podem ser mais expressivos.

Atualmente a maioria dos produtos eletrônicos tais como celulares e computadores passam por testes acelerados de *burn in* antes de sua liberação para venda. Componentes mecânicos também são submetidos a testes mecânicos antes de sua comercialização como forma de garantia que o produto vendido terá a confiabilidade esperada, não gerando assim custos com reposição de peças de produtos em garantia.

A garantia, por sua vez, é oferecida para proporcionar ao cliente uma segurança com relação à confiabilidade do produto. Uma garantia maior significa para o cliente uma segurança de que o produto não vai falhar, e, se falhar, ele será repostado ou consertado sem nenhum custo adicional ao cliente.

Quando a falha não é acelerada, podem-se utilizar dados provenientes das falhas ocorridas durante o período de garantia. A utilização de dados de garantia é uma das principais fontes de dados para análise de garantia, porém a utilização de tais dados deve ser conduzida de maneira cuidadosa de modo a superar as dificuldades de se trabalhar com dados de garantia.

A principal dificuldade de se trabalhar com dados provenientes de garantias é a alta censura dos dados. Os dados de garantia geralmente são considerados censurados a direita porque muitos dos produtos analisados não falham antes de completarem o período de garantia. Em casos extremos de censura, nenhuma falha é observada durante o período de observação proposto, sendo necessários métodos alternativos para obtenção da confiabilidade, conforme abordado na secção 3.3.1. Em outros casos onde o número de falhas é pequeno demais, existem algumas formas de minimizar esse problema, abordados na secção 3.3.2.

Um segundo problema comum ao se trabalhar com dados de garantia é a presença de muitos modos de falha atuando sob o mesmo produto ou componente. Quando a falha é acelerada pode-se limitar o número de fatores de *stress* sobre o produto em um ambiente simulado. Assim pode-se estudar a influência de um modo de falha específico sobre o componente em estudo. Como em dados de garantia, o ambiente não é simulado, existem muitos fatores que influenciam a confiabilidade do produto e causam a falha. Esses fatores agem conjuntamente e sua influência sobre o produto muitas vezes é dependente de outro fator.

O resultado dessa situação é que muitas vezes é difícil encontrar uma distribuição de probabilidade que represente todos os modos de falhas simultaneamente. A modelagem de um modo de falha por vez pode ser feita, porém, além de trabalhosa, dependendo do número de modos de falha, é necessário utilizar uma metodologia para concatenar todas essas modelagens em uma só, pois o objetivo do estudo geralmente é descobrir a confiabilidade do produto, e não somente modelar os modos de falha de maneira isolada.

Muitas alternativas surgem para a solução deste problema e algumas delas são abordadas com maiores detalhes na secção 3.3.3.

1.2. Justificativa

Independente do tipo da modelagem e da fonte de dados utilizada, fica claro que o estudo de confiabilidade vem ganhando espaço devido a sua importância. Tal crescimento pode ser ilustrado pela figura 1.1 abaixo, que mostra o a evolução do número de citações sobre confiabilidade nos últimos 20 anos. A pesquisa foi feita no site da ISI *Web of Knowledge* com as palavras “*Reliability*” e “*Warranty*”

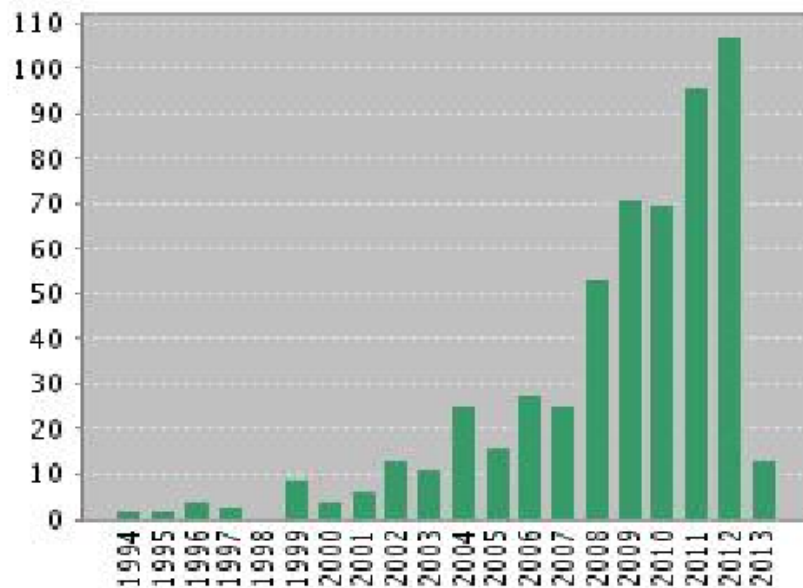


Figura 1.1 - Evolução de Citações em Confiabilidade

É fácil perceber que toda falha de um produto, seja na etapa de desenvolvimento, produção ou mesmo quando já está em posse do cliente, gera para a organização um custo. Esse custo pode ter sua fonte no próprio produto onde ocorreu a falha, no investimento necessário para redesenhar a linha de produção ou um processo em específico ou mesmo o custo da perda de imagem junto a um cliente (CUI e KHAN, 2008).

Quando a falha acontece em um equipamento, o custo de produção parada é o mais facilmente perceptível, juntamente com o custo de conserto do equipamento ou dos danos que a sua falha pode ter causado em outros equipamentos ou até mesmo danos à saúde dos trabalhadores.

Independente do caso existe uma necessidade urgente de se estudar as falhas com o intuito de diminuir sua ocorrência e prever o seu acontecimento.

Nesse contexto ganha especial importância os estudos de confiabilidade utilizando dados de garantia. Primeiramente porque nesse caso, o produto já está nas mãos do cliente, e a ocorrência de uma falha fatalmente afetará a percepção deste cliente sobre a organização.

Em segundo lugar, porque a concorrência acirrada e a grande diversidade de produtos no mercado fazem com que a garantia oferecida como forma de segurança seja um dos fatores analisados pelos clientes na hora da compra. Porém uma garantia oferecida sem que o produto

tenha condições de funcionar sem falhas por pelo menos o período de garantia oferecido acarreta custos adicionais para a organização com reposição de peças ou troca de produtos em garantia.

Conclui-se com estas análises que o uso estratégico e de forma apropriada dos conceitos ligados a confiabilidade podem trazer grandes benefícios às organizações. Benefícios ligados à redução de custos, melhorias significativas no setor produtivo e uma melhoria na imagem da empresa frente a seus clientes confirmando assim a confiabilidade como importante área de pesquisa, dada a contribuição que pode ser gerada com os estudos em nessa área.

1.3. Objetivo

Dada a importância do estudo de confiabilidade, notadamente voltado para o estudo de dados de garantia, como forma estratégica de redução de custos e outros benefícios, nota-se a necessidade de se conduzir estudos de aprofundamento nos métodos utilizados para modelagem da confiabilidade de produtos e equipamentos. Esse trabalho vem ao encontro desta necessidade.

O objetivo deste trabalho é gerar um modelo matemático que descreva a confiabilidade de um produto eletrônico a partir de dados de garantia coletados em campo.

1.4. Limitações do trabalho

As limitações do trabalho surgem basicamente das imperfeições dos dados de campo e das suposições que foram feitas para tornar o problema passível de ser modelado matematicamente.

A primeira limitação importante pode ser explicada através do método de pesquisa utilizado. Neste trabalho utiliza-se o método de modelagem e simulação, mais especificamente o método empírico descritivo segundo Bertrand e Fransoo (2002). Neste método específico, o objetivo é simplesmente a modelagem matemática do problema, partindo de dados de campo, não se preocupando em implementar ações para melhorar a confiabilidade do produto. Quando se obtém o modelo matemático, o trabalho tem seu objetivo concluído, não se preocupando em tirar do modelo ações para serem implantadas e resolverem efetivamente o problema da empresa.

A segunda limitação aparece quando se trabalha com dados de garantia. Dados de falhas provenientes das assistências técnicas somente podem ser utilizados propriamente se as falhas acontecerem dentro do período de garantia. Fora deste período, há incertezas quanto à disposição do cliente a informar uma falha ao fabricante, visto que o fabricante não pagará mais pelo reparo ou reposição. Assim o estudo se limita, inicialmente aos dados de garantia. Algumas soluções são propostas e implantadas para solucionar este problema.

Uma simplificação feita para facilitar o modelo matemático é que os componentes do produto são considerados não reparáveis, apesar de serem reparáveis. Assim quando da troca ou reparo de um componente, o produto é considerado tão bom quanto novo, o que muitas vezes não é verdade, pois outros componentes que não foram reparados já se encontram em estado de uso. Sendo assim, quando do reparo de qualquer componente do produto, o seu tempo até falha é zerado e ele passa a contar como um produto novo que acabou de ser vendido. Se outro componente deste mesmo produto vier a falhar, em um período de uma semana, por exemplo, pois já estava sofrendo desgaste há algum tempo, o tempo até falha considerado para o produto é uma semana, ou seja, a diferença entre o tempo de falha e o tempo do fim do último reparo. Isso pode causar uma diminuição do tempo médio até falha do produto.

Uma segunda simplificação feita é que algumas alterações foram feitas nos primeiros estágios de vida do produto à medida que já se foram percebendo algumas falhas prematuras. Essas alterações provavelmente tiveram efeito sobre a confiabilidade do produto, pois o produto foi alterado, algum componente pode ter sido removido ou acrescentado. A consideração desta alteração implicaria na complicação do modelo matemático de forma que ele poderia se tornar impraticável matematicamente. Assim, foi considerado que nenhuma alteração foi feita no produto e que o produto estudado continua sendo o mesmo. Tomou-se o cuidado de se escolher um produto onde nenhuma alteração brusca foi realizada, de tal modo que mudasse radicalmente a taxa de falhas do mesmo.

Sendo assim, alteração é considerada indiretamente uma vez que a entrada para o cálculo da confiabilidade são os dados de falha. Se a alteração tiver efeito sobre o produto, fatalmente afetará o número de falhas e a frequência de falhas do mesmo, afetando, como resultado, a confiabilidade do produto.

A última simplificação adotada é que os modos de falha presentes sobre o produto atuam de forma independente. Em outras palavras, um modo de falha não potencializa o outro.

O trabalho está organizado na seguinte estrutura: o capítulo 2 fala sobre confiabilidade e métodos para sua estimação, o capítulo 3 fala sobre dados de garantia, o capítulo 4 traz um exemplo com dados coletados em uma empresa de produtos eletrônicos e o capítulo 5 conclui o trabalho.

2. Confiabilidade

2.1. Breve histórico e definição

Confiabilidade de um produto é a probabilidade deste produto desempenhar satisfatoriamente sua função por um período de tempo específico operando em condições ambientais previamente estabelecidas (MURTHY, 2007).

Pode-se perceber na definição acima a presença de alguns componentes críticos na definição de confiabilidade. O primeiro deles é que confiabilidade é uma probabilidade, ou seja, seu valor deve variar entre 0 e 1. O segundo é o fato de o conceito de confiabilidade está sempre associado a um tempo de referência. Não é correto perguntar simplesmente a confiabilidade de um produto, sem informações sobre o tempo da missão que se deseja investigar. Deve-se perguntar a confiabilidade do produto para uma missão de tempo igual a “ t ”, cuja resposta será a probabilidade do produto não falhar até o tempo considerado. O terceiro e último ponto que deve ser considerado na definição de confiabilidade é que ela sempre está sendo considerada sob condições ambientais definidas. Em outras palavras, confiabilidade não é uma característica intrínseca ao produto, ela varia de acordo com o estresse aplicado sobre o mesmo. Portanto a confiabilidade de uma furadeira doméstica em um determinado tempo “ t ” será maior se for utilizada realmente para execução de tarefas domésticas. Se ela for, em algum momento, utilizada em trabalhos industriais, onde o grau de esforço aplicado sobre ela é maior, a confiabilidade do equipamento será prejudicada (FOGLIATTO, 2009).

Outro aspecto que se deve considerar ao se falar de confiabilidade é o conceito de falha. Como confiabilidade é definida como a probabilidade de o produto “não falhar”, o momento ou os critérios que definem uma falha devem ser claramente estabelecidos. Um

celular que não consegue fazer chamadas certamente pode ser considerado um produto sob efeito de uma falha. A dúvida sobre considerar ou não o produto sob efeito de falha emerge quando o produto desempenha corretamente sua função principal, mas alguma outra função ou componente secundário apresenta uma falha. Por exemplo: um celular cuja bateria deveria durar 3 horas e dura somente 2 horas pode ser considerado um produto sobre efeito de uma falha? A bateria é um componente secundário e, apesar de estar com o desempenho reduzido, ainda funciona. Um computador que está riscado devido a uma queda, mas desempenha normalmente suas funções pode ser considerado um item com falha? Antes de se definir confiabilidade desses produtos deve-se definir quais são exatamente os critérios de falha para os mesmos.

Outro conceito que surge quando se trata de confiabilidade é o conceito de disponibilidade. Disponibilidade de um produto ou equipamento é a probabilidade de o equipamento estar disponível em um determinado tempo “t”. Note que “estar disponível” é estar apto a funcionar, não importa quantas vezes o produto tenha falhado. Ambas, disponibilidade e confiabilidade estão relacionadas ao tempo médio até falha (*Mean Time To Failure* – MTTF), mas a disponibilidade ainda depende de um segundo parâmetro, o tempo médio de reparo (*Mean Time To Repair* - MTTR).

Em outras palavras, a disponibilidade varia conforme a capacidade de reparo do produto analisado. Dois produtos, um com alta capacidade de reparo e outro com baixa capacidade de reparo podem ter a mesma confiabilidade, mas com certeza terão disponibilidades diferentes. Em unidades ou produtos não reparáveis, os conceitos de confiabilidade e disponibilidade se equivalem. (FOGLIATTO, 2009)

2.2. Medidas de Confiabilidade

Confiabilidade pode ser definida como uma probabilidade. Nada mais é que a probabilidade de o tempo de falha T ser maior que o “t” analisado. Matematicamente tem-se que:

$$R(t) = P(T > t) \quad \text{Eq. (2.1)}$$

onde $R(t)$ representa a confiabilidade do produto em função do tempo e $P(T > t)$ representa a probabilidade do tempo de falha T ser maior que o tempo de análise t.

As equações enumeradas de 2,1 à 2.6 foram retiradas de Fogliatto (2009).

Também se sabe que confiabilidade é a probabilidade de um produto não falhar até um determinado tempo de missão “t”. Sendo F(t) a função densidade de probabilidade acumulada, ou seja, a probabilidade de falha acumulada de um produto, tem-se que:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u)du \quad \text{Eq. (2.2)}$$

onde f(u) é a função densidade de probabilidade do produto, ou seja, a probabilidade de o produto falhar a cada instante “t” e F(t) é sua função acumulada.

Percebe-se que integrando-se a função densidade de probabilidade f(t), obtém-se a função densidade de probabilidade acumulada F(t) como se pode confirmar na equação 2.3.

$$F(t) = \int_0^t f(u)du \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Existem também outras medidas de confiabilidade tais como a função de risco e a função da vida residual média. A função de risco pode ser considerada a medida de confiabilidade mais difundida na prática (FOGLIATTO, 2009). Ela pode ser interpretada como a quantidade de risco de falha associado a uma unidade de tempo t. A função de risco também é conhecida nos estudos de confiabilidade como taxa de falha e pode ser obtida através da equação 2.4.

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \text{ para todo } t > 0 \quad \text{Eq. (2.4)}$$

onde h(t) é a função que exprime a taxa de risco no tempo, f(t) é a função densidade de probabilidade e R(t) é a função confiabilidade.

A função de risco ou taxa de falha está fortemente relacionada às etapas da vida de um produto ou componente. Existem três categorias básicas de função de risco: as funções de risco crescentes, as funções de risco decrescentes e função de risco constante, que é uma combinação das duas anteriores (FOGLIATTO, 2009).

Componentes mecânicos e eletrodomésticos, onde o desgaste cresce com o passar do tempo, podem ser descritos em geral, por uma função de risco crescente enquanto que produtos que podem ser descritos através de uma função de risco decrescente são raros na prática. Geralmente funções de risco constante ocorrem em produtos cuja função densidade de probabilidade é exponencial. Alguns softwares que tem em sua fase inicial uma alta incidência de *bugs* que são corrigidos com o tempo o que possibilita o amadurecimento do software são um exemplo de produto que pode ser descrito através de uma função de risco decrescente.

A maioria dos produtos, porém, enfrenta em seu ciclo de vida uma variação entre as categorias acima citadas, o modelo de ciclo de vida conhecido como “curva da banheira” representa, na verdade, as taxas de falha incidentes sob um produto durante seu ciclo de vida, conforme pode ser visto na figura 2.1.

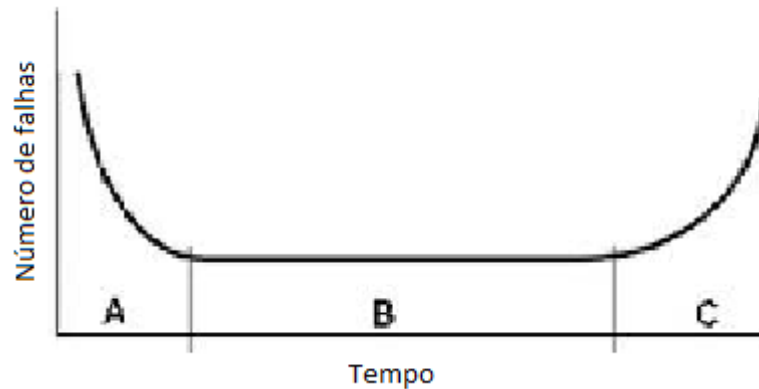


Figura 2.1 - Variação das taxas de falha dentro do ciclo de vida do produto

A fase A da figura 2.1 ilustra uma função de risco decrescente e representa a fase de mortalidade infantil de produtos. Geralmente, as falhas que ocorrem nessa etapa são falhas devido a erros de projeto, montagem ou fabricação, em produtos eletrônicos isso ocorre principalmente em unidades que não passaram pelo teste de *burn in*. Após essa fase inicial a tendência é que as falhas se estabilizem caracterizando um período de falhas aleatórias durante toda vida útil do produto, representada por B. Nesse período nota-se uma taxa de falhas constante e nenhum modo de falha é predominante. Na última fase do ciclo de vida, caracterizada por uma taxa crescente de falhas, os produtos, principalmente produtos que contém componentes mecânicos, começam a ter uma alta incidência de falhas devido ao desgaste sofrido com o tempo e o uso.

A equação 2.5 é na verdade um conjunto de equações que representa uma estimativa linear das taxas de falha de cada uma das etapas. A taxa de falha decresce linearmente até λ no tempo a/b , se mantém constante em λ até t_0 e cresce linearmente para tempos maiores que t_0 . A constante “c” representa o quanto cresce a taxa de falha para cada unidade de tempo acima de t_0 .

$$h(t) = \begin{cases} a - bt + \lambda & 0 \leq t \leq a/b \\ \lambda & a/b < t < t_0 \\ c(t - t_0) + \lambda & t_0 \leq t \end{cases} \quad \text{Eq (2.5)}$$

onde a , b , c e λ são constantes que definem os coeficientes das respectivas retas onde estão presentes.

A figura 2.2 ilustra as quatro principais medidas de confiabilidade já abordadas. Alguns comentários sobre essas distribuições se fazem pertinentes nesse momento. Nota-se que a função confiabilidade(b) sempre começa em 1, ou seja, 100% e termina em zero. A função $F(t)$ (c), sendo uma probabilidade acumulada, sempre cresce ao longo do tempo e ao contrário da confiabilidade, sempre começa em zero e termina em 1. As demais funções são livres, $f(t)$ (a) pode assumir a forma de qualquer distribuição de probabilidade conhecida e $h(t)$ (d) pode ser crescente, decrescente ou constante conforme já comentado nesta secção.

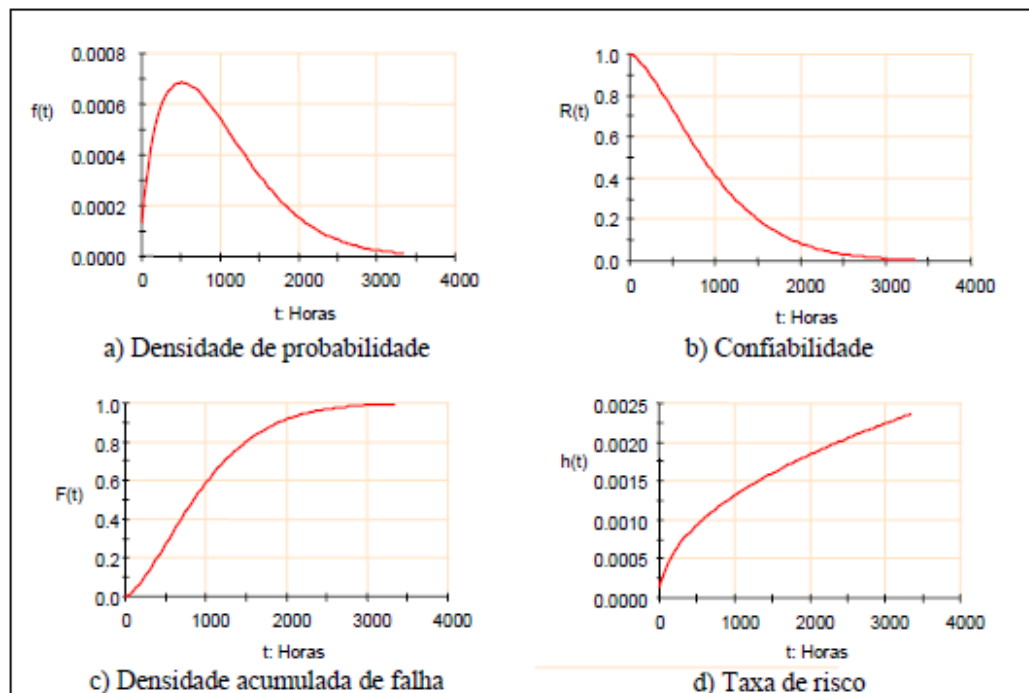


Figura 2.2 - Gráficos Hipotéticos das quatro principais medidas de confiabilidade

A última medida de confiabilidade abordada nesse tópico é a função de vida residual, que corresponde à vida remanescente esperada da unidade com base em sua confiabilidade,

dado que ela sobreviveu até um tempo “t”. A vida residual $L(t)$ pode ser calculada conforme a equação 2.6.

$$L(t) = \frac{1}{R(t)} \int_t^{+\infty} uf(u) du - t \quad \text{Eq. (2.6)}$$

onde $L(t)$ é a função de vida residual, $R(t)$ é a função confiabilidade e $f(u)$ é a função densidade de probabilidade do produto analisado.

É importante notar que todas essas medidas de confiabilidade estão relacionadas entre si e uma vez que se conhece a função densidade de probabilidade $f(t)$, pode-se chegar a qualquer outra medida de confiabilidade.

2.3. Estimação da Função Confiabilidade

Observando a equação (2.2) nota-se que se pode estimar a função confiabilidade $R(t)$ a partir da função densidade de probabilidade $f(t)$. A função $f(t)$ por sua vez é determinada através de dados de tempo até falha do produto analisado. Observando os dados até falha pode-se associar a esses dados uma distribuição de probabilidade que melhor explica a frequência com que eles ocorrem.

Existem dois tipos de distribuições de probabilidade: as distribuições paramétricas e as não paramétricas. Nas distribuições paramétricas, o que se faz é um teste de ajuste com as distribuições já conhecidas, através de um teste paramétrico. Nas distribuições paramétricas, utilizam modelos distribuição já disponíveis na literatura para analisar qual é a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta aos dados enquanto nas distribuições não paramétricas, não se baseiam em modelos já disponibilizados na literatura..

Modelos paramétricos de confiabilidade geralmente não têm a capacidade de modelar múltiplos modos de falha (MARCORIN e ABACKERLI, 2006). A modelagem de cada modo de falha em modelos paramétricos deve ser feita de forma independente e depois combinados através da regra conhecida como *competing risks* (HUANG E ASKIN, 2003). Exemplos clássicos de distribuições paramétricas são: Normal, Exponencial, Weibull e Lognormal. A adoção prévia de uma ou outra distribuição depende basicamente da literatura existente, sabe-se, por exemplo, que produtos eletrônicos frequentemente seguem uma distribuição Exponencial com taxa de falhas constante ao longo do tempo (ver figura 2.1). Uma vez escolhida a distribuição de probabilidade a ser testada contra os dados de falha, a estimação

dos parâmetros dessa distribuição pode ser feita através de diversos métodos, os mais comuns são o dos mínimos quadrados, o da máxima verossimilhança e o método dos momentos. Detalhes sobre as formulações matemáticas para estimação de parâmetros usando distribuições paramétricas podem ser obtidos em Fogliatto (2009) e Meeker (1998).

A adoção de modelos paramétricos permite a previsão de confiabilidade pela extrapolação no tempo ao longo da distribuição, além de resultar em uma estimativa suave da distribuição de confiabilidade (MEEKER, 1998). Já as distribuições não paramétricas permitem análise somente no intervalo de tempo considerado, não sendo possíveis extrapolações dentro de um intervalo de confiança aceitável.

O uso de uma distribuição não paramétrica, porém, é mais flexível que o uso de distribuições paramétricas, uma vez que não se limita a análise a uma distribuição paramétrica. Do mesmo modo, as distribuições não paramétricas podem ser utilizadas para modelar modos de falha, componentes ou sistemas, uma vez que é possível analisar múltiplos modos de falha com uma única distribuição. Distribuições não paramétricas comuns em confiabilidade são a de Kaplan-Meier e a de Nelson-Aalen. Detalhes sobre as formulações matemáticas para estimação de parâmetro utilizando distribuições não paramétricas podem ser obtidos em Meeker (1998).

2.3.1. Estimação utilizando modelos paramétricos

Quando se escolhe modelos paramétricos para estimação dos parâmetros, deve-se escolher previamente a distribuição de probabilidades que será utilizada. Conforme já abordado na seção 2.3, as distribuições mais utilizadas em confiabilidade são a Exponencial, a Lognormal e a Weibull. Essas distribuições possuem características únicas que definem sua aplicabilidade. A função Exponencial descreve situações onde as respectivas taxas de falha do componente são supostas contínuas ao longo do tempo, a função Lognormal é uma distribuição bastante genérica em estudos de confiabilidade e bem versátil a diversas aplicações. A distribuição de Weibull pode descrever, dependendo da escolha de seus parâmetros, taxas de falhas crescentes, constantes ou decrescentes. As distribuições Exponencial e Weibull são as mais utilizadas para modelagem de confiabilidade de produtos eletrônicos (SANTOS, 2008).

Uma vez escolhida a distribuição a ser utilizada pode-se estimar os parâmetros através de três métodos: o método dos mínimos quadrados, o método dos momentos e o método da verossimilhança. Nas secções subsequentes será explorado com mais detalhes a estimação de parâmetros da distribuição de Weibull através dos três métodos citados.

2.3.1.1. Estimativa dos parâmetros da distribuição de Weibull através do método dos mínimos quadrados

Para funções que podem ser linearizadas através de uma transformada, como é o caso da maioria das distribuições aplicadas em estudos de confiabilidade, a estimação dos parâmetros através do método dos mínimos quadrados é bastante simples.

Partindo dos tempos até falha medidos, se $t_1, t_2 \dots t_n$ representam um conjunto de tempos até falha ordenados os parâmetros de forma (γ) e escala (θ) podem ser obtido através de uma regressão e estão representados pelas equações 2.7 e 2.8 (FAWZAN, 2000):

$$\hat{\gamma} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad \text{Eq (2.7)}$$

$$\hat{\theta} = e^{(\bar{x} - \bar{y})/\hat{\gamma}} \quad \text{Eq (2.8)}$$

onde :

$$x_i = \ln(t_i) \quad \text{Eq (2.9)}$$

$$y_i = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - \frac{i}{n+1}}\right)\right) \quad \text{Eq (2.10)}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Eq (2.11)}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad \text{Eq (2.12)}$$

e $\hat{\gamma}$ e $\hat{\theta}$ representam as estimativas dos parâmetros de forma e escala respectivamente.

2.3.1.2. Estimativa dos parâmetros da distribuição de Weibull através do método dos momentos

Se $t_1, t_2 \dots t_n$ representa uma amostra aleatória de uma variável aleatória com função densidade de probabilidade $f(t)$, seu k -ésimo momento é dados pela equação 2.13 (FAWZAN, 2000):

$$M_k = \int_{-\infty}^{+\infty} t^k f(t) dt \quad \text{Eq. (2.13)}$$

e sua estimativa é dada por:

$$\widehat{M}_k = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^k}{n} \quad \text{Eq. (2.14)}$$

onde M_k é o k -ésimo momento da função densidade de probabilidade $f(t)$

Se as integrais dos momentos tem solução, os k parâmetros da distribuição podem ser obtidos através dos k momentos calculados. Para a distribuição de Weibull o k -ésimo momento é calculado como:

$$M_k = \theta^k \Gamma\left(\frac{k}{\gamma} + 1\right) \quad \text{Eq. (2.15)}$$

onde $\Gamma(\cdot)$ representa a função Gama da variável entre parêntesis e θ e γ são os parâmetro da função.

A partir dos dois primeiros momentos calculados, pode-se calcular o coeficiente de variação CV, que depende somente de γ , pela equação 2.16:

$$CV = \frac{\sqrt{\Gamma(1+2/\gamma) - \Gamma^2(1+1/\gamma)}}{\Gamma(1+1/\gamma)} \quad \text{Eq. (2.16)}$$

Adotando o coeficiente de variação dos dados amostrais como estimativa do resultado da equação 2.16, pode-se obter iterativamente uma estimativa do parâmetro γ . O parâmetro θ por sua vez pode ser estimado através da equação 2.17:

$$\hat{\theta} = \left[\frac{\bar{x}}{\Gamma(1+1/\hat{\gamma})} \right]^{\hat{\gamma}} \quad \text{Eq. (2.17)}$$

onde \bar{t} é média dos tempos até falha da amostra

2.3.1.3. Estimativa dos parâmetros da distribuição de Weibull através do método da máxima verossimilhança

A estimativa pelo método da verossimilhança baseia-se na função de verossimilhança da amostra, que contém os parâmetros desconhecidos. Os valores dos parâmetros que maximizam a função de verossimilhança são adotados como estimadores dos parâmetros populacionais. A função de verossimilhança é definida a partir da equação 2.18 (FOGLIATTO, 2009) onde $t_1, t_2 \dots t_n$ são os tempos de falha amostrais.

$$L(\theta) = f(t_1, \theta) * f(t_2, \theta) * f(t_3, \theta) \dots f(t_n, \theta) \quad \text{Eq (2.18)}$$

Onde $f(\cdot)$ são as funções densidade de probabilidade calculadas para cada tempo t de análise.

Segundo Dillenburg (2005) a estimativa de máxima verossimilhança dos dois parâmetros de uma distribuição de Weibull é obtida a partir da solução das equações 2.19 e 2.20:

$$\frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\gamma}} \ln(t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\gamma}}} - \frac{1}{\hat{\gamma}} - \sum_{i=1}^r \frac{\ln(t_i)}{r} = 0 \quad \text{Eq (2.19)}$$

$$\hat{\theta} = \left[\frac{\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\gamma}}}{r} \right]^{1/\hat{\gamma}} \quad \text{Eq (2.20)}$$

onde t_i são os tempos até falha, r é o número de falhas, n é o número total de unidades observadas e $\hat{\gamma}$ e $\hat{\theta}$ representam as estimativas dos parâmetros de forma e escala respectivamente.

O software Minitab 16, utilizado neste trabalho para as estimações dos parâmetros, utiliza o método da máxima verossimilhança para a estimação.

2.3.2. Estimação utilizando modelos não-paramétricos

Conforme já abordado na seção 2.3, modelos não paramétricos são úteis quando não se quer ou não se pode supor previamente a distribuição de probabilidade que melhor se adequa aos dados.

Quando se utiliza distribuições não paramétricas se encontram dificuldades em determinar os intervalos de confiança do modelo, uma vez que não se trabalha com parâmetros (MARCORIN e ABACKERLI, 2006). Porém distribuições que não assumem as formas das distribuições paramétricas comuns tem uma maior flexibilidade de forma e podem modelar os vários modos de falhas geralmente presentes em um produto ou componente.

Na ausência de dados censurados, uma estimativa não paramétrica da função confiabilidade baseada nos tempos até falha $t_1, t_2 \dots t_n$ pode ser representada como na equação 2.21.

$$\hat{R}(t) = \frac{\#(t)}{n} \quad \text{Eq. (2.21)}$$

onde: " $\#(t)$ " é o número de unidades em risco (ainda operando) em " t " e " n " é o número total de unidades em análise.

Na presença de dados censurados, porém, a equação 2.21 não é mais válida, uma vez que " n " é considerado constante durante toda a análise. Para dados censurados podem-se utilizar os estimador de Kaplan-Meier e o estimador de Nelson-Aalen.

2.3.2.1. Estimador de Kaplan-Meier

Esse estimador, também conhecido como estimador produto limite é frequentemente utilizado em estudos não paramétricos e pode ser aplicado em estudos de confiabilidade envolvendo múltiplas falhas e censuras. A taxa de risco é depende do número de falhas e da população em risco no tempo de análise e pode ser calculada conforme equação 2.22.

$$h(t) = \frac{r_i}{NR_i} \quad \text{Eq. (2.22)}$$

onde NR_i é o número de unidades em risco imediatamente antes de t_i e r_i é o número de falhas em t_i .

A partir das taxas de falhas calculadas para cada t_i , pode estimar a confiabilidade do produto seguindo a equação 2.23.

$$\hat{R}(t) = \prod_{t_i < t} (1 - h(t_i)) \quad \text{Eq 2.23}$$

onde $\hat{R}(t)$ é a estimativa da função confiabilidade e $h(t)$ é a função taxa de risco.

Em outras palavras, a confiabilidade do produto no tempo “t” será dada pelo produtório de um menos as taxas de falhas calculadas para cada t_i antes do “t” de análise. Há dificuldades em analisar os intervalos de confiança de modelos não paramétricos apesar de existirem algumas fórmulas que calculem esse intervalo supondo a função confiabilidade, dada por esse estimador, assintoticamente normal.

2.3.2.2. Estimador de Nelson-Aalen

O estimador de Nelson-Aalen é mais utilizado quando o principal interesse é encontrar a taxa de risco acumulada $H(t)$ e não a confiabilidade $R(t)$. Utilizando a equação 2.22 para o cálculo de $h(t)$, o estimador de Nelson-Aalen pode ser representado pela equação 2.24.

$$\hat{H}(t) = \sum_{t_i < t} h(t_i) \quad \text{Eq (2.24)}$$

onde $h(t)$ é a função taxa de risco.

Independente do estimador que se deseja utilizar, existe uma dificuldade relacionada ao uso de distribuições não paramétricas: o cálculo do intervalo de confiança para o tempo médio até falha. Marcorin e Abackerli (2006) propõem o uso do método *Bootstrap* de reamostragem para corrigir esse problema.

2.3.2.3. Métodos de reamostragem

A aplicação de métodos de reamostragem em modelos não paramétricos vem da necessidade de se obter um intervalo de confiança para o tempo médio até falha. Marcorin e Abackerli (2006) propõe a aplicação do método *bootstrap* com esta finalidade.

Os métodos mais frequentes na literatura para a reamostragem são o *bootstrap* e o *jackknife*. Esses métodos são simples e se diferenciam basicamente pela reposição ou não do elemento retirado aleatoriamente.

Suponha uma amostra inicial de n elementos. Os dois métodos se baseiam na retirada aleatória de amostras a partir da amostra inicial. No método *jackknife* se retiram amostras aleatórias de tamanho $m < n$, sem reposição do elemento retirado aleatoriamente. Assim sendo, cada elemento da amostra inicial só pode ser retirado uma vez em cada reamostragem de tamanho m .

Suponha o conjunto A de dados abaixo, representando nossa amostra inicial de 9 elementos.

$$A = (1,2,3,4,5,6,7,8,9)$$

O método *jackknife* consiste na retirada aleatória de amostras de tamanho $m < n$, por exemplo para $m = 5$ pode-se conseguir as seguintes reamostragens:

$$R_1 = (3,5,1,9,6)$$

$$R_2 = (1,5,4,8,7)$$

$$R_3 = (1,5,3,9,7)$$

Nota-se que em nenhuma das reamostragens, algum elemento de A apareceu mais de uma vez. Isso ocorre justamente pelo fato de não ocorrer reposição. Em outras palavras, quando o elemento “3” é retirado em R_1 , ele não volta para A, sendo imediatamente descartado e impossibilitado de aparecer novamente em R_1 . Antes da retirada do segundo elemento de R_1 , o conjunto A deve conter somente 8 elementos. Após o término da reamostragem R_1 , todos os elementos voltam para A e uma nova reamostragem começa. Pode-se repetir esse procedimento quantas vezes forem necessárias.

Já no método *bootstrap*, a principal mudança é a reposição do elemento aleatório. Como o elemento aleatório é repostado, torna-se possível retirar uma reamostragem de tamanho n , igual a amostra inicial sem que ela seja idêntica a amostra inicial. Assim utilizando o mesmo conjunto inicial A com nove elementos, pode-se retirar os seguintes conjuntos de reamostragem de tamanho $n = 9$.

$$R_1 = (3,5,1,9,6,3,3,9,8)$$

$$R_2 = (1,5,4,8,7,8,6,5,2)$$

$$R_3 = (1,5,3,9,7,2,2,2,4)$$

Neste método, quando o elemento “3” é retirado em R_1 , ele volta para A antes da retirada do segundo elemento. Assim existe a possibilidade de o elemento “3” ser retirado novamente. Isso não ocorre na segunda retirada, mas ocorre na sexta e também na sétima retirada de R_1 . Portanto nota-se que um mesmo elemento pode, aleatoriamente, ser retirado mais de uma vez para compor uma mesma reamostragem.

A vantagem da reposição é a possibilidade de formar-se reamostragem de mesmo tamanho da amostra original, mantendo-se o número de elementos iniciais sem que a amostra inicial seja repetida, como aconteceria no método *jackknife*.

A grande vantagem de se utilizar método de reamostragem, é que supondo que cada elemento represente um tempo de falha, após a retirada de “k” amostras de tamanho “n”, pode-se calcular “k” tempos médios até falha diferentes e obter-se subsequentemente uma distribuição de tempos médios até falha. A distribuição dos tempos médios de falha, pelo teorema central do limite será normal, podendo ser utilizada para calcular um intervalo de confiança para o tempo médio até falha T, com significância α . A fórmula de cálculo é apresentada pela equação 2.25 abaixo:

$$IC (\bar{T} : (1 - \alpha) * 100) = [\bar{T} - Z_{\alpha/2} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right); \bar{T} + Z_{\alpha/2} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)] \quad \text{Eq (2.25)}$$

Independente do tipo de distribuição escolhida, ou se faz-se o uso de reamostragem ou não, a modelagem da confiabilidade se faz necessária para se acessar informações e prever o comportamento do produto. O estudo da confiabilidade tem se desenvolvido fortemente em áreas como manutenção de equipamentos e desenvolvimento de produtos além do estudo de produtos já lançados no mercado através de dados coletados em campo. Nas secções subsequentes, o estudo de confiabilidade nessas áreas será abordado separadamente.

2.4. Confiabilidade e a manutenção de equipamentos

Quando se trata de equipamentos, a função manutenção desempenha um papel importante no que se diz respeito à disponibilidade dos mesmos. Para a maioria das empresas, uma maior disponibilidade dos equipamentos implica em maior produção e menor custo. É importante ressaltar novamente a diferença entre disponibilidade e confiabilidade, mas é bom ter em mente que mesmo sendo diferentes, esses conceitos estão fortemente relacionados.

Segundo Ponchet, Fouladirad e Grall (2010) os custos de manutenção podem variar de 15 a 70% dos custos de produção e tendem a ser mais altos quando a função manutenção desempenha um papel corretivo na organização.

Nesse contexto se encaixa a prática da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC). Rausand (1998) afirma que a esse tipo de manutenção teve sua origem em aplicações em indústrias aeroespaciais em meados dos anos 70 e, logo em seguida, recebeu aceitação e foi largamente aplicada na área militar.

O principal objetivo da MCC é reduzir custos ao mesmo tempo que aumenta a confiabilidade e a segurança do equipamento. A MCC consiste basicamente em uma análise de falhas potenciais dos componentes seguida de uma análise quantitativa dos riscos de ocorrência de falhas em cada componente. Só depois dessa análise é que decide-se qual categoria de manutenção preventiva se deve utilizar para otimizar a disponibilidade do equipamento em questão. (SELVIK e AVEN, 2011).

Atualmente, com base nos resultados que vem sendo apresentados por empresas que adotaram a MCC, esse conceito tem saído das áreas de origem e tem sido mais amplamente aplicados em diversos outros ramos industriais.

Segundo Fogliatto (2009), a eficácia da MCC está baseada em alguns pilares próprios desse programa. Entre eles (i) amplo envolvimento de engenheiros, operadores e técnicos de manutenção caracterizando um ambiente de engenharia simultânea, (ii) ênfase no estudo das consequências das falhas, que direcionam todas as atividades de manutenção, (iii) abrangência das análises, considerando questões como segurança e meio ambiente, (iv) ênfase nas atividades pró-ativas, com foco nas abordagens preventivas e preditivas e (v) combate às falhas escondidas, que reduzem a confiabilidade do sistema.

Meeker (1998) destaca algumas questões típicas de uma abordagem centrada em confiabilidade. Segundo o autor existem sete questões básicas que devem ser respondidas nesse tipo de manutenção:

- (i) Quais as funções e padrões de desempenho esperados para os equipamentos ? Essa questão deve ser respondida para que fique claro, antes do início da análise, o que exatamente caracteriza uma falha. Toda vez que o equipamento tiver um desempenho abaixo do esperado, é necessário uma investigação das causas desse desempenho inferior.
- (ii) De que modo os equipamentos podem falhar em cumprir suas funções? Essas questões permitem identificar os principais modos de falha nos equipamentos.
- (iii) O que causa a falha funcional? Permitindo uma análise de causas para posteriormente traçar ações de manutenção.

- (iv) O que acontece quando o equipamento falha? Essas questões possibilitam análise de riscos e analisa as consequências da falha, direcionando ações de manutenção, ajudando na previsão de componentes em estoque e no custo da manutenção.
- (v) De qual modo cada falha interessa? Em uma organização, existem possivelmente centenas de modos de falha a serem considerados, cada um deles afeta a organização de uma maneira diferente. Alguns causam prejuízos consideráveis e outros causam efeitos mínimos. A identificação dos modos críticos é fundamental para priorização das atividades de manutenção.
- (vi) O que pode ser feito para impedir ou prevenir cada falha? A resposta a essa questão é um plano de ação de manutenção que vise evitar ou prevenir os modos de falhas identificados nas questões anteriores.
- (vii) O que fazer quando não for possível estabelecer ação preventiva pertinente? Que estabelece quais são os procedimentos nos casos onde a falha é grave e não pode ser prevista geralmente levando a atividades de procura de falhas ou até redesenho do sistema.

O impacto da manutenção sobre a confiabilidade dos equipamentos (ENDRENYI, *et al.*, 2001; BERTLING, ALLAN, e ERIKSSON, 2005) e os conceitos envolvidos em MCC estão sendo estudados nos mais diversos ramos tais como indústria química (FONSECA e KNAPP, 2000) e até mesmo em manutenção de ferrovias (MARQUEZ, SCHMID e COLLADO, 2003).

A maioria dos estudos envolvendo manutenção de componentes, se baseia no estudo da degradação do componente para que a ação seja tomada antes que a falha ocorra.

2.5. Estudos de degradação de componentes

Quando o componente, sistema ou produto sofre ação do desgaste ao longo do tempo e é possível medir a evolução desse desgaste ou degradação do componente.

A informação sobre a confiabilidade do produto pode ser acessada fazendo-se uso desses dados de degradação.

Freitas, Toledo, Colosímo e Pires (2009) afirmam que experimentos e estudos direcionados a degradação tem o objetivo de investigar a vida média de componentes que nem sempre falham em testes de vida acelerados ou dentro do período de análise de dados.

Segundo estes autores, o uso de dados de degradação pode ser útil para inferir a vida média do componente e assim prever sua confiabilidade.

O que acontece muitas vezes é que produtos com alta confiabilidade ou componentes em projetos robustos apresentam taxas de falhas muito baixas. Esperar que o produto falhe para ter acesso a dados sobre o mesmo se tornaria inviável pelo longo tempo que esse processo demanda. Para esses casos, o uso de dados de degradação se torna interessante do ponto de vista prático.

Assim como a função taxa de falha, a degradação de um componente pode ser crescente ou decrescente com o passar do tempo, a figura 2.3 mostra o comportamento dos dois tipos de curva. Na figura 2.3, o termo D_f refere-se à medida de degradação crítica, que define uma falha.

O que ocorre em estudos de degradação é que, como a falha não ocorre, é preciso escolher outra medida de desempenho. Meeker, Doganaksoy e Hahn (2001) afirmam que há casos onde a degradação pode ser medida diretamente, através de medidas de desgaste pura e simplesmente e há casos onde somente uma medida indireta, frequentemente a saída do processo, pode ser feita. Um exemplo disso é medir, em estudos com alimentos, o número de microorganismos que se desenvolvem com o passar do tempo.

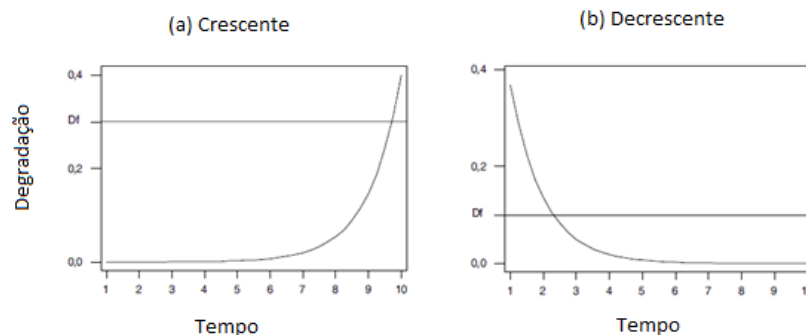


Figura 2.3 - Tipos de degradação - adaptado de Oliveira e Colosimo (2004)

Nos dois casos, é preciso definir um nível crítico para a medida de desempenho escolhida, e uma falha passa a ser definida a partir do momento que se ultrapassa esse limite, tanto para baixo, em medidas de degradação decrescentes, tanto para cima, em medidas de degradação crescentes. Segundo o mesmo autor, existem casos onde a degradação é uma medida contínua e outros onde ela só é perceptível se medida em intervalos, de forma discreta.

O objetivo dos estudos de degradação, portanto, é estabelecer um modelo que explique o avanço da medida de degradação no tempo. Uma vez definida essa função, substitui-se a medida de degradação crítica D_f no modelo e se obtém o tempo até falha do componente ou produto.

Segundo Oliveira e Colosimo (2004) existem três métodos principais para se estimar $F(t)$ a partir de dados de degradação, o método de aproximação, o método analítico e o método numérico. Os dois primeiros são podem ser aplicados quando a relação entre $D(t)$ e t é direta e a função que os relaciona é simples. A medida que esta função se torna complexa, deve-se partir para o método numérico. Detalhes sobre as formulações matemáticas dos métodos de estimação a partir de dados de degradação podem ser obtidos em Oliveira e Colosimo (2004).

Percebe-se uma relação muito forte entre estudos de confiabilidade de equipamentos e as técnicas de análise de dados de degradação visto que boa parte dos componentes mecânicos que vem a falhar em equipamentos mostram algum sinal de desgaste, fadiga ou outro tipo de stress que se acumula com o passar do tempo. Porém dados de degradação também podem ser aplicados a produtos, tanto na fase de testes de vida iniciais ou após seu lançamento no mercado através de medidas em campo.

Quando se trata de produtos, os estudos de degradação tem a mesma função que testes de vida acelerados, que visam acelerar a falha do componente através da aplicação de uma condição de stress excessivo. A vantagem do método de degradação é que ele funciona com a ocorrência de poucas ou até mesmo de nenhuma falha, enquanto o teste acelerado necessita de um número mínimo de falhas para análise.

Obviamente, nem sempre é possível fazer uso de dados de degradação. Em produtos, processos ou equipamentos onde a falha é instantânea, os dados relativos a desgastes dos componentes tendem a não ser significativos para previsão da confiabilidade do sistema. Nesses casos, onde a causa da falha geralmente é uma causa externa, como um esforço excessivo ou condição de stress superior a qual o equipamento foi projetado, deve-se fazer uso de dados de falha tradicionais para se chegar a alguma conclusão a respeito da confiabilidade do sistema. Meker, Escobar e Lu (1999) desenvolvem um modelo para modelar $F(t)$ a partir de dados de falha em conjunto com dados de degradação. Segundo estes autores, mesmo em testes de vida objetivando medidas de degradação ocorrem falhas abruptas

nas unidades em teste. É preciso um modelo misto que possibilite entrada tanto de dados de degradação quanto de falhas.

Torres e Ruiz (2007) apresentam um modelo para avaliar confiabilidade de estruturas, tais como pontes e plataformas, baseado na degradação da sua capacidade. Segundo o autor, essas estruturas sofrem degradação de capacidade por ação de ventos, ondas e outros agentes corrosivos. Visto que uma falha em uma estrutura pode causar danos graves ao meio ambiente e atentar com a vida das pessoas, um estudo de degradação que visa antecipar e prever a falha se faz necessário. O autor conduz um exemplo em uma plataforma de petróleo em alto mar com o objetivo de estimar a curva de confiabilidade da plataforma considerando a ação de diversos efeitos.

Já Zhou, Xi e Lee (2007) aplicam os conceitos de degradação na manutenção. Os autores consideram que toda manutenção não é capaz de reparar o equipamento e devolvê-lo ao estado “novo” e portanto, todo componente, devido ao uso e à imperfeição das manutenções, está sujeito a degradação com o passar do tempo. Os autores usam dois tipos de degradação: no primeiro o equipamento sofre degradação simplesmente com o passar do tempo, mesmo que esteja fora de funcionamento, no segundo, o equipamento sofre degradação pelo uso, de acordo com a intensidade e condições nas quais ele é utilizado. Eles concluem que a suposição de que o equipamento, após o reparo, seja considerado no estado “novo” não pode ser feita pois acarreta sérios desvios na taxa de risco do equipamento.

Joseph e Yu (2006) aplicam os conceitos de degradação a produtos. Os autores utilizam-se da técnica de planejamento de experimentos para variar possíveis fatores que afetam o desempenho do produto. A resposta do planejamento de experimentos, nesse caso, é a própria medida de degradação escolhida pelos autores. Os autores conseguem identificar os fatores que influenciam no desempenho do produto e em que grau eles influenciam. Deste modo, se torna possível tomar ações nos fatores identificados de forma a aumentar a confiabilidade do produto.

Quadro 2.1 - Resumo de aplicações envolvendo degradação

Autor	Aplicação	Objetivo	Conceitos Utilizados
Torres e Ruiz (2007)	Estruturas	Estimar a função Confiabilidade	Degradação
Zhou, Xi e Lee (2007)	Equipamentos	Estimar a função taxa de falha	Degradação e MCC
Joseph e Yu (2006)	Produtos	Estimar uma função que descreva o comportamento da medida de degradação em função dos fatores considerados	Degradação e Planejamento de Experimentos

O quadro 2.1 resume as aplicações citadas no texto, para efeito de facilitar a localização das citações e aplicações.

2.6. Testes de Vida Acelerados

Segundo Fogliatto (2009), testes acelerados são utilizados com o intuito de encurtar a vida de produtos ou acelerar a degradação de suas características de desempenho.

Produtos ou sistemas muito robustos têm uma confiabilidade muito alta demandando longos períodos de operação até a ocorrência de falhas nos testes tradicionais. Em testes acelerados, dados de desempenho são coletados sob condições extremas de funcionamento e, a partir da análise desses dados, procura-se prever o desempenho das unidades em condições normais de operação.

Meeker e Escobar (1998) indicam que, como a condução de testes de vida acelerados é cara, um planejamento bem elaborado se faz necessário para que os custos desses testes não sejam um fator limitante. Segundo esses autores, o planejamento do teste deve conter informações sobre:

- qual o tempo máximo esperado para condução do teste?
- o número esperado de unidades que irão falhar durante o teste?
- quantas unidades se devem colocar em teste para se obter o número mínimo de falhas estabelecido?
- quais são as condições sob as quais os produtos serão submetidos durante o teste?

Essas questões básicas podem impedir que o teste se prolongue por muito tempo, o que tornaria sua aplicação inviável.

Uma vez que geralmente o tempo para execução do teste é limitado e para a condução de uma boa análise dos dados é necessário um número mínimo de falhas, é fundamental que se defina as condições de teste coerentes.

Fogliatto (2009) apresenta quatro tipos de estresse aos quais as unidades podem ser submetidas:

- estresse constante
- estresse tipo escala
- estresse progressivo

- estresse cíclico

Os testes de estresse constante são os que mais se aproximam da realidade, uma vez que os produtos são utilizados na prática de uma maneira constante, sem grandes picos ou variações de estresse. Nos demais, o stress é aumentado de maneira progressiva até atingir um determinado valor ou aumentado em forma de escada, se mantendo um determinado tempo em cada nível de stress. O teste com stress cíclico, o stress atinge um valor máximo estipulado pelo teste e regressa ao valor mínimo e esse ciclo se repete até o fim do teste.

A definição do tipo certo de estresse é muito importante visto que a definição errada pode comprometer a validade do teste, quando o tipo de estresse definido não condiz com o tipo de estresse na operação real do produto, e também pode impedir que as unidades falhem, mesmo sob condições extremas, se essas condições extremas ainda não forem extremas o suficiente.

Quando as unidades colocadas em teste não falham até o fim do tempo de teste, esses dados são considerados censurados.

Freitas e Colosimo (1997) destacam três tipos principais de censura: censura a direita, censura à esquerda e censura aleatória. A censura à esquerda ocorre quando uma unidade já apresenta falha antes do início do teste, censura aleatória ocorre quando o tempo de teste é diferente para as diversas unidades colocadas em teste. A censura à direita, que é o tipo mais frequente de censura pode ser subdividida em:

- Censura do tipo I: onde o teste é interrompido em um tempo predeterminado e todas as unidades que não falharam até esse tempo são consideradas censuradas.

- Censura do tipo II: Onde o teste é finalizado após a ocorrência de um número predeterminado de falhas.

Ao final de um teste acelerado espera-se ter um número razoável de falhas para que possa ser feita uma análise. A análise dos dados de teste de vida acelerados deve permitir conclusões sobre o tempo de falha dos produtos em sua condição normal de uso, para isso se faz uso de modelos físicos de aceleração.

Segundo Fogliatto (2009), um modelo físico descreve o efeito da aceleração de um fator de estresse sobre a taxa de falhas da unidade em teste. Eles geralmente descrevem relações não lineares, ou seja, um aumento linear do estresse resulta em uma redução não

linear não linear dos tempos até falha. A escolha do modelo a ser adotado é importante devido a esse comportamento não linear.

Existem vários modelos físicos de aceleração, entre eles podem ser destacados como os mais utilizados na literatura: o modelo de Arrhenius, o modelo de Eyring e o modelo da lei da potência inversa (FOGLIATTO, 2009).

2.6.1. Modelo de Aceleração de Arrhenius

O modelo de Arrhenius é utilizado para relacionar tempo médio até a falha das unidades em teste com a sua temperatura de operação. As aplicações mais frequentes desse modelo são em componentes eletrônicos, baterias e pilhas quando a temperatura é o fator a ser acelerado. O modelo para cálculo da vida média em operação do produto é descrito pela equação 2.26 abaixo, as equações de 2.26 até 2.29 foram retiradas de Fogliatto (2009).

$$L_0 = L_s \exp \left[\frac{E_a}{K} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \quad \text{Eq. (2.26)}$$

onde L_0 e L_s são respectivamente a vida em condições de operação e a vida acelerada obtida no teste, T_0 e T_s são as temperaturas de operação e a temperatura de teste, E_a é chamada de energia de ativação e é uma constante que depende do nível de influência da temperatura no produto em teste, valores pequenos de E_a implicam em unidades pouco afetadas pela temperatura. K é chamada constante de Boltzmann e vale $8,623 \times 10^{-5}$.

2.6.2. Modelo de Aceleração de Eyring

O modelo de Eyring é uma alternativa ao modelo de Arrhenius na modelagem de dados acelerados onde o fator de stress é a temperatura. O modelo de Eyring é um pouco mais genérico que o de Arrhenius, podendo também oferecer um bom ajuste em situações experimentais em que o fator de aceleração não é temperatura.

O fator de aceleração do modelo pode ser representado pela equação 2.27.

$$A_f = \frac{L_0}{L_s} = \frac{T_s}{T_0} \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_s} \right) - \alpha \right] \quad \text{Eq (2.27)}$$

onde α e β são constantes obtidas por dois pontos em níveis diferentes de aceleração através de uma regressão linear simples e as outras variáveis seguem a mesma denominação do modelo de Arrhenius.

2.6.3. Modelo de Aceleração da lei da potência inversa

O modelo da potência inversa descreve o tempo até falha de um produto como função de um único fator de stress, como nos anteriores Arrhenius e Eyring. O fator de stress no modelo da potência inversa porém pode ser qualquer tipo de carga mecânica ou elétrica, como uma voltagem ou corrente excessiva.

Suponha um fator de stress V positivo. A relação da potência inversa entre o tempo até falha e o fator de stress é definido pela equação 2.28.

$$L_s = \frac{C}{V_s^n} \quad \text{Eq (2.28)}$$

onde C e n são constantes que dependem das características do produto e do método de teste utilizado e podem ser estimados através de regressão linear simples. Também existem estimadores de verossimilhança já estabelecidos na literatura para esse tipo de constante. Mais detalhes podem ser obtidos em Meeker (1998).

2.6.4. Modelos combinados de aceleração

Segundo Fogliatto (2009), modelos de aceleração combinados são usados quando mais de um fator de stress é aplicado simultaneamente às unidades. É uma combinação entre os modelos de Arrhenius e o da potência inversa e geralmente são utilizados onde um dos fatores de stress é a temperatura e o outro é voltagem.

O fator de aceleração é dado pela equação 2.29:

$$A_f = \frac{L_0}{L_s} = \left(\frac{V_0}{V_s}\right)^{-n} \exp\left[\frac{E_a}{K}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_s}\right)\right] \quad \text{Eq (2.29)}$$

onde V_0 e V_s são respectivamente a voltagem em condições de operação e a voltagem acelerada obtida no teste e as outras variáveis segue denominação dado no modelo de Arrhenius.

Os testes acelerados têm sido aplicados com frequência com o intuito de prever a confiabilidade do produto (YANG, 2010; MEEKER, ESCOBAR, e HONG, 2009; BAIK e MURTHY, 2008), porém esses testes geralmente são caros e é necessário ter uma infraestrutura em termos de instalações e equipamentos para teste, além de pessoal treinado para conduzir os ensaios. Além disso, os testes acelerados não representam a realidade dos produtos em sua condição de uso onde eles estão sujeitos a muitos fatores de stress de maneira aleatória. Para se estimar a confiabilidade do produto se utilizando de dados reais e não simulados é necessário fazer uso de outra fonte de informação de falhas, colhidas em campo de produtos sobre garantia.

3. Confiabilidade e garantia de produtos

Quando se trata de produtos, o estudo da confiabilidade pode ser dividido em estudos voltados para o desenvolvimento e lançamento de novos produtos no mercado ou para análise de dados de garantia de produtos que já estejam consolidados em seus respectivos nichos.

3.1. Confiabilidade para desenvolvimento de produtos

Para Huang, Liu e Murthy (2007), o sucesso de novos produtos depende de decisões de desenvolvimento e engenharia, gerando confiabilidade do produto, e decisões de marketing tais como preço e garantias.

Desde o advento da revolução industrial, novos produtos têm entrado no mercado a cada dia. Como resposta a livre concorrência desses produtos e o crescente nível de exigência sobre a qualidade dos mesmos, nota-se uma tendência clara de crescimento na complexidade e no grau de inovação que eles apresentam.

Devido ao rápido avanço tecnológico, a pressão para que o produto seja colocado rapidamente no mercado aumenta a cada dia. Sabe-se que, se não se é pioneiro no lançamento de um determinado produto no mercado, as chances de se obter lucro rápido com aquele produto são bem menores.

Lu et al. (1999) afirmam que o propósito final de um processo de desenvolvimento de produto é a obtenção de um produto que satisfaça as necessidades dos clientes com o intuito de gerar lucros. Porém, os mesmos autores afirmam que quando essas duas grandezas podem

ser medidas, após alguns meses de lançamento no mercado, geralmente já é tarde demais para se propor melhorias, principalmente em produtos eletrônicos onde o risco de obsolescência é alto.

A questão da obsolescência pode ser contornada quando se aplicam os estudo de confiabilidade não em produtos, mas em mecanismos e componentes. Esses mecanismos não são unicamente utilizados no produto estudado e conclusões sobre a confiabilidade desses mecanismos ou componentes podem trazer melhorias para os próximos produtos a serem desenvolvidos. Assim, ao invés de estudar a confiabilidade do produto em si, como um todo, pode-se recorrer aos tempos de falhas relativos somente ao componentes de interesse e estudar sua confiabilidade, assim, é possível traçar projetos para aumentar sua confiabilidade. Um exemplo é a tela de LCD utilizada nos celulares. Quando essa tela começou a integrar os celulares o número de defeitos atribuídos a essa parte do equipamento certamente era maior do que o número de defeitos encontrados atualmente. Uma análise sobre as falhas que usualmente ocorrem nesse componente certamente gera melhorias na sua confiabilidade, com o passar do tempo e sua utilização em outros produtos semelhantes pode ser estudada e avaliada.

O desafio do processo de desenvolvimento de produtos é determinar a confiabilidade do produto antes mesmo que ele seja lançado ao mercado. Em muitos casos, onde uma falha do produto põe em risco vidas de pessoas, esse aspecto é mandatório.

Segundo Yadav et al. (2003) existem várias fontes de informação de confiabilidade do produto durante sua fase de desenvolvimento. Informações provenientes de experimentos e testes de robustez, análise de modos de falhas e até mesmo as opiniões de especialistas deveriam ser consideradas no processo de melhoria da confiabilidade de produtos em desenvolvimento. Os mesmos autores ressaltam que os modelos de previsão de confiabilidade tradicionais não são suficientemente flexíveis para integrar as diferentes fontes de informação.

Existem soluções alternativas para a determinação da confiabilidade do produto nos estágios iniciais do seu desenvolvimento. Lindley (2000) propõe uma teoria de análise subjetiva de probabilidades para tratar os dados que muitas vezes podem ser vagos nos primeiros estágios do desenvolvimento enquanto Yadav *et al.* (2003) propõem a utilização de logica fuzzy como solução do problema.

A medida que se caminha para o final do processo de desenvolvimento, as informações vão ficando mais claras, além de existir em maior quantidade nos estágios finais.

Quando o produto está inteiramente projetado, surge a oportunidade de realizar testes nesse produto antes de lançá-lo efetivamente no mercado. Os teste de vida acelerados já foram abordados na secção 2.6, cabe aqui ressaltar que os resultados desses testes podem e devem ser utilizados para analisar produtos em desenvolvimento. Mesmo assim, análise de dados de falha em campo também constitui fonte de informação para desenvolvimento de novos produtos, principalmente porque, além de representarem falhas colhidas em condições reais, não simuladas, podem ser adicionadas a esses dados de falhas informações sobre a satisfação do cliente com o produto, o que não ocorre em testes acelerados, uma vez que o produto ainda não está nas mãos do cliente.

Hussain e Murthy (2003) abordam a questão de custos no processo de desenvolvimento de produtos. Quando se faz uma análise de confiabilidade do produto em desenvolvimento e se propõe modificações, existe um custo implícito nessas modificações. Esses custos normalmente recairão sobre o processo produtivo que deverá ser alterado para aumentar a confiabilidade do produto final. Os autores argumentam que é preciso estudar um ponto ótimo entre redução dos custos devido ao aumento da confiabilidade e aumento dos custos de produção para o mesmo fim.

Apesar de defender que o melhor momento para melhorar a confiabilidade do produto é na sua fase de desenvolvimento, devido aos altos custos de se trabalhar um produto que já está no mercado, Cui e Khan (2008) propõem um método para estudo de confiabilidade e estimação do período de garantia após o lançamento do produto.

Lu (1998) trabalha a estimativa de confiabilidade em uma indústria automotiva baseada em dados de falha prematuros, que ocorrem entre 4 e 5 meses após o lançamento do produto. Trabalhar com dados de falha prematuros ajuda a identificar componentes que têm maior possibilidade de ser acionados no futuro para *recalls*. Através da identificação desses componentes, modificações no projeto do produto já são feitas e os produtos que são produzidos após essa análise já saem corrigidos, diminuindo a quantidade de veículos chamados nos *recalls*. O autor conclui que a aplicação dessa metodologia traz benefícios financeiros tanto para o cliente quanto para a empresa.

Ion *et al.* (2007) aplicam os conceitos de análise de dados de campo em produtos eletrônicos. Os autores também utilizam dados de falhas prematuras para prever o comportamento do produto e então atuar no projeto antes que a vida útil desse produto acabe devido ao rápido grau de inovação presente no ambiente de eletrônicos. Os autores concluíram que o indicador utilizado foi incapaz de indicar o grau de confiabilidade do

produto dada a pouca quantidade de dados utilizada para seu cálculo, outros indicadores devem ser utilizados para esse tipo de análise.

3.2. Modelos de garantia de produtos

Segundo Murthy (2007), garantia de um produto é a segurança que o comprador tem de que o produto comprado desempenhará suas funções conforme especificado no momento da venda. É um contrato que é feito entre o comprador e o fabricante do produto, onde o fabricante se compromete, dentro de condições especificadas, a trocar ou reparar, parcial ou totalmente o produto em caso de dano.

Geralmente esse contrato é feito sob um unidade de medida de calendário, em meses ou anos. Porém em alguns produtos esse tempo vem especificado em missões, utilizando alguma outra medida que não seja o tempo de calendário. Por exemplo, nos automóveis, comumente se utiliza a métrica dos quilômetros rodados para fins de garantia e revisões.

A garantia oferecida para os produtos tem tido, nos últimos anos, um papel estratégico nas organizações. Uma vez que a concorrência é acirrada e existe grande similaridade entre produtos em termos de preço, qualidade e funções desempenhadas, os consumidores tem considerado cada vez mais a garantia que o fabricante oferece na hora de decidir por qual produto comprar.

Partindo-se do princípio que a confiabilidade do produto varia com o passar do tempo, há um número de falhas potenciais relacionadas a queda de confiabilidade durante os anos. O período de garantia de um produto deve ser determinado através da análise detalhada desses dados, levando em consideração a queda da confiabilidade do produto e o aumento dos custos com reparos de produtos em garantia.

Segundo Fogliatto (2009), três tipos de garantia são normalmente utilizados na determinação do período de garantia: a garantia integral mediante falha por tempo limitado, garantia integral mediante falha por tempo ilimitado e garantias *pro rata*. Também podem se definir políticas combinando esse tres tipos básicos.

A garantia integral com tempo limitado geralmente diz respeito a reposição do item que apresenta falha antes do término do período de garantia estabelecido por um item novo ou pelo reparo do item que apresentou falha. Não importa quantas falhas o produto tiver dentro do período de garantia, o consumidor irá receber quantos reparos ou itens novos for

necessário até o fim do período de garantia estipulado. Esse tipo de garantia se aplica em produtos de diversos generos: eletrodomésticos, produtos eletrônicos em geral, automóveis, etc.

A garantia integral ilimitada segue a mesma lógica do modelo anterior, a diferença é que quando um produto é reparado, ele recebe o mesmo prazo de garantia original oferecido na compra do produto. Assim, no primeiro modelo, de garantia limitada, se o produto falhar com um ano de uso e o período de garantia acordado for de dois anos, só restará um ano de garantia ao consumidor. No caso da garantia ilimitada, se a falha ocorrer com um ano de uso, o produto ou item reparado volta ao consumidor e os dois anos de garantia começam a contar novamente a partir da data do reparo.

Os modelos de garantia integral costumam resultar em altos custos para as empresas que fornecem os produtos e geralmente beneficiam o usuário. Nesse contexto, o problema chave é determinar o tempo e o preço a se cobrar pelo garantia com o intuito de reduzir os prejuizos que ela pode gerar.

O último tipo de garantia, o tipo *pro rata*, mesmo estando dentro do período de garantia, o produto é repostado a um custo para o consumidor dependendo da idade ou do momento da falha e o item repostado passa a ser coberto por uma garantia idêntica a original. Se um produto falha em um tempo “t” e a garantia total tem duração “g”, o consumidor paga, no ato do reparo, um valor igual a razão “t” por “g”, referente a proporção de tempo que ele utilizou do produto ou item que apresentou falha. Esse tipo de garantia, ao contrário dos demais, traz vantagens claras para o fornecedor e não beneficia tanto o consumidor. Para que nenhuma das partes se sinta prejudicada, tem sido muito utilizado o tipo misto de garantia, onde existem um período de tempo onde é oferecida a garantia integral seguido por um período de tempo onde é oferecido a garantia *pro rata*.

O modelo de garantia escolhido depende muito do tipo de reparo sob o qual o produto está sujeito. Existem produtos reparáveis e produtos não-reparáveis. Produtos não-reparáveis são aqueles onde o custo de reparação do produto é igual ou superior ao custo de reposição.. Nesses produtos o acesso aos componentes e a facilidade de se realizar manutenções dos itens tende a ser menor como é o caso de alguns eletrodomésticos. Em produtos reparáveis, o custo de reparação é significativamente inferior ao custo de reposição, como no caso de automóveis.

Existem ainda as chamadas garantias extendidas. Nesse tipo de garantia o consumidor pode pagar um preço além do preço do produto, no ato da compra, de modo a estender os

benefícios da garantia por mais tempo. A chave nesse tipo de garantia é determinar o custo a ser cobrado pela extensão de um tempo “t” no período de garantia original. Esse custo deve levar em consideração a queda da confiabilidade do produto com o passar do tempo.

Independente do tipo de produto, o tipo de garantia, o tempo de garantia estabelecido e o custo a ser cobrado por garantias estendidas devem ser calculados com base na análise cuidadosa de dados de garantia. Dados de garantia tem origem em dados de campo, na maioria das vezes, dados de assistências técnicas de produtos. É preciso garantir que esse dados estejam completos e parte-se da suposição de que todos os defeitos de produtos em garantia são seguidos do acionamento da assistência técnica. Caso contrário, a empresa não terá conhecimento da falha, e ela não será contabilizada no modelo, gerando obviamente, um erro na estimação da confiabilidade do produto.

Os dados para modelagem da confiabilidade do produto podem ter origem em diversas fontes. Algumas dessas fontes já foram abordadas no capítulo 2, como é o caso dos testes acelerados, na seção 2.6. Esse capítulo analisa dados provenientes do campo, discutir os problemas e vantagens de se trabalhar com esse tipo de dados e analisar algumas técnicas utilizadas na literatura.

3.3. Dados de campo

Dados de campo têm origem principalmente em relatórios de assistência técnica dos produtos em garantia. A precisão da coleta de dados depende muito da suposição de que a grande maioria dos clientes lesados por uma falha do produto aciona o setor de assistência técnica. Esse comportamento, porém, geralmente é observado somente para produtos que se encontram dentro do período de garantia.

A lógica por trás dessa afirmação é simples, quando clientes sabem que tem o direito de ter seu produto reparado gratuitamente acionam o serviço de assistência técnica especializado da empresa. Quando o produto falha fora do período de garantia, o cliente busca geralmente, um serviço de reparo mais barato, já que terá que pagar por ele. Dessa maneira os dados da falha dos produtos fora do período de garantia não chegam ao conhecimento da empresa fabricante. A utilização de dados incompletos de falhas provenientes de produtos fora da garantia pode levar a conclusões erradas sobre a real confiabilidade do produto. Por

esse motivo, quando se trata de dados de campo para modelagem de confiabilidade, utilizam-se dados de falhas limitados ao período de garantia do produto.

A limitação da utilização dos dados somente dentro do período de garantia causa o que os especialistas chamam de alta censura de dados. Marcorin e Abackerli (2006) apresentam diversas dificuldades de se trabalhar com dados de campo utilizando modelos tradicionais de modelagem de confiabilidade. Segundo esse autores, dados de campo são altamente censurados e por isso o volume de dados muitas vezes é insuficiente para uma análise apropriada. Santos (2008), também aborda a questão da alta censura de dados e utiliza dados obtidos através de especialistas para resolver esta questão.

A censura em dados de campo acontece quando, ao final do período de garantia, existem produtos que não falharam. O que acontece na prática é que, como se limita a coleta de dados ao período de garantia, observa-se pouca ocorrência de falhas. Logicamente, produtos de qualidade muitas vezes levam anos até a ocorrência da primeira falha, que portanto, não será observada no primeiro ou segundo ano de vida, correspondentes ao período de garantia usualmente fornecido.

Marcorin e Abackerli (2006) propõem a utilização do método de reamostragem *Bootstrap* para minimizar esse problema. O método proposto consiste em retirar aleatoriamente de um conjunto de tamanho n (que corresponde ao número de falhas observadas no período de garantia) várias amostras de mesmo tamanho n , com reposição. Com isso, consegue-se a partir de um conjunto pequeno de dados, gerar dados suficientes para a análise.

Em uma situação extrema, de zero defeitos durante o período de garantia, torna-se impossível utilizar o método de reamostragem *Bootstrap*. Para esses casos, Jiang et al. (2010) apresentam um método modificado de verossimilhança, adaptado para estimação de parâmetros de confiabilidade sem a utilização de dados de falhas.

Outro ponto positivo na utilização do método de Marcorin e Abackerli (2006) é o fato de que, pelo teorema central do limite, aplicado no método, os dados que antes seguiam uma distribuição não paramétrica podem agora ser representados pela distribuição normal, facilitando a análise (MARCORIN e ABACKERLI, 2006).

Muitas vezes, para dados de campo, não se conhece ou é impossível determinar uma distribuição de probabilidades que modele os tempos até falha encontrados. Os dados podem seguir diversas distribuições de probabilidade, as mais comuns em confiabilidade são a

distribuição de Weibull, a Lognormal, a Gama e a Exponencial. A identificação da distribuição de probabilidade que descreve os dados de campo é importante porque é através dela que se pode realizar previsões sobre o comportamento do produto.

Existem distribuições paramétricas e não-paramétricas. A diferença básica entre elas é que a primeira exige que seja assumida uma distribuição específica, e.g., Weibull, para a estimação dos parâmetros. Já a segunda não exige essa suposição, e é mais indicada quando não se conhece ou não é possível identificar a distribuição a priori como já foi abordado no capítulo 2.

Além da limitação do volume de dados, há uma segunda limitação que pode impedir ou dificultar conclusões acertivas sobre a estimação da confiabilidade. Muitas vezes observa-se falhas na sistemática de coleta de dados o que frequentemente gera relatórios com dados faltantes. Um exemplo clássico é a falta do tempo até a falha.

O tempo até a falha (TTF) pode ser definido como a diferença entre o instante de ocorrência da falha e o tempo no qual o produto entrou em funcionamento. Na prática porém, não é fácil determinar o TTF. Em produtos ou equipamentos que trabalham em intervalos, e.g., um lâmpada ou computador, onde os equipamentos são ligados e desligados em tempos aleatórios, a determinação do tempo até falha não é simples. Coit e Jin (2000) propõem um modelo para estimar parâmetros de distribuições onde há dados faltantes de TTF.

A utilização de dados de campo porém tem benefícios que merecem ser mencionados. Em testes laboratoriais de confiabilidade tenta-se simular algumas condições de funcionamento do produto na prática. Por mais preciso que sejam os laboratórios e os procedimentos de teste, há sempre um erro que envolve a diferença entre as condições reais com as condições simuladas.

Por outro lado, quando se controla as condições dentro de laboratórios pode-se determinar a influência de um determinado fator isolado sobre o TTF do produto. Sob condições reais, em campo, o que acontece é a presença de inúmeros modos de falhas (causados pela variação de diversos fatores simultaneamente) que seguem distribuições de probabilidades diferentes. Na maioria dos estudos envolvendo dados de campo parte-se da suposição que só existe um modo de falha ou que a probabilidade de ocorrência de todos os modos de falha é a mesma, o que nem sempre é condizente com a realidade.

Rand e Linn (2010), apresentam um estudo que comprova a diferença de resultados quando se assume erroneamente um único modo de falha. Os autores afirmam que a

suposição de que dados de campo assumem uma única distribuição com um único modo de falha não deve ser feita pois mostram resultados significativamente diferentes dos resultados conseguidos quando essa simplificação não é feita.

A decisão de se utilizar dados de campo ou dados de testes acelerados deve levar em consideração os fatores apresentados. Pan (2009), propõe uma abordagem bayesiana para previsão de confiabilidade utilizando dados de campo em conjunto com dados de testes acelerados. Segundo o autor, nenhuma das duas formas isoladas pode ser utilizada sem grandes limitações. Apesar dessa abordagem, a grande maioria dos trabalhos utilizam somente uma fonte de dados.

As seções subsequentes visam explorar com maior detalhamento os problemas em se trabalhar com dados de campo e as soluções já propostas para se resolver esses problemas.

3.3.1. Confiabilidade sem dados de falha

A situação mais crítica que pode ocorrer quando se trata da observação de produtos em garantia é a não ocorrência de falhas dentro do período de observação.

Métodos tradicionais paramétricos de estimação de confiabilidade geralmente partem das falhas observadas para atribuir antecipadamente uma distribuição de probabilidades ao conjunto de dados, para depois, derivar a função confiabilidade do produto em análise. Sem dados de falha, é impossível realizar qualquer análise paramétrica.

Nesses casos paramétricos, o problema é que a função confiabilidade é derivada diretamente da função densidade de probabilidade cuja própria definição diz que é a probabilidade acumulada de ocorrência da falha. É impossível, porém, pelos métodos tradicionais estudados, obter-se a função densidade de probabilidade e conseqüentemente a distribuição acumulada se não se observa a ocorrência de falha alguma.

Também os métodos tradicionais de estimação de parâmetros como o dos momentos e o da máxima verossimilhança partem do princípio que se tem a informação das falhas ocorridas, mesmo que seja de maneira intervalar.

Mesmo as análises e modelos não paramétricos usam como entrada para a análise os dados de falha observados do produto em análise. Apesar de não pressuporem nenhuma

distribuição *a priori*, as próprias fórmulas dos estimadores apresentados no capítulo 2 mostram que a presença de dados de falha é importante mesmo para análises não paramétricas.

Nesses casos, o número de unidades que falharam em um determinado intervalo é computado para que ao fim possa-se calcular a taxa de falhas ou a função de risco do produto e a partir dela, derivar-se a função confiabilidade. Semelhante ao caso paramétrico, não é possível obter a função de risco sem dados de falhas.

Jiang *et al.* (2010) apresentam um método modificado de máxima verossimilhança, adaptado para estimação de parâmetros de confiabilidade sem a utilização de dados de falhas. É importante ressaltar que, como ainda se trata do método de máxima verossimilhança, mesmo que modificado, a adoção de uma distribuição *a priori* ainda deve ser feita por se tratar de um método paramétrico de estimação. O método proposto por Jiang *et al.* (2010) pressupõe uma distribuição de weibull devido a características do produto estudado.

Wang e Langanke (2001) comparam confiabilidade entre um produto novo que ainda não possui dados de falha com dados de falha de um produto antigo, porém, os autores supõem que os parâmetros das duas distribuições são idênticos, o que nem sempre é verdade, limitando o trabalho.

Yadav *et al.* (2003) propõem um método de estimação da função confiabilidade utilizando parâmetros físicos de desempenho. Na verdade a metodologia que foi proposta por Yadav *et al.* (2003) é muito semelhante a técnica utilizada em estudos de degradação, onde as falhas não ocorrem e é necessário utilizar medidas de desempenho para monitorar as condições do produto ou item e assim desenvolver o modelo para prever futuras falhas. Quando da ausência de falhas, sem que seja necessário se fazer muitas suposições que limitam o estudo, utilizar técnicas de degradação é ainda a melhor solução quando é possível medir as grandezas que representam o desempenho do produto.

3.3.2. Confiabilidade dados de falha faltantes

A utilização de dados de campo para estimação da confiabilidade do produto depende fortemente de dados coletados pela manutenção ou assistência técnica (MARCORIN e ABACKERLY, 2006).

Essa dependência é causa de uma série de outros empecilhos quando se trabalha com dados de campo. A falta de armazenamento de dados de falha é muito comum em empresas que não tem uma área de assistência técnica bem estruturada com um sistema integrado que possibilita busca de informações de tempos até falha coletados de forma descentralizada, nas diversas redes de assistência técnica que prestam serviço ao fabricante. A dificuldade ao acesso a essas informações e o impacto dessa dificuldade nos estudos de confiabilidade tem sido um problema estudado nos últimos anos.

Coit e Jin (2000) propõem um método para estimação da função confiabilidade quando há dados faltantes. Um caso típico é quando, para alguns produtos, o tempo até falha não é coletado. Sendo assim só se tem acesso parcial às informações sobre a falha dos produtos em estudo. É como se em mil falhas que foram registradas em um determinado período só foram registrados 900 tempos até falha ou muitas vezes, um porcentagem muito menor. A falta de informações sobre os demais produtos dificultam a estimação dos parâmetros da função densidade de probabilidade.

Na verdade, quando isso ocorre, é difícil adequar alguma função densidade de probabilidade aos dados. Devido a falta de dados, o perfil de falhas do produto fica comprometido e as distribuições comumente utilizadas começam a não ser adequadas aos dados. Ainda sim, uma análise não paramétrica se coloca como uma opção para contornar o problema.

A grande barreira ao uso de distribuições não paramétricas é a impossibilidade de se calcular intervalos de confiança para o modelo. Um modelo sem intervalo de confiança é um modelo onde não foram consideradas as margens ou os limites para os quais aquele modelo é válido. Sem esses limites, é extremamente complicado utilizar esse modelo para realizar previsões acerca da confiabilidade do produto, uma vez que não se conhece o erro que se está assumindo para cada tempo “t” de análise. Seria como ter a média de uma população mas não ter nenhum conhecimento sobre o seu desvio padrão e querer avaliar se essa população ou conjunto de dados é adequado para alguma situação particular. Sem uma medida de dispersão ou variabilidade dos dados é impossível tirar conclusões sobre a qualidade do modelo.

Marcorin e Abackerly (2006) propuseram uma metodologia que tenta solucionar simultaneamente o problema de se ter poucos dados, utilizando uma distribuição não paramétrica e o problema do cálculo do intervalo de confiança para o modelo não paramétrico utilizado. A figura 3.1 ilustra o método proposto por Marcorin e Abackerli (2006).

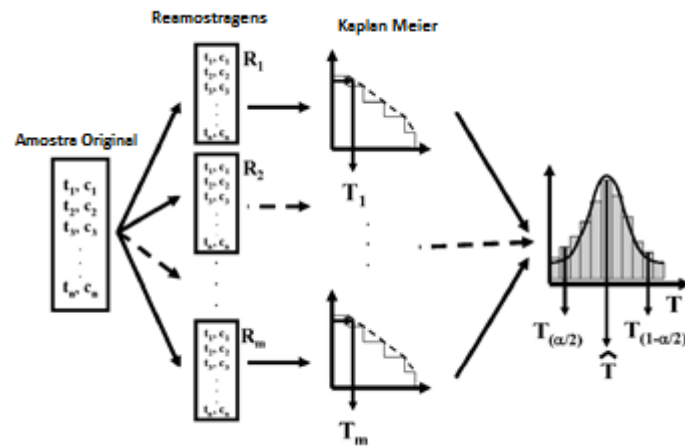


Figura 3.1 - Método de reamostragem combinado com uso de distribuições não paramétricas - adaptado de Marcorin e Abackerly (2006)

O método consiste basicamente em 3 etapas. Em uma primeira etapa, se gera de uma amostra inicial várias reamostragens com reposição seguindo o método *Bootstrap*. Esse método nada mais é do que retirar aleatoriamente de um conjunto amostral de tamanho “n”, “n” medidas, com reposição, para formar outro conjunto amostral de tamanho “n”, derivado do conjunto original.

É importante ressaltar que a aleatoriedade e a reposição são pontos-chaves desse método *Bootstrap*. Esse procedimento é repetido “m” vezes, até que se obtenha um conjunto de dados substancial para se trabalhar.

Através desse método, o pesquisador elimina as consequências de se trabalhar estatisticamente com valores pequenos de “n”, pois ao invés de se trabalhar com o conjunto inicial de “n” medidas, o autor trabalha com um valor “m” de distribuições, sendo “m” tão grande quanto o pesquisador queira.

A partir dessas “m” reamostragens do conjunto original, o pesquisador atribui para cada um desses conjuntos uma distribuição não paramétrica e utiliza o estimador de Kaplan-Meier para obter a distribuição.

Portanto, cada reamostragem representa agora uma distribuição de probabilidades obtida através do estimador de Kaplan-Meier e cada distribuição possui um MTTF representado na figura 3.1 por $T_1 \dots T_m$.

Como já abordado neste capítulo, o principal problema de se utilizar distribuições não paramétricas é a impossibilidade de se calcular o intervalo de confiança para o modelo, uma

vez que não se trabalha com parâmetros. No terceiro passo do método proposto, o pesquisador supre essa dificuldade aplicando o teorema central do limite e a partir deste ponto, trabalhando com dados que seguem a distribuição normal.

Sabe-se que a distribuição normal é uma distribuição paramétrica com parâmetros média e desvio padrão. Como resultado do método, portanto, tem-se um MTTF médio e um desvio padrão relativo ao MTTF das “m” reamostragens, resultando em uma distribuição normal de MTTF’s.

Tratando essa distribuição normal de MTTF’s como sendo a função densidade de probabilidade, pode-se derivar de acordo com as equações apresentadas no capítulo 2 as demais funções relativas a confiabilidade do produto.

Esse método mostra-se útil na resolução do problema de se calcular o intervalo de confiança quando se utiliza distribuição não paramétrica. O método porém, não contempla outras dificuldades ao se tratar dados de campo como a presença de muitos modos de falha e o fato de os dados ainda serem altamente censurados, restritos ao período de garantia.

3.3.3. Confiabilidade com dados censurados

Marcorin e Abarckerli (2006), Santos (2008) e Fogliatto (2009), entre outros autores, expressam em seus trabalhos a dificuldade de se trabalhar com dados censurados.

A primeira coisa que deve ficar clara é o que efetivamente significa a censura de dados. Freitas e Colosimo (1997) definem censura de dados como qualquer unidade analisada que não apresenta falha no período de estudo. Esses autores, conforme já abordado na secção 2.6, destacam três tipos de censura. Desses três tipos apresentados na secção 2.6, a censura à direita é a mais comum, principalmente quando se trata com dados de garantia onde, após o período de garantia, que é fixo, qualquer unidade que não apresentar falhas é considerada censurada.

Usar dados dentro do período de garantia é importante, pois, após esse período, o fabricante não tem mais controle sobre os dados de falha e esses dados se tornam pouco confiáveis. É fácil perceber, que, após o período de garantia, o cliente, que após este período tem que pagar pelo reparo do produto, irá procurar o serviço de reparo mais barato, que geralmente não é o serviço oferecido pelo fabricante. Assim, as falhas que ocorrem após o

período de garantia não chegam a ser computadas no banco de dados do fabricante e não podem ser utilizadas para análises de confiabilidade.

A principal questão que emerge dessa problemática é qual seria, ou como considerar o tempo até falha de uma unidade que não apresentou falha até o final do período de garantia. Esse tempo até a falha certamente não pode ser ignorado, mas também não pode ser considerado de qualquer maneira.

As figuras 3.2 e 3.3 ilustram o que acontece quando ocorre a censura de dados, na prática. Para ilustrar, considere-se a produção de quinhentas unidades de um determinado produto que se deseja analisar. Suponha também que as quinhentas unidades foram acompanhadas por dois anos, que é o período de garantia oferecido pelo fabricante e após esses dois anos somente cem unidades falharam. A dados utilizados para análise da confiabilidade, portanto, são os cem tempos até falha que se conseguiu medir. Os outros quatrocentos tempos, que não foram medidos são considerados como falha após o período de dois anos, porém nada se pode afirmar com relação à distribuição de probabilidades que se adequa a esses dados.

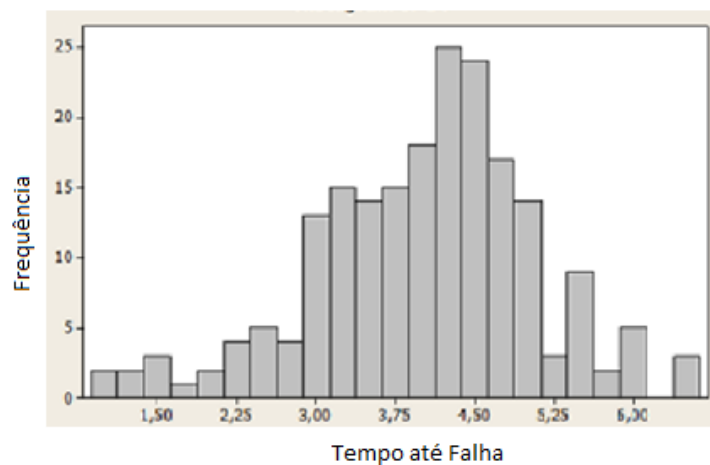


Figura 3.2 - Distribuição hipotética de tempos de falha provenientes de dados de garantia sem censura

A figura 3.2 ilustra os 100 tempos até falha onde efetivamente podem-se medir as falhas. Com base nessa figura e realizando um teste de adequação apropriado pode-se afirmar qual distribuição de probabilidades melhor descreve o comportamento desses cem dados

A questão agora é: essa distribuição, obtida a partir de um quinto dos dados amostrais (cem em um total de quinhentos), pode ser considerada uma amostra adequada para representar a população? A resposta a essa pergunta é “não” e se justifica pelo fato do

comportamento dos outros quatrocentos dados ser totalmente desconhecido, podendo estar sobre influências de modos de falhas diferentes dos que geraram as falhas das cem unidades observadas.

A distribuição que representa a totalidade da amostra de dados analisados, considerando que as unidades que falharam após o período de garantia pode ser representada esquematicamente pela figura 3.3.

Como não se conhece a distribuição das falhas após o período de garantia, todos os dados censurados são representados por uma única coluna ao final do gráfico. Quando a censura é percentualmente pequena, a capacidade da censura em alterar a distribuição já conhecida é pequena, e pode ser desconsiderada. Porém, na grande maioria dos casos, a censura é significativa e representa cerca de 90% a 95% dos elementos da população.

Como se pode notar na figura 3.3, a distribuição que melhor representa os dados, que na figura 3.2 era bem definida, se torna difícil de identificar, pois a última coluna que representa a censura dos dados, é significativa.

Em outras palavras, é necessário identificar outra fonte de dados para acessar a informação que não pode ser obtida devido à censura dos dados.

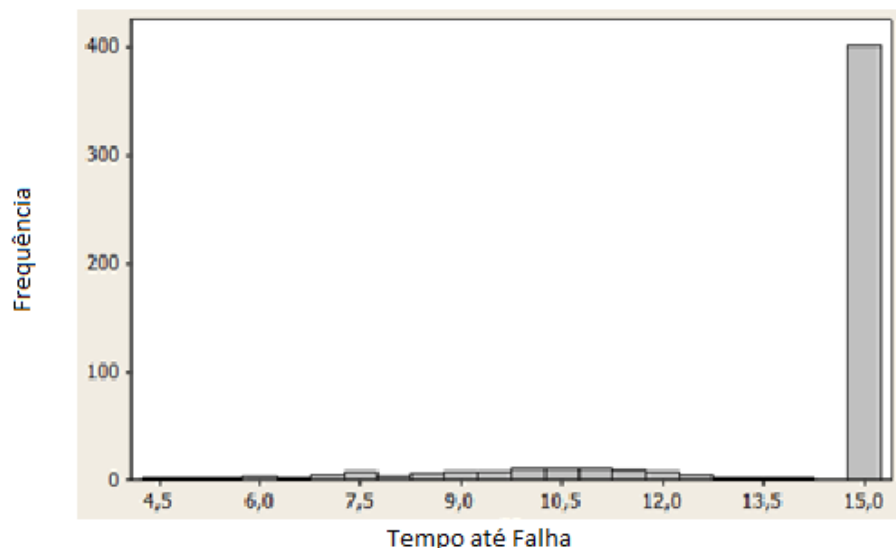


Figura 3.3 - Distribuição Hipotética de tempos até falha provenientes de dados de garantia com censura

Santos (2008) propõe uma solução para esse problema. O autor utiliza-se de um questionário direcionado para especialistas de assistência técnica na tentativa de obter as

informações de falha após o período de garantia. Esse questionário pode ser encontrado nos anexos do trabalho de Santos (2008).

Após o preenchimento deste questionário tem-se a informação de como a função $F(t)$ varia com o tempo e, a partir dela, podemos derivar a função $f(t)$ e gerar os dados que antes eram considerados censurados. A figura 3.4 mostra esquematicamente o procedimento utilizado por Santos (2008).

No exemplo utilizado, das quinhentas unidades colocadas em teste, somente cem apresentaram falha dentro do período de garantia. Segundo o método apresentado por Santos (2008) os outros quatrocentos dados faltantes seriam gerados aleatoriamente, mas seguindo a distribuição de probabilidade que melhor se adequa aos dados conseguidos através de especialistas.

Assim, a opinião dos especialistas serve somente para se obter informações sobre a distribuição de probabilidades que melhor modela os dados que não falharam, ou seja, através da opinião de especialistas, transforma-se a ultima coluna da figura 3.3 em uma distribuição de probabilidades.

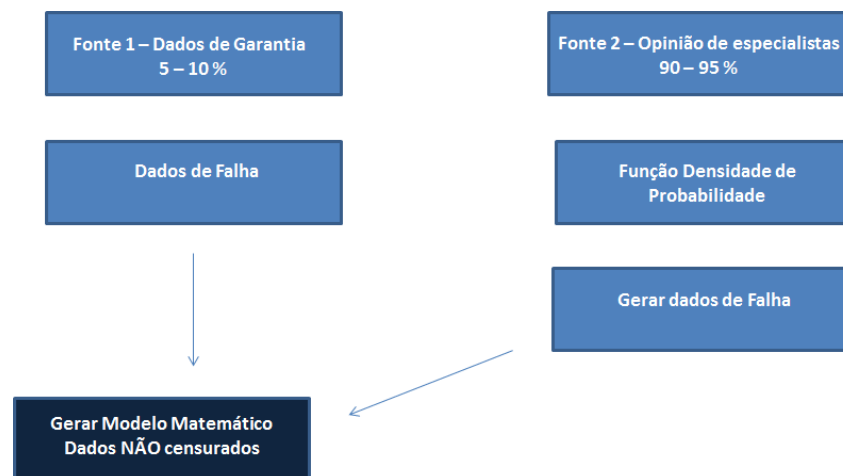


Figura 3.4 - Modelo utilizando opinião de especialistas

Utilizando-se dessa distribuição, geram-se os dados que antes eram censurados, que representa geralmente cerca de 90% a 95% do número de unidades da população. A partir desse ponto se passa a contar não mais com cem dados de tempos até falha, mas com todos os quinhentos dados, ou seja, 100%. Tendo essas informações de tempos até falha, pode-se obter $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$, $H(t)$ e todas as outras medidas de confiabilidade derivadas.

Santos (2008) também desenvolve um modelo que pode ser utilizado em dados provenientes de muitos modos de falhas. O autor se utiliza uma modelagem matemática complexa para derivar as equações e chegar a um modelo que consiga agregar modos de falha prematuros e por desgaste, além de falhas aleatórias que ocorrem durante toda a vida útil do produto.

Porém há alternativas onde a modelagem matemática não se faz necessária. O estudo de como os diversos modos de falha podem influenciar na modelagem da confiabilidade será exposto na secção subsequente.

3.3.4. Presença de muitos modos de falha em estudos de confiabilidade

Em estudos de confiabilidade é comum se deparar com situações onde o produto ou unidades em análise estão sujeitas a mais de um modo de falha. Primeiramente é necessário entender o que é um modo de falha. Segundo Fogliatto (2009), modo de falha é o mecanismo pelo qual a falha acontece. É importante diferenciar modo de falha de causa da falha. A causa de uma determinada falha pode ter sido um fio desencapado, porém o modo de falha nesse caso seria provavelmente um curto circuito.

Mesmo dentro da mesma fase de vida de um produto ou equipamento existem diversos modos de falhas presentes e atuantes sobre ele. Um equipamento mais antigo pode falhar pelo modo de falha “curto circuito” gerado, por exemplo, pela má condição dos fios, ou pelo modo de falha “desgaste mecânico”, gerado pelo fim da vida útil de um componente não inspecionado. Existem, porém, modos de falhas específicos para cada fase da vida útil do produto ou equipamento em análise.

Falhas na montagem ou na inspeção final de fabricação geralmente se manifestam nos primeiros instantes da vida do produto analisado. Assim se percebe claramente a formação de grupos de modos de falha de acordo com a fase da vida útil que eles usualmente ocorrem.

Santos (2008) identifica 3 tipos de modos de falha principais: os modos de falha prematuros, que acontecem nos primeiros anos de vida, os modos de falha de desgaste, que acontecem no fim da vida do produto e os modos de falhas aleatórias, que podem acontecer aleatoriamente durante toda vida do equipamento. Um curto circuito, por exemplo, pode ser um modo de falha aleatório, pois pode ser causado por um fio desencapado por efeito do

tempo de uso e má operação/manutenção ou pode ser gerado por uma falha na montagem dos componentes eletrônicos. Quedas em geral ou falhas consequentes de grandes impactos podem acontecer, do mesmo modo, em qualquer fase da vida do produto.

A modelagem desses diferentes modos de falha também pode ser graficamente representada. A figura 3.5 mostra um histograma de frequência de falhas no tempo típico de um modo de falha prematuro e a figura 3.6 mostra um exemplo de modo de falha por desgaste.

Nota-se na figura 3.5 que a concentração de falhas está no primeiro ano e se espalha um pouco até o segundo ano de vida do produto. Após o segundo ano, a ocorrência fica escassa ou é inexistente. Já na figura 3.6, nota-se exatamente o contrário, a presença de poucas falhas no início da vida útil e uma concentração de falhas após décimo segundo ano de vida.

Qualquer um desses modos de falhas pode ser modelado sem problemas por distribuições conhecidas e frequentemente utilizadas como é o caso da Weibull, Exponencial, Lognormal e Gama. Basta, para isso, alterar os parâmetros dessas funções, que geralmente são bem flexíveis e podem assumir um grande número de formas.

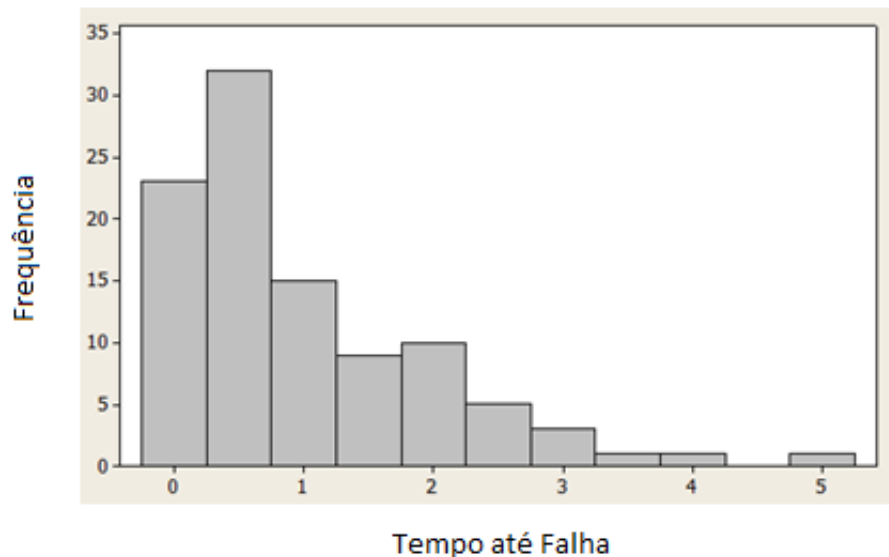


Figura 3.5 - Histograma de frequência de falhas típico de um modo de falha prematuro

Um dos principais problemas da modelagem da confiabilidade é que esses modos de falhas, prematuros e por desgaste usualmente estão presentes no mesmo produto ou

equipamento. Separadamente, a modelagem é simples, porém quando esses modos de falhas agem sobre o mesmo produto, a distribuição de falhas começa a adquirir formas difíceis de modelar. A figura 3.8 mostra uma curva típica quando se analisa dois modos de falha em um mesmo produto.

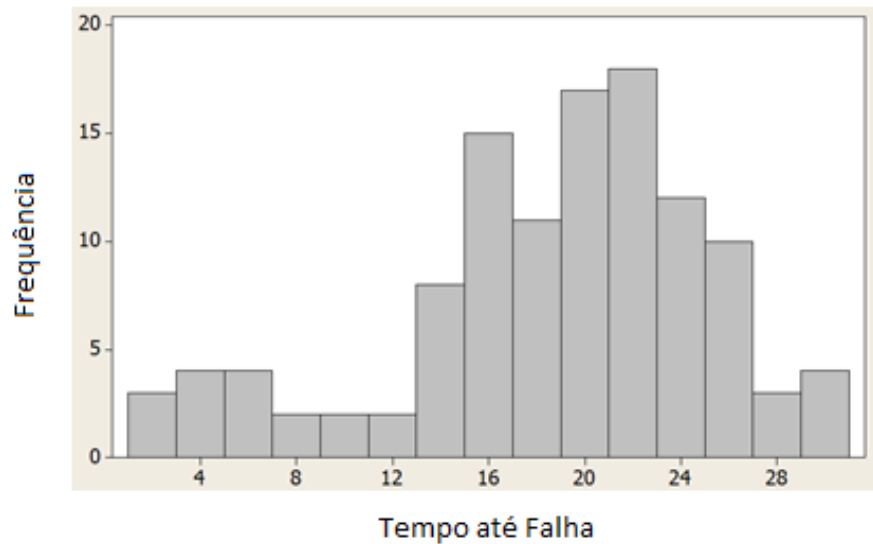


Figura 3.6 - Histograma de frequência de falhas típico de um modo de falha por desgaste

O que acontece na figura 3.7 é que se torna difícil encontrar uma distribuição conhecida que consiga se ajustar aos dados. Mesmo alterando os parâmetros, distribuição de probabilidade dificilmente tem dois picos ou dois focos de concentração de frequência, o que torna difícil a modelagem conjunta dos modos de falha.

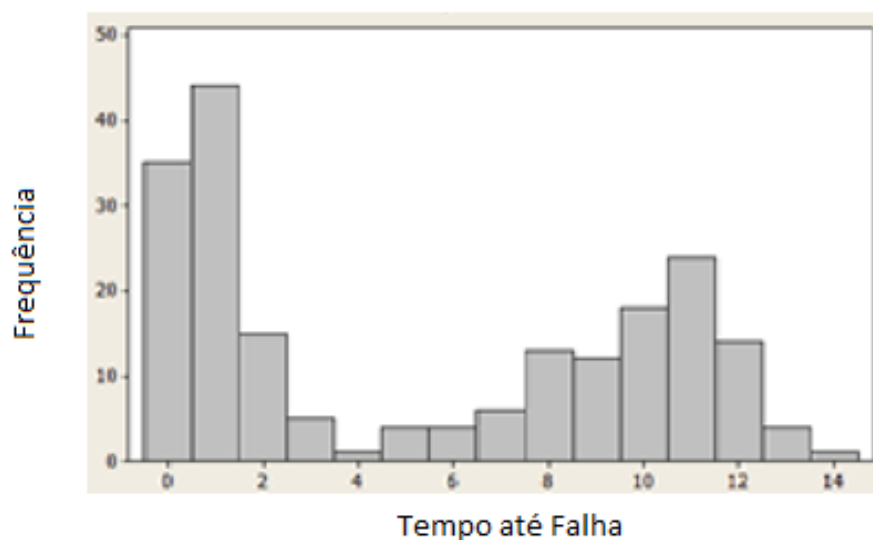


Figura 3.7 - Histograma de frequência de falhas na presença de ao menos dois modos de falha distintos

A pergunta que se faz presente é: como modelar a confiabilidade do produto utilizando funções conhecidas na presença de dois ou mais modos de falha distintos? Qual distribuição deve-se utilizar?

Uma primeira alternativa, já abordada em secções anteriores é fazer uso de distribuições não paramétricas para modelagem. Assim sendo, abre-se mão de distribuições com parâmetros já definidos e que são mais conhecidas e estudadas em prol da flexibilidade. O lado negativo de se utilizar funções não paramétricas é que junto com elas deve-se adotar um conjunto de outras técnicas para calcular o intervalo de confiança para o modelo, como já abordado neste capítulo.

Outra alternativa, proposta por Huang e Askin (2003) é a de utilizar o modelo chamado de *competing risks*. Neste caso, a modelagem dos diferentes modos de falha é feita de maneira separada utilizando-se distribuições paramétricas conhecidas. Uma vez que se consegue modelar os tempos até falha separadamente, tem-se acesso a todos os tipos de função e medidas de confiabilidade tais como $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ e $H(t)$ para cada modo de falha separadamente. O modelo de *competing risks* nada mais é do que uma maneira de juntar as modelagens de diferentes modos de falha.

Considerando os modos de falha como independentes uns dos outros. Ou seja, a ocorrência de um modo de falha não potencializa a ocorrência de outro, é possível utilizar a equação 3.1 para chegar à confiabilidade total do produto.

$$R(t) = \prod_{i=1}^k R_i(t) \quad \text{Eq 3.1}$$

Onde $R(i)$ representa a função confiabilidade de cada modo de falha e $R(t)$ a função confiabilidade do produto.

Nesta fórmula a confiabilidade do produto nada mais é que o produtório das confiabilidades de cada modo de falha. É intuitivo perceber que se o produto falhar por um modo de falha ou por outro não é indiferente para modelar a confiabilidade do mesmo, uma vez que não se faz diferenciação de falhas e que os modos de falhas são independentes.

A partir da confiabilidade total do produto, podem-se utilizar as equações apresentadas no capítulo 2 para se chegar às demais medidas de confiabilidade. O capítulo seguinte apresenta a condução de um exemplo utilizando os conceitos abordados até aqui.

4. Análise de dados para modelagem de confiabilidade para componentes eletrônicos

Nesta secção busca-se conduzir uma análise de dados de garantia com o intuito de modelar a confiabilidade de um produto eletrônico. Utilizam-se os conceitos discutidos nos capítulos 2 e 3 e procuram-se soluções para superar as dificuldades em se trabalhar com dados de campo, apresentadas no capítulo 3.

4.1. Metodologia de pesquisa

O objetivo deste trabalho é gerar um modelo matemático que descreva a confiabilidade de um produto eletrônico a partir de dados de garantia coletados em campo. Assim o método de pesquisa escolhido para a condução do trabalho foi a de Modelagem e Simulação, que é discutida por Bertrand e Fransoo (2002).

A figura 4.1 ilustra as fases envolvidas em um método de modelagem e simulação.

Pode-se visualizar claramente as etapas envolvidas no método de modelagem e simulação. A etapa de conceitualização parte do problema real e visa desenvolver um modelo conceitual. Nessa fase definem-se quais variáveis devem entrar no modelo, qual o escopo do problema e outras características iniciais que irão definir o modelo.

Na fase de modelagem propriamente dita, utiliza-se o modelo conceitual previamente desenvolvido e busca-se desenvolver um modelo matemático que o represente. Busca-se nessa etapa definir relações causais entre as variáveis previamente incluídas no modelo.

Nas etapas finais o modelo científico é resolvido matematicamente e a solução é implantada, resolvendo o problema proposto e fechando o ciclo.

O ciclo apresentado, porém, não sempre é completo. Bertrand e Fransoo (2002) dividem o método em axiomático ou empírico, normativo ou descritivo. Os autores chamam o método axiomático de método de teoria pura onde não se tem a preocupação efetiva em se resolver um problema prático, contrariamente ao método empírico, onde a resolução do problema prático e a implantação das soluções têm um papel central no método.

Bertrand e Fransoo (2002) afirmam ainda que em um método axiomático descritivo, o foco do trabalho está na fase de modelagem. Nesse método em particular, o modelo conceitual é frequentemente adquirido da literatura, através de pesquisas semelhantes envolvendo os mesmos tipos de variáveis. A preocupação nesse método é simplesmente partir do modelo conceitual retirado da literatura e desenvolver um modelo matemático capaz de representá-lo.

Já em um método axiomático normativo, o processo de modelagem ainda faz parte do método, mas existe uma preocupação em resolver o modelo e a solução pode alimentar novamente o modelo conceitual para possíveis mudanças ou contribuições para o modelo. Nota-se que em nenhum dos modelos axiomáticos tem-se a preocupação de resolver o problema real ou implantar solução alguma.

Os modelos empíricos por sua vez têm essa característica. Em um modelo empírico descritivo o ciclo é composto pelas etapas de conceitualização, modelagem e é seguido pela validação do modelo que é representado pela seta ligando o modelo científico à realidade.

Finalmente, o modelo mais completo que envolve todo o ciclo é o caso empírico normativo onde estão presentes as fases de conceitualização, modelagem, solução do modelo e implantação. Nesse ciclo, o pesquisador parte do problema real desenvolve todo o modelo conceitual e o modelo científico, tem a preocupação de resolver o modelo e implantar as soluções.

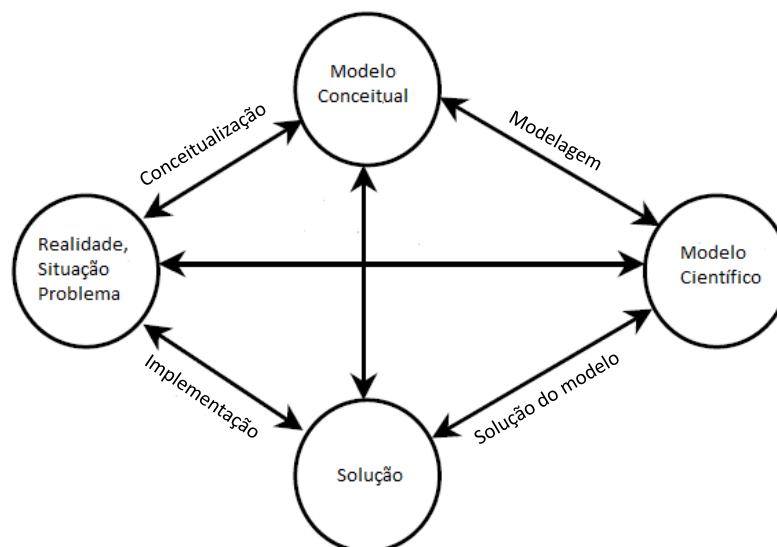


Figura 4.1 - Fases do método Modelagem e Simulação - adaptado de Bertrand e Fransoo (2002)

O método utilizado no presente trabalho é o empírico descritivo, focado simplesmente na etapa de modelagem, onde o modelo conceitual já está disponível na literatura e objetiva-se somente a obtenção do modelo matemático que o descreve.

Desta maneira, o resultado final deste trabalho é um modelo matemático que representa os dados de falha do produto eletrônico estudado, sem a preocupação efetiva de resolver o modelo e propor soluções para melhorar a confiabilidade do produto.

4.2. Caracterização do sistema

Existem diversos componentes críticos em um produto eletrônico, porém para efeito de análise o produto será tratado como se fosse um único componente. Toda falha de qualquer componente, desde que comprometa o funcionamento do produto será considerada como falha do produto e entrará na base de dados de falha utilizada na análise. Não será feita diferenciação de falhas com relação ao componente na qual ela ocorre a não ser para efeito de análise de modos de falhas predominantes, na secção 4.4.

Assim sendo, o produto não será analisado em forma de sistema e os modos de falha serão considerados independentes um do outro. Em outras palavras, será considerado que a falha de um determinado componente dentro do produto não afetará a ocorrência de uma possível falha em outro componente. O produto, quando reparado será tratado como “tão bom quanto novo”, e tempo até a falha será contabilizado a partir do término do reparo decorrente da falha anterior.

4.3. Coleta de dados de falha em garantia

Toda falha ocorrida dentro do período de garantia tem um tratamento especial dentro da empresa fabricante. As falhas são registradas apropriadamente nas diversas assistências técnicas que a empresa possui.

Se, no tempo de ocorrência da falha, o produto não estiver em garantia, é tratado pela própria assistência técnica e não há preocupação de reportar essa falha a matriz da empresa. Quando o produto está em garantia, a assistência técnica avalia a necessidade de troca de componente e faz a requisição a empresa fabricante solicitando garantia e a falha é registrada

e repassada à base de dados da matriz. O registro da falha é feito considerando as informações básicas listadas abaixo:

- Número de série do produto
- Modelo do produto
- Data de produção
- Data da Compra
- Data de entrada na assistência técnica
- Data de término do reparo
- Código da falha
- Descrição da falha
- Dentro/Fora da garantia

Nota-se que as informações básicas para cálculo do tempo até falha tais como as datas de compra, início e término de reparo estão presentes na base de dados, assim como informações para identificação do produto, número de série e modelo, e do modo de falha.

O tempo até falha foi calculado como sendo a diferença entre a data de compra do produto e a data de entrada na assistência técnica para produtos que apresentaram a primeira falha e como sendo a diferença entre a data de término de reparo da falha anterior e a data de entrada na assistência técnica para produtos apresentando a segunda falha em diante.

Nota-se que existe uma suposição de que o produto foi colocado em funcionamento no momento da compra e que funciona continuamente até o momento da falha. Essa suposição é comum quando o tempo de análise é o tempo de calendário.

A escolha do modelo analisado foi feita utilizando-se dos dados de produção e de falha de cada modelo e os critérios utilizados foram:

- 1) Que o modelo tivesse um volume de produção significativo para a empresa, ou seja, estivesse entre os 10 modelos com maior volume de produção.
- 2) Que o modelo escolhido tivesse, dentre os modelos escolhidos no critério 1, a menor censura de dados, ou seja, maior número de falhas, percentualmente ao total produzido do modelo.

O modelo escolhido teve um registro de produção de 201.916 unidades entre julho de 2009 e junho de 2011, ou seja, produção anual de 100.958 unidades e foram registradas 23.998 falhas entre julho de 2010 e junho de 2011, período de um ano referente ao período de garantia oferecido para o produto. Com base nesses dados anuais, sabe-se que a censura de dados presente é de 76,2% e é de natureza mista, pois os produtos entraram em funcionamento em tempos diferentes (censura aleatória) dado pela data de compra do mesmo e a análise foi limitada ao período de garantia, que é de um ano (censura a direita).

A partir da escolha do modelo, foi calculado para cada registro de falha o tempo até a falha conforme método já especificado. Só foram consideradas falhas que ocorreram dentro do período de garantia.

A partir deste ponto tem-se, portanto, uma massa de dados de tempos até falha com a qual o trabalho foi desenvolvido.

4.4. Análise preliminar dos dados

A primeira análise que geralmente é feita em um estudo de confiabilidade é a distribuição de frequência dos tempos até falha coletados. Essa pode ser feita de maneira gráfica fazendo-se uso de um histograma.

A figura 4.2 mostra o histograma de distribuição dos tempos até falha coletados.

Nota-se que a frequência de falhas começa relativamente baixa até a vigésima quinta semana e após esse tempo a frequência tem um acréscimo significativo e quase dobra até chegar a seu pico na quadragésima terceira semana, voltando a cair até o fim do período de garantia, que é de um ano, ou cinquenta e duas semanas.

A primeira providência, quando já se conhece a distribuição de frequência dos tempos até falha é tentar ajustar uma distribuição de probabilidades já conhecida para caracterizar a massa de dados de garantia. Para isso é feito um teste de adequação considerando as distribuições mais conhecidas em confiabilidade.

A figura 4.3 mostra o ajuste obtido considerando as distribuições Weibull, Exponencial, Gamma e Lognormal e a figura 4.4 mostra uma tentativa de ajustar a massa de

dados com distribuições conhecidas, mas não tão comuns em confiabilidade. Os gráficos foram obtidos do software MINITAB 16.

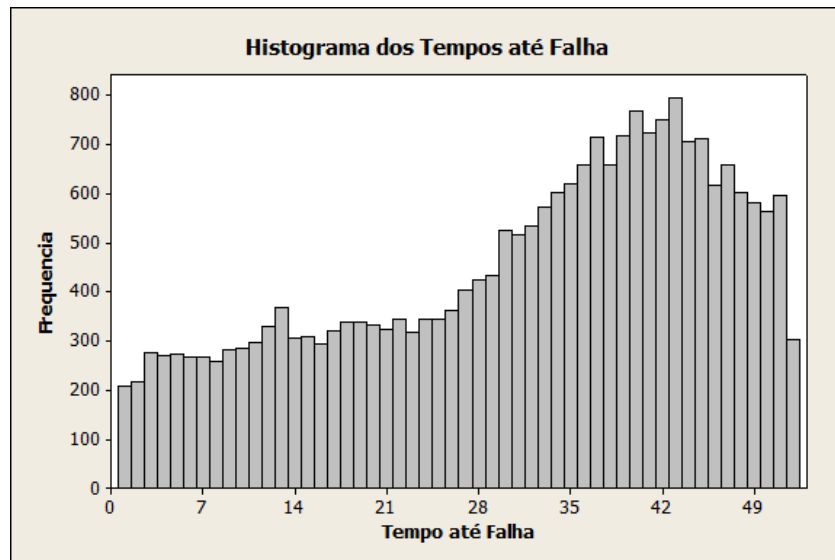


Figura 4.2 - Histograma dos tempos até falha coletados no período de garantia

A análise desse teste de adequação é obtida graficamente e confirmada através do *P-Value* que caracteriza o resultado do teste de adequação para cada distribuição considerada. Nota-se claramente pela análise da figura 4.3 e 4.4 que nenhuma das distribuições consideradas apresentou bom ajuste à massa de dados.

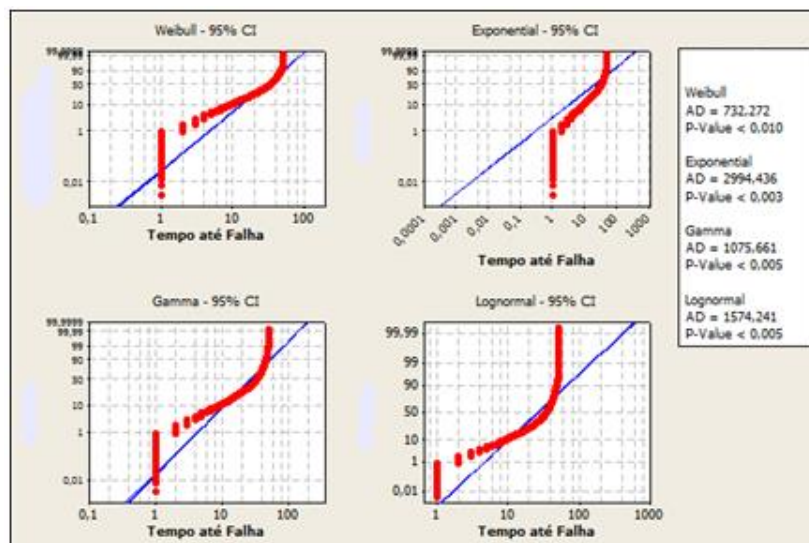


Figura 4.3 - Teste de adequação para principais distribuições de probabilidade

Além dos pontos vermelhos não estarem bem distribuídos sobre a linha azul, nenhum *P-Value* é superior ao nível de significância adotado de 5%. O que também pode ser confirmado na figura 4.4.

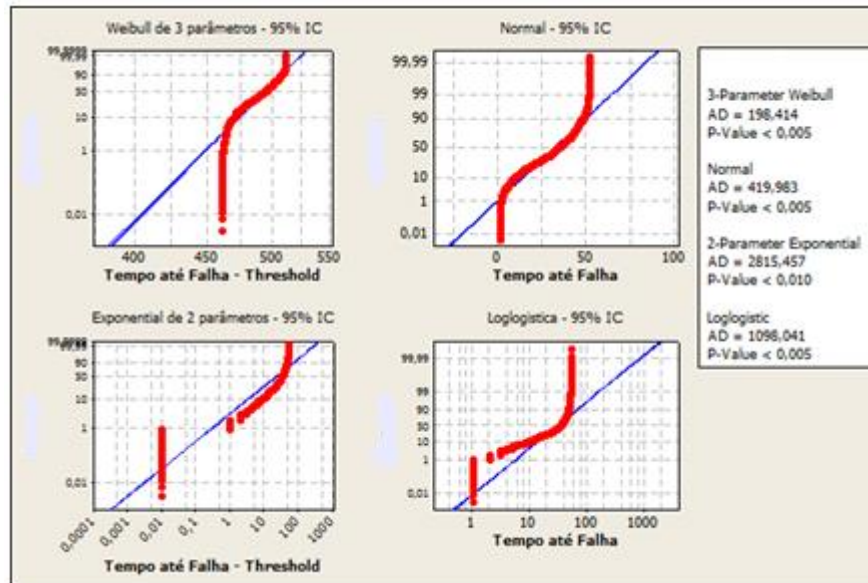


Figura 4.4 - Teste de adequação - outras distribuições

Conclui-se com o resultado desse teste que nenhuma das distribuições testadas descreve bem a massa de dados de tempo até falha coletada no período de garantia. Isso pode ser explicado, como já discutido na seção 3.3.4, pela presença de muitos modos de falha atuando sob o mesmo produto.

Uma segunda tentativa seria tentar separar os modos de falhas atuantes e tentar modelá-los separadamente. Para isso, seria necessário uma análise dos modos de falhas atuando sobre o produto em análise.

4.5. Análise dos modos de falhas predominantes

Baseando-se no campo da base de dados que permite identificar o código e a descrição em que cada falha ocorre, pode-se identificar os modos de falha.

Fazendo uma primeira análise, é possível identificar quantos códigos de falhas diferentes existem na base de dados.

A contagem inicial apontou a presença de 137 códigos de falhas diferentes, porém identificou-se também que 81% das falhas estavam concentradas em somente 7 códigos de falhas diferentes. Em outras palavras, 5% dos códigos de falhas continham informação sobre 81% das falhas ocorridas no período de garantia.

Nesse contexto faz-se necessário somente a análise dos modos de falhas dominantes portanto a análise será restrita aos 7 modos de falha que contém mais de 80% da informação necessária. A tabela 4.1 enumera quais são esse modos de falha e qual a sua participação percentual no total de falhas em garantia.

Tabela 4.1 - Análise preliminar dos modos de falha

Descrição da Falha	Número de Falhas	% do Total de Falhas	% acumulado
Display Intermitente	9705	41%	41%
Não Liga	4791	20%	61%
Liga, mas não funciona	1444	6%	67%
Ferrugem	1091	5%	72%
Desliga Automaticamente	844	4%	76%
Falha no Teclado	713	3%	79%
Sem som	631	3%	81%

Nota-se que os modos de falhas relacionados estão ligados a falhas prematuras do produto e pouco relacionados ao desgaste dos mesmos. Os dois modos de falhas que talvez estejam ligados a desgaste são “Ferrugem” e “Falha no teclado”, que apesar de poder ter origem na montagem, podem também ter origem no desgaste desse teclado. Sendo assim, a análise desses modos de falha indica que apenas 9% das falhas analisadas provém de modos de falha relacionados a desgaste no primeiro ano de vida do produto e 91% das falhas analisadas provém de defeitos de montagem ou outros tipos de falha prematura do produto.

Com a identificação das principais falhas, pode-se tentar modelar separadamente cada uma delas para posterior cálculo da confiabilidade.

Esta alternativa porém, logo foi descartada visto que mesmo dividindo as falhas em subgrupos para tentar modelá-las, os testes de adequação não identificaram nenhuma distribuição conhecida que conseguisse modelar alguns desses modos de falha. As figuras 4.5

e 4.6 mostram esta situação para o modo de falha com maior participação no total de falhas em garantia.

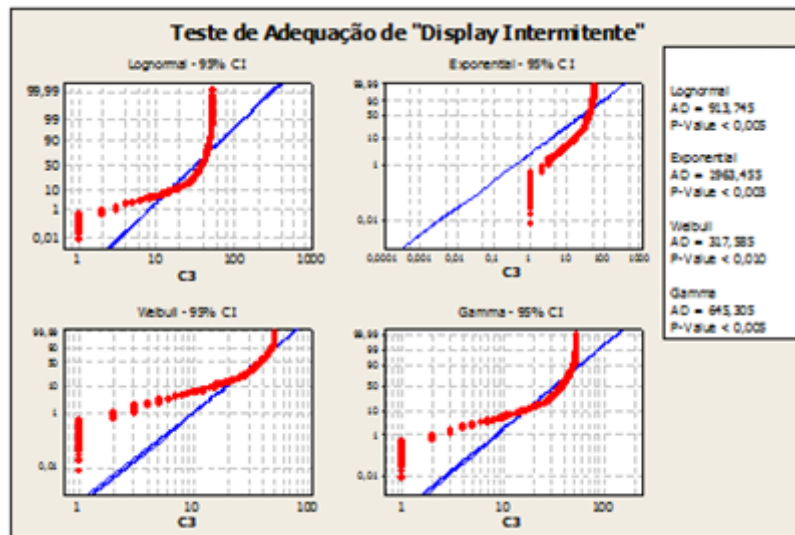


Figura 4.5 - Teste de adequação para o modo de falha "Display Intermitente" - principais distribuições

Nota-se que nenhuma das distribuições testadas consegue modelar com qualidade o modo de falha "Display Intermitente". O mesmo acontece com os demais modos de falha da tabela 4.1 o que inviabiliza o uso de distribuições paramétricas para a modelagem da confiabilidade desse produto, considerando o período de garantia apenas.

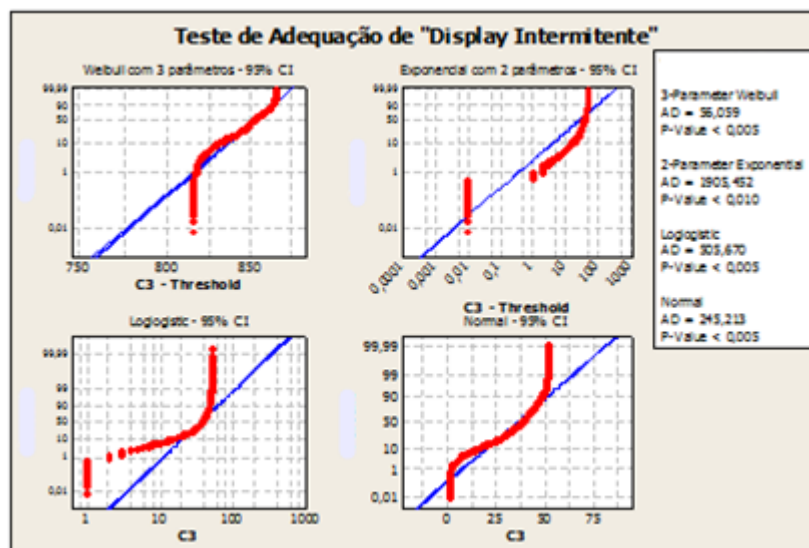


Figura 4.6 - Teste de adequação para o modo de falha "Display Intermitente" - outras distribuições

De qualquer modo, a modelagem da confiabilidade do produto utilizando somente os dados de garantia não deve ser feita visto que somente 23,8% dos produtos falharam nesse período e a modelagem seria feita na presença de uma censura muito grande de dados, prejudicando a análise e invalidando as conclusões.

Como forma de solucionar o problema da censura excessiva dos dados, foi utilizada uma outra fonte de dados: a opinião de especialistas. Essa fonte de dados visou resgatar a informação perdida no período de pós garantia, provavelmente incluindo modos de falhas mais relacionados ao desgaste do que relacionados a falhas prematura do produto.

4.6. Incluindo a opinião de especialistas no modelo

Um questionário direcionado foi aplicado a um grupo de nove especialistas com o intuito de acessar a informação relativa às falhas do produto após o período de garantia. Através deste questionário pretendeu-se traçar um perfil de falhas e analisar os modos de falhas atuantes no produto após o período de garantia ter terminado. O questionário completo se encontra no anexo 1, já preenchido com as respostas que representam o consenso entre os especialistas entrevistados.

Segundo resposta destes especialista, o ano que melhor representa a ocorrência da primeira falha no produto é o segundo ano de uso e a vida média dos produtos deste modelo é de três anos.

Algumas perguntas deste questionário foram feitas de maneira a validar as informações fornecidas pelos especialista com informações já conhecidas pela análise dos dados de garantia.

Os especialistas responderam que no primeiro ano de vida, apenas 40% das falhas podem ser atribuídas a problemas de montagem ou outras falhas de origem prematura e os outros 60% das falhas deveriam ser categorizadas como falhas por desgaste de algum componente.

Essa informação não confere com a análise feita utilizando-se os dados de falhas, onde verifica-se que a maioria das falhas ocorridas neste período, cerca de 90%, foram devido a

falhas de montagem ou falhas consideradas prematuras. Essa divergência serve como um alerta para a qualidade das informações fornecidas pelos especialista.

Como se conhece o percentual de produtos que falhou no primeiro ano de vida, que coincide com a censura de dados obtida através da análise dos dados de garantia , foi realizada outra verificação para validação dos dados. Pela análise dos dados de garantia, verificou-se que aproximadamente 23% dos produtos falharam no primeiro ano de vida. A alta censura de aproximadamente 77% foi motivo para a condução da análise de dados provenientes da opinião de especialista.

Quando perguntado aos especialista porém o percentual de falhas acumulado a cada tempo “t”, com “t” variando de zero semanas até 260 semanas, ou 5 anos, a informação foi divergente. Segundo os especialista apenas 3% dos dados falham no primeiro ano de vida. A figura 4.7 mostra um gráfico comparativo da evolução da função densidade acumulada de falha proveniente das duas fontes consideradas: dados de garantia e opinião de especialista.

Conluiu-se no gráfico que mesmo considerando a dispersão da opinião dos especialistas, há uma diferença entre eles e os dados de garantia coletados.

Para a modelagem da confiabilidade do produto porém, no presente trabalho, faz-se necessária a informação de falhas do produto após o período de garantia. Como a opinião dos especialistas é a única fonte de dados para este período, decidiu-se por continuar a análise para demonstração do procedimento, porém com a ressalva de que a opinião dos especialistas não foi validada.

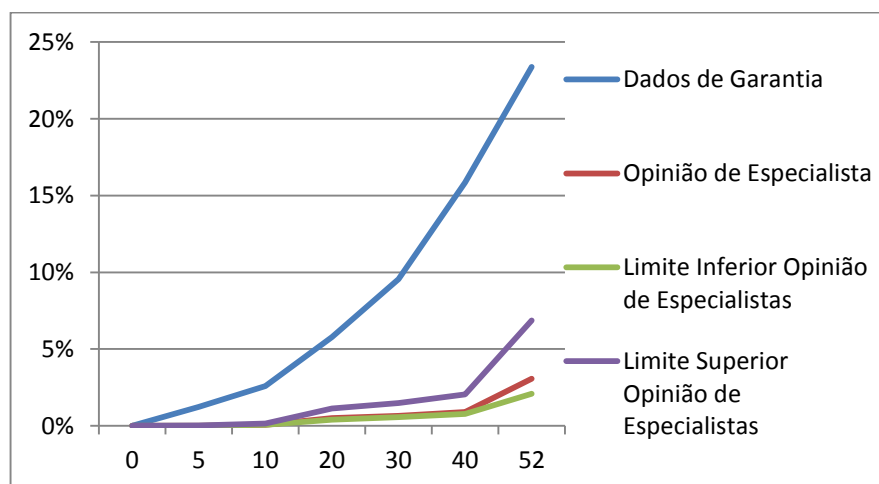


Figura 4.7 - Validação da opinião de especialista

O uso da opinião de especialista para modelagem da confiabilidade portanto, deve ser questionada sempre quanto a validade das informações recebidas. Se a empresa possui um sistema de coleta de dados consolidado e voltado para a área de confiabilidade, existem alternativas para o uso de opinião de especialista. O fornecimento de garantias estendidas gratuitas a clientes especiais pode ser uma fonte para coleta de informações referentes a falhas do produto. Se for necessário determinar o perfil de falhas do produto até o quinto ano de vida, por exemplo, basta para isso, fornecer a alguns clientes uma garantia especiais de 5 anos. A empresa participante deste estudo porém, não possuía banco de dados de forma a aproveitar esta alternativa.

O próximo passo na inclusão da opinião de especialistas no modelo foi a identificação de uma função densidade de probabilidade com base nas informações adquiridas através da questão. A tabela 4.2 fornece as informações dos especialista sobre o percentual acumulado de falha no produto até o quinto ano de uso.

Utiliza-se o software Minitab para através desses dados, obter uma função densidade de probabilidade para os dados de falha. Testou-se as principais distribuições de probabilidade com os dados obtidos através de especialista. O resultado pode ser obtido na figura 4.8.

Quadro 4.2 - Percentual acumulado de falha após o período de garantia segundo opinião de especialistas

Tempo "t" em SEMANAS de uso	Percentual de produtos que falham até "t"
78 semanas (1 ano e meio)	5,00%
104 semanas (2 anos)	10,24%
130 semanas (2 anos e meio)	18,00%
156 semanas (3 anos)	23,03%
182 semanas (3 anos e meio)	48,00%
208 semanas (4 anos)	65,03%
234 semanas (4 anos e meio)	76,00%
260 semanas (5 anos)	100,00%

Percebe-se na figura 4.8 que existem três distribuições com um alto coeficiente de correlação entre os dados coletados e as distribuições testadas. Em tese, qualquer uma delas poderia ser utilizada para descrever os dados adquiridos através da opinião de especialistas.

Foi escolhida a distribuição de Weibull para uma análise mais detalhada, visto que esta distribuição é largamente aplicada em estudos de confiabilidade.

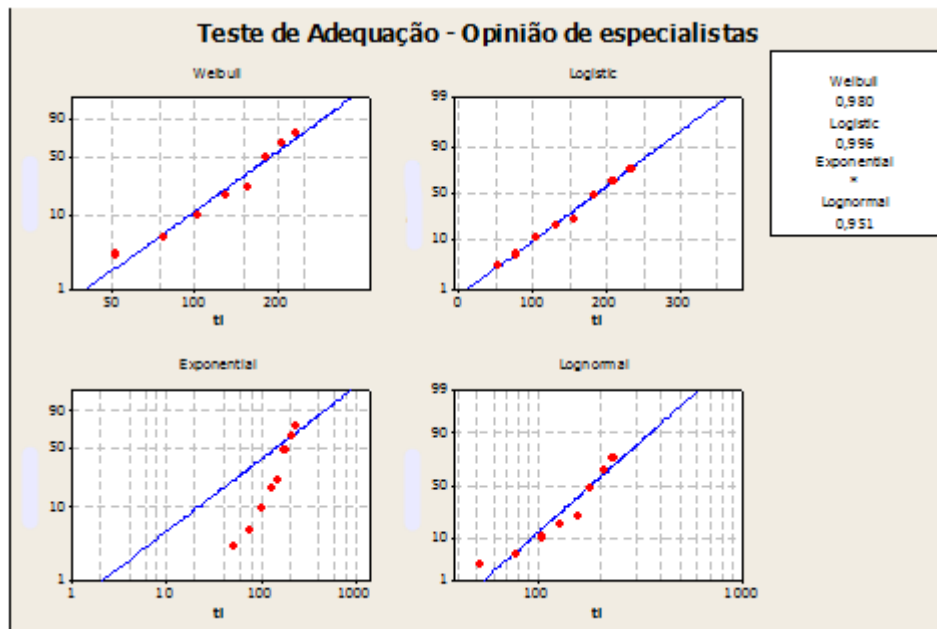


Figura 4.8 - Teste de adequação da opinião de especialistas

Quando se supõe uma distribuição de weibull, é possível determinar os parâmetros da distribuição weibull que melhor se ajusta aos dados. A figura 4.9 mostra os parâmetros selecionados.

Notou-se que uma distribuição de weibull com dois parâmetros, o de forma valendo 2,74 e o de escala valendo 217,47 representava adequadamente a opinião dos especialistas. Percebeu-se também um tempo médio até falha de 193,49 semanas. Assumiu-se essa distribuição como sendo a distribuição que melhor se ajustava aos dados provenientes da opinião de especialista o próximo passo foi gerar um conjunto de dados aleatórios a partir desta distribuição com o intuito de simular os tempos até falha das unidades que não falharam no período de garantia.

Foi através deste procedimento que se substitui a alta censura dos dados de garantia por tempos até falha simulados a partir da distribuição encontrada. O número de tempos até falha simulados deve ser igual ao número de unidades censuradas no período de garantia.

Utilizando-se novamente do software Minitab, gerou-se 76.960 dados aleatoriamente, seguindo a distribuição de weibull encontrada.

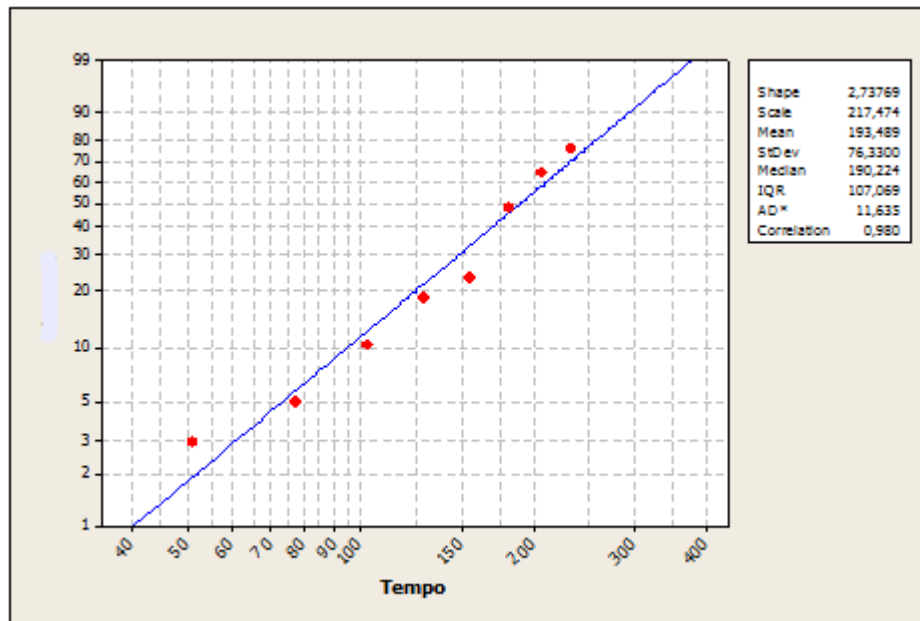


Figura 4.9 - Parâmetros da distribuição de weibull - opinião de especialistas

Após a geração dos 76.960 tempos até falha, foi preciso incorporar esses dados simulados aos 23.998 tempos de falha já conhecidos no período de garantia. Assim sendo e terminado este procedimento, começou-se a trabalhar com um conjunto de dados completos, e não mais censurados. A figura 4.10 mostra um histograma dos dados completos.

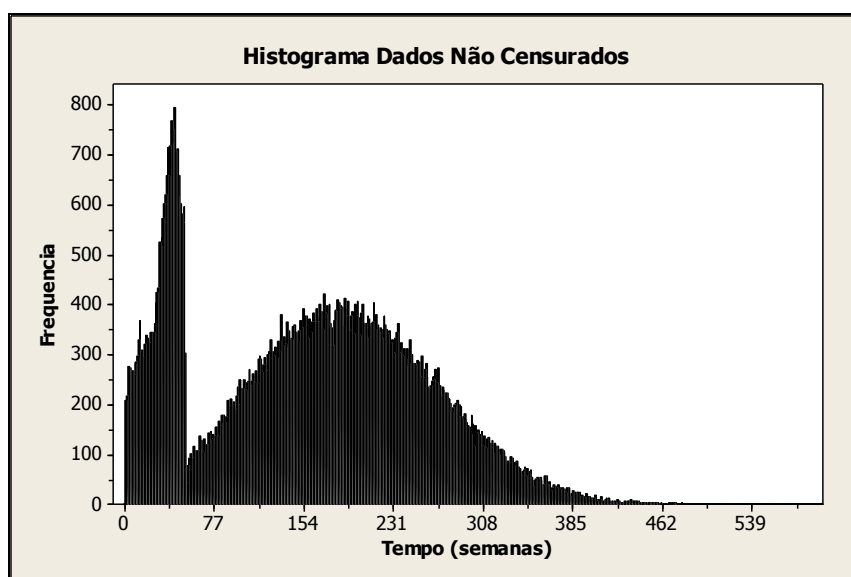


Figura 4.10 - Histograma de dados completos

Evidencia-se no histograma, em forma de uma descontinuidade na curva de frequências, a falta de qualidade da informação coletada através da opinião de especialista. Assumindo os dados coletados em garantia como corretos, pois representam a realidade, até a semana 52 pode-se ter maior certeza da qualidade dos dados. Exatamente na semana 52, verificou-se uma descontinuidade da curva de frequências somente justificável pela divergência entre a opinião de especialistas com os dados coletados.

De fato, o número de falhas aumentou até a quinquagésima segunda semana, na semana seguinte, o número de falhas provavelmente ainda seria alto, pois não existia razão aparente para esta queda brusca. Como, porém, na semana seguinte, trocou-se a fonte de informação e passou-se a utilizar a opinião de especialista, a lógica na formação da curva não se confirmou, dando origem a essa descontinuidade.

Ressalta-se novamente que, a não ser que os dados dos especialistas estejam validados, o uso da opinião de especialista não deve ser feito para cálculo de confiabilidade. Nesta pesquisa, utilizou-se os dados provenientes de especialistas porque foram a única fonte de informação para acessar os dados de pós garantia. Fica evidenciada a necessidade de um novo método para acessar essas informações. Tais métodos existem, porém é necessário ter-se uma base de dados estruturada para estudos de confiabilidade.

4.7. Cálculo da confiabilidade do produto

O cálculo da confiabilidade do produto foi feito fazendo-se uso dos dados coletados, por ambas as fontes e sumarizados na figura 4.10, apesar da descontinuidade já discutida acima.

Nota-se claramente que o uso de uma distribuição paramétrica não é possível, pois nenhuma distribuição conhecida teria a capacidade de se ajustar a esses dados. Para efeito de confirmação é realizado um teste de adequação com as principais distribuições de probabilidades e o resultado desse teste pode ser visualizado na figura 4.11.

Para a modelagem da confiabilidade, portanto, foi necessária a utilização de distribuições não paramétricas. Utilizou-se a distribuição de Kaplan-Meier para a modelagem da confiabilidade do produto. Através do software Minitab e baseado nas equações 2.22 e 2.23, obteve-se a curva de confiabilidade do produto, como se pode visualizar na figura 4.12, o modelo quadrático foi o de maior ajuste, 98,2%.

Nota-se na figura 4.12 a presença da descontinuidade na função confiabilidade. Descontinuidade esta que teve origem da função densidade de probabilidade e que se propaga para as demais funções de confiabilidade. Nota-se que descontinuidade continua na semana 52 de análise.

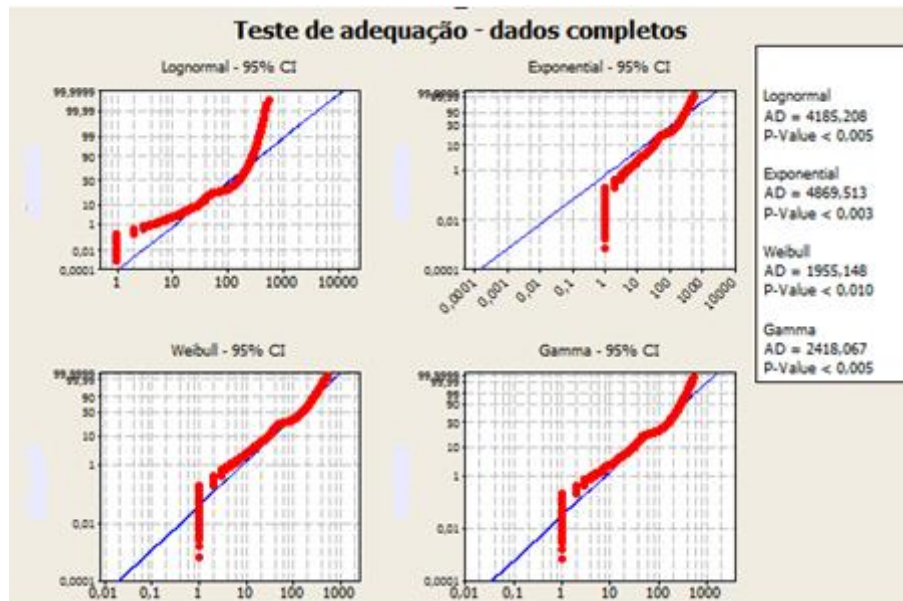


Figura 4.11 - Teste de adequação dos dados completos

Esta descontinuidade permaneceu presente em todos os gráficos que continham grandezas relacionadas a função densidade de probabilidade. Como exemplo, observa-se na figura 4.13 a função densidade de probabilidade acumulada, contendo a mesma descontinuidade.

Reitera-se aqui que a dificuldade de se trabalhar com funções não paramétricas de probabilidade está na fato de não ser possível a determinação de intervalos de confiança para o tempo médio até falha. Marcorin e Abackerly (2006) propõem uma solução para este problema, solução esta que foi adotada no presente trabalho como forma de calcular os intervalos de confiança para o tempo médio até falha.

Foi utilizado, portanto, o método de reamostragem bootstrap segundo procedimento da secção 2.3.2.3. A base de dados inicial de onde foram retiradas as reamostragens foi a de dados não censurados ilustrada na figura 4.10.

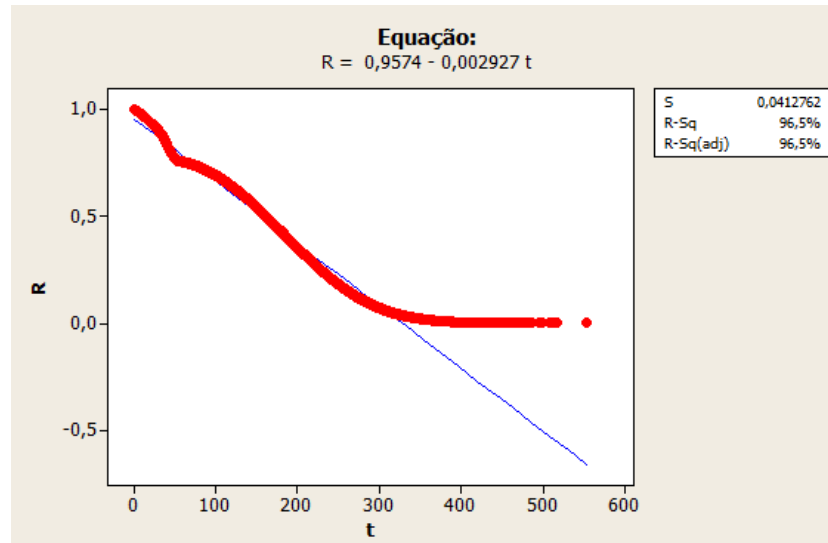


Figura 4.12 - Curva de confiabilidade do produto

A partir dessa amostra inicial de 100.567 valores foram gerados mais 50 reamostragens de mesmo tamanho e calculado o tempo médio de cada uma dessas reamostragens utilizando o estimador de Kaplan-Meier segundo procedimento apresentado na figura 3.1.

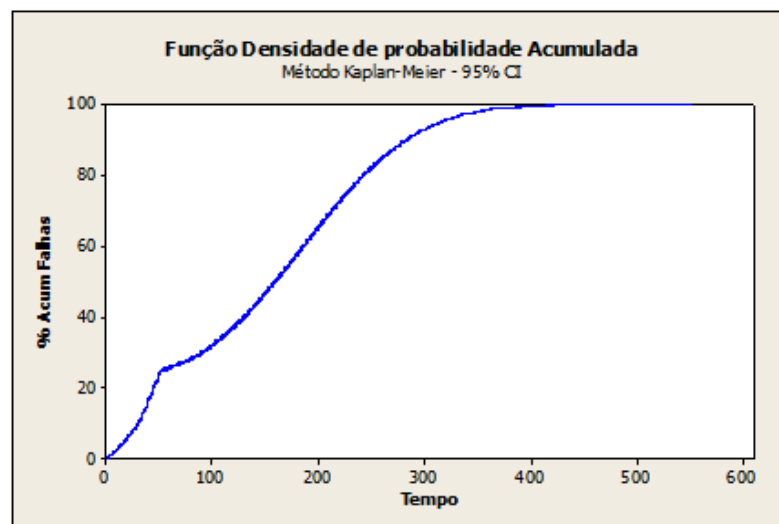


Figura 4.13 - Função densidade de probabilidade acumulada do produto

Depois de calculados os 50 tempos médios, espera-se que a distribuição desses tempos fosse aderente a distribuição normal, o que permitiria a definição dos intervalos de confiança para o tempo até a falha. A figura 4.14 mostra o teste de aderência dos dados a uma

distribuição normal. Concluiu-se através da figura que os dados seguiam uma distribuição normal com média 155,6 semanas e desvio padrão de 0,26.

Através desses valores, utilizando um índice de significância de 5% e considerando “n” igual a 50, utilizou-se a equação 2.25 para cálculo do intervalo de confiança do tempo médio até falha do produto.

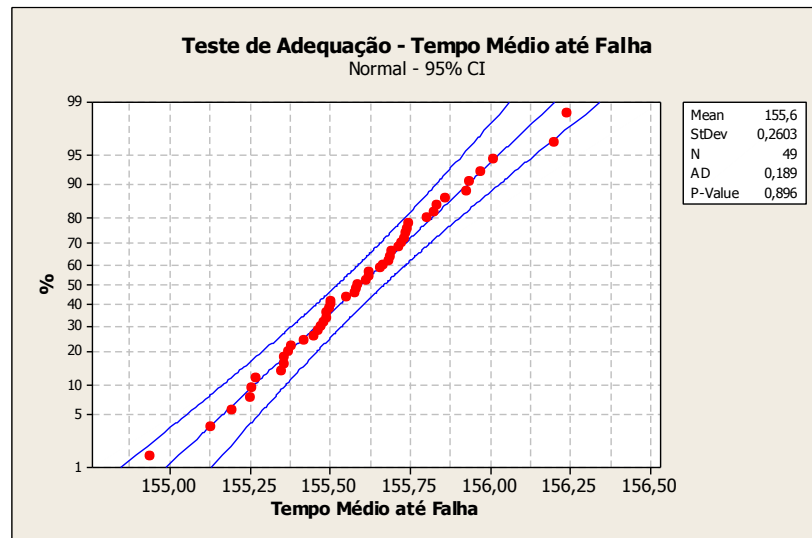


Figura 4.14 - Teste de adequação dos tempos médios até falha

A figura 4.15 mostra a distribuição dos tempos médios até falha com o intervalo de confiança calculado.

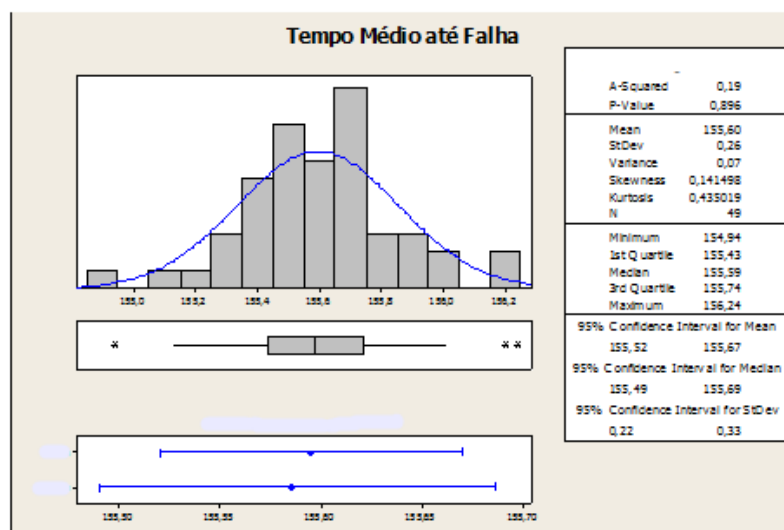


Figura 4.15 - Distribuição dos tempos médios até falha calculados, com intervalos de confiança

Percebe-se na figura 4.15 que os tempos médios até falha seguem uma distribuição normal, como já era esperado, possibilitando assim o cálculo dos intervalos de confiança.

5. Conclusões

Calculada a confiabilidade do produto juntamente com seu tempo médio até falha com respectivo intervalo de confiança e outras medidas de confiabilidade, tal como a densidade acumulada de falha, uma análise dos resultados obtidos e dos métodos utilizados se faz necessária para aproveitamento em outros trabalhos.

O primeiro item que se deve destacar sobre o trabalho diz respeito à base de dados para confiabilidade. Uma série de dificuldades surgiu quando a base de dados e também a própria política da empresa em relação a garantias não eram voltadas diretamente para o estudo de confiabilidade.

Primeiramente, a coleta de dados para estudos de confiabilidade utilizando-se dados de garantia não é feita pela empresa fabricante. Ela é conduzida, na maioria das vezes por empresas terceiras que prestam serviço de assistência técnica a empresa fabricante. O que acontece muitas vezes é que o registro das falhas no que diz respeito a informações importantes para o cálculo da confiabilidade ou mesmo para a identificação correta dos modos de falha foi realizado de maneira não padronizada pelas diversas assistências técnicas.

Quando uma assistência técnica tem seu próprio modo de fazer os apontamentos dos registros, mesmo que contenham os dados mínimos para análise, a anotação de dados não padronizadas pode gerar conflitos na hora da compilação desses dados para o cálculo da confiabilidade.

A falta da indicação do tempo até falha em alguns reparos é um exemplo de falha na anotação dos dados de reparo. A falta desta informação implica na exclusão do dado na análise realizada, o que automaticamente impõe um erro ao modelo.

Este fato não aconteceu, neste trabalho, de forma a influenciar drasticamente os resultados, pois houveram somente alguns casos isolados onde esse tipo de falha ocorreu. Porém vale lembrar a importância do apontamento correto da data de entrada na assistência, para que o cálculo do tempo até falha do produto.

Outra falha no apontamento de dados, que pode ser crítica se ocorrer em um percentual relativamente alto é o apontamento incorreto da identificação do produto. Ao se identificar o produto com modelo ou número de série incorretos, perde-se a referência do produto e não se consegue identificar se a falha em questão é a primeira, segunda ou terceira falha do produto.

Como o cálculo do tempo até falha é diferente para a primeira falha, quando comparado com as demais falhas, a falha na identificação do produto pode levar ao apontamento incorreto do tempo até falha. O tempo até falha de um produto em primeira falha é a diferença entre a data de entrada na assistência técnica e a data de venda do produto. O tempo até falha de um produto em segunda, terceira ou falhas subsequentes é a diferença entre a data de entrada na assistência técnica e a data de conclusão do último reparo. Porém para se identificar a data de conclusão do último reparo é preciso que o produto esteja identificado corretamente em ambos os apontamentos.

Assim, neste trabalho, quando o produto não foi identificado corretamente na base de dados, considerou-se que era a primeira falha do produto, pois não foi possível identificar em nenhum outro apontamento na base de dados, um produto com identificação igual.

A última falha que se identificou quanto aos apontamentos foi com relação à identificação correta dos modos de falha. Quando do apontamento da falha, deve ser feito um julgamento do modo de falha que está agindo sobre o produto e este deve ser informado sob a forma de algum código, anteriormente criado, de maneira que cada modo de falha corresponda a um código e cada código diga respeito somente a um modo de falha. Foram encontradas na base de dados, mais de uma descrição de falha incluída no mesmo código de falha.

Assim um produto que não liga não deve ser colocado no mesmo código de falha de um produto que liga, mas desliga automaticamente após alguns instantes. Quando isso acontece, falhas potencialmente diferentes são agrupadas no mesmo código de falha, o que pode gerar distorção na distribuição individual de cada modo de falha.

Esta talvez seja uma das razões pelas quais não se conseguiu modelar com sucesso os modos de falhas individualmente na secção 4.5. A contaminação da base de dados pode ter distorcido as distribuições individuais causando impossibilidade da modelagem.

Outro fator que pode ter impossibilitado a modelagem individual dos modos de falha é o fato de que os então “modos de falha” na planilha do fabricante, não são, na verdade, modos de falha, mas sim efeitos da falha. Deste modo “não ligar” é o efeito de um modo de falha, que pode ser oxidação, botão quebrado, ou mal contato entre os componentes. Assim, no mesmo código de falha podem existir muitos modos de falhas presentes, pois o mesmo efeito pode acontecer devido a ocorrência de falhas diferentes. Como a única fonte de informação disponível era esta, considerou-se a coluna de identificação da falha como modo de falha, mas o fato de não se conseguir fazer a modelagem individual é um indício de que os modos de falhas estão misturados nos códigos de falha. Efeitos da falha não seguem cada um uma distribuição específica de probabilidade, sendo incoerente, portanto, tentar modelar efeitos de falha.

É preciso, em uma base de dados voltada para a confiabilidade, corrigir esses tipos de erro que influenciam muito uma análise de confiabilidade. A formação de uma base de dados voltada para confiabilidade exige que a empresa, primeiramente, trate confiabilidade de forma estratégica e a partir disto, remodele seus procedimentos de apontamento de dados de forma a facilitar a modelagem da confiabilidade.

A primeira parte da análise conduzida nesta seção tratou da necessidade de se ter uma base de dados voltada para confiabilidade. Na segunda parte desta seção, procurou-se discutir a eficiência dos métodos utilizados para superar algumas dificuldades em se trabalhar com dados de campo, abordadas no capítulo 3. Cada um dos métodos utilizados foi baseado na literatura existente e suas referências devidamente citadas, é necessário, porém, analisar o desempenho de cada um dos métodos no contexto deste trabalho.

Quanto ao método proposto por Santos (2008), que prevê o uso da opinião de especialistas com o intuito de acessar informações de pós garantia nota-se que alguns cuidados se fazem necessários ao utilizar este método.

A opinião de especialistas somente deve ser utilizada se esta for a única fonte de dados disponível e não houver outra forma quantitativa de se obter as informações de pós garantia. Em algumas empresas onde a base de dados é voltada para confiabilidade e a política de garantias é traçada de forma a facilitar o estudo da confiabilidade, a alternativa ao uso de especialistas pode ser os dados obtidos a partir de garantias estendidas para clientes selecionados.

Como a intenção é acessar informações de falha de produto e conseqüentemente de confiabilidade durante toda a vida útil do produto, o fornecedor pode escolher alguns clientes de forma planejada e oferecer a esses clientes uma garantia que pode durar, por exemplo, 5 anos, muito superior ao período de garantia oferecido normalmente e quase se aproximando da vida útil esperado para aquele produto. Deste modo, ao monitorar as falhas que ocorrem nestes equipamentos em garantia estendida, pode-se acessar de maneira mais confiável a dados sobre falhas do produto nos estágios finais de sua vida útil.

É importante ressaltar que essa concessão deve ser feita de maneira cuidadosa, uma vez que essas garantias estendidas, por si só, trarão de maneira imediatista, um prejuízo para a empresa devido aos custos adicionais com reparos e troca de componentes durante um período maior. Esse custo, porém, se pensado de maneira estratégica, pode ser considerado um investimento da empresa, uma vez que trás retornos em forma de informação e esta informação, se bem utilizada, dará retornos financeiros futuros devido à melhoria da confiabilidade do produto.

Desta forma, sabe-se que existem alternativas ao uso de opinião de especialista, método que se mostrou, no presente trabalho, ineficaz e impreciso na modelagem da confiabilidade do produto. Isto é evidenciado claramente na figura 4.7 e se manifesta em forma de descontinuidade nas figuras 4.10, 4.12 e 4.13.

Quanto ao método de reamostragem bootstrap proposto por Marcorin e Abackerli (2006) que tinha como objetivo principal o cálculo do intervalo de confiança do tempo médio até falha modelado pode-se afirmar que o método encontrou resultado, porém este resultado pode ser questionado. Se observar-se na figura 4.15, o intervalo de confiança obtido para o tempo médio até falha é muito reduzido, levando a interpretação de que a variabilidade do tempo médio até falha é muito pequena na prática, ou seja, que quase 100% dos produtos falham muito próximos ao tempo médio modelado.

Tal fato, porém, não pode ser confirmado na prática, uma vez que cerca de 25% dos dados falharam com menos de 52 semanas de uso e o tempo médio até falha obtido gira em torno de 155 semanas. Somente este fato já seria suficiente para supor um desvio maior ou um intervalo de confiança mais largo sobre o tempo médio até falha. Portanto questiona-se a eficácia deste método na obtenção de intervalos de confiança que se aproximam da realidade.

A terceira e última parte desta seção busca discutir o trabalho como um todo e o uso de dados de garantia como uma forma compatível de se acessar informações sobre confiabilidade.

O uso de dados de garantia para modelagem de confiabilidade é extenso na literatura, o que pode ser verificado com uma rápida checagem das referências citadas. O questionamento que segue diz respeito à aplicabilidade desta fonte de dados para o caso de produtos eletrônicos.

Sabe-se que para a boa condução de um estudo de confiabilidade baseada em dados de garantia, é necessário certo tempo para que as falhas dos produtos em garantia ocorram. Muitas vezes deve-se esperar 6 meses, um ano ou até mais para se que o estudo de confiabilidade tenha um resultado palpável e consiga modelar a confiabilidade do produto.

A esta altura, no ramo de produtos eletrônicos onde a tecnologia e inovação estão fortemente presentes, o questionamento que se coloca é se acessar a informação de confiabilidade do produto um ano e meio após o seu lançamento no mercado ainda é válido e traz resultados expressivos para a empresa uma vez que o produto já se encontra obsoleto, ou próximo da obsolescência?

A conclusão que se chega é que quando se trata o produto como se fosse um único componente se restringe a análise e as conclusões da modelagem àquele produto em específico. Se o produto se encontra obsoleto ou próximo da obsolescência, de pouco adianta o conhecimento da confiabilidade do mesmo, pois nenhuma alteração, já no fim da vida útil do produto seria economicamente viável.

Quando se muda um pouco a visão do sistema, e passa-se a tratar o produto como um conjunto de componentes, o estudo de confiabilidade pode ainda ser útil, mesmo com o produto a beira da obsolescência. Quando o estudo passa a tirar conclusões sobre a confiabilidade de cada componente e não somente sobre a confiabilidade do produto, pode-se utilizar a informação de confiabilidade de cada componente para se decidir se aquele componente deve ou não entrar em projetos de produtos futuros, de modo a contribuir para a melhoria contínua da confiabilidade dos produtos da empresa.

Assim, se para executar uma mesma função existem dois componentes distintos, com confiabilidades provavelmente diferentes, a empresa pode optar por utilizar, para novos produtos, o componente de maior confiabilidade. Quando a foco do estudo de confiabilidade

utilizando dados de garantia, passa do produto, para o componente, gera uma condição mais interessante de ser explorada e o estudo passa a ser mais útil para que a organização melhore continuamente a confiabilidade dos seus produtos.

Ainda vale ressaltar que o uso de outras fontes de dados, tais como testes acelerados podem ser utilizados como uma alternativa aos dados de garantia.

Voltando aos objetivos do trabalho, foi colocado como objetivo principal a modelagem matemática da confiabilidade do produto utilizando-se dados de garantia. Tal objetivo foi atingido e o modelo que descreve a confiabilidade do produto foi gerado com sucesso. Os dados de garantia realmente se mostram como uma fonte de dados para acessar esta informação de confiabilidade. Porém, dadas as diversas dificuldades em se trabalhar com dados de garantia sem que a empresa tenha uma base de dados estruturada, faz-se necessário uso de métodos e fontes de dados alternativos que nem sempre são eficazes em modelar a confiabilidade do produto como ocorre na prática. Os dados de garantia, por si só, não são suficientes para modelar a confiabilidade do produto, a não ser que se conte com garantias especiais como já mencionado nesta secção.

Para trabalhos futuros, recomenda-se um estudo comparativo de bases de dados distintas de empresas onde o estudo da confiabilidade seja estratégico. Esse estudo teria como objetivo a estruturação de uma base de dados ideal para estudos de confiabilidade. Outra possibilidade de trabalhos futuros seria um estudo comparativo da confiabilidade de dois ou mais componentes que desempenham a mesma função, com o objetivo de escolher o melhor componente para se utilizar em novos produtos, com o intuito de melhorar a confiabilidade do mesmo.

6. Referências Bibliográficas

AGRAWAL, J.; RICHARDSON, P.; GRIMM P. The Relationship Between Warranty and Product Reliability. **The Journal of Consumer Affairs** , v. 30, p. 421-443, 1996.

BAIK, J.; MURTHY, D. Reliability assessment based on two-dimensional warranty data and an accelerated failure time model. **International Journal of Reliability and Safety** , v. 2, n. 3, p. 190-208, 2008.

BERTLING, L.; ALLAN, R.; ERIKSSON, R. A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems** , v. 20, n. 1, p. 75-82, 2005.

BERTRAND, J.; FRANSOO, J. Modelling and Simulation: Operations Management Research Metodologies using Quantitative Modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

COIT, D.; JIN, T. Gamma distribution parameter estimation for field reliability data with missing failure times. **IIE Transactions** , v. 32, p. 1161-1166, 2000.

CUI, Y.; KHAN, W. A Case Study: Reliability-based Product Development and Improvement Model. **Quality and Reliability Engineering International** , v. 24, p. 361-373, 2008.

DILLENBURG, M. **Estimativa da confiabilidade de produtos a partir das contagens mensais de vendas e falhas ao longo do período de garantia**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ENDRENYI, J.; ABORESHEID, S.; ALLAN, R.; ANDERS, G. J.; ASGARPOOR, S.; BILLINTON, R. The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability. **IEEE Transactions on Power Systems** , v. 16, n. 4, p. 638-646, 2001.

FARD, N.; LI, C. Optimal simple step stress accelerated life test design for reliability prediction. **Journal of Statistical Planning and Inference** , v. 139, p. 1799-1808, 2009.

FAWZAN, M. *Methods for estimating the parameters of the weibull distribution*. **Science and Technologie**, p. 1-11, 2000.

FOGLIATTO, F. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. São Paulo: Elsevier, 2009.

FONSECA, D.; KNAPP, G. An expert system for reliability centered maintenance in the chemical industry. **Expert Systems with Applications** , v. 19, n. 1, p. 45-57, 2000.

FREITAS, M.; COLOSIMO, E. **Confiabilidade: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1997.

FREITAS, M. A.; TOLEDO, M. L.; COLOSIMO, E. A.; PIRES, M. C. Using degradation data to assess reliability: a case study on train wheel degradation. **Quality and Reliability Engineering International** , v. 25, n. 5, p. 607-629, 2009.

HUANG, H.-Z.; LIU, Z.-J.; MURTHY, D. N. Optimal reliability, warranty and price for new products. **IIE Transactions** , v. 39, n. 8, p. 819-827, 2007.

HUANG, W.; ASKIN, R.G. Reliability analysis of electronic devices with multiple competing failure modes involving performance aging degradation. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 19, p. 241-254, 2003.

HUSSAIN, A.; MURTHY, D. Warranty and Optimal Reliability Improvement through Product Development. **Mathematical and Computer Modelling** , v. 38, p. 1211-1217, 2003.

ION, R.; PETKOVA, V.; PEETERS, B.; SANDER, P. Field reliability prediction in consumer electronics using warranty data. **Quality and Reliability Engineering International** , v.23, n. 4, p. 401-414, 2007.

JIANG, P.; LIM, J.; ZUO, M.; GUO, B. Reliability Estimation in a Weibull Lifetime Distribution with Zero-failure Field Data. **Quality and Reliability Engineering International** , v. 26, p. 691-701, 2010.

JOSEPH, V.; YU, I. Reliability improvement experiments with degradation data. **IEEE Transactions on Reliability** , v. 55, n. 1, p. 149-17, 2006.

LINDLEY, D. The philosophy of statistics. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 49, n. 3, p. 293-337, 2000.

LU, M. Automotive reliability prediction based on early field failure warranty data. **Quality and Reliability Engineering International** , v. 14, n. 2, p. 103-108, 1998.

LU, Y.; LOH, H.; IBRAHIM, Y.; SANDER, P.; BROMBACHER, A. Reliability in time-driven product development process. **Quality and Reliability Engineering International** ,v. 15, p. 427-430, 1999.

MARCORIN, A.; ABACKERLI, A. Field Failure Data: an Alternative Proposal for Reliability Estimation. **Quality and Reliability Engineering International** , v. 22, p. 851-862, 2006.

MARQUEZ, F.; SCHMID, F.; COLLADO, J. A reliability centered approach to remote condition monitoring. A railway points case study. **Reliability Engineering and System Safety** , v. 80, n. 1, p. 33-40, 2003.

MEEKER, W.; DOGANAKSOY, N.; HAHN, G. J. Using Degradation Data for Product Reliability Analysis. **Quality Progress** , v. 34, n. 6, p. 60-65, 2001.

MEEKER, W.; ESCOBAR, L. **Statistical Methods for Reliability Data**. New York, Wiley, 1998

MEEKER, W.; ESCOBAR, L.; HONG, Y. Using accelerated life tests to predict product field reliability. **Technometrics** , v. 51, n. 2, p. 146-161, 2009.

MURTHY, D. N. Product Reliability and Warranty: an overview and future research. **Produção** , v. 17, n. 3, p. 426-434, 2007.

OLIVEIRA, V.R.; COLOSIMO, E. A. Comparison of methods to estimate the time-to-failure distribution in degradation tests. **Quality and Reliability Engineering International** , v. 20, p. 363-373, 2004.

PAN, H. A Bayes Approach to Reliability Prediction Utilizing Data from Accelerated Life Tests and Field Failure Observations. **Quality and Reliability Engineering International** , v. 25, p. 229-240, 2009.

PONCHET, A.; FOULADIRAD, M.; GRALL, A. Assessment of a maintenance model for a multi-deteriorating mode system. **Reliability Engineering and System Safety** , v. 95, p. 1244-1254, 2010.

RAND, D.; McLINN, J. Analysis of Field Failure Data When Modeled Weibull Slope Increases with Time. **Quality and Reliability Engineering International** , v. 27, p. 99-105, 2010.

RAUSAND, M. Reliability Centered Maintenance. **Reliability Engineering and System Safety** , v. 60, p. 121-132, 1998.

SANTOS, G. **Modelo de Confiabilidade Associando Dados de Garantia e Pós-Garantia a três Comportamentos de Falhas**, Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SELVIK, J. T.; AVEN, T. A framework for reliability and risk centered maintenance. **Reliability Engineering and System Safety** , v. 96, p. 324-331, 2011.

THOMAS, M.; RICHARD, J. Warranty-based method for establishing reliability improvement targets. **IIE Transactions** , v. 38, n. 2, p. 1049-1058, 2006.

TORRES, M.; RUIZ, S. Structural reliability evaluation considering capacity degradation over time. **Engineering Structures** , v. 29, n. 9, p. 2183-2192, 2007.

YADAV, O.; SINGH, N.; CHINNAM, R.; GOEL, P. A fuzzy logic based approach to reliability improvement estimation. **Reliability Engineering and System Safety** , v. 80, p. 63-74, 2003.

YANG, G. Accelerated Life Test Plans for Predicting Warranty Cost. **IEEE Transactions on Reliability** , v. 59, n. 4, p. 628-634, 2010.

WANG, W.; LANGANKE, D. Comparing two designs when the new design has few or no-failures – is the new better than the previous one?. **Proceeding of Annual Reliability and Maintainability Symposium**, p. 322-325, 2001.

ZHOU, X.; XI, L.; LEE, J. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 92, n. 4, p. 530-534, 2007.

Anexo 1- Opinião de Especialistas

Questionário sobre Confiabilidade

- 1) Qual o percentual aproximado ACUMULADO de produtos falham até o tempo “t” indicado na tabela. É importante notar que o número deve começar em zero em t=0 (0% dos produtos falham com Zero semanas de uso) e crescer a medida que o tempo cresce até atingir os 100% em algum instante “t” (que representa o tempo onde dificilmente algum produto do modelo ainda não apresentou falhas), não necessariamente em t=364 semanas (5 anos), que é o último tempo considerado para análise. O tempo é dado em SEMANAS de uso do produto.

Tempo “t” em SEMANAS de uso	Percentual de produtos que falham até “t”
0 semanas	0%
5 semanas	0,01%
10 semanas	0,07%
20 semanas	0,50%
30 semanas	0,66%
40 semanas	0,91%
52 semanas (1 ano)	3,06%
78 semanas (1 ano e meio)	5,00%
104 semanas (2 anos)	10,24%
130 semanas (2 anos e meio)	18,00%
156 semanas (3 anos)	23,03%
182 semanas (3 anos e meio)	48,00%
208 semanas (4 anos)	65,03%
234 semanas (4 anos e meio)	76,00%
260 semanas (5 anos)	100,00%

- 2) Marque com um X o ano que melhor representa a ocorrência da primeira falha na maioria dos produtos.

Primeiro ANO	Segundo ANO	Terceiro ANO	Quarto ANO	Quinto ANO
--------------	-------------	--------------	------------	------------

X

- 3) Qual o tempo médio de vida dos produtos?

Primeiro ANO	Segundo ANO	Terceiro ANO	Quarto ANO	Quinto ANO
--------------	-------------	--------------	------------	------------

X

- 4) No primeiro ano de vida, qual o percentual de falhas é devido a falhas prematuras (proveniente da montagem de componentes, manufatura) e qual o percentual de falhas é devido a desgaste de componentes? A soma deve dar 100%.

Falhas Prematuras	Falhas por desgaste
40%	60%

- 5) Até que ano, as falhas prematuras são o modo predominante de falha??

Primeiro ANO	Segundo ANO	Terceiro ANO	Quarto ANO	Quinto ANO
--------------	-------------	--------------	------------	------------

X