



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO
MESTRADO INTERINSTITUCIONAL UFRGS - UNICENP



**MODELAGEM PARA ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE
PRODUTOS EM GARANTIA**

UBIRATAN VIEIRA GUIMARÃES

**ORIENTADOR:
PROF. JOÃO LUIZ BECKER, Ph.D.**

PORTO ALEGRE
2002

UBIRATAN VIEIRA GUIMARÃES

**MODELAGEM PARA ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE
PRODUTOS EM GARANTIA**

Dissertação, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Administração.

PORTO ALEGRE
2002

BANCA EXAMINADORA

Presidente:	Prof. Dr. João Luiz Becker	PPGA/EA/UFRGS
Examinadores:	Prof. Dr. Flávio S. Fogliatto	PPGEP/UFRGS
	Prof. Dr. Denis Borenstein	PPGA/EA/UFRGS
	Prof. Dr. Eduardo Ribas Santos	PPGA/EA/UFRGS

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho somente foi possível pela colaboração direta ou indireta de diversas pessoas e organizações, às quais devo meus sinceros agradecimentos.

Dentre estas quero ressaltar em especial:

- À Electrolux do Brasil que permitiu a utilização das informações para a realização desta dissertação e aos seus profissionais pela disponibilidade e entusiasmo com que se envolveram nas fases em que participaram do estudo.
- Ao Prof. Dr. João Luiz Becker, pela serenidade e conhecimento em suas valiosas orientações.
- Ao Prof. Dr. Flávio S. Fogliatto, pelo apoio metodológico e na indicação e disponibilização de material bibliográfico para o estudo.
- Ao Prof. Dr. José Luis Duarte Ribeiro e ao Sr. Celso Fritsch, que tão gentilmente cederam cópias dos *softwares* necessários para a realização dos cálculos e ajustes das distribuições de probabilidade.
- Ao Prof. Jorge Festa, pela sua contribuição especialmente na parte de estatística bayesiana.
- À minha família pelo incentivo permanente e principalmente pelo tempo em que tiveram de abrir mão da minha presença.

SUMÁRIO

	Páginas
LISTA DE QUADROS	VII
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE GRÁFICOS	VIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 METODOLOGIA DO ESTUDO	3
1.4 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO	3
1.5 ESTRUTURA DO ESTUDO	4
2. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE UNIDADES REFRIGERADORAS FREEZER	5
2.1 PRINCÍPIOS DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	5
2.1.1 Componentes Básicos de um Sistema de Refrigeração	6
2.1.2 Componentes Elétricos do Sistema de Refrigeração	9
2.1.3 Funcionamento Básico do Sistema de Refrigeração	11
2.2 UNIDADE REFRIGERADORA FREEZER	13
2.2.1 Descrição de operação das unidades	13
3. REVISÃO SOBRE GARANTIA DE PRODUTOS E CONFIABILIDADE	15
3.1 GARANTIA DE PRODUTOS	16
3.2 TEORIA DA CONFIABILIDADE	18
3.3 FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE	20
3.3.1 Tempo-até-Falha	20
3.3.2 Função de Confiabilidade	21
3.3.3 Função de Risco	22
3.3.4 Tempo Médio até Falha e Tempo Médio entre Falhas	24
3.3.5 Modelos Probabilísticos em Confiabilidade	25
3.4 ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS E CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DOS ESTIMADORES	31
3.4.1 Método da Máxima Verossimilhança	33
3.4.2 Método dos Momentos	33
3.4.3 Método de Bayes	34
3.5 MODELAGEM DE DADOS DE TEMPOS ATÉ FALHA	36
3.5.1 Tipos de Censura	36
3.5.2 Modelos Paramétricos de Confiabilidade	37
3.6 TESTES DE ADEQUAÇÃO	43
3.6.1 Teste de aderência pelo Qui-Quadrado	43
3.6.2 Método de Kolmogorov-Smirnov	44
3.6.3 Papel de Probabilidade	44
3.7 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS	45

4 METODOLOGIA PROPOSTA PARA MODELAGEM DE DADOS	46
4.1 METODOLOGIA APLICADA NA ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DO SISTEMA.....	47
4.1.1 Verificação dos modelos dos subsistemas.....	47
5 ESTUDO DE CASO	49
5.1 CARACTERÍSTICAS DO MODELO DE UNIDADE REFRIGERADORA FREEZER EM ESTUDO	49
5.2 DADOS E INFORMAÇÕES DE PRODUÇÃO E FALHAS NO CAMPO.....	50
5.3 ESTRUTURA DO DIAGRAMA DE BLOCOS E DO SISTEMA ANALISADO	50
5.4 ESPECIFICAÇÃO DOS MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DOS SUBSISTEMAS	51
5.5 MODELAGEM UTILIZANDO O PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO PARA OS DADOS CENSURADOS	66
5.5.1 Análise da Confiabilidade do Produto.....	77
5.6 MODELAGEM ATRAVÉS DA ANÁLISE BAYESIANA DE CONFIABILIDADE	80
5.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	83
6 CONCLUSÕES	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
ANEXOS	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRODUÇÃO MENSAL DE UNIDADES DO MODELO H210, SET/99 – AGO/00	52
TABELA 2 – DISTRIBUIÇÃO DOS TEMPOS-ATÉ-FALHA EM DIAS DE USO PARA.....	53
O SUBSISTEMA COMPRESSOR.....	53
TABELA 3 – DISTRIBUIÇÃO DOS TEMPOS-ATÉ-FALHA EM DIAS DE USO PARA O SUBSISTEMA ELÉTRICO	54
TABELA 4 – DISTRIBUIÇÃO DOS TEMPOS-ATÉ-FALHA EM DIAS DE USO PARA O SUBSISTEMA REFRIGERAÇÃO.	55
TABELA 5 – FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE PARA OS DADOS SIMULADOS - COMPRESSOR	70
TABELA 6– FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE PARA OS DADOS SIMULADOS - ELÉTRICO.....	73
TABELA 7– FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE PARA OS DADOS SIMULADOS - REFRIGERAÇÃO	76
TABELA 8 - ESTIMATIVAS DOS PARÂMETROS DOS SUBSISTEMAS COMPONENTES DO FREEZER H210	78
TABELA 9 – ESTIMATIVAS DE CONFIABILIDADE E FUNÇÕES PARA O FREEZER H210.....	78

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – SIGNIFICÂNCIA DOS TESTES DE ADERÊNCIA DOS MODELOS AJUSTADOS - COMPRESSOR.....	59
QUADRO 2 – ESTIMATIVAS DOS PARÂMETROS PARA O MODELO WEIBULL - COMPRESSOR.....	59
QUADRO 3 – SIGNIFICÂNCIA DOS TESTES DE ADERÊNCIA DOS MODELOS AJUSTADOS - ELÉTRICO.....	62
QUADRO 4 – ESTIMATIVAS DOS PARÂMETROS PARA O MODELO WEIBULL - ELÉTRICO	62
QUADRO 5 – SIGNIFICÂNCIA DOS TESTES DE ADERÊNCIA DOS MODELOS AJUSTADOS - REFRIGERAÇÃO.....	65
QUADRO 6 – ESTIMATIVAS DOS PARÂMETROS PARA O MODELO WEIBULL - REFRIGERAÇÃO	66
QUADRO 7 – ESTIMATIVAS PARA O AJUSTE SIMULADO DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL - COMPRESSOR.....	69
QUADRO 8 – ESTIMATIVAS PARA O AJUSTE SIMULADO DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL - ELÉTRICO ...	72
QUADRO 9 – ESTIMATIVAS PARA O AJUSTE SIMULADO DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL - REFRIGERAÇÃO.....	76

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MODELO DE FILTRO SECADOR.....	9
FIGURA 2 - SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO – CONCEITO UTILIZADO EM REFRIGERADOR DOMÉSTICO	12
FIGURA 3 - UNIDADE REFRIGERADORA FREEZER ELECTROLUX MODELO H210	13
FIGURA 4 - EXEMPLO DE FUNÇÃO ACUMULADA DE FALHA.....	21
FIGURA 5 - EXEMPLO DE FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE	22
FIGURA 6 - EXEMPLO DE FUNÇÃO DE RISCO	24
FIGURA 7 - EXEMPLO DE FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE - WEIBULL	27
FIGURA 8 - EXEMPLO DA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE – EXPONENCIAL	28
FIGURA 9 - EXEMPLO DA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE – LOGNORMAL	29
FIGURA 10 - EXEMPLO DA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE – NORMAL	30

FIGURA 11 - EXEMPLO DA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE - GAMA.....	31
FIGURA 12 - EXEMPLO DE SISTEMA EM SÉRIE	45

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – HISTOGRAMA DA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE - COMPRESSOR....	53
GRÁFICO 2 – FUNÇÃO DE RISCO – COMPRESSOR.....	56
GRÁFICO 3 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE – COMPRESSOR	56
GRÁFICO 4 – PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO EXPONENCIAL - COMPRESSOR..	57
GRÁFICO 5 – PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO WEIBULL - COMPRESSOR	57
GRÁFICO 6 – PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO LOGNORMAL - COMPRESSOR ...	58
GRÁFICO 7 – PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO NORMAL - COMPRESSOR.....	58
GRÁFICO 8 – HISTOGRAMA DA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE - ELÉTRICO	60
GRÁFICO 9 – FUNÇÃO DE RISCO - ELÉTRICO	60
GRÁFICO 10 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE - ELÉTRICO	60
GRÁFICO 11 – PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO EXPONENCIAL - ELÉTRICO	61
GRÁFICO 12– PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO WEIBULLL - ELÉTRICO	61
GRÁFICO 13– PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO LOGNORMAL - ELÉTRICO	61
GRÁFICO 14– PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO NORMAL - ELÉTRICO	62
GRÁFICO 15 – HISTOGRAMA DA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE - REFRIGERAÇÃO	63
GRÁFICO 16 – FUNÇÃO DE RISCO - REFRIGERAÇÃO.....	63
GRÁFICO 17 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE - REFRIGERAÇÃO	64
GRÁFICO 18 – PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO EXPONENCIAL - REFRIGERAÇÃO	64
GRÁFICO 19 – PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO WEIBULL - REFRIGERAÇÃO	64
GRÁFICO 20 – PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO LOGNORMAL - REFRIGERAÇÃO	65
GRÁFICO 21 – PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO NORMAL - REFRIGERAÇÃO....	65
GRÁFICO 22 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE - DADOS SIMULADOS COMPRESSOR	67
GRÁFICO 23 – FUNÇÃO DE RISCO - DADOS SIMULADOS COMPRESSOR	67
GRÁFICO 24 – FUNÇÃO DENSIDADE ACUMULADA DE FALHA - DADOS SIMULADOS COMPRESSOR	68
GRÁFICO 25 – PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO WEIBULLL – DADOS SIMULADOS COMPRESSOR	68
GRÁFICO 26 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE – DADOS SIMULADOS ELÉTRICO	71
GRÁFICO 27 – FUNÇÃO DE RISCO – DADOS SIMULADOS ELÉTRICO	71
GRÁFICO 28 – FUNÇÃO DENSIDADE ACUMULADA DE FALHA – DADOS SIMULADOS ELÉTRICO.....	71
GRÁFICO 29 – PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO WEIBULLL – DADOS SIMULADOS ELÉTRICO.....	72
GRÁFICO 30 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE – DADOS SIMULADOS REFRIGERAÇÃO	74
GRÁFICO 31 – FUNÇÃO DENSIDADE ACUMULADA DE FALHA – DADOS SIMULADOS REFRIGERAÇÃO	74
GRÁFICO 32 – FUNÇÃO DE RISCO – DADOS SIMULADOS REFRIGERAÇÃO	75
GRÁFICO 33 – PAPEL DE PROBABILIDADE PARA O MODELO WEIBULLL – DADOS SIMULADOS REFRIGERAÇÃO	75

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A - RELAÇÃO DE CHAMADAS DE CAMPO	92
----------------------------------------------	----

RESUMO

O desenvolvimento tecnológico, aliado à grande competitividade do mercado em escala mundial, tem como conseqüências diretas a elevação dos padrões de consumo e o aumento da diversidade de opções de compra por parte dos consumidores. Desta forma as empresas têm se empenhado em desenvolver sistemas de gestão robustos, porém flexíveis, que lhes proporcionem produzir bens de melhor qualidade, com diferenciais em relação aos concorrentes.

A confiabilidade de um produto apresenta, sob diferentes aspectos, impacto na satisfação do consumidor, resultando como fator fundamental na decisão de compra. Além disso, as empresas têm procurado desenvolver mecanismos que propiciem criar um canal de relacionamento mais amplo junto aos seus consumidores, utilizando-se dos programas de fidelidade que têm como uma das suas principais ferramentas a extensão da garantia de produtos.

Para implementar um programa de extensão de garantia, a empresa deve estar produzindo com alto nível de confiabilidade e estar em acompanhamento contínuo do desempenho destes produtos no campo. Este acompanhamento pode ser feito a partir dos dados de falha dos produtos em garantia, que possibilitam estabelecer indicadores de performance e avaliar custos relacionados às não-conformidades observadas.

Este trabalho propõe, a partir de um estudo de caso, realizar a modelagem para análise da confiabilidade de um produto refrigerador freezer, com o objetivo de identificar a distribuição das falhas e estimar a confiabilidade do produto para um período de 2 (dois) anos de uso, possibilitando assim à empresa estabelecer os custos adicionais com a extensão da garantia do produto que atualmente é de 1 (um) ano.

O estudo foi delineado em duas alternativas de modelagem, sendo a primeira através da adequação, estimação e simulação do modelo de distribuição de falhas e a segunda por meio da análise bayesiana de confiabilidade envolvendo o uso de distribuições *a priori* e *a posteriori*.

Os resultados observados demonstram que apesar das técnicas serem distintas, as modelagens convergiram para estimativas similares e qualitativamente coerentes com os pressupostos estabelecidos pela empresa pesquisada.

ABSTRACT

Technological development in addition to a great worldwide market competition, has as direct consequences the elevation of consuming standards and an increase in the diversity of purchase options for the consumers. Hence, companies have striven to develop robust though flexible management systems, which may allow them to produce better quality goods with differentials in relation to their competitors.

The reliability of a product has, under different aspects, an impact on the consumer's satisfaction, thus resulting in an essential factor in a purchase decision. In addition to that, companies have sought to develop mechanisms that allow them to create a wider communication channel with their consumers, by means of loyalty programs aimed at their customers, which have as one their chief tools the product warranty extension.

In order to implement a product warranty extension program, the company must be manufacturing products with a high level of reliability and be continuously monitoring the performance of these products on the field. This monitoring can be made based on data from product failures occurred during the warranty period, which allow the establishment of performance indexes and cost assessment based on non-conformities noticed.

This work proposes, from a case study, the making of a modelling for a reliability analysis of a freezer refrigerator product, thus aiming to identify the distribution of this product failures and also to estimate the reliability of the product in a period of a two (2) year use, thus allowing the company to establish the additional costs generated by the extension of the product warranty which is currently of one (1) year.

The study was designed in two modelling alternatives, the first one being through adequacy, estimate and simulation of a distribution of failures model and the second through a Bayes reliability analysis involving the use of prior and subsequent distributions.

The findings show that despite the use of different techniques, these two modelling versions converged into similar estimates, which are qualitatively consistent with the assumptions established by the company under research.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Comentários Iniciais

Atualmente as empresas enfrentam grandes desafios para que possam se manter competitivas no mercado globalizado. A qualidade dos produtos e serviços tem sido um fator básico de decisão para o consumidor no momento da compra. Nos últimos anos a produção de bens duráveis teve um grande desempenho no aperfeiçoamento da qualidade nos produtos e serviços, possibilitando às empresas permanecerem competitivas e crescendo dentro do mercado global (WASSERMAN & SUDJIANTO, 1996). Produzir bens com alta confiabilidade tornou-se de fundamental importância para que as empresas possam aumentar a sua participação no mercado e proporcionar a satisfação dos clientes atendendo suas expectativas em relação ao desempenho do produto.

Um dos segmentos mais disputados é o chamado mercado de “linha branca” ou *good whites*, composto de refrigeradores, *freezers*, fornos microondas, fogões, lavadoras de roupa e condicionadores de ar. Esta linha, ao longo dos anos, vem apresentando uma melhoria contínua em relação ao tempo de vida dos produtos fabricados, no entanto, as alterações e implementações nos projetos têm sido mais constantes num menor espaço de tempo, dificultando realizar observações de performance no campo por um período de tempo muito extenso.

A Electrolux, uma das maiores empresas do mundo neste segmento, tem efetuado alterações sistemáticas em seus produtos de forma a torná-los cada vez mais confiáveis e competitivos. Especificamente no Brasil, a empresa mantém um interesse significativo pois, segundo a ELETROS – Associação dos Fabricantes de Produtos Eletro-Eletrônicos, cada ponto percentual deste mercado representa aproximadamente US\$ 40 milhões.

Uma das estratégias de marketing utilizada pelas empresas é a extensão de garantia dos produtos, cujo objetivo é estabelecer vantagens importantes para a empresa através da satisfação e fidelidade de clientes. Para implementar estes programas, a empresa deve alinhar o desenvolvimento dos produtos às

necessidades de redução em custos e prazos, à exigência dos consumidores e às novas tecnologias surgidas. Uma das ferramentas imprescindíveis neste contexto é a análise da confiabilidade dos modelos fabricados, pois a disponibilização de recursos no projeto desses produtos é efetivamente alta.

A Electrolux pretende expandir seus prazos de garantia e, para tanto, necessita estabelecer os custos adicionais que deverão ser agregados. A análise da confiabilidade de produtos enquadra-se como instrumento adequado para subsidiar tais estudos. Para desenvolver a análise da confiabilidade de seus produtos, a empresa deve utilizar os registros da assistência técnica, através do banco de dados da Garantia da Qualidade.

Esta dissertação propõe, a partir da utilização de dados em garantia do modelo Freezer H210, desenvolver o estudo da confiabilidade do produto, através dos métodos estatísticos de confiabilidade, proporcionando à empresa obter informações que contribuam e auxiliem na execução do programa proposto.

1.2 Objetivos

Os objetivos delineados para este estudo são:

1.2.1 Objetivo Geral

Estabelecer uma metodologia que possa ser aplicada na modelagem e análise de confiabilidade de produtos manufaturados de linha branca, possibilitando à empresa definir os custos adicionais com o programa de extensão de garantia.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Contribuir e auxiliar a empresa fabricante do produto através da concepção de uma metodologia para análise que avaliará a confiabilidade do modelo refrigerador *freezer*, tipo individual, produzido no Brasil.
- Proporcionar à empresa fabricante do modelo, mecanismos para implementação de garantia estendida através da verificação dos custos adicionais.

1.3 Metodologia do Estudo

O método utilizado neste estudo enquadra-se na forma de *pesquisa-ação*, conforme proposto por THIOLENT(1997). Este tipo de pesquisa é apresentado como um método apropriado para conhecer e intervir nas organizações. Consiste essencialmente em acoplar pesquisa e ação em um processo no qual as pessoas envolvidas participam, junto com os pesquisadores, para chegarem interativamente a elucidar a realidade em que estão inseridos, identificando problemas coletivos, buscando e experimentando soluções em situação real. A dimensão ativa do método manifesta-se no planejamento das ações e na avaliação dos resultados.

Segundo SPINK (1979, *apud* THIOLENT, 1997), a pesquisa-ação tem “o duplo e explícito propósito de auxiliar a reflexão, formulação ou implementação da ação e de desenvolver, enriquecer ou testar quadros de referências teóricos ou modelos relevantes ao fenômeno em estudo”.

A estrutura metodológica está dividida em quatro etapas: a primeira apresenta uma revisão bibliográfica a respeito dos principais conteúdos teóricos necessários para a elaboração desta dissertação, contemplando alguns princípios básicos de refrigeração, a segunda se refere à teoria da confiabilidade e métodos estatísticos direcionados à solução do estudo de caso proposto. A seguir, realizou-se o levantamento dos dados necessários para delinear a modelagem da confiabilidade do produto; posteriormente, foi definida a metodologia a ser utilizada e, finalmente, a aplicação do método de análise da confiabilidade através de um estudo de caso.

1.4 Delimitações do Estudo

Esta dissertação refere-se ao estudo de caso de um modelo de produto fabricado pela Electrolux do Brasil, sendo portanto restrita a este contexto, não sendo aplicável a produtos similares de outros fabricantes. Uma outra limitação do estudo realizado foi estabelecer exclusivamente a confiabilidade do produto para o período de vinte e quatro meses conforme a necessidade da empresa, não havendo portanto considerações a respeito da confiabilidade do produto para outros períodos de uso.

Finalmente, todas as técnicas utilizadas para o desenvolvimento dos cálculos do estudo ficaram restritas aos dados gerados dentro do período de um ano de garantia.

1.5 Estrutura do Estudo

Este estudo encontra-se dividido em 5 capítulos, desenvolvidos conforme descrição a seguir:

No capítulo 1 estão apresentados os objetivos, o método de desenvolvimento da dissertação e as delimitações do estudo.

O capítulo 2 abrange a introdução teórica sobre o produto refrigerador. Neste capítulo, são apresentados o princípio de funcionamento e a classificação das unidades refrigeradoras, além de conceitos básicos necessários para a compreensão do princípio de funcionamento deste tipo de aparelho.

No capítulo 3, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre Garantia e Confiabilidade. Incluem-se conceitos teóricos, definições e métodos de testes estatísticos necessários para o entendimento da metodologia sugerida nos capítulos posteriores.

O capítulo 4 apresenta a metodologia proposta para este estudo, envolvendo a modelagem e análise da confiabilidade em dois níveis (clássico paramétrico e estimação bayesiana) para os dados de produtos em garantia.

No capítulo 5 é realizado o estudo de caso, aplicando-se a metodologia delineada para análise da confiabilidade no modelo freezer H210.

2. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE UNIDADES REFRIGERADORAS FREEZER

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos de funcionamento das unidades refrigeradoras *freezers*, bem como as características particulares dos modelos individuais, objetos deste estudo. A maior parte das informações foram obtidas junto ao Manual do Programa de Desenvolvimento – Curso de Refrigeração Doméstica da Electrolux do Brasil S/A.

O capítulo apresenta-se dividido da seguinte forma: a seção 2.1 retrata os princípios básicos do sistema de refrigeração, mostrando através das subseções 2.1.1 e 2.1.2, respectivamente, os componentes básicos do sistema de refrigeração e os componentes elétricos do sistema de refrigeração, na subseção 2.1.3 apresenta-se o funcionamento básico de um sistema de refrigeração. Na seção 2.2 é apresentada a unidade refrigeradora freezer H210 e na subseção 2.2.1 descreve-se o modo de operação desta unidade.

2.1 Princípios do Sistema de Refrigeração

Qualquer substância sempre terá uma temperatura superior a $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ (frio máximo ou zero absoluto). Sendo assim, ela possuirá calor por menor que seja a quantidade nela existente. Segundo STOECKER & JABARDO (1994), o calor pode ser definido como a forma de energia transferida através de um sistema em uma dada temperatura a um outro sistema numa temperatura inferior. A caloria é a unidade de medida utilizada para indicar a quantidade de calor presente em um corpo, substância, ambiente ou reação química. Em refrigeração as unidades de calor mais utilizadas são: kcal (quilocaloria), btu (unidade térmica britânica) e kj (quilojoule).

Entende-se refrigeração como o processo de diminuir a quantidade de calor de um corpo. Esta remoção de calor de um corpo é feita através da transmissão de calor em suas formas:

a) Por Condução

É a maneira pela qual o calor é transmitido em substâncias sólidas. O calor se propaga da região de temperatura mais elevada para a região de temperatura mais baixa. Segundo HOLMAN (1983), a energia é transferida por condução e a taxa de transferência de calor por unidade é proporcional ao gradiente normal de temperatura.

b) Por Convecção

É a forma de transmissão nos líquidos e gases. É um processo combinado de transporte de calor de um meio líquido ou gasoso a uma parede plana ou curva (tubo) que o limita por meio do movimento do fluido. O movimento livre de um fluido é provocado pela diferença de densidade das partículas quentes e frias, onde ocorre a troca térmica. O movimento forçado é provocado por agentes externos como bombas, agitadores e compressores.

c) Por Radiação

Em contraste com os mecanismos de condução e convecção, onde a energia é transferida através de um meio natural, o calor pode também ser transferido em regiões onde existe o vácuo perfeito (HOLMAN,1983). Neste caso, o mecanismo é a radiação eletromagnética que é propagada como resultado de uma diferença de temperatura.

2.1.1 Componentes Básicos de um Sistema de Refrigeração

Um sistema de refrigeração apresenta os seguintes componentes básicos:

a) Gás Refrigerante

Todos os gases que apresentam a propriedade de retirar calor através da mudança de estado são chamados de gases refrigerantes ou frigorígenos. Os gases frigorígenos que melhor satisfazem à propriedade mencionada devem apresentar as seguintes características:

- Possuir elevada capacidade de refrigeração;
- Misturar-se facilmente com óleos dos motocompressores;
- Ser um gás facilmente condensável;

- Possuir baixa temperatura de ebulição;
- Ser um gás não corrosivo.

b) Evaporador

Componente do sistema de refrigeração onde ocorrerá a transformação do refrigerante, que encontra-se na forma líquida, em vapor (gás), através da vaporização que é provocada pela diminuição da pressão, ou seja, é por meio do evaporador que o gás refrigerante retira o calor dos alimentos. Os evaporadores podem ser dos seguintes tipos: tubo-chapa, *roll-bond* ou aletado.

c) Acumulador de Líquido

É um tubo cilíndrico localizado na parte final dos evaporadores tubo-chapa, aletados e em serpentinas evaporadoras de congeladores horizontais e verticais. O acumulador tem como função reter eventuais partes de refrigerante líquido (que não evaporou), impedindo o seu retorno à tubulação de sucção pois o refrigerante na forma líquida causa danos ao compressor.

d) Linha de Sucção

Tubo que liga o evaporador ao compressor e sua função é fazer com que o refrigerante retorne no estado gasoso ao compressor para somente então reiniciar o ciclo de refrigeração.

e) Tubo Capilar

É um tubo geralmente feito de cobre que liga o condensador ao evaporador. Em razão de seu diâmetro pequeno e comprimento longo, o tubo capilar mantém um diferencial de pressão do gás refrigerante entre o condensador e o evaporador, permitindo que este se mantenha em estado líquido e regulando a quantidade de gás refrigerante que entra no evaporador.

f) Condensador

É o componente do sistema de refrigeração responsável pela mudança de estado do refrigerante de gasoso para líquido. O condensador do tipo tubo-arame corresponde a uma tubulação em forma de serpentina composta de arames soldados na

superfície externa que atuam como dissipadores de calor. O condensador tipo estático com pré-condensador possui uma serpentina separada onde circula o gás refrigerante, bombeado pelo compressor. Após passar por esta serpentina, o gás entra em uma tubulação específica do compressor que está em contato direto com o óleo lubrificante, retirando parte do seu calor para, em seguida, o vapor superaquecido entrar no condensador principal.

g) Tubo Desumidificador (sistema anticondensação de umidade)

Trata-se de um tubo de cobre na forma geométrica do gabinete que é uma extensão do pré-condensador. Através dele circula vapor quente do gás refrigerante. O desumidificador está localizado dentro da isolação do refrigerador ou *freezer*, em contato direto com a flange do gabinete, pois sua função, através da condução térmica é evitar que gotículas de água (sudação) proveniente da umidade do ar, concentrem-se nas paredes do produto.

h) Ventilação Natural no Condensador

Consiste na remoção do calor do condensador pelo processo natural, isto é, o ar atmosférico, em contato com as paredes quentes do condensador, fica aquecido tornando-se menos denso, dirigindo-se para cima e dando lugar ao ar fresco que entra em contato com o condensador.

i) Ventilação Forçada no Condensador

Consiste na remoção do calor do condensador por meios mecânicos. Um motoventilador promove o fluxo do ar através das paletas do condensador. Estas, por sua vez, atuam como dissipadoras do calor, que é constantemente renovado.

j) Filtro Secador

Filtro secador ou desidratador é o componente responsável pela retenção de partículas sólidas e absorção de umidade que possam existir no sistema de refrigeração e está localizado entre o condensador e o capilar. É composto basicamente de um tubo de cobre, duas telas e seu interior é totalmente preenchido por um elemento granulado denominado “molecular sieve” que é o agente que efetua a absorção da umidade.



Figura 1 - Modelo de Filtro Secador

2.1.2 Componentes Elétricos do Sistema de Refrigeração

a) Compressor Hermético

O compressor é chamado de “coração do sistema” e sua função básica consiste em aspirar o gás refrigerante do evaporador e comprimi-lo no circuito através do condensador.

O compressor hermético é composto de duas partes fundamentais: o compressor (parte mecânica) e o motor (parte elétrica), sendo também chamado de motocompressor.

b) Relé de Partida

Eletromecânico

Trata-se de um componente que auxilia o motocompressor no momento da partida. Para a partida do motor é necessária uma elevação na corrente elétrica de quatro a cinco vezes a normal de trabalho. Esta corrente circula pelo enrolamento do relé e pelo enrolamento principal que se encontram energizados em série.

A corrente elétrica elevada cria um campo magnético no relé, o qual atrai seu núcleo metálico móvel, unindo os contatos móveis com os fixos, ligando o enrolamento auxiliar do compressor. Quando o motor atinge a velocidade normal de trabalho, aproximadamente 3.600 rpm, a corrente que circula pela bobina do relé diminui sua intensidade, tornando o campo magnético insuficiente para manter os contatos fechados, desprendendo os contatos e excluindo a fase de partida, ficando somente o enrolamento principal (marcha) na corrente e rotação de regime.

PTC – De estado sólido

Possui a mesma função do relé eletromecânico, mas características e conceito de funcionamento diferentes. O relé PTC utiliza uma pastilha de cerâmica para energizar e desenergizar o enrolamento auxiliar (partida) do motor.

Este tipo de relé responde à corrente do enrolamento auxiliar, ou seja, a pastilha de PTC se aquece pela passagem de corrente elétrica, aumentando a resistência ôhmica e limitando a passagem de corrente do enrolamento auxiliar, ficando somente o enrolamento principal (marcha). Assim que a tensão de linha for removida do PTC, começa o resfriamento da pastilha e a redução da resistência ôhmica, permitindo a passagem de corrente para uma nova partida.

c) Protetor Térmico

É um dispositivo constituído de um invólucro de baquelite, contendo no seu interior uma resistência ligada em série com um disco bimetálico (duas lâminas com materiais diferentes), sendo sensível à temperatura e à corrente elétrica elevada. O protetor térmico tem como função proteger o motor contra sobrecarga de corrente e alta temperatura, bloqueio do rotor, curto-circuito, elevação da temperatura nos enrolamentos, sobrecarga de tensão e baixa tensão.

d) Termostato

É basicamente um interruptor térmico que liga e desliga o motor do compressor com o objetivo de manter as temperaturas internas adequadas para a conservação dos alimentos. O termostato possui um botão de regulagem que está montado em um eixo. Quando este botão é girado no sentido horário, diminui-se a temperatura interna, girando-se no sentido anti-horário, aumenta-se a temperatura interna.

O capilar sensível do termostato é carregado com gás refrigerante cuja variação de pressão ocorre em função da temperatura do evaporador. Quando a temperatura aumenta, a pressão do gás também aumenta, fazendo com que o fole do termostato expanda-se e feche os contatos elétricos, ligando o compressor. Em contrapartida, a diminuição da temperatura, abre os contatos, desligando o compressor.

e) Resistência de Degelo

É uma resistência elétrica colada em uma folha de alumínio que é fixada na traseira da placa fria (evaporador). Através do aquecimento a resistência liquefaz os cristais de gelo formados na placa fria.

2.1.3 Funcionamento Básico do Sistema de Refrigeração

Exemplo de funcionamento do sistema de refrigeração de uso doméstico

- 1- O compressor comprime o gás refrigerante para o pré-condensador em alta pressão, onde é iniciado o processo de dissipação de calor para o ambiente e vai para o tubo desumidificador, que é uma extensão do pré-condensador.
- 2- O gás encaminha-se para o resfriador de óleo do compressor, retira calor do óleo e entra no condensador principal onde continua o processo de dissipação de calor, transformando-se gradativamente em líquido.
- 3- O líquido penetra no filtro secador, onde são retidas pequenas quantidades de partículas sólidas e umidade (água) que possam estar no sistema.
- 4- O líquido entra no capilar, diminui a pressão, aumenta a velocidade e segue para o evaporador.
- 5- O líquido entra no evaporador primário preenchendo parte deste e em seguida parte para o secundário (placa fria), retornando para o primário até completar o preenchimento. Dentro do evaporador, em baixa pressão o líquido gradativamente transforma-se em gás, absorvendo calor dos alimentos e do ambiente interno do refrigerador.
- 6- No final do evaporador primário, o refrigerante, já totalmente gasoso, retorna para o compressor através do tubo de sucção para reiniciar o ciclo.

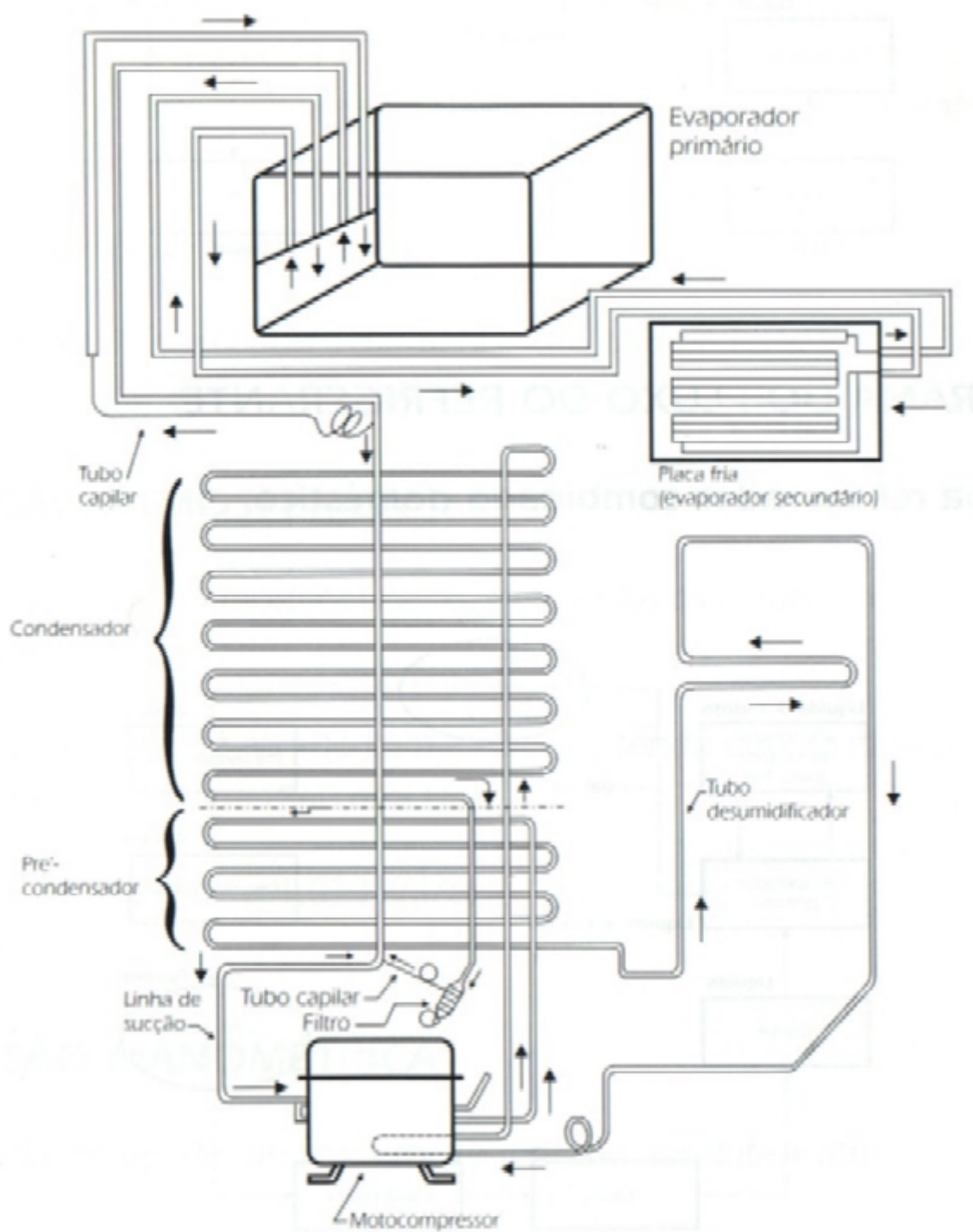


Figura 2 - Sistema de Refrigeração – Conceito utilizado em refrigerador doméstico

2.2 Unidade Refrigeradora Freezer

A unidade refrigeradora freezer é um equipamento responsável por congelar e conservar alimentos com o objetivo de preservar as suas características. A Electrolux fabrica *freezers* para a linha comercial e doméstica, podendo ser na forma vertical ou horizontal. Entre os modelos fabricados pela empresa podem ser citados os verticais F170, F210, F250 e o FF240, e na linha dos horizontais os modelos H160, H210, H300, H400 e H500.

O modelo de *freezer* objeto do estudo é o H210 da linha doméstica e um dos mais comercializados pela empresa.



Figura 3 - Unidade Refrigeradora Freezer Electrolux Modelo H210

2.2.1 Descrição de operação das unidades

A unidade refrigeradora *Freezer Convecção Natural* é conceituada como uma máquina térmica responsável pela execução de trocas térmicas com um fluido refrigerante em um ciclo fechado através da retirada de calor de um compartimento fechado e isolado termicamente do meio ambiente, conforme os princípios termodinâmicos da convecção natural. Seus principais componentes são:

- fluido refrigerante R134a (ciclopentano);
- evaporador;
- compressor;
- condensador;
- tubo capilar;
- isolamento térmica do compartimento.

O fluido refrigerante durante o processo de evaporação em baixa pressão, encontra-se no estado gasoso e numa temperatura baixa (aproximadamente -30°C). Devido à baixa temperatura e aos princípios da convecção natural, o fluido refrigerante realiza a troca térmica, absorvendo o calor existente no interior do compartimento *freezer* e simultaneamente transferindo ao compartimento a sua baixa temperatura, fazendo assim o resfriamento e congelamento no *freezer*. O fluido refrigerante, após absorver o calor existente devido à diferença de temperatura, é conduzido ao compressor, onde é submetido a um processo de compressão mecânica, resultando em um significativo acréscimo de temperatura (80 a 100°C) e pressão.

Nesta nova condição, com temperatura e pressão elevadas, o fluido refrigerante é conduzido ao condensador onde novamente através da convecção natural é realizada uma troca térmica com o ar do meio ambiente, resultando numa diminuição da temperatura do fluido refrigerante, provocando a transformação do estado físico do fluido para o estado líquido refrigerante. Nesta fase de troca térmica com o ar do meio ambiente, o fluido refrigerante cede ao ambiente o calor absorvido do interior do compartimento *freezer* no momento em que foi submetido à evaporação na fase inicial. Em seguida, o fluido refrigerante, agora em estado líquido e com alta pressão, é conduzido ao tubo capilar onde passa por uma sensível redução em sua pressão, mas se mantendo no estado líquido. Neste tubo capilar, assim denominado devido ao seu reduzido diâmetro interno, o fluido é forçado a reduzir sua pressão para níveis próximos a zero, e assim, ao ser introduzido no evaporador, o fluido ainda líquido vaporiza-se instantaneamente, causando uma rápida diminuição da temperatura ao mudar do estado líquido para o estado gasoso. A seguir é novamente reiniciado o ciclo.

3. REVISÃO SOBRE GARANTIA DE PRODUTOS E CONFIABILIDADE

A análise da confiabilidade para produtos em garantia tem sido objeto de estudo de vários autores e pesquisadores. Além de livros referenciais como NELSON (1982), LLOYD & LIPOW (1984), HOYLAND & RAUSAND (1994) e ELSAYED (1996), artigos e trabalhos publicados a respeito do tema foram pesquisados para fundamentar o desenvolvimento deste estudo. O artigo elaborado por FOGLIATTO & FALCETTA (2001) a respeito de modelagem para dados de falhas envolvendo distribuições bimodais, onde os autores propõem a aplicação do procedimento de uma heurística para a modelagem do sistema, serviu como modelo inicial desta pesquisa em virtude da similaridade do objeto de estudo e das condições de observação dos dados experimentais.

Estudos como o de LAWLESS (1998) sobre a análise estatística de dados de produtos em garantia envolvendo a aplicação do modelo de Poisson em um caso específico de análise de custos com garantia e predição de chamadas para refrigeradores, de WASSERMAN & SUDJIANTO (1996) que trata de estratégias para predição de chamadas de garantia utilizando modelos estáticos, modelos dinâmicos e aproximações não paramétricas incluindo o uso de redes neurais, de HAHN & MEEKER (1982) retratando os conceitos e perigos da extrapolação em estudos de confiabilidade e, principalmente, NACHLAS & KUMAR (1993), a respeito da estimação de confiabilidade usando dados de campo duplamente censurados, onde os autores se utilizam de informações *a priori* na estimação de uma distribuição de Weibull e desenvolvem mecanismos de simulação para determinar a confiabilidade após determinado período, serviram de fonte para reflexão e entendimento na modelagem do estudo proposto.

Quanto à aplicação dos modelos bayesianos, MARTZ & WALLER (1982) apresentam farto conteúdo a respeito da análise bayesiana de confiabilidade, não somente sugerindo o uso de determinados modelos, mas também exemplificando cada uma das situações e aplicações. A fundamentação da análise estatística na inferência bayesiana fornecida por BOX & TIAO (1992) e JEFFREYS (1998) proporcionou identificar adequadamente os pressupostos estabelecidos para o uso de tal técnica e aplicá-la em conformidade na estimação bayesiana da confiabilidade.

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os fundamentos relacionados à Garantia de Produtos e Teoria da Confiabilidade utilizados neste estudo. O capítulo está dividido na seguinte forma: a seção 3.1, apresenta os conceitos a respeito da garantia de produtos e garantia extraordinária. A seção 3.2 traz os conceitos teóricos de confiabilidade. Na seção 3.3 são apresentadas as principais funções de confiabilidade e as principais distribuições utilizadas para modelagem de tempos-até-falha. Na seção 3.4, apresentam-se três métodos matemáticos utilizados para estimação dos parâmetros das distribuições de confiabilidade, assim como os critérios para escolha dos estimadores. Compõem a seção 3.5, os tipos de dados geralmente coletados e os modelos paramétricos e bayesiano para definição dos parâmetros das distribuições. A seção 3.6 trata da descrição dos testes de adequação para as distribuições hipotéticas e o método gráfico para verificação da aderência dos dados experimentais ao modelo de distribuição proposto. A seção 3.7 retrata a forma de cálculo na determinação da confiabilidade de um sistema como um todo.

3.1 Garantia de Produtos

A garantia é um contrato ou acordo sobre o qual o produtor de um produto ou serviço concorda em reparar, substituir ou providenciar serviços quando o produto falha ou o serviço não atende os requisitos do consumidor antes de um tempo especificado (ELSAYED, 1996).

Segundo HART (1996), a origem das garantias inicia-se na metade do século XIX, quando alguns comerciantes começaram a fornecer uma garantia escrita de devolução de dinheiro para seus produtos. Embora estas garantias amplamente divulgadas parecessem aos olhos dos observadores como uma excentricidade financeira, rapidamente serviram para conseguir milhares de clientes. Aquelas ofertas não apenas marcaram a primeira vez em que garantias foram utilizadas como uma estratégia de negócios, mas também introduziram para o público a noção de que uma garantia poderia ser mais do que um meio para desfazer uma transação comercial faltosa, em vez disso, uma garantia poderia ser uma poderosa declaração a respeito da maneira de uma empresa fazer negócios.

Ao longo do tempo as garantias foram regulamentadas proporcionando aos fabricantes concorrerem entre si de forma ílesa, deixando aos consumidores a avaliação final da confiabilidade e qualidade dos seus produtos. Na década de 60, conforme HART (1996), observou-se o surgimento de um elo muito fraco entre o fornecimento de garantias e o monitoramento da satisfação de clientes, mas somente na década de 80 algumas empresas começaram a perceber que poderiam estar perdendo algumas significativas oportunidades da utilização de garantias. Neste momento, muitos fabricantes tentaram aumentar suas garantias como resposta à crescente obsessão que o mercado tinha em relação à qualidade, e o tempo de cobertura das garantias de produtos eletrônicos, automóveis e eletrodomésticos em muitos casos passou de um para cinco anos, embora os tipos de problemas cobertos por tais garantias fossem freqüentemente limitados.

Atualmente, a garantia de produtos tem sido utilizada pelas empresas, não apenas como uma ferramenta de marketing, mas também como um meio de definir, cultivar e manter a qualidade em toda a organização.

Empresas cujos produtos têm um desempenho muito melhor que os de seus concorrentes, devem chamar a atenção para esse fato oferecendo uma garantia extraordinária que os outros não possam igualar (KOTLER, 1999). Geralmente, a simples oferta de garantia adicional tem pouco impacto em clientes atuais e potenciais, de produtos. Afinal, um certo grau de garantia protetiva é exigido por lei e quase que todos os clientes esperam encontrar algum tipo de garantia formal acompanhando virtualmente qualquer produto que comprem. A criação de uma garantia extraordinária advém de um esforço especial por parte da empresa, e HART (1996), observa que este esforço pode ser feito de diversas maneiras: ao dramaticamente estenderem a amplitude ou duração da garantia, ou ao oferecerem uma garantia que vá além da devolução do dinheiro, ou ao oferecerem uma garantia incondicional de satisfação, que permita ao cliente devolver o produto, mesmo que não haja nada de errado com ele.

Este tipo de garantia extraordinária pode capturar a potencial atenção do cliente e ir além, no sentido de vencer hesitações a respeito da compra. Para poder oferecer uma garantia mais extensa aos seus clientes, a empresa deve estar fabricando sob níveis de excelência. HESKETT et al (1994), identificam que, a qualidade deve estar alinhada aos padrões de exigência de uma garantia poderosa.

Para HART(1996), a implantação de um programa de garantia extraordinária por parte da empresa, não pode ocorrer de forma exclusiva entre os diversos setores, pois há a necessidade de se estabelecer formas de garantias internas para que a empresa alcance os objetivos propostos com a implantação em todos os níveis. O maior risco que um programa de garantia extraordinária corre é ser mal preparado ou descuidadamente implantado, pois os custos das compensações podem ultrapassar os benefícios mercadológicos.

3.2 Teoria da Confiabilidade

O conceito de confiabilidade, normalmente está ligado aos requisitos de qualidade intrínseca do produto e, em geral associado à sua durabilidade, o que proporciona à empresa fornecedora assumir a garantia de um produto. Para que o fornecedor possa assumir esta obrigação com o consumidor, seus produtos devem ser fabricados com alta confiabilidade de forma a minimizar a incidência de falhas no campo e reduzir os custos da população em garantia.

Segundo HOYLAND & RAUSAND (1994), “A confiabilidade de um determinado item pode ser definida como sua capacidade de realizar uma função requerida durante um determinado período de tempo, submetido a um determinado meio, em condições de projeto”.

Outros autores, como FREITAS & COLOSIMO (1997), definem confiabilidade como:

“A probabilidade de um item desempenhar satisfatoriamente a função requerida, sob condições de operações estabelecidas, por um período de tempo predeterminado”.

Entre as definições apresentadas, observa-se basicamente a substituição do termo *capacidade* por *probabilidade*. Esta alteração sugere que a confiabilidade seja definida em função de uma medida e para tal, a probabilidade torna-se a medida de grandeza da confiabilidade. Em geral, nas definições apresentadas, *itens* podem ser componentes, sistemas ou subsistemas que compõem um produto ou serviço e *função requerida* é uma única função ou o conjunto das funções necessárias para um serviço especificado.

Neste contexto, é importante destacar alguns elementos relevantes no âmbito da confiabilidade, tais como: a necessidade de se definir as funções para as quais o produto foi projetado; o que se entende por desempenho satisfatório; as condições de operação e a necessidade de se definir o período de tempo durante o qual o produto deve funcionar corretamente. A não confiabilidade de um produto tem conseqüências no custo, no tempo desperdiçado e no efeito psicológico da inconveniência, entre outras (LLOYD & LIPOW, 1984).

A vida de um produto é determinada pelo seu *design* e manufatura. Segundo HAHN & MEEKER (1982), a análise dos dados de vida do produto é importante para o estabelecimento da garantia de produtos, pois proporciona fazer comparações com os produtos dos competidores, checar a veracidade das publicidades, determinar a necessidade de *recall* e estimar os custos com falhas de produtos em garantia. Entre as aplicações da confiabilidade, a principal delas está ligada à prevenção de falhas. Uma falha pode ser definida como término da disponibilidade de um item para realizar sua função requerida HOYLAND & RAUSAND (1994, apud FALCETTA, 2000). As falhas podem ocorrer de diferentes modos e a informação pode ser obtida no campo ou através de testes em laboratórios. Conforme FOGLIATTO & FALCETTA (2001), a obtenção de dados a partir dos testes de confiabilidade sob condições controladas em laboratórios implica em alto custo para as empresas, limitando a utilização desta ferramenta. Uma forma de introduzir a modelagem por meio da análise de confiabilidade pode ser realizada com a utilização dos dados provenientes das informações de campo dos produtos em garantia. Segundo BLISCHKE & MURTHY (1996, apud LAWLESS, 1998), a análise de dados em garantia é um assunto que historicamente foi negligenciado pelos fabricantes embora, muitos artigos tratando de modelagem matemática e planejamento de garantia tivessem sido disponibilizados. Estas informações podem ser disponibilizadas, por exemplo, pela assistência técnica e podem auxiliar nos projetos de melhoria dos produtos.

Diversos estudos realizados tratam da aplicação de modelos para a análise da confiabilidade de produtos que, em essência, apresentam modelagens estatísticas.

3.3 Funções de Confiabilidade

Dentro da análise de confiabilidade de produtos, as principais funções utilizadas, são:

(i) a função de confiabilidade; (ii) a função de risco; (iii) o tempo médio entre falhas, MTBF (*Mean Time Between Failures*); e (iv) o tempo médio até a falha, MTTF (*Mean Time to Failure*).

3.3.1 Tempo-até-Falha

As formas usuais de especificar o tempo-até-falha são a função de confiabilidade e a função de taxa de falha. Segundo HOYLAND & RAUSAND (1994), o tempo-até-falha indica o período desde que a unidade entrou em operação até o momento da falha. Seja $t = 0$ como o tempo inicial, logo o tempo até a falha pode apresentar variações, podendo assim ser considerada como uma variável aleatória designada por T . O estado da unidade no tempo t pode ser descrito pelo estado da variável $X(t)$, da seguinte forma:

$X(t) = 1$, se a unidade estiver funcionando no tempo t
 $X(t) = 0$, se a unidade não estiver funcionando no tempo t .

A relação entre o estado da variável $X(t)$ e o tempo até falha T não precisa ser, necessariamente, medido em unidades de tempo, podendo ser também dado em número de ciclos, número de rotações, etc.

O tempo-até-falha T será considerado como distribuído continuamente, com densidade de probabilidade $f(t)$. A função acumulada de falha $F(t)$ é:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u) du, \quad \text{para } t > 0 \quad (3.1)$$

Desta forma, $F(t)$ representa a probabilidade da unidade falhar no intervalo de tempo $(0, t)$. A função densidade de probabilidade $f(t)$ é definida como;

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (3.2)$$

Quando Δt for pequeno, então:

$$P(t < T \leq t + \Delta t) = f(t) \cdot \Delta t \quad (3.3)$$

A função acumulada de falha $F(t)$ está exemplificada na figura 4, a seguir.

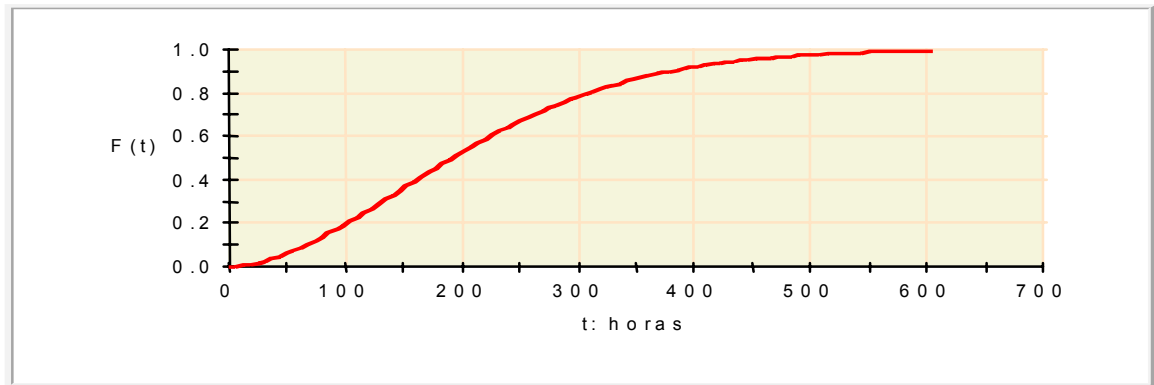


Figura 4 - Exemplo de Função acumulada de falha

3.3.2 Função de Confiabilidade

A função de confiabilidade é uma das principais funções probabilísticas usadas para descrever estudos provenientes de testes de durabilidade. Uma função de confiabilidade é definida como a probabilidade de um produto desenvolver sua função sem falhar até um tempo t . Conforme ELSAYED (1996), uma situação em que componentes são testados quanto a sua confiabilidade, ao final de um tempo t , obtêm-se:

n_0 = número total de componentes testados

$n_f(t)$ = número de componentes que falharam durante o teste no período t

$n_s(t)$ = número de componentes que não falharam durante o teste no período t

sendo que $n_0 = n_f(t) + n_s(t)$.

A função de confiabilidade $R(t)$ é definida como a função acumulada de sucesso no tempo t , ou seja:

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)} = \frac{n_s(t)}{n_0} \quad (3.4)$$

como,

$$F(t) = \frac{n_f(t)}{n_0} \quad (3.5)$$

observa-se que a função de confiabilidade $R(t)$ corresponde ao complemento da função acumulada de falha $F(t)$, ou seja,

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t), \quad \text{para } t > 0 \quad (3.6)$$

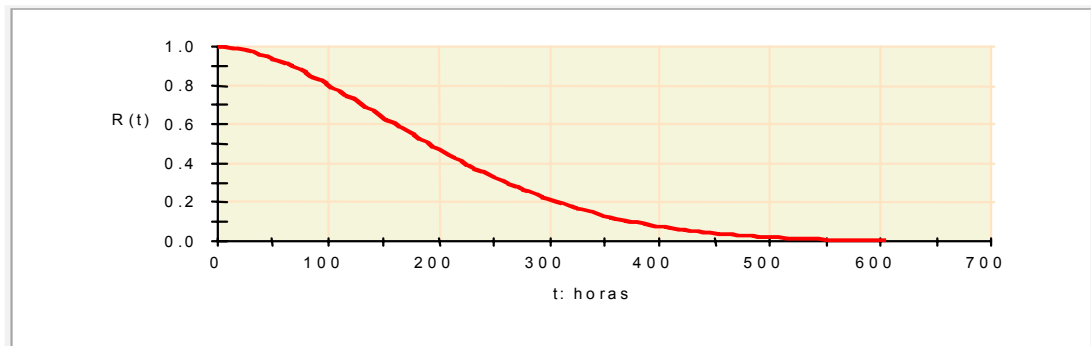


Figura 5 – Exemplo de função de confiabilidade

3.3.3 Função de Risco

A probabilidade de um produto ou unidade falhar em um determinado intervalo de tempo $(t, t + \Delta t)$, dado que o produto está operante no tempo t , é dada por:

$$P(t < T \leq t + \Delta t \mid T > t) = \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} \quad (3.7)$$

Dividindo esta probabilidade pela amplitude do intervalo de tempo Δt e considerando $\Delta t \neq 0$, obtém-se a função de risco do produto:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t \setminus T > t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.8)$$

Quando Δt é pequeno, utiliza-se a aproximação:

$$P(t < T \leq t + \Delta t \setminus T > t) = h(t) \cdot \Delta t \quad (3.9)$$

Conforme ELSAYED (1996), a função de risco de um intervalo de tempo pode ser expressa como:

$$h(t_i) = \frac{n_f(\Delta t_i)}{n_s(t_i - 1) \cdot \Delta t_i} \quad (3.10)$$

Existe uma interessante relação entre as funções $F(t)$ e $R(t)$, conforme pode ser observado:

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} [1 - R(t)] = -R'(t) \quad (3.11)$$

Desta forma,

$$h(t) = \frac{R'(t)}{R(t)} = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (3.12)$$

Como $R(0) = 1$, então:

$$\int_0^t h(t) dt = -\ln R(t) \quad (3.13)$$

e

$$R(t) = \varepsilon^{-\int_0^t h(u) du} \quad (3.14)$$

A função de confiabilidade $R(t)$ e a função acumulada de falhas $F(t)$ podem ser determinadas pela função de risco, $h(t)$. A probabilidade de falhas pode ser expressa por :

$$f(t) = h(t) \varepsilon^{-\int_0^t h(u) du}, \text{ para } t > 0 \quad (3.15)$$

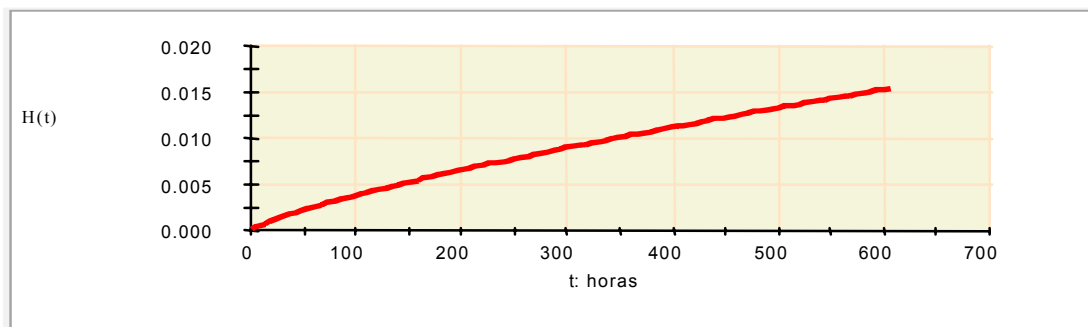


Figura 6 – Exemplo de Função de Risco

3.3.4 Tempo Médio até Falha e Tempo Médio entre Falhas

Em estudos de durabilidade, a confiabilidade de um sistema pode ser quantificada por meio do Tempo Médio até a Falha (MTTF) para sistemas não reparáveis e através do Tempo Médio entre Falhas (MTBF) para sistemas que podem ser reparados.

Observando-se n sistemas idênticos não reparáveis até a ocorrência de falhas nos tempos t_1, t_2, \dots, t_n , a média dos tempos-até-falha, MTTF, será estimada por:

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (3.16)$$

Sendo conhecida a distribuição de probabilidade dos tempos-até-falha observados, o MTTF corresponderá ao valor esperado da variável aleatória T , ou seja:

$$E(T) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.17)$$

então o MTTF pode ser expresso pela função:

$$MTTF = -\int_0^{\infty} t \frac{dR(t)}{dt} dt = -\int_0^{\infty} t dR(t) = tR(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt, \quad (3.18)$$

Como $R(\infty) \rightarrow 0$ e $R(0) = 1$, a equação (3.18) pode ser reduzida a

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.19)$$

3.3.5 Modelos Probabilísticos em Confiabilidade

Do ponto de vista da estimação da função de risco, LLOYD & LIPOW (1984) indicam que produtos da chamada “linha branca”, para períodos mais extensos de sua vida útil, apresentam um comportamento muito próximo da chamada curva da banheira onde a taxa de falhas normalmente apresenta alta mortalidade infantil, decresce, torna-se constante em sua vida útil e assume um comportamento ascendente durante a fase de envelhecimento.

Nessas fases, algumas causas das falhas podem ser identificadas, como por exemplo:

- Mortalidade Infantil: Defeitos de projeto, deficiências do processo de fabricação e garantia da qualidade. Do ponto de vista do projeto, o enfoque para reduzir a taxa de falhas é minimizar este período ao máximo ou eliminá-lo por completo antes da utilização real do componente ou equipamento. Consiste no emprego de testes de melhoramento ou crescimento da confiabilidade durante o desenvolvimento do projeto seguidos por testes controlados e *burn-in*
- junto ao controle de processo, assim como, melhorar os serviços de inspeções durante a fabricação.
- Vida Útil: As falhas ocorrem principalmente pela ocorrência aleatória de esforços que excedem os níveis de resistência do componente. Nesse caso, podem ser identificados: um projeto inadequado para aplicação, ambiente com maior

severidade do que o especificado, maus tratos com o produto e superutilização do equipamento.

- Envelhecimento: Quando ocorre um aumento na taxa de falhas, devido ao desgaste pela ocorrência gradual de mudanças físicas e químicas na estrutura interna ou externa do equipamento/componente, como por exemplo: corrosão/erosão, fadiga e desgastes generalizados.

No entanto nem todos os componentes apresentam função de risco conforme a curva da banheira, pois muitos tipos de equipamentos acabam não apresentando uma ou outra região. Segundo NELSON (1990), distribuições teóricas com uma função de taxa de falhas na forma da curva da banheira, são bastante complexas e difíceis de serem manipuladas.

As principais distribuições de probabilidade utilizadas em análise de confiabilidade para a modelagem de tempos-até-falha estão apresentadas a seguir.

a) Modelo de Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull foi proposta originalmente por W. Weibull (1954) em estudos relacionados ao tempo de falha devido a fadiga de metais. É uma distribuição freqüentemente empregada para descrever o tempo de vida de produtos industriais. A distribuição de Weibull também descreve adequadamente o tempo de vida de componentes ou subsistemas.

O modelo físico que justifica a distribuição de Weibull origina-se da teoria dos valores extremos, mais especificamente as distribuições de Gumbell.

A função densidade de probabilidade $f(t)$ da distribuição de Weibull é dada por:

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1} \varepsilon^{-\frac{t^\gamma}{\theta}}, \text{ para } t > 0 \quad (3.20)$$

e suas funções de risco $h(t)$ e de confiabilidade $R(t)$ são:

$$h(t) = \frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1}, \text{ para } t > 0 \quad (3.21)$$

e

$$R(t) = \varepsilon^{\frac{-t^\gamma}{\theta}} \quad , \text{ para } t > 0 \quad (3.22)$$

onde γ e θ representam os parâmetros de forma e escala da função, respectivamente, assumindo valores não negativos.

Em função do parâmetro de forma, observa-se que para $\gamma < 1$, a função de risco decresce com o tempo (região de mortalidade infantil da curva da banheira), para $\gamma = 1$, a função de risco é constante ao longo do tempo (região útil da curva da banheira) e para $\gamma > 1$, a função de risco apresenta crescimento linear (região de envelhecimento da curva da banheira).

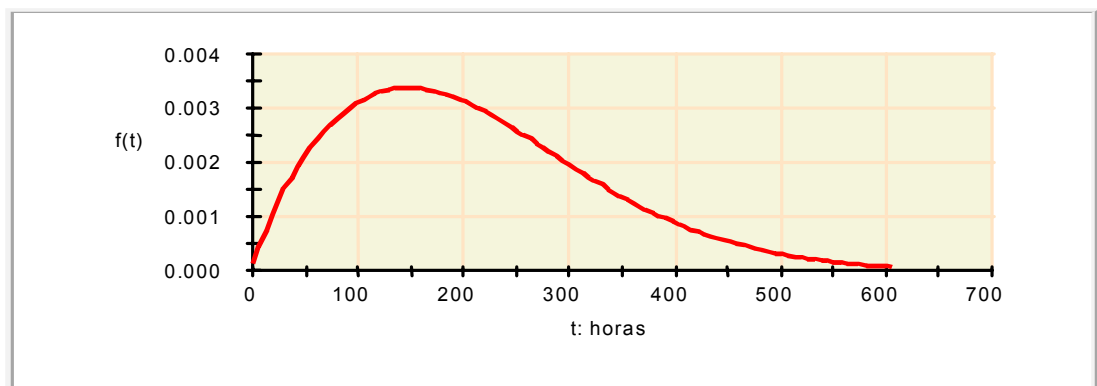


Figura 7 – Exemplo de função densidade de probabilidade - Weibull

b) Modelo de Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial caracteriza-se por apresentar uma função de risco constante. Trata-se de um caso especial da Distribuição de Weibull, sendo utilizada em situações em que as falhas ocorrem de forma aleatória com uma taxa fixa e sem um expressivo mecanismo de desgaste ou degradação. A função densidade de probabilidade $f(t)$ da distribuição exponencial é dada por:

$$f(t) = \lambda \varepsilon^{-\lambda t} \quad , \text{ para } t > 0 \quad (3.23)$$

e suas funções de risco $h(t)$ e de confiabilidade $R(t)$ são expressas da seguinte forma:

$$h(t) = \frac{1}{\lambda} \quad (3.24)$$

e

$$R(t) = \varepsilon^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)} \quad (3.25)$$

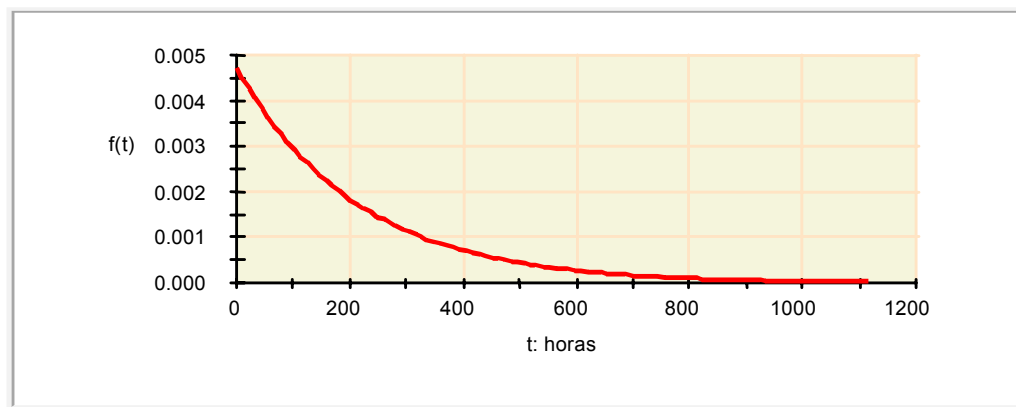


Figura 8 – Exemplo da Função densidade de probabilidade – Exponencial

c) Modelo de Distribuição Lognormal

Assim como a distribuição de Weibull, a distribuição lognormal é utilizada com freqüência para caracterizar o tempo de vida de produtos e materiais. A distribuição lognormal é a que melhor descreve os tempos de vida de componentes semicondutores cujos mecanismos de falha envolvem interações químicas, como as encontradas em processos de corrosão, acúmulo superficial de cargas elétricas e degradação de contatos, sendo também adequada para os mecanismos de falha por fadiga em materiais. A função densidade de probabilidade $f(t)$, é expressa por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0, t > 0 \quad (3.26)$$

e as funções de risco $h(t)$ e de confiabilidade $R(t)$, são dadas por:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)}{t\sigma R(t)} \quad (3.27)$$

e

$$R(t) = \phi\left\{\frac{-[\ln(t) - \mu]}{\sigma}\right\} \quad (3.28)$$

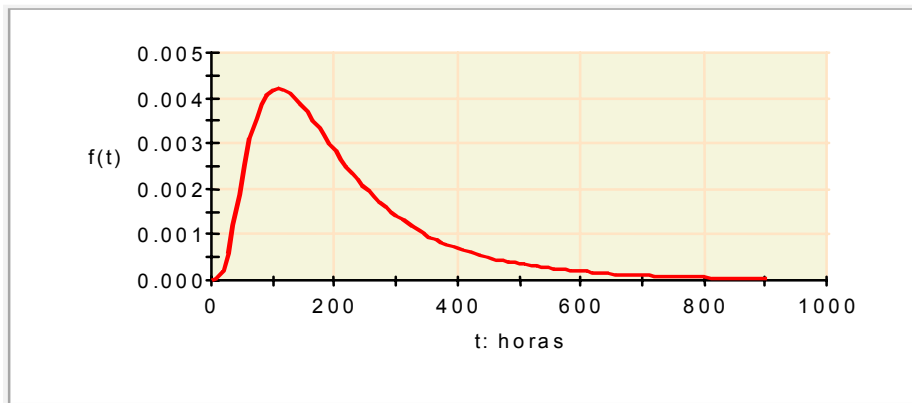


Figura 9 – Exemplo da função densidade de probabilidade – Lognormal

d) Modelo de Distribuição Normal

Alguns tipos de componentes podem ter o comportamento das falhas representado por uma distribuição normal. Seja T a duração da vida de um componente, sua função densidade de probabilidade $f(t)$, será dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3.29)$$

e suas funções de risco $h(t)$ e de confiabilidade $R(t)$, serão expressas por:

$$h(t) = \frac{\phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)}{\sigma R(t)} \quad (3.30)$$

e

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (3.31)$$

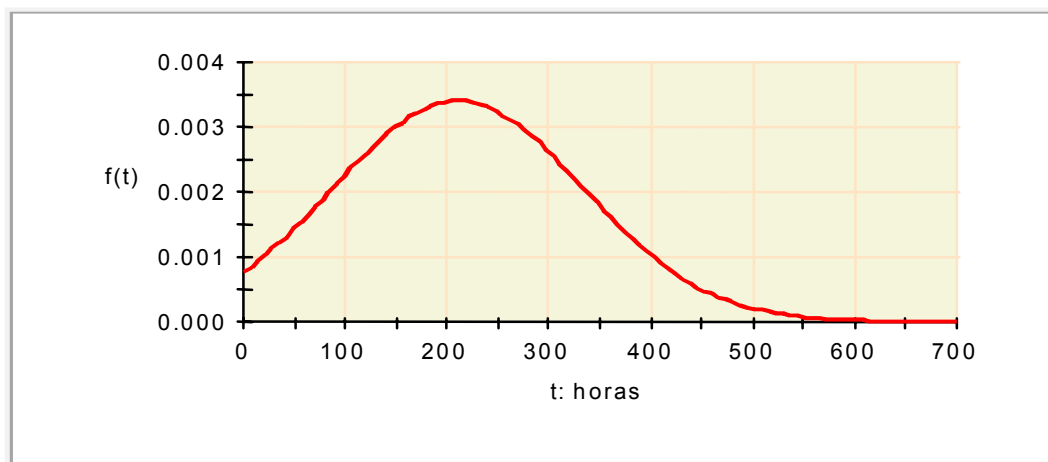


Figura 10 – Exemplo da função densidade de probabilidade – Normal

e) Modelo de Distribuição Gama

Se X é variável aleatória, que assume somente valores não negativos, então X terá uma *distribuição de probabilidade gama*, se sua função densidade de probabilidade for dada por:

$$f(t) = \frac{t^{\gamma-1}}{\theta^{\gamma} \Gamma(\gamma)} \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \quad (3.32)$$

As funções de risco $h(t)$ e de confiabilidade $R(t)$ da distribuição Gama, são dadas por:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.33)$$

e

$$R(t) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\theta} \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \left(\frac{\gamma}{\theta} \right)^{\gamma-1} \varepsilon^{-\frac{\gamma}{\theta}} d\gamma \quad (3.34)$$

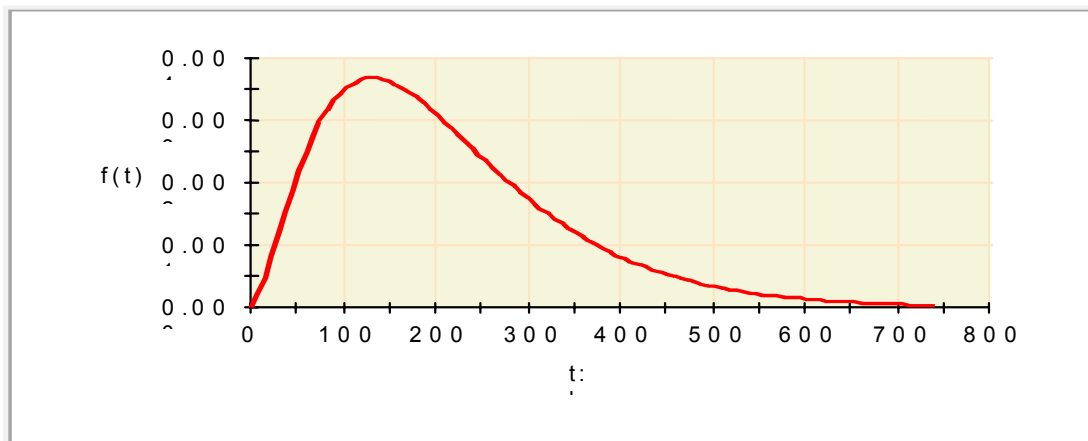


Figura 11 – Exemplo da função densidade de probabilidade - Gama

3.4 Estimativas de Parâmetros e Critérios para Escolha dos Estimadores

Os modelos probabilísticos apresentados na seção 3.3 são caracterizados por quantidades desconhecidas, denominadas parâmetros. Os modelos de Weibull, lognormal, normal e gama são estruturados em função de dois parâmetros, enquanto o modelo exponencial, por apenas um. Estas quantidades conferem uma forma geral aos modelos probabilísticos. No entanto, nos estudos de confiabilidade, tais parâmetros devem ser estimados a partir das observações amostrais, de tal forma que o modelo possa ser determinado e convenientemente utilizado. A tentativa de se caracterizar a forma da distribuição da população é chamada de problema da especificação.

O problema da especificação sugere a estimação dos parâmetros populacionais utilizando-se das evidências experimentais. A estimação de parâmetros consiste na escolha adequada do melhor estimador para tal finalidade.

Um bom estimador, conforme MOOD et al. (1974) deve apresentar as seguintes propriedades:

i) Não tendenciosidade

Um estimador $\hat{\theta}$ é chamado de estimador *não tendencioso* de θ se o valor esperado de $\hat{\theta}$ for igual a θ ; isto é, se $E(\hat{\theta}) = \theta$ para todos os valores de θ em Ω .

ii) Consistência

Sejam $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_n, \dots$ uma seqüência de estimadores de θ . Esta seqüência será um estimador consistente de θ se para todo $\varepsilon > 0$, for satisfeita a seguinte condição:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(\theta - \varepsilon < \hat{\theta}_n < \theta + \varepsilon) = 1 \quad \text{para todo } \theta \text{ em } \Omega. \quad (3.35)$$

iii) Eficiência

Dados dois estimadores $\hat{\theta}_1$ e $\hat{\theta}_2$, a serem usados na estimação de um mesmo parâmetro θ , então $\hat{\theta}_1$ será mais eficiente que $\hat{\theta}_2$ como estimador de θ se, para o mesmo tamanho de amostra,

$$E[(\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2)^2] < E[(\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2)^2] \quad (3.36)$$

iv) Suficiência

Um estimador $\hat{\theta}$ é *suficiente* se contém o máximo possível de informação com referência ao parâmetro θ por ele estimado.

Alguns critérios têm sido propostos com a finalidade de resolver o problema da escolha dos estimadores mais adequados. Entre os principais métodos podem ser citados; o *método da máxima verossimilhança*, o *método dos momentos* e o *método de Bayes*.

3.4.1 Método da Máxima Verossimilhança

Este método fornece em geral estimadores consistentes, assintoticamente eficientes e com distribuição assintoticamente normal.

A essência do método consiste em adotar para o parâmetro o valor que maximize a *função de verossimilhança* correspondente ao resultado obtido na amostra. Ou seja, retirada uma amostra de uma população, a configuração dessa amostra irá depender das características da população e, particularmente, do valor do parâmetro desconhecido θ que se deseja estimar. Considerando-se então, a probabilidade, ou densidade de probabilidade, conforme o caso, de que uma particular amostra seja obtida, essa probabilidade ou densidade de probabilidade irá depender, evidentemente, da amostra observada e do valor do parâmetro θ da população. Sendo fixada esta amostra, essa probabilidade ou densidade de probabilidade será função de θ , dita *função de verossimilhança* correspondente a essa particular amostra. Essa função admite, em geral, um único ponto de máximo, o qual fornecerá a estimativa de máxima verossimilhança do parâmetro θ . Seja $l(x, \theta)$ a função de verossimilhança, então:

$$l(x, \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta) \quad (3.37)$$

A determinação do estimador de máxima verossimilhança é dada pela solução da equação:

$$\frac{dl(x, \theta)}{d\theta} = 0 \quad (3.38)$$

3.4.2 Método dos Momentos

Este método consiste em supor que os momentos da distribuição da população coincidem com os da amostra (MOOD et al., 1974).

Seja $f(x; \theta_1, \dots, \theta_k)$ uma densidade com k parâmetros. Sejam $\mu'_1, \mu'_2, \dots, \mu'_k$ os k primeiros momentos; isto é:

$$\mu_t = \int_{-\infty}^{\infty} x_t^t f(x; \theta_1, \dots, \theta_k) dx \quad t = 1, 2, \dots, k \quad (3.39)$$

Em geral, μ_t pode ser uma função de k parâmetros $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$, e é denotado por $\mu_t = \mu_t(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$. Se x_1, x_2, \dots, x_n é uma amostra aleatória de tamanho n com densidade $f(x; \theta_1, \dots, \theta_k)$, então essa amostra representa os k primeiros momentos m_1', m_2', \dots, m_k' , quando:

$$m_t' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^t \quad (3.40)$$

A obtenção das estimativas dos k parâmetros de uma distribuição de probabilidade necessita dos primeiros k momentos populacionais e amostrais.

3.4.3 Método de Bayes

O método de Bayes baseia-se na existência de uma função perda associada ao erro da estimativa, e na consideração de uma distribuição *a priori* para os possíveis valores do parâmetro. Será adotada a estimativa que minimize o valor médio ou a expectativa da perda, calculada com base na distribuição resultante para o parâmetro após o conhecimento dos valores da amostra.

Segundo MARTZ & WALLER (1982), o problema da estimação estatística é um tipo especial de decisão estatística em que se deseja estimar o valor de um parâmetro desconhecido θ , que pode ser chamado de vetor estimado.

No caso da estimação *bayesiana*, o espaço ação A consiste dos possíveis pontos estimados para o parâmetro θ formando assim um subgrupo do parâmetro no espaço Ω_θ . O espaço de decisão D consiste dos possíveis estimadores para θ . Então a função decisão será dada por:

$$\hat{\theta} = \delta(x), \quad (3.41)$$

quando x é o valor observado de X . A função $\hat{\theta}$ é chamada de estimador pontual de θ . Uma vez que X tenha sido observado, a função $\delta(x)$ pode ser avaliada e a “ação” resultante $\hat{\theta}$ é referendada como a estimativa pontual de θ . Em outras palavras, as estimativas (ações) são os valores dos estimadores (função de decisão).

A perda incorrida, estimando θ por $\hat{\theta}$, deve refletir a discrepância entre o valor de θ e a estimativa de $\hat{\theta}$ e deve também ser zero se e somente se $\hat{\theta} = \theta$. Por esta razão a função perda L em um problema de estimação sempre assume a forma:

$$L(\theta, \hat{\theta}) = h(\theta)\gamma(\theta - \hat{\theta}), \quad (3.42)$$

onde γ é uma função não negativa de erro $\theta - \hat{\theta}$, tal que $\gamma(\theta) = 0$ e h é uma função não negativa ponderada que reflete a gravidade relativa dos erros dados pelos diferentes valores de θ . Na determinação da função de decisão de Bayes, baseada nesta função perda, a função h pode ser considerada como um componente da distribuição *a priori* $g(\theta)$. Por esta razão, freqüentemente é assumido que a função h em (3.42) é uma constante.

Em vários problemas de estimação, deseja-se apenas estimar alguns dos componentes de θ . Neste caso o componente de θ que não será estimado é chamado de *parâmetro nuisance*. Por exemplo, se numa distribuição $W(\gamma, \theta)$ o parâmetro de escala θ está para ser estimado, o parâmetro de forma γ será chamado de *parâmetro nuisance*.

Quando o parâmetro θ é unidimensional, a função perda em um problema de estimação pode ser expressa por:

$$L(\theta, \hat{\theta}) = a \left| \theta - \hat{\theta} \right|^b \quad (3.43)$$

3.5 Modelagem de Dados de Tempos até Falha

Nos estudos de confiabilidade de componentes ou sistemas é necessária a obtenção dos dados de tempo-até-falha desses componentes ou sistemas. Estes dados que identificam o desempenho dos produtos originam-se basicamente de duas fontes: dados de campo e dados experimentais (testes). Conforme FREITAS & COLOSIMO (1997), os dados de campo podem ser obtidos por meio de *testes de mercado* bem antes do lançamento do produto ou através das chamadas dos serviços autorizados de assistência técnica, principalmente com maior fidedignidade para os dados de produtos que estão dentro do prazo de garantia. A obtenção de dados experimentais pode ser feita através dos testes acelerados, que são utilizados com muita frequência nas indústrias e proporcionam estimar com grande rapidez, estimativas do tempo médio de vida nas condições de uso.

No caso do presente estudo, a análise da confiabilidade do produto será realizada utilizando-se de informações de campo, mais especificamente da área de garantia da qualidade de produtos. Esses dados contemplam informações a respeito do período de produção, frequência de não-conformidades do componente por tempo de uso e período da chamada, entre outras.

3.5.1 Tipos de Censura

Os testes realizados para obter as medidas de durabilidade de produtos são demorados e caros. Por serem demorados, usualmente os testes são concluídos antes que todos os itens falhem. Uma característica decorrente desses testes é a presença de observações incompletas ou parciais. Estas observações que ultrapassaram o tempo limite do teste são chamadas de sobreviventes e, conseqüentemente, todo o conjunto de observações sobreviventes estará na condição chamada de *censura do teste*. Existem diferentes tipos de censura assim descritos:

a) *Censura por tempo ou do Tipo I*

É aquela em que o teste será terminado após um período preestabelecido de tempo.

b) Censura por falha ou do Tipo II

É aquela em que o teste será encerrado após ter ocorrido a falha em um número preestabelecido de itens sob teste.

c) Censura do Tipo III

Representada pela mistura dos dois tipos de censura apresentadas anteriormente. O teste será encerrado após ocorrer a falha em um número preestabelecido de itens ou após o término do tempo especificado para o mesmo.

d) Censura Aleatória

Ocorre quando as unidades são testadas em diferentes períodos de tempo e não foi especificado o número de unidades que devem falhar ao final de cada período de tempo.

3.5.2 Modelos Paramétricos de Confiabilidade

Esta subseção apresenta os modelos paramétricos da distribuição Exponencial e da distribuição de Weibull, introduzindo os conceitos abordados na seção 3.2.

a) Modelo para a Distribuição Exponencial

Supondo uma amostra de n itens onde as $r \leq n$ primeiras observações são falhas e as demais, $n - r$, são censuras.

Utilizando o Método da Máxima Verossimilhança, para obter-se o estimador de λ na distribuição exponencial, tem-se que:

$$L(\lambda) = \prod_{i=1}^r (1/\lambda) \exp(-t_i/\lambda) \prod_{i=r+1}^n \exp(-t_i/\lambda) \quad (3.44)$$

tomando-se o logaritmo natural de $L(\lambda)$

$$\ln(L(\lambda)) = -r \ln \lambda - (1/\lambda) \prod_{i=1}^n t_i \quad (3.45)$$

e

$$\frac{\partial \ln L(\lambda)}{\partial \lambda} = \frac{r}{\lambda} + (1/\lambda^2) \prod_{i=1}^n t_i \quad (3.46)$$

Igualando a zero, obtém-se a expressão do estimador de máxima verossimilhança para λ :

$$\hat{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{r} \quad (3.47)$$

O termo $\sum_{i=1}^n t_i$ é denominado *tempo total sob teste*. Se todas as observações são não censuradas, $\hat{\lambda} = \bar{t}$ é a média amostral.

b) **Modelo para a Distribuição de Weibull**

O cálculo para a obtenção dos estimadores de máxima verossimilhança para a distribuição de Weibull, segundo ELSAYED (1996) pode ser obtido a partir das equações:

$$\frac{n}{\hat{\gamma}} + \sum_{i=1}^n \ln t_i - \frac{1}{\hat{\theta}} \sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\gamma}} \ln t_i = 0 \quad , \quad (3.48)$$

$$-\frac{n}{\hat{\theta}} + \frac{1}{\hat{\theta}^2} \sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\gamma}} = 0 \quad (3.49)$$

O estimador de máxima verossimilhança de θ e γ pode ser obtido mediante a resolução das equações (3.48) e (3.49) simultaneamente. Substituindo $\hat{\theta}$ da equação (3.49) na equação (3.48), obtém-se a diferença $D(\hat{\gamma})$:

$$D(\hat{\gamma}) = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\gamma}}}{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\gamma}}} - \frac{1}{\hat{\gamma}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i = 0 \quad (3.50)$$

O valor de $\hat{\gamma}$ pode ser obtido por solução numérica através do método de Newton-Raphson ou por tentativa e erro. Tendo sido determinado o valor de $\hat{\gamma}$, obtém-se o valor de $\hat{\theta}$ por meio de:

$$\hat{\theta}^{\gamma} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i^{\hat{\gamma}}}{n} \quad (3.51)$$

O intervalo de confiança $(1 - \alpha)$ para os parâmetros γ e θ são dados por:

$$\hat{\gamma} - z_{\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\hat{\gamma})} \leq \gamma \leq \hat{\gamma} + z_{\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\hat{\gamma})} \quad (3.52)$$

$$\hat{\theta} - z_{\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\hat{\theta})} \leq \theta \leq \hat{\theta} + z_{\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\hat{\theta})} \quad (3.53)$$

Se as unidades testadas sofrem algum tipo de censura nos dados, então as equações (3.45) e (3.46) adaptadas para dados censuradas, são:

$$\frac{r}{\hat{\gamma}} + \sum_{i=1}^r \ln t_i - \frac{1}{\hat{\theta}} \left[\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\gamma}} \ln t_i + (n-r) t_r^{\hat{\gamma}} \ln t_r \right] = 0 \quad (3.54)$$

$$-\frac{r}{\hat{\theta}} + \frac{1}{\hat{\theta}^2} \left[\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\gamma}} + (n-r) t_r^{\hat{\gamma}} \right] = 0 \quad (3.55)$$

A diferença $D(\hat{\gamma})$ será dada por:

$$D(\hat{\gamma}) = \frac{\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\gamma}} \ln t_i + (n+r)t_r^{\hat{\gamma}} \ln t_r}{\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\gamma}} + (n-r)t_r^{\hat{\gamma}}} - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln t_i - \frac{1}{\hat{\gamma}} = 0 \quad (3.56)$$

Utilizando-se do mesmo procedimento adotado anteriormente, para um valor qualquer de $\hat{\gamma}$, obtém-se $\hat{\theta}$ através da seguinte expressão:

$$\hat{\theta}^r = \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\gamma}} + (n-r)t_r^{\hat{\gamma}} \right] \quad (3.57)$$

c) Modelo para a distribuição de Weibull na Estimação Bayesiana.

Dentro da análise de confiabilidade bayesiana, a estimação do processo de Weibull tem sido desenvolvida pela literatura em dois casos fundamentais de interesse. No primeiro caso, o valor do parâmetro de forma γ é conhecido e o valor do parâmetro de escala θ é desconhecido e considerado uma variável aleatória. No segundo caso os parâmetros γ e θ são desconhecidos e tratados como variáveis aleatórias. Neste estudo será apresentado o primeiro caso em função da sua aplicação ao estudo de caso proposto.

Na análise de confiabilidade Weibull é freqüente o caso em que o valor do parâmetro de forma é conhecido. Segundo MARTZ & WALLER (1982), autores como Canavos (1974), Moore e Bilikam (1978), Papadoulos e Tsokos (1975) e Tummala e Sathe (1978) trabalharam em situações na qual o parâmetro de escala era desconhecido e sendo assim considerado como uma variável aleatória.

Seja um teste de vida de n itens em que s itens tenham falhado em tempos ordenados t_1, \dots, t_s e $n-s$ itens estão operando nos tempos t_{s+1}^*, \dots, t_n^* sem falhas; assim $T_{s+1} > t_{s+1}^*, \dots, T_n > t_n^*$. A estatística

$$W = \sum_{i=1}^s T_i^\gamma + \sum_{i=s+1}^n T_i^{*\gamma} \quad (3.58)$$

é suficiente para a estimação de θ . Isto pode ser examinado pela verossimilhança correspondente:

$$L(\lambda / z) \theta \lambda^s \gamma^s \left(\prod_{i=1}^s t_i \right)^{\gamma-1} \exp \left[-\lambda \left(\sum_{i=1}^s t_i^\gamma + \sum_{i=s+1}^n t_i^{*\gamma} \right) \right] \quad (3.59)$$

Se os itens não são retirados *a priori* antes do teste terminar, então:

$$W = nT_s^\gamma, \text{ para testes com repetição,} \quad (3.60)$$

$$W = \sum_{i=1}^s T_i^\gamma + (n-s)T_s^\gamma, \text{ para testes sem repetição} \quad (3.61)$$

que representam a situação de itens censurados do Tipo II em que n itens são testados simultaneamente, com ou sem repetição e s falhas ocorrem.

Seja $g(\lambda)$ a representação da distribuição *a priori* de Λ , e a distribuição *a posteriori* de Λ dada por $W = w$ então:

$$g(\lambda / w) = \frac{\lambda^s e^{-\lambda w} g(\lambda)}{\int_0^\infty \lambda^s e^{-\lambda w} g(\lambda) d\lambda} \quad (3.62)$$

Quando se considera o caso de uma distribuição $U(\alpha_0, \beta_0)$ *a priori* de Λ dada por :

$$g(\lambda; \alpha_0, \beta_0) = \frac{1}{\beta_0 - \alpha_0}, \quad \alpha_0 < \lambda < \beta_0 \quad (3.63)$$

$$= 0, \quad \text{para qualquer outro valor}$$

A distribuição *a posteriori* de Λ dado t , será:

$$g(\lambda \setminus t; s, \alpha_0, \beta_0) = \frac{\lambda^s \varepsilon^{-\lambda t}}{\int_{\alpha_0}^{\beta_0} \lambda^s \varepsilon^{-\lambda t} d\lambda} \quad (3.64)$$

Fazendo $y = \lambda t$, o denominador de (3.64) torna-se:

$$\int_{\alpha_0}^{\beta_0} \lambda^s \varepsilon^{-\lambda t} d\lambda = \int_{\alpha_0 t}^{\beta_0 t} \frac{y^s \varepsilon^{-y} dy}{t^{s+1}} = [\Gamma(s+1, \beta_0 t) - \Gamma(s+1, \alpha_0 t)], \quad (3.65)$$

onde $\Gamma(a, z)$ representa a função gama incompleta. Substituindo (3.65) em (3.64) a distribuição *a posteriori* de Λ dado t pode ser expressa por:

$$g(\lambda \setminus t; s, \alpha_0, \beta_0) = \frac{t^{s+1} \lambda \varepsilon^{-\lambda t}}{\Gamma(s+1, \beta_0 t) - \Gamma(s+1, \alpha_0 t)} \quad (3.66)$$

e a distribuição marginal será dada por

$$f(t; s, \alpha_0, \beta_0) = \frac{\Gamma(s+1, \beta_0 t) - \Gamma(s+1, \alpha_0 t)}{\Gamma(s)(\beta_0 - \alpha_0)t^2}, \quad (3.67)$$

Sendo assim, a estimação pontual do valor esperado *a posteriori* é calculada por:

$$E(\Lambda \setminus t; s, \alpha_0, \beta_0) = \frac{\Gamma(s+2, \beta_0 t) - \Gamma(s+2, \alpha_0 t)}{t[\Gamma(s+1, \beta_0 t) - \Gamma(s+1, \alpha_0 t)]} \quad (3.68)$$

e o segundo momento é dado por:

$$E(\Lambda^2 \setminus t; s, \alpha_0, \beta_0) = \frac{\Gamma(s+3, \beta_0 t) - \Gamma(s+3, \alpha_0 t)}{t^2[\Gamma(s+1, \beta_0 t) - \Gamma(s+1, \alpha_0 t)]} \quad (3.69)$$

A variância *a posteriori* pode ser calculada usando a relação:

$$Var(\Lambda \setminus t; s, \alpha_0, \beta_0) = E(\Lambda^2 \setminus t; s, \alpha_0, \beta_0) - E^2(\Lambda \setminus t; s, \alpha_0, \beta_0) \quad (3.70)$$

A estimação do MTTF de uma distribuição $W(\gamma, \theta)$ é dada por:

$$MTTF = E(T; \gamma, \theta) = \gamma^{-1/\theta} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\theta}\right) \quad (3.71)$$

Para obter a confiabilidade $R(t)$ na distribuição *a posteriori*, a média de R dado t , será:

$$E(R \setminus t; s, t_1, \alpha_0, \beta_0) = \left(\frac{t}{t+t_1}\right)^{s+1} \cdot \frac{\Gamma[s+1, \beta_0(t+t_1)] - \Gamma[s+1, \alpha_0(t+t_1)]}{\Gamma(s+1, \beta_0 t) - \Gamma(s+1, \alpha_0 t)} \quad (3.72)$$

3.6 Testes de Adequação

Um teste de adequação do modelo refere-se à verificação da hipótese a respeito da forma da distribuição na população. Nesse tipo de teste, admite-se, por hipótese, que a distribuição da variável na população seja descrita por determinado modelo de distribuição de probabilidade, ou seja, o teste verifica se a distribuição apresenta boa aderência ou não dos dados da amostra ao modelo. Obtendo-se uma boa aderência e a amostra sendo razoavelmente grande admite-se que o modelo forneça uma boa idealização da distribuição populacional. Por outro lado, a rejeição de H_0 indica que o modelo testado é inadequado para representar a distribuição da população. Nesta seção estão apresentados dois tipos de testes de adequação: o do Qui-Quadrado e o método de Kolmogorov-Smirnov .

3.6.1 Teste de aderência pelo Qui-Quadrado

Esta forma de testar a aderência foi desenvolvida por Karl Pearson e baseia-se na estatística:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} = \sum_{i=1}^k \frac{O_i^2}{E_i} - n. \quad (3.73)$$

Para uma amostra de tamanho n retirada de uma população com função acumulada de falha $F(t)$, a hipótese nula num teste de Qui-Quadrado será dada por:

$H_0 : F(t) = F_0(t)$, para todo t , onde $F_0(t)$ é a distribuição acumulada hipotética obtida a partir dos dados amostrais. A hipótese alternativa será dada por:

$H_1 : F(t) > F_0(t)$, para algum t . Neste caso o teste de Qui-Quadrado é um teste unilateral e H_0 será rejeitada quando o modelo testado estiver longe da realidade, onde as freqüências observadas irão diferir significativamente das esperadas, resultando num crescimento da variável de teste.

3.6.2 Método de Kolmogorov-Smirnov

O teste de Kolmogorov-Smirnov é um método em que a variável de teste é a maior diferença observada entre a função de distribuição acumulada do modelo e a da amostra. A função de distribuição acumulada do modelo testado indica as probabilidades acumuladas em cada ponto, ou seja $F(t) = P(T \leq t)$. A função de distribuição acumulada da amostra corresponderá ao gráfico das freqüências relativas acumuladas. Dada esta função por $G(t)$, o teste consta da verificação do valor:

$$D = \max|F(t) - G(t)| \quad (3.74)$$

e da comparação com um valor crítico tabelado em função de α e n . Se D for maior que o valor crítico rejeita-se H_0 .

O método é exato para distribuições contínuas de parâmetros conhecidos, devendo a função $G(t)$ ser construída com base nos valores individuais da amostra.

3.6.3 Papel de Probabilidade

Conforme FREITAS & COLOSIMO (1997), o papel de probabilidade é um método utilizado com freqüência para verificar a adequação de modelos, além de fornecer estimativas dos parâmetros das distribuições. O método consiste em transformar a função acumulada da distribuição em um gráfico linear. No caso da

distribuição de Weibull, o parâmetro de forma γ pode ser obtido pela inclinação da reta que representa a função $F(t)$ e o parâmetro de escala θ será estimado considerando que $F(x = \theta) = 0,632$. O valor de θ é determinado projetando-se 63,2% do valor da ordenada no eixo da abcissa.

3.7 Confiabilidade de Sistemas

Um sistema ou produto é composto de subsistemas ou componentes estruturados para desempenhar as funções exigidas no projeto. Suponha-se que dois componentes estejam montados em série:



Figura 12 – Exemplo de sistema em série

Assim, para que o sistema funcione, ambos os componentes deverão funcionar. Admitindo, que os componentes funcionem independentemente, a confiabilidade do sistema, $R(t)$, em relação à confiabilidade dos componentes, $R_1(t)$ e $R_2(t)$ é obtida por:

$$R(t) = P(T > t) = P(T_1 > t \text{ e } T_2 > t) = P(T_1 > t)P(T_2 > t) = R_1(t)R_2(t) \quad (3.75)$$

Assim, $R(t) \leq \min[R_1(t), R_2(t)]$. Ou seja, para um sistema formado de dois componentes independentes, em série, a confiabilidade do sistema será menor que a confiabilidade de suas partes.

A explicação acima pode ser generalizada para n componentes, de tal forma que, se n componentes que funcionem independentemente forem montados em série, e se o i -ésimo componente tiver confiabilidade $R_i(t)$, então a confiabilidade do sistema completo, $R(t)$, será dada por

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdots R_n(t) \quad (3.76)$$

4 METODOLOGIA PROPOSTA PARA MODELAGEM DE DADOS

Este estudo tem por finalidade delinear um modelo de distribuição de probabilidade das falhas ao longo do tempo de garantia de doze meses do produto *Freezer H210*, proporcionando assim, estimar a confiabilidade do produto para um período de dois anos, conforme necessidade da empresa pesquisada. O estudo apresenta duas propostas para a modelagem, sendo a primeira através dos modelos estatísticos clássicos agregados de simulações com informações *a priori* indicadas pelo fabricante, e a segunda, por meio da análise de confiabilidade bayesiana, considerando uma distribuição *a priori* delineada em função das informações disponibilizadas pela empresa. Em ambos os casos, os dados e informações foram obtidos junto à Garantia da Qualidade, departamento responsável pelo controle dos dados de campo dos produtos em garantia.

A metodologia proposta para a modelagem de dados de falha utilizada neste estudo, tem alguma similaridade aos estudos realizados por SUZUKI (1985) a respeito da estimação de parâmetros de tempos de vida para dados de campo incompletos e com NACHLAS & KUMER (1993) ao estimarem o parâmetro de escala da distribuição de Weibull considerando o parâmetro de forma como conhecido *a priori*. O estudo proposto prevê a utilização de informações pareadas acerca dos dados de produção e tempos-até-falha dos produtos manufaturados. Estas informações podem apresentar pequenas distorções, seja por produtos que apresentaram falhas e a garantia não foi acionada, ou casos em que não se conhecia exatamente o tempo de uso do produto em função do período em que o mesmo permanece em estoque na empresa ou nas lojas que o comercializam. Este período entre a data de fabricação e o início de operação é chamado de tempo de prateleira e que, conforme FOGLIATTO & FALCETTA (2001) não parece ser tão relevante em produtos de alto valor agregado.

Este capítulo apresenta em sua seção 4.1, a descrição da metodologia aplicada neste estudo. Na subseção 4.1.1 são apresentados os procedimentos adotados para a identificação dos modelos de distribuição dos subsistemas, e a descrição dos passos subseqüentes na análise da confiabilidade do sistema.

4.1 Metodologia Aplicada na Análise da Confiabilidade do Sistema

Para realizar a análise de confiabilidade do sistema, foram avaliados os componentes e sua estrutura de funcionalidade, assim como os subsistemas. Em conjunto com os técnicos responsáveis pela engenharia do produto, foi estabelecida a ordem de conexão entre os componentes e do sistema como um todo. A decisão tomada proporcionou definir três grupos relevantes de análises para avaliar a confiabilidade do sistema. Entre os grupos estabelecidos e denominados de subsistemas, um deles foi formado por apenas um componente chamado compressor, e os outros dois agruparam componentes que formaram o sistema elétrico e o sistema de refrigeração (aqui tratados como subsistemas). Os cálculos e estimativas foram realizados para os três subsistemas tanto na modelagem utilizando-se de simulações com o auxílio dos *softwares* Proconf (1999) e Prosis (1999) como na modelagem realizada por meio da estimação bayesiana utilizando o *software* Maple V (1997).

Estando definida a estrutura do sistema através dos componentes e subsistemas e de posse das informações a respeito da confiabilidade dos mesmos, define-se a curva de confiabilidade do sistema e estima-se a confiabilidade para o período desejado.

4.1.1 Verificação dos modelos dos subsistemas

Utilizando-se as informações pertinentes aos produtos por data de fabricação e dos tempos-até-falha, são realizadas as modelagens para a distribuição da função de risco de cada componente e cada subsistema. A partir daí, realiza-se a análise visual da distribuição por meio dos histogramas e dos gráficos das funções de risco e de confiabilidade para cada componente e subsistema, além da verificação através do papel de probabilidade. Uma vez observada a similaridade com alguma distribuição teórica existente, são realizados os testes de aderência através do Qui-Quadrado e do Kolmogorov-Smirnov com o objetivo de verificar a adequação do modelo ajustado aos dados experimentais. Definida a distribuição teórica, são estimados os parâmetros através do Método da Máxima Verossimilhança, possibilitando determinar a função densidade de probabilidade, função de risco e

função de confiabilidade para cada um dos componentes e subsistemas. Estes resultados posteriormente são utilizados na análise da confiabilidade do sistema.

A técnica de simulação utilizada a partir da identificação e cálculo dos parâmetros do modelo para cada componente e subsistema foi estabelecida em função da censura observada após o primeiro ano de uso dos produtos e considerou a informação, *a priori*, quanto aos parâmetros da distribuição fornecidos pela empresa, através de discussões com grupos da Engenharia da Qualidade e Garantia da Qualidade. As informações *a priori* foram obtidas junto à planta localizada na Suécia, tomando como referência um produto similar ao modelo utilizado como objeto do estudo. Em países como a Suécia e a Suíça, a Electrolux mantém o acompanhamento de uma certa quantidade de produtos no campo com o objetivo de determinar procedimentos para melhorar a qualidade dos produtos, assim como realizar estimativas das ocorrências de falhas. Estas informações foram relevantes para determinação do parâmetros da distribuição e as estimativas de confiabilidade nas modelagens descritas anteriormente.

5 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi delineado com o objetivo de gerar uma contribuição à empresa pesquisada, procurando através da determinação dos índices de confiabilidade, determinar os custos adicionais com a implementação da extensão de garantia ao produto em estudo.

Este capítulo apresenta-se dividido da seguinte forma:

Nas seções 5.1 e 5.2 são apresentados respectivamente, o modelo de produto objeto do estudo através das suas especificações e características e as informações pertinentes às falhas do produto durante o período de garantia, assim como, dados de produção no período especificado para o estudo. Na seção 5.3 é definido o diagrama de blocos e o tipo de sistema analisado. A seção 5.4 apresenta a especificação dos modelos de distribuição dos subsistemas e as seções 5.5 e 5.6 apresentam respectivamente o procedimento de modelagem considerando os dados censurados por meio de simulação e através dos métodos bayesianos em confiabilidade. Nestas seções são apresentados também os resultados obtidos através dos procedimentos adotados.

5.1 Características do Modelo de Unidade Refrigeradora Freezer em Estudo

O produto escolhido para o presente estudo de caso é uma unidade refrigeradora freezer de uso doméstico, modelo H210, com as seguintes especificações técnicas:

- Altura : 940 cm.
- Largura : 823 cm.
- Profundidade: 730 cm.
- Consumo: (127V) 50,8 kWh/mês e (220V) 45KWh/mês.
- Capacidade de armazenagem: 201 litros.

Entre seus *features* podem ser destacados o painel de controle frontal, o dreno de degelo frontal e a fechadura com chave auto expulsiva permitindo o travamento do freezer.

Este modelo de freezer foi escolhido por ser um produto relativamente novo, pois sua fabricação se iniciou em 1997 e por estar entre um dos melhores produtos fabricados pela empresa .

5.2 Dados e Informações de Produção e Falhas no Campo

Este estudo abrange as 21.296 unidades produzidas do modelo H210 entre o mês de setembro de 1999 e agosto de 2000, proporcionando obter desta forma 12 séries completas de observações de falhas no campo para cada um dos 12 meses de uso do produto em garantia. As informações para a realização deste estudo foram coletadas pela DISC – Divisão de Serviços ao Cliente e disponibilizadas pelo Departamento de Garantia da Qualidade da Electrolux do Brasil S/A através dos relatórios mensais de ocorrências com produtos em garantia.

Em relação às unidades de tempo das informações, considerou-se o período de ocorrência das falhas em dias de uso do produto. Este procedimento foi adotado tomando como base a informação da produção mensal e a data efetiva da chamada no campo.

5.3 Estrutura do Diagrama de Blocos e do Sistema Analisado

O modelo H210 é composto pelos seguintes componentes agrupados em subsistemas.

- Elétrico : cabo elétrico, capacitor, chicote/fiação interna, interruptor principal, lâmpada indicadora/Led, painel de controle, protetor térmico do compressor, rede elétrica, relé, termostato e bulbo do termostato.
- Refrigeração: filtro secador, linha de descarga (alta pressão), linha de sucção, tubo capilar e tubo de serviço.
- Produto: avental/grade de ventilação, base, botão de controle, cabeceira inferior/esquerda, caixa interna, cesto aramado, dobradiça/bucha, dreno, emblema, fechadura, gabinete, gaxeta, isolamento, moldura, painel interno da porta, pé/rodízio, porta/estrutura da porta e puxador.

O componente compressor apesar de ser considerado um componente elétrico, neste caso foi avaliado como um subsistema em função da sua importância no contexto da confiabilidade do produto. Não foi considerada neste estudo a orientação ao cliente/uso pois a mesma não se caracteriza como uma não-conformidade do produto.

Na definição da estrutura do diagrama, foram retiradas da análise as não-conformidades relacionadas ao subsistema produto, pois as mesmas não se caracterizam como determinantes para que o produto não opere. Em síntese, a estrutura definitiva foi estabelecida juntamente com o grupo de analistas da Engenharia da Qualidade e consolidada em três subsistemas; elétrico, refrigeração e compressor. Todos os componentes estão ligados em série e o sistema pára de operar se um dos subsistemas falhar.

5.4 Especificação dos Modelos de Distribuição dos Subsistemas

Para cada um dos subsistemas foi realizada a modelagem dos dados-até-falha, possibilitando verificar a função de risco e as demais distribuições enfocadas no capítulo 3.

Os gráficos dos histogramas e papel de probabilidade, estimativas dos parâmetros dos modelos de distribuições, formulação dos testes de adequação e as simulações do estudo foram realizados através do *software* Proconf (1999). A determinação do modelo de confiabilidade do sistema foi elaborada com o auxílio do *software* Prosis (1999).

Na análise da adequação dos modelos, não foi considerada a censura imposta aos dados, sendo assim, o ajuste identifica a distribuição dos dados experimentais restrita ao período de garantia dos produtos. A partir da obtenção do modelo, foram realizadas as estimativas dos parâmetros.

A tabela 1 apresenta os dados mensais de produção do modelo H210. Neste estudo optou-se por padronizar as informações considerando a data de produção como o 15^o dia do mês.

TABELA 1 – Produção mensal de unidades do modelo H210, Set/99 – Ago/00

MÊS	PRODUÇÃO
SET/99	1.646
OUT/99	880
NOV/99	2.287
DEZ/99	2.904
JAN/00	3.582
FEV/00	2.946
MAR/00	1.834
ABR/00	1.399
MAI/00	903
JUN/00	1.260
JUL/00	725
AGO/00	950
TOTAL	21.296

Fonte: Departamento de Garantia da Qualidade – Electrolux do Brasil S/A

As observações referentes aos dados de falha, foram retiradas da tabela inserida no Anexo A. Esta tabela apresenta o código do modelo, código do subconjunto, descrição do subconjunto, código do defeito, descrição do defeito, código da ordem de serviço, número de série do produto, data de emissão da nota fiscal, data da chamada, cidade, unidade da federação, razão social da assistência técnica e data da contabilização. Para o presente estudo, foram utilizadas as informações pertinentes ao código do subconjunto, número de série do produto, data de emissão e data da chamada. Foram retiradas da análise as ocorrências denominadas *orientação ao cliente/uso* e aquelas relacionadas a acessórios do produto. Além disso, algumas informações de produção ou data de chamada que estavam fora do período de análise também foram retiradas, restando um total de 272 (duzentas e setenta e duas) falhas decorrentes dos subsistemas analisados.

As tabelas 2, 3 e 4 apresentam as distribuições ordenadas dos tempos-até-falha dos subsistemas.

Tabela 2 – Distribuição dos tempos-até-falha em dias de uso para o Subsistema compressor.

Obs.	Tempo até a Falha (em dias)	Obs.	Tempo até a Falha (em dias)
1	17	23	117
2	19	24	128
3	22	25	132
4	27	26	145
5	29	27	152
6	34	28	157
7	58	29	161
8	61	30	164
9	62	31	175
10	67	32	187
11	74	33	207
12	77	34	212
13	79	35	218
14	83	36	220
15	86	37	222
16	91	38	235
17	92	39	239
18	96	40	264
19	102	41	286
20	104	42	312
21	110	43	353
22	112		

O subsistema compressor apresentou 43 falhas no período, representando um índice de 0,2% ou aproximadamente 1 falha para cada 500 produtos no campo.

Gráfico 1 – Histograma da função densidade de probabilidade - Compressor

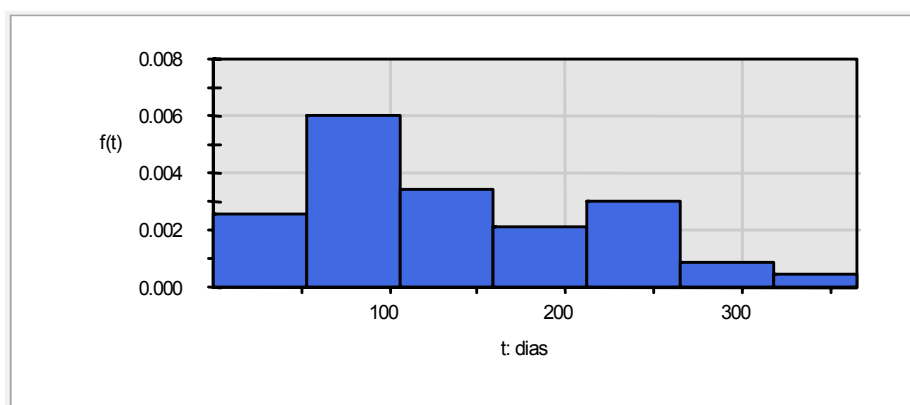


Tabela 3 – Distribuição dos tempos-até-falha em dias de uso para o subsistema elétrico

Obs.	Tempo até a Falha (em dias)	Obs.	Tempo até a Falha (em dias)	Obs.	Tempo até a Falha (em dias)
1	15	42	88	83	183
2	17	43	89	84	186
3	19	44	96	85	188
4	22	45	97	86	192
5	24	46	110	87	197
6	24	47	112	88	204
7	25	48	117	89	206
8	27	49	117	90	207
9	27	50	119	91	209
10	28	51	120	92	213
11	28	52	125	93	218
12	28	53	125	94	221
13	29	54	128	95	230
14	30	55	130	96	230
15	30	56	132	97	235
16	33	57	134	98	237
17	34	58	136	99	237
18	37	59	137	100	238
19	42	60	137	101	240
20	45	61	138	102	243
21	54	62	139	103	245
22	55	63	141	104	249
23	59	64	143	105	250
24	60	65	144	106	256
25	65	66	144	107	267
26	66	67	144	108	273
27	66	68	148	109	274
28	67	69	149	110	278
29	69	70	151	111	284
30	72	71	154	112	293
31	73	72	157	113	303
32	73	73	159	114	310
33	75	74	162	115	318
34	77	75	164	116	324
35	79	76	166	117	327
36	79	77	167	118	334
37	80	78	169	119	345
38	80	79	174	120	347
39	82	80	175	121	356
40	83	81	177	122	359
41	87	82	179		

Para o subsistema elétrico foram observadas 122 falhas de campo durante o período de garantia. Este resultado incide numa taxa de 0,57% ou 1 falha a cada 175 produtos no campo.

Tabela 4 – Distribuição dos tempos-até-falha em dias de uso para o subsistema refrigeração.

Obs.	Tempo até a Falha (em dias)	Obs.	Tempo até a Falha (em dias)	Obs.	Tempo até a Falha (em dias)
1	12	37	90	73	179
2	15	38	95	74	183
3	15	39	98	75	184
4	15	40	101	76	185
5	20	41	101	77	185
6	20	42	107	78	198
7	22	43	112	79	199
8	23	44	118	80	205
9	28	45	120	81	208
10	29	46	124	82	217
11	30	47	131	83	222
12	30	48	133	84	222
13	30	49	136	85	225
14	35	50	137	86	229
15	37	51	140	87	230
16	38	52	142	88	230
17	42	53	142	89	238
18	43	54	143	90	240
19	45	55	144	91	246
20	58	56	145	92	257
21	60	57	149	93	265
22	64	58	150	94	273
23	67	59	150	95	278
24	67	60	153	96	291
25	69	61	153	97	299
26	72	62	157	98	304
27	72	63	157	99	309
28	72	64	158	100	319
29	72	65	163	101	322
30	74	66	167	102	325
31	76	67	168	103	327
32	84	68	173	104	338
33	86	69	173	105	352
34	87	70	175	106	353
35	88	71	176	107	359
36	90	72	176		

O subsistema refrigeração apresentou no período de análise um total de 107 ocorrências, indicando uma taxa de 0,5% ou aproximadamente 1 falha a cada 200 produtos no campo.

A partir dos dados apresentados nas tabelas 2, 3 e 4 foram construídos os histogramas de frequência da função densidade de probabilidade e os gráficos de barras das funções de risco e confiabilidade, além dos testes de aderência para cada um dos subsistemas.

a) Modelo para o subsistema compressor

O subsistema compressor apresenta 21.253 dados censurados que não foram contemplados nesta análise inicial. Foram observadas 43 falhas do compressor durante o período de garantia do produto em estudo. A análise apresentou os seguintes gráficos para as funções:

Gráfico 2 – Função de Risco – Compressor

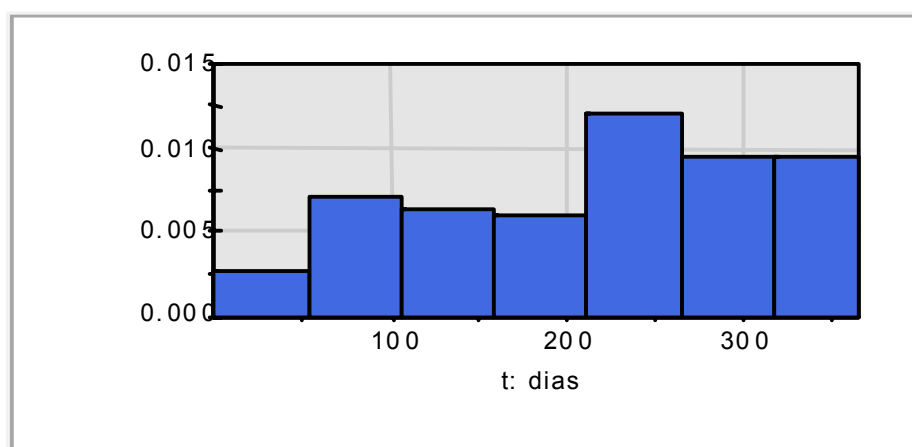


Gráfico 3 – Função de Confiabilidade – Compressor

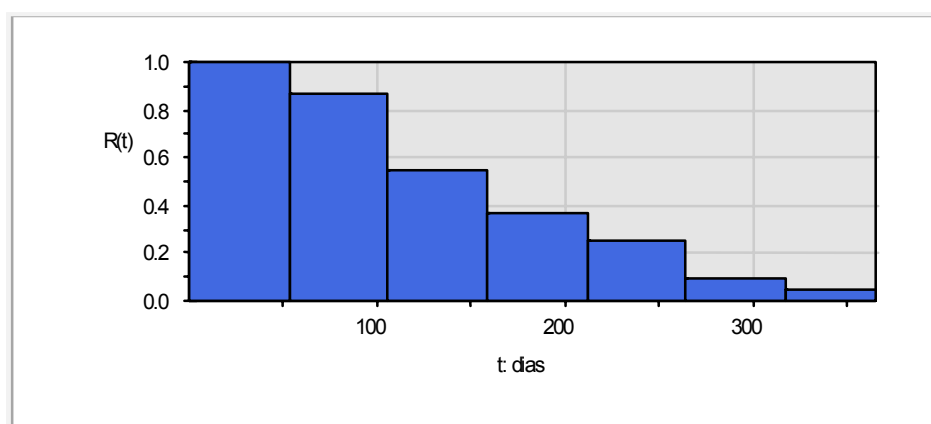


Gráfico 4 – Papel de probabilidade para o Modelo Exponencial – Compressor

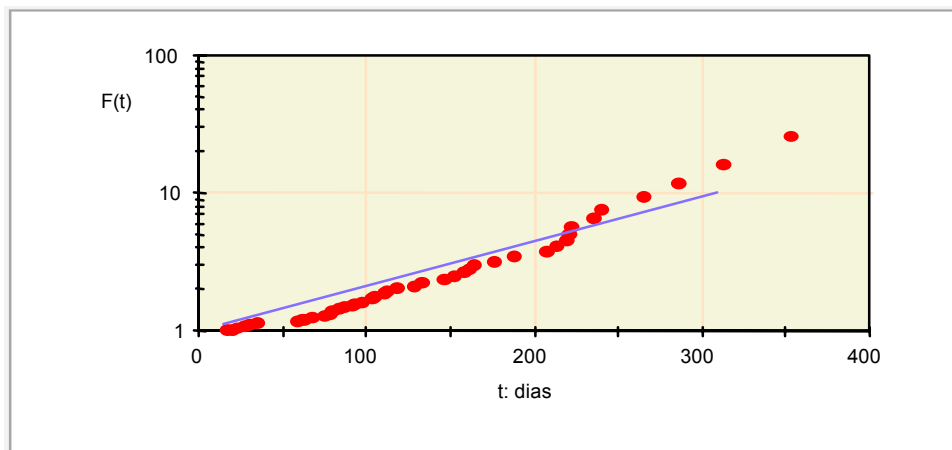


Gráfico 5 – Papel de probabilidade para o Modelo Weibull – Compressor

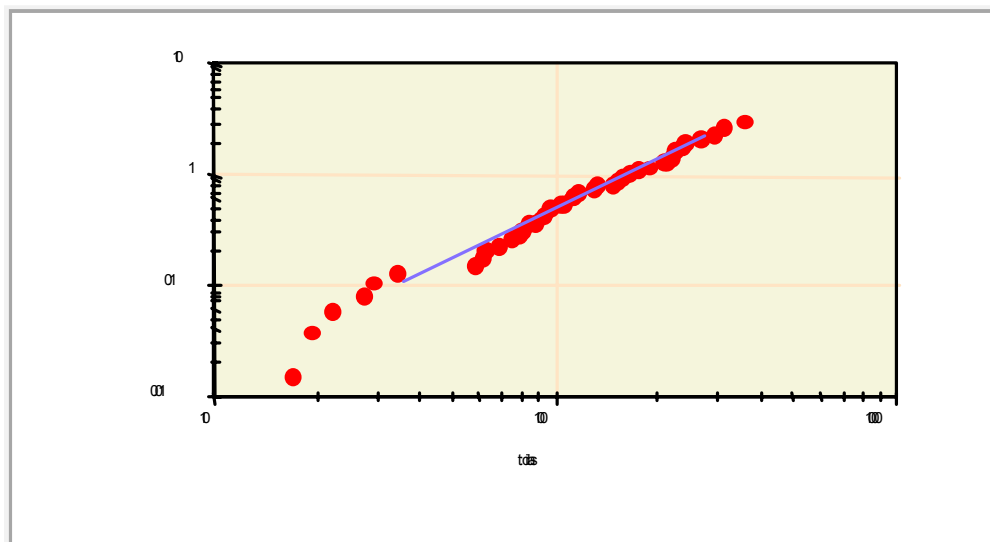
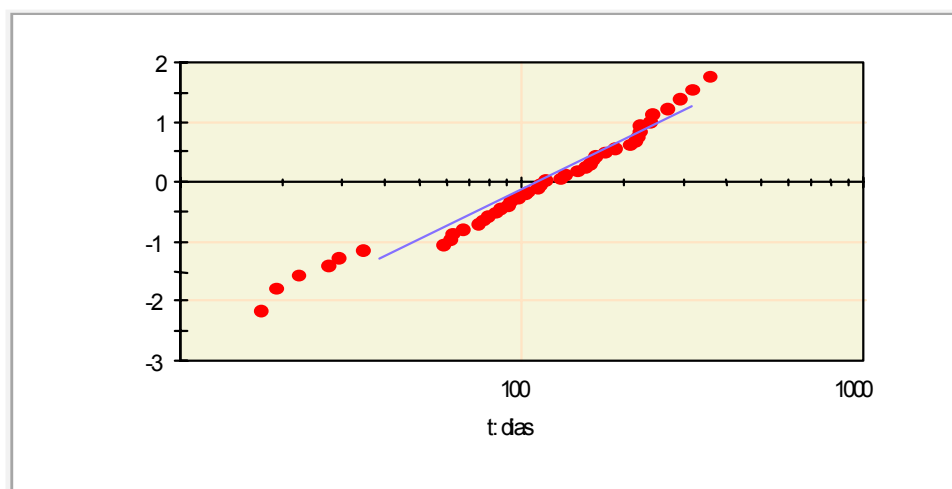
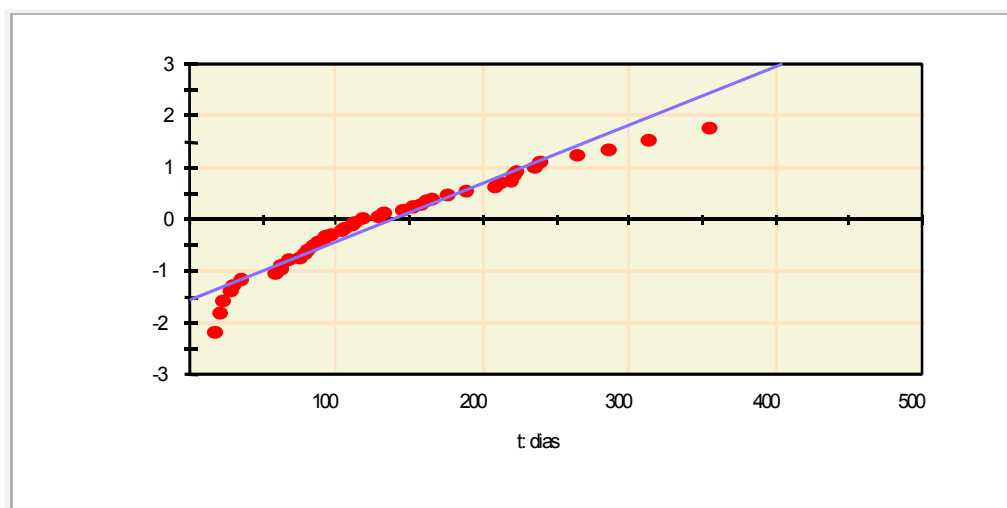


Gráfico 6 – Papel de probabilidade para o Modelo Lognormal – Compressor**Gráfico 7 – Papel de probabilidade para o Modelo Normal – Compressor**

Uma análise preliminar dos gráficos sinaliza para a utilização do modelo Weibull. Em seguida foram realizados os testes de aderência para os diversos modelos com a finalidade de observar qual dos modelos apresenta melhor adequação aos dados experimentais.

Quadro 1 – Significância dos testes de aderência dos modelos ajustados - Compressor

MODELO	TESTE DO QUI-QUADRADO	TESTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV
EXPONENCIAL	P = 0,0190	P = 0,0002
WEIBULL	P = 0,4271	P = 0,3670
LOGNORMAL	P = 0,2619	P = 0,2517
NORMAL	P = 0,0001	P = 0,0001

Observa-se através dos resultados apresentados no Quadro 1 que o ajuste dos dados aos modelos de Weibull e Lognormal não foram significativos na rejeição da hipótese. Como o *p-value* foi maior para o modelo de Weibull, optou-se por realizar o cálculo das estimativas dos parâmetros para a distribuição de Weibull, obtendo-se os seguintes resultados:

Quadro 2 – Estimativas dos parâmetros para o modelo Weibull - Compressor

AJUSTE DOS DADOS - MODELO WEIBULL
Parâmetro de Localização = 0
Estimativas da Verossimilhança Máxima:
Gamma = 1,5635
Theta = 157,4021
Var(Gamma) = 0,0358
Var(Theta) = 257,7
Cov(Theta, Gamma) = 0,8538
Estimativa não tendenciosa:
Gamma = 1,515
Theta = 156,207
95% do Intervalo de Confiança:
para Gamma = 1,1296 até 1,8478
para Theta = 125,9132 até 192,6047
t10 = 35,3674
t50 = 122,6407
MTTF = 140,8487

Os resultados das estimativas tornam-se subestimados em função do pequeno período de análise e da ausência de censura aos dados. Como prova disso o valor observado para o MTTF é de apenas 141 dias.

b) Modelo para o subsistema elétrico

Este subsistema apresentou um total de 122 falhas no campo dentro do período especificado. A análise apresentou um total de 21.174 dados censurados. Os seguintes gráficos foram observados:

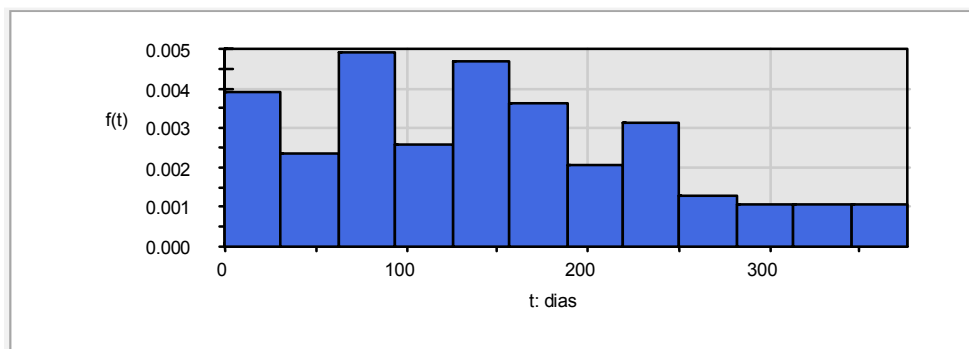
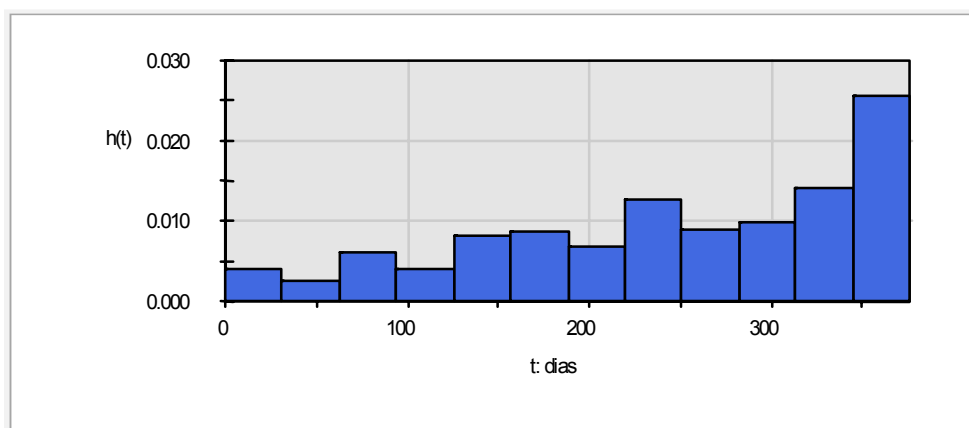
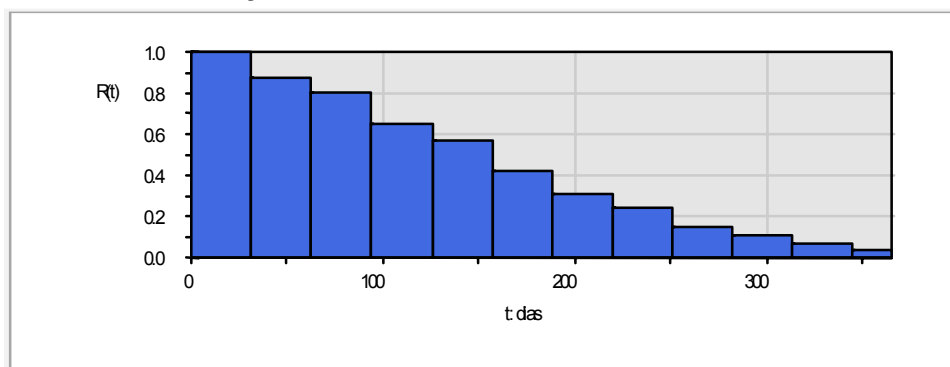
Gráfico 8 – Histograma da função densidade de probabilidade – Elétrico**Gráfico 9 – Função de Risco - Elétrico****Gráfico 10 – Função de Confiabilidade - Elétrico**

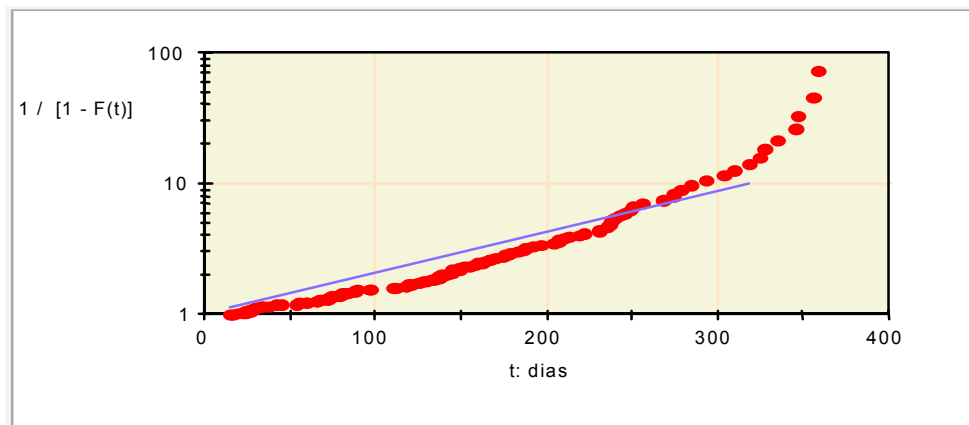
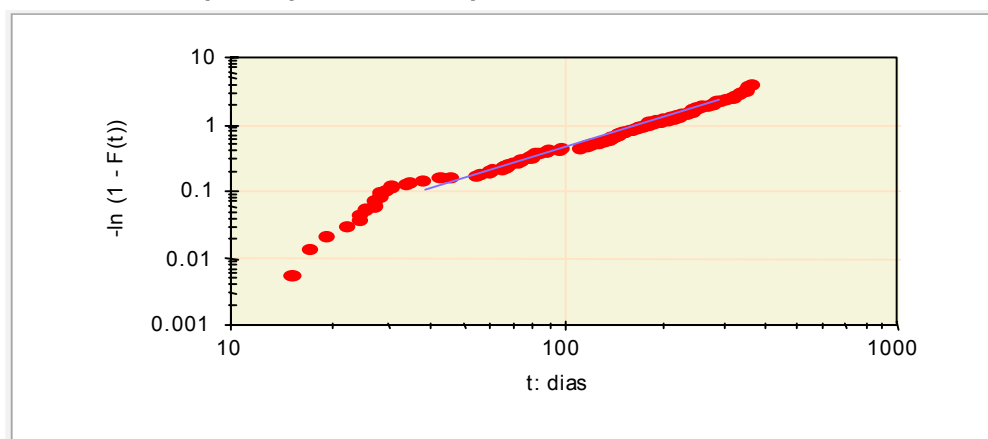
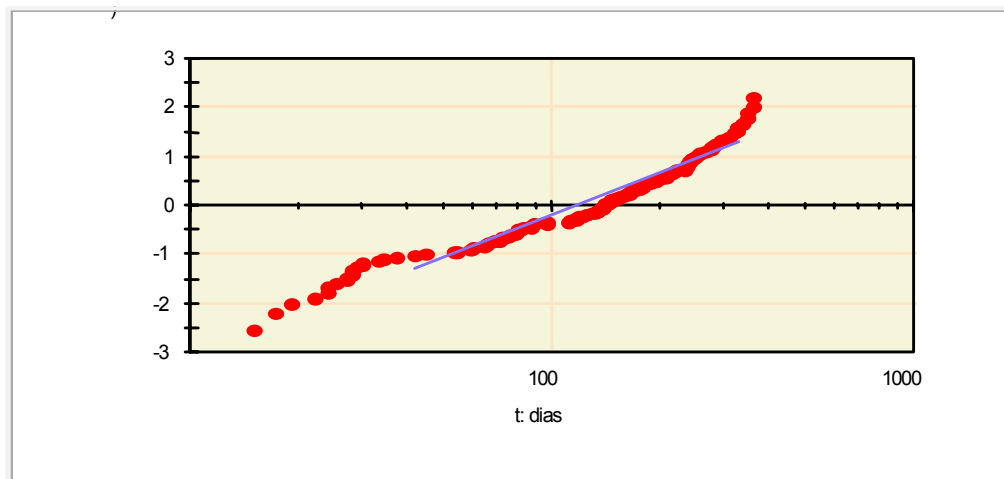
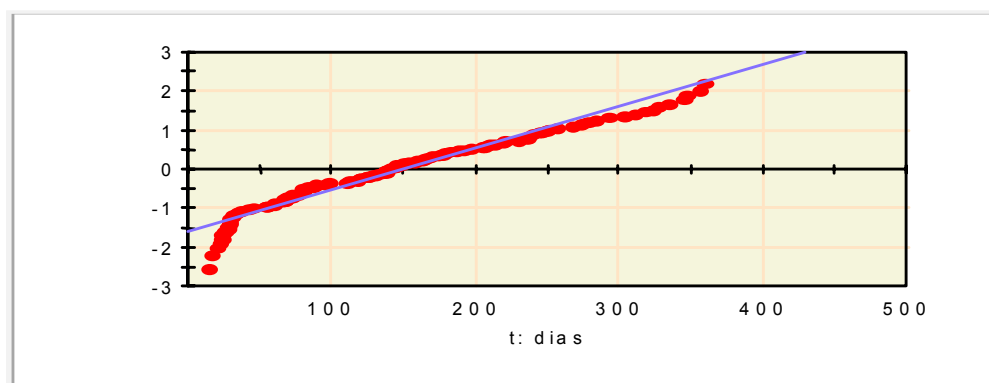
Gráfico 11 – Papel de probabilidade para o Modelo Exponencial – Elétrico**Gráfico 12– Papel de probabilidade para o Modelo Weibulll – Elétrico****Gráfico 13– Papel de probabilidade para o Modelo Lognormal – Elétrico**

Gráfico 14– Papel de probabilidade para o Modelo Normal – Elétrico



Realizando-se os testes de aderência o seguinte quadro foi observado:

Quadro 3 – Significância dos testes de aderência dos modelos ajustados - Elétrico

MODELO	TESTE DO QUI-QUADRADO	TESTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV
EXPONENCIAL	P = 0,0003	P = 0,0001
WEIBULL	P = 0,1085	P = 0,2079
GAMMA	P = 0,0397	P = 0,0363
LOGNORMAL	P = 0,0001	P = 0,0047
NORMAL	P = 0,0001	P = 0,0001

A análise mostra apenas o modelo de Weibull como passível de não rejeição para os dados experimentais do subsistema elétrico.

Calculando-se as estimativas dos parâmetros para a distribuição de Weibull, obtêm-se os seguintes valores:

Quadro 4 – Estimativas dos parâmetros para o modelo Weibull - Elétrico

AJUSTE DOS DADOS - MODELO WEIBULL
Parâmetro de Localização = 0
Estimativas da Verossimilhança Máxima:
Gamma = 1,6025
Theta = 167,6286
Var(Gamma) = 0,013
Var(Theta) = 98,9677
Cov(Theta, Gamma) = 0,3413

CONTINUAÇÃO
Estimativa não tendenciosa:
Gamma = 1,5849
Theta = 167,1781
95% do Intervalo de Confiança:
para Gamma = 1,3549 até 1,7963
para Theta = 148,174 até 188,1495
t10 = 40,4133
t50 = 132,6618
MTTF = 150,0217

De forma análoga à análise do subsistema compressor, observa-se o viés das estimativas no comportamento dos dados do subsistema elétrico.

c) Modelo para o subsistema refrigeração

O subsistema de refrigeração apresentou no período de análise 107 falhas no campo. Foram censurados 21.189 dados de produtos. Os gráficos das distribuições e funções estão apresentados a seguir.

Gráfico 15 – Histograma da função densidade de probabilidade - Refrigeração

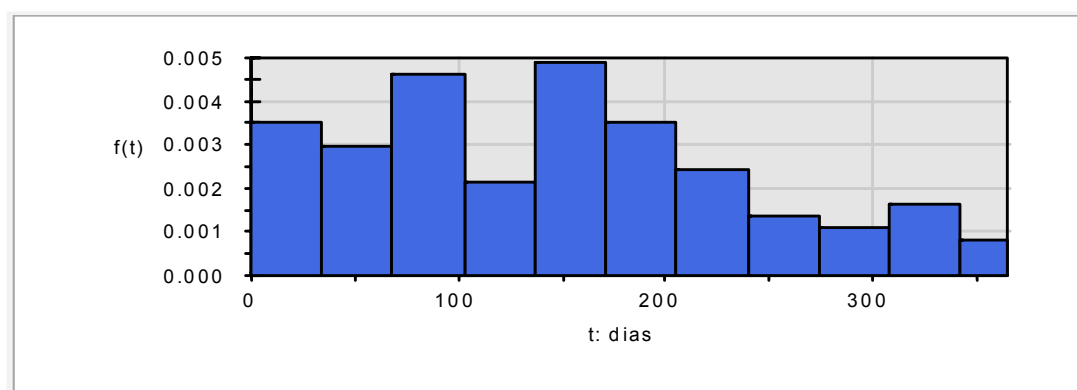


Gráfico 16 – Função de Risco - Refrigeração

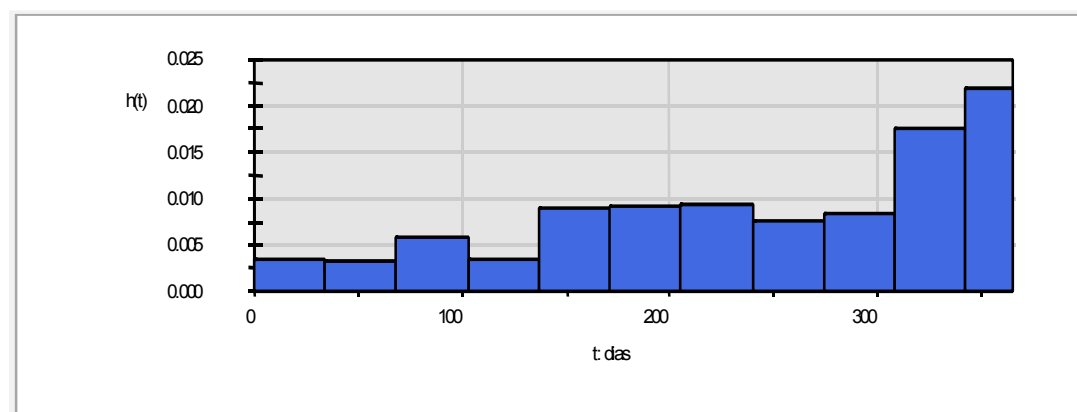


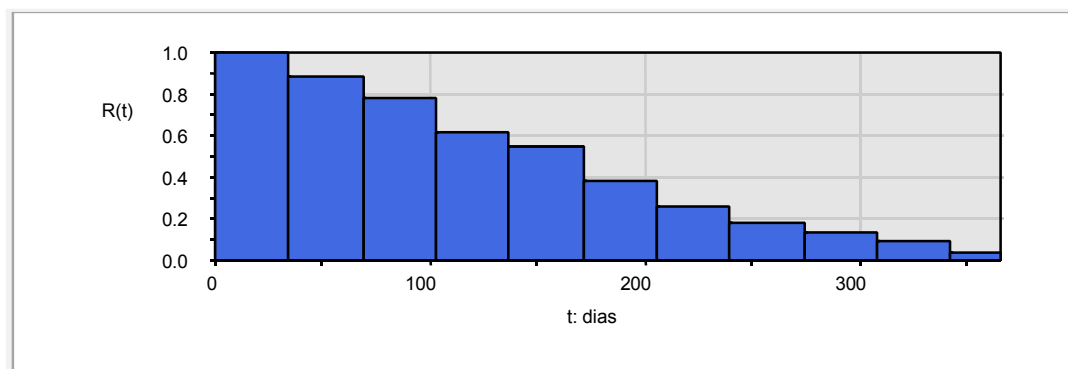
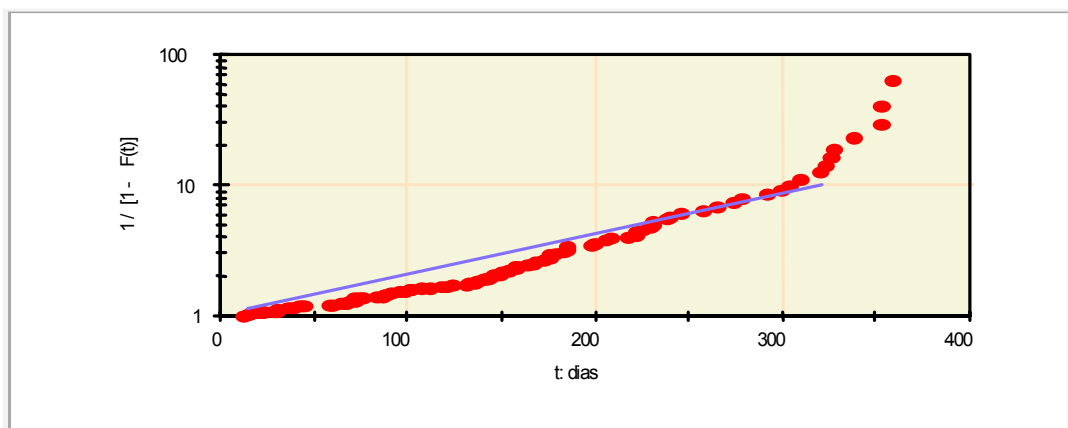
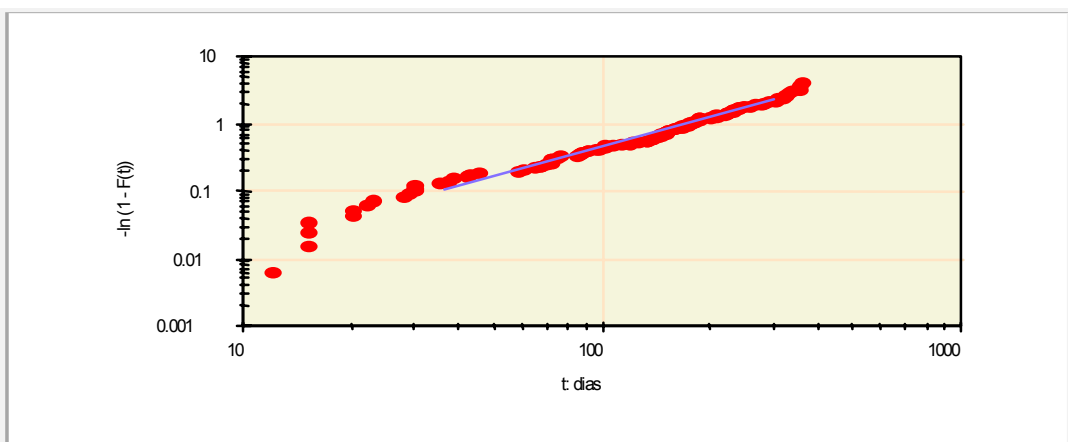
Gráfico 17 – Função de Confiabilidade – Refrigeração**Gráfico 18 – Papel de probabilidade para o Modelo Exponencial – Refrigeração****Gráfico 19 – Papel de probabilidade para o Modelo Weibull – Refrigeração**

Gráfico 20 – Papel de probabilidade para o Modelo Lognormal – Refrigeração

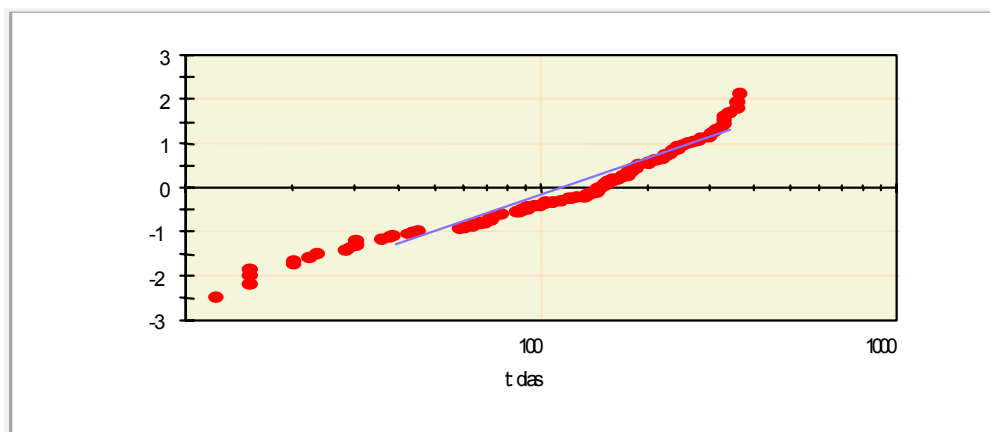
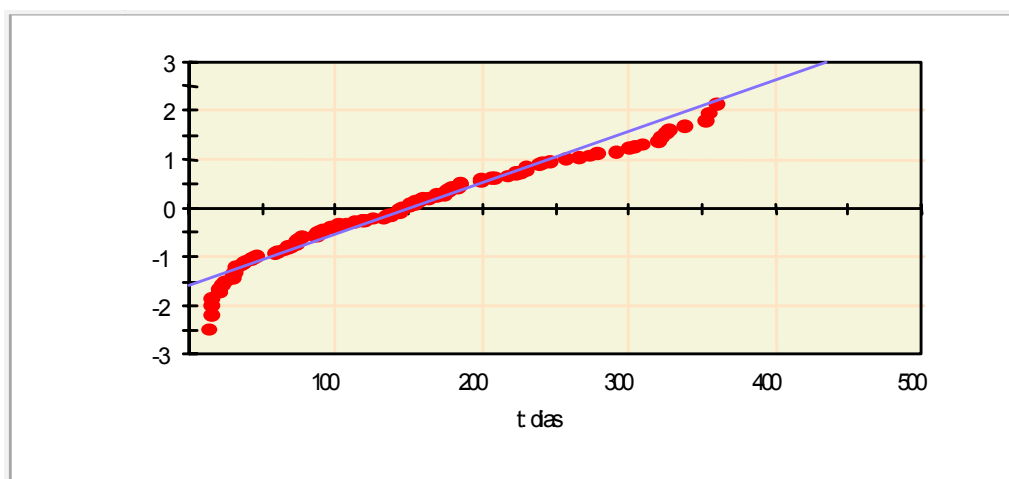


Gráfico 21 – Papel de probabilidade para o Modelo Normal – Refrigeração



Através dos testes de aderência, os seguintes níveis de significância foram observados para os modelos.

Quadro 5 – Significância dos testes de aderência dos modelos ajustados - Refrigeração

MODELO	TESTE DO QUI-QUADRADO	TESTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV
EXPONENCIAL	P = 0,0002	P = 0,0001
WEIBULL	P = 0,1450	P = 0,1583
GAMMA	P = 0,0514	P = 0,0107
LOGNORMAL	P = 0,0001	P = 0,0120
NORMAL	P = 0,0001	P = 0,0001

Tal como havia ocorrido para os demais subsistemas, no subsistema refrigeração também os dados foram mais aderentes ao modelo de Weibull, não sendo rejeitada a hipótese que a população siga esta distribuição. A obtenção das estimativas de máxima verossimilhança para os parâmetros da distribuição Weibull estão apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6 – Estimativas dos parâmetros para o modelo Weibull - Refrigeração

AJUSTE DOS DADOS - MODELO WEIBULL
Parâmetro de Localização = 0
Estimativas da Verossimilhança Máxima:
Gamma = 1,5635
Theta = 167,3761
Var(Gamma) = 0,0141
Var(Theta) = 118,1015
Cov(Theta, Gamma) = 0,3867
Estimativa não tendenciosa:
Gamma = 1,5439
Theta = 166,8604
95% do Intervalo de Confiança:
para Gamma = 1,3068 até 1,7663
para Theta = 146,1593 até 189,9284
t10 = 38,8448
t50 = 131,5995
MTTF = 150,1365

5.5 Modelagem Utilizando o Procedimento de Simulação para os Dados Censurados

As análises realizadas em 5.4 não contemplaram os dados censurados do estudo. Este procedimento estabelece valores subestimados para o MTTF das funções. Através da Engenharia da Qualidade da empresa pesquisada, obteve-se a informação que este tipo de produto é projetado para operar entre 10 e 12 anos e estatísticas realizadas na planta localizada na Suécia indicam um MTTF em torno de 8 anos, o que acarretaria num número próximo a 3000 dias de operação até a falha. Sendo esta informação conhecida e identificada como *a priori*, e simulando através do *software* Proconf (1999) várias distribuições das falhas contemplando a

censura para cada um dos subsistemas até que o número de falhas seja muito próximo ao número efetivo observado para um período de um ano em garantia e fixando o parâmetro de escala θ em 3000 dias, obtém-se uma distribuição ajustada com um novo parâmetro de forma, γ . A partir daí é calculada a confiabilidade do subsistema para o período desejado (730 dias).

a) Simulação para o subsistema compressor

Gráfico 22 – Função de Confiabilidade – dados simulados Compressor

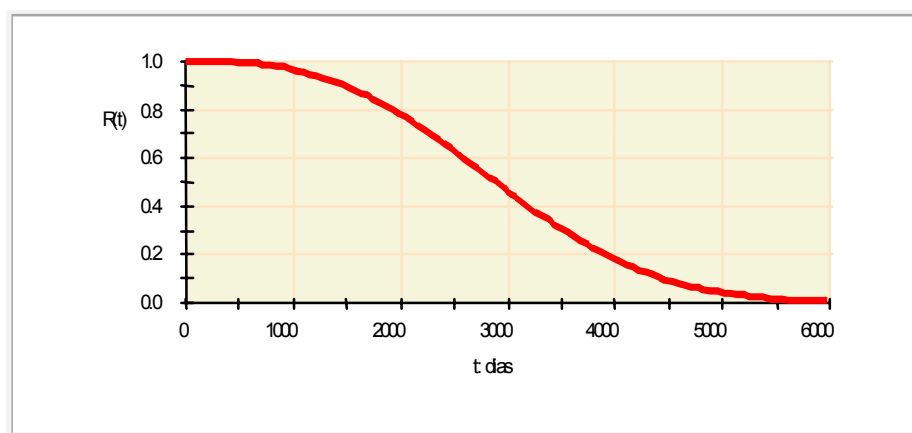


Gráfico 23 – Função de Risco (r(t)) versus tempo (t em dias) para o compressor. A curva mostra o risco aumentando de 0.0000 para 0.0025 ao longo de 6000 dias.

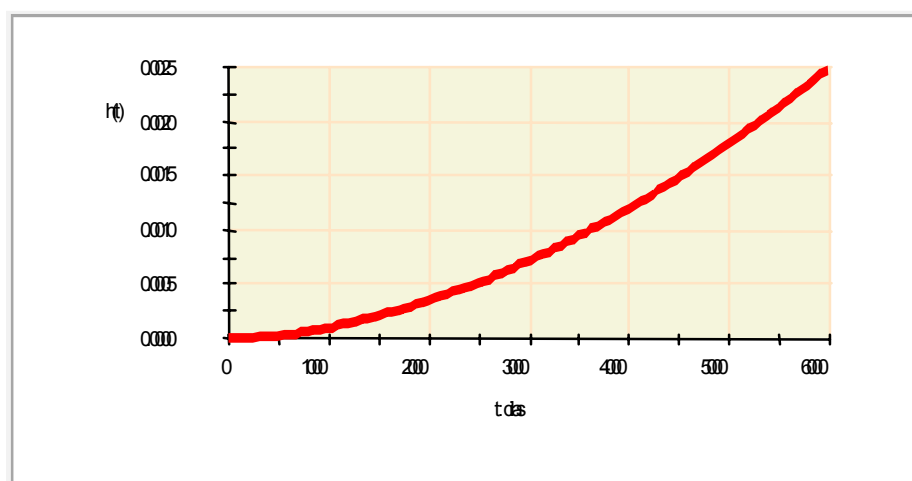


Gráfico 24 – Função Densidade Acumulada de Falha – dados simulados Compressor

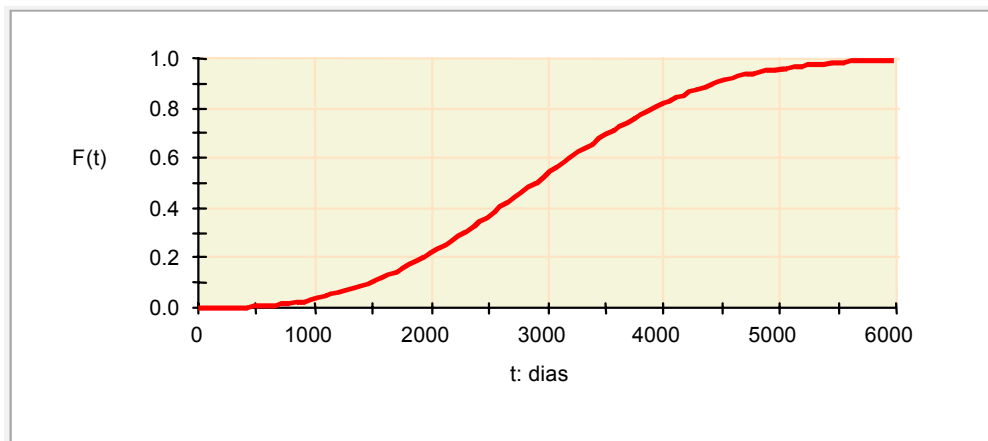
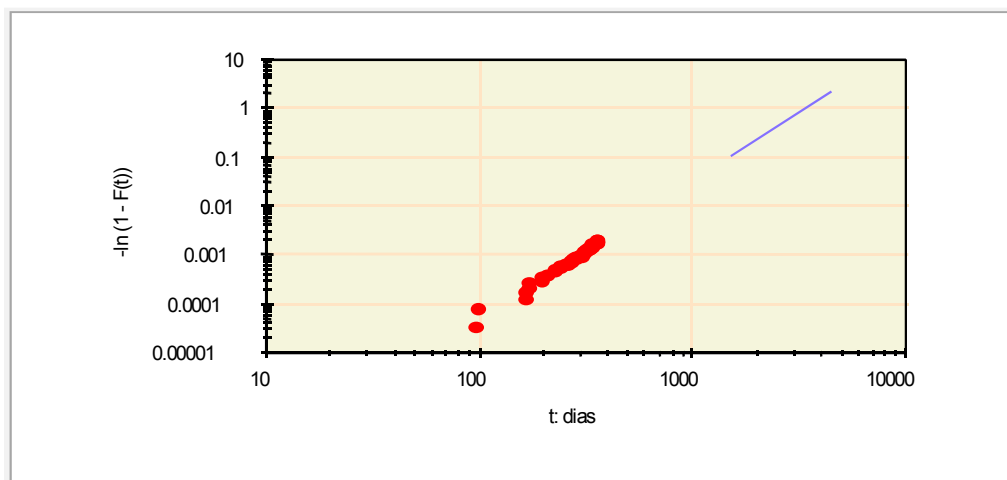


Gráfico 25 – Papel de probabilidade para o Modelo Weibull – dados simulados Compressor



A partir da obtenção dos gráficos apresentados anteriormente, verifica-se a aderência dos dados ao modelo ajustado (Weibull), obtendo-se os seguintes resultados:

- Qui-Quadrado ($p = 0,575$) e Kolmogorov-Smirnov ($p = 0,9685$)

Quadro 7 – Estimativas para o ajuste simulado da distribuição Weibull - Compressor

AJUSTE DOS DADOS SIMULADOS - MODELO WEIBULL
Parâmetro de Localização = 0
Estimativas da Verossimilhança Máxima:
Gamma = 2,7945
Theta = 3289,762
Var(Gamma) = 7,7188E-05
Var(Theta) = 85,071
Cov(Theta, Gamma) = -0,074
Estimativa não tendenciosa:
Gamma = 2,7943
Theta = 3290,218
95% do Intervalo de Confiança:
para Gamma = 2,7166 até 2,7506
para Theta = 3253,267 até 3370,844
t10 = 1470,524
t50 = 2885,767
MTTF = 2929,554

Os resultados apresentam-se mais consistentes em relação às informações técnicas repassadas pelas áreas de Engenharia e Garantia da Qualidade. Estudos anteriores realizados na Europa indicavam um parâmetro de forma em torno de 2,6 e ao mesmo tempo, o valor obtido para o MTTF aproxima-se de 8 anos que é a expectativa da fábrica em relação a este subsistema. A partir daí foram determinados os cálculos das funções de confiabilidade, conforme demonstra a tabela 5. A obtenção da estimativa da confiabilidade do subsistema compressor para um período de 1 ano é de 0,9979 e para o período desejado do estudo que corresponde a 730 dias (2 anos) é de 0,9852.

Tabela 5 – Funções de confiabilidade para os dados simulados - Compressor

FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE				
Tempo	Confiabilidade	Densidade Acumulada de Falha	Densidade de Probabilidade	Taxa de Falha
0	1	0	0	0
60,3581	1	1,41E-05	8,07E-07	8,07E-07
120,7162	0,9999	9,75E-05	2,39E-06	2,39E-06
181,0743	0,9997	3,03E-04	4,79E-06	4,79E-06
241,4324	0,9993	6,76E-04	7,94E-06	7,94E-06
301,7905	0,9987	0,0013	1,18E-05	1,18E-05
362,1486	0,9979	0,0021	1,63E-05	1,63E-05
422,5068	0,9968	0,0032	2,14E-05	2,15E-05
482,8649	0,9953	0,0047	2,71E-05	2,72E-05
543,223	0,9935	0,0065	3,34E-05	3,36E-05
603,5811	0,9913	0,0087	4,02E-05	4,06E-05
663,9392	0,9886	0,0114	4,76E-05	4,81E-05
724,2973	0,9855	0,0145	5,55E-05	5,63E-05
784,6554	0,982	0,018	6,38E-05	6,49E-05
845,0135	0,9778	0,0222	7,25E-05	7,42E-05
905,3716	0,9732	0,0268	8,17E-05	8,39E-05
965,7297	0,968	0,032	9,12E-05	9,42E-05
1026,088	0,9622	0,0378	1,01E-04	1,05E-04
1086,446	0,9558	0,0442	1,11E-04	1,16E-04
1146,804	0,9488	0,0512	1,22E-04	1,28E-04
1207,162	0,9411	0,0589	1,32E-04	1,41E-04
1267,52	0,9328	0,0672	1,43E-04	1,53E-04
1327,878	0,9238	0,0762	1,54E-04	1,67E-04
1388,236	0,9142	0,0858	1,65E-04	1,81E-04
1448,595	0,9039	0,0961	1,76E-04	1,95E-04
1508,953	0,8929	0,1071	1,87E-04	2,10E-04
1569,311	0,8813	0,1187	1,98E-04	2,25E-04
1629,669	0,869	0,131	2,09E-04	2,41E-04
1690,027	0,8561	0,1439	2,20E-04	2,57E-04
1750,385	0,8425	0,1575	2,31E-04	2,74E-04

b) Simulação para o subsistema elétrico

A simulação para o subsistema elétrico estabeleceu as seguintes funções e cálculos de estimativas:

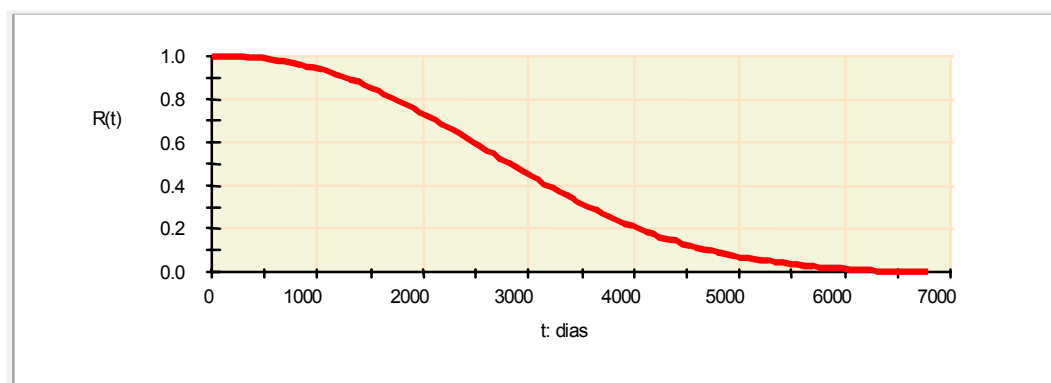
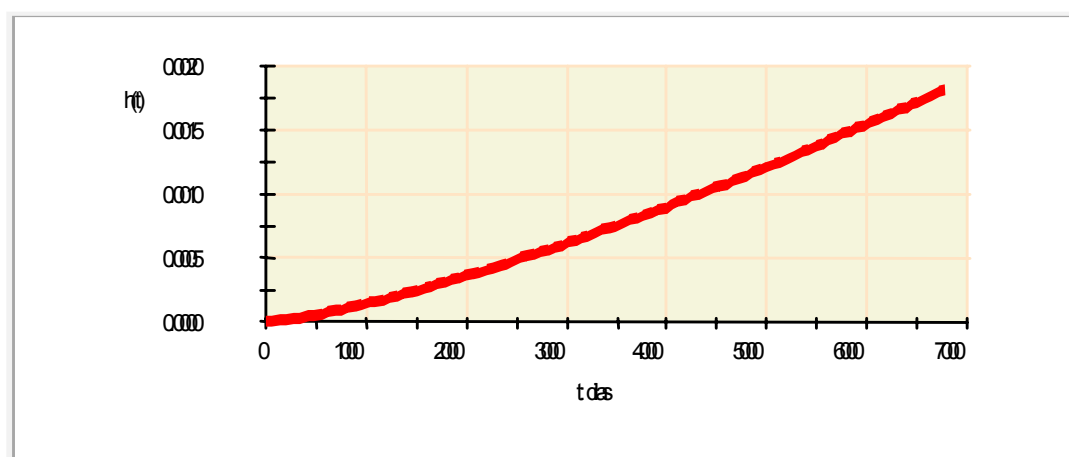
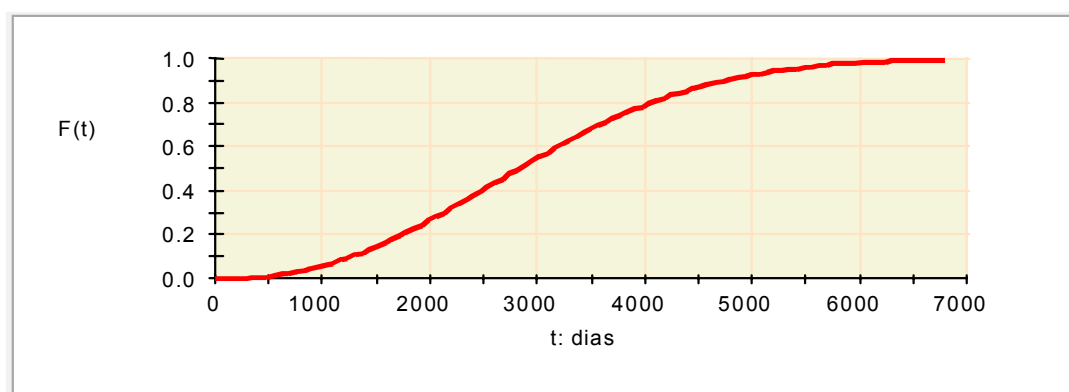
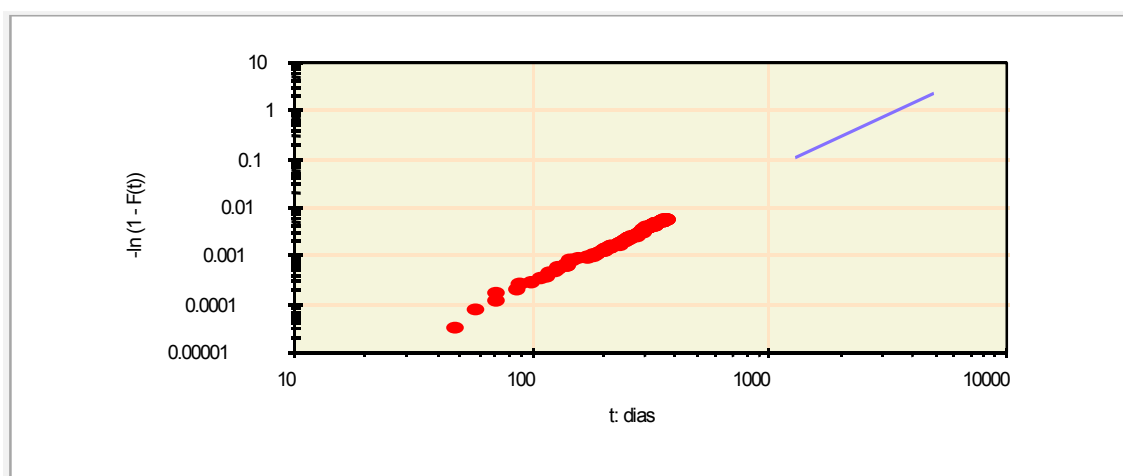
Gráfico 26– Função de Confiabilidade – dados simulados Elétrico**Gráfico 27– Função de Risco h(t) – dados simulados Elétrico****Gráfico 28– Função Densidade Acumulada de Falha – dados simulados Elétrico**

Gráfico 29– Papel de probabilidade para o Modelo Weibull – dados simulados Elétrico



Os testes de aderência dos dados ao modelo ajustado (Weibull), apresentaram os seguintes resultados para o *p-value*:

- Qui-Quadrado ($p = 0,7485$) e Kolmogorov-Smirnov ($p = 0,9397$)

Quadro 8 – Estimativas para o ajuste simulado da distribuição Weibull - Elétrico

AJUSTE DOS DADOS - MODELO WEIBULL
Parâmetro de Localização = 0
Estimativas da Verossimilhança Máxima:
Gamma = 2,3245
Theta = 3310,512
Var(Gamma) = 1,4745E-04
Var(Theta) = 343,746
Cov(Theta, Gamma) = -0,2057
Estimativa não tendenciosa:
Gamma = 2,3244
Theta = 3310,973
95% do Intervalo de Confiança:
para Gamma = 2,2824 até 2,3298
para Theta = 3264,999 até 3403,413
t10 = 1257,433
t50 = 2827,967
MTTF = 2933,617

Da mesma forma como ocorreu na análise do subsistema compressor, observa-se a coerência dos resultados verificados para o subsistema elétrico, onde o parâmetro γ foi estimado em 2,3244 e o MTTF corresponde a 8,04 anos.

Os resultados das funções de confiabilidade estão apresentados na tabela 6 e a estimativa da confiabilidade para o subsistema elétrico para um período de 1 ano é de 0,9941 e de 0,9707 para 730 dias (2 anos).

Tabela 6– Funções de confiabilidade para os dados simulados - Elétrico

FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE					
Tempo	Confiabilidade	Densidade Acumulada de Falha	Densidade de Probabilidade	Taxa de Falha	
1	0	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0
2	68,5274	1,00E+00	1,22E-04	4,45E-06	4,45E-06
3	137,0548	0,9994	6,10E-04	1,05E-05	1,05E-05
4	205,5822	0,9984	1,60E-03	1,78E-05	1,78E-05
5	274,1096	0,9969	3,10E-03	2,59E-05	2,60E-05
6	342,637	0,9949	5,10E-03	3,47E-05	3,49E-05
7	411,1644	0,9922	7,80E-03	4,40E-05	4,44E-05
8	479,6918	0,9888	1,12E-02	5,38E-05	5,44E-05
9	548,2192	0,9848	1,52E-02	6,39E-05	6,49E-05
10	616,7466	0,9801	1,99E-02	7,43E-05	7,59E-05
11	685,274	0,9746	2,54E-02	8,50E-05	8,72E-05
12	753,8014	0,9684	3,16E-02	9,58E-05	9,89E-05
13	822,3288	0,9615	3,85E-02	1,07E-04	1,11E-04
14	890,8562	0,9538	4,62E-02	1,18E-04	1,23E-04
15	959,3836	0,9454	5,46E-02	1,29E-04	1,36E-04
16	1027,911	0,9362	6,38E-02	1,40E-04	1,49E-04
17	1096,438	0,9262	7,38E-02	1,50E-04	1,62E-04
18	1164,966	0,9156	8,44E-02	1,61E-04	1,76E-04
19	1233,493	0,9042	9,58E-02	1,72E-04	1,90E-04
20	1302,021	0,892	1,08E-01	1,82E-04	2,04E-04
21	1370,548	0,8792	1,21E-01	1,92E-04	2,18E-04
22	1439,075	0,8657	1,34E-01	2,02E-04	2,33E-04
23	1507,603	0,8516	1,48E-01	2,11E-04	2,48E-04
24	1576,13	0,8368	1,63E-01	2,20E-04	2,63E-04
25	1644,658	0,8215	1,79E-01	2,28E-04	2,78E-04
26	1713,185	0,8056	1,94E-01	2,36E-04	2,93E-04
27	1781,712	0,7891	2,11E-01	2,44E-04	3,09E-04
28	1850,24	0,7722	2,28E-01	2,51E-04	3,25E-04
29	1918,767	0,7547	2,45E-01	2,57E-04	3,41E-04
30	1987,295	0,7369	2,63E-01	2,63E-04	3,57E-04
31	2055,822	0,7187	2,81E-01	2,68E-04	3,73E-04
32	2124,349	0,7001	3,00E-01	2,73E-04	3,90E-04
33	2192,877	0,6813	3,19E-01	2,77E-04	4,07E-04
34	2261,404	0,6622	3,38E-01	2,80E-04	4,24E-04

c) Simulação para o subsistema refrigeração

O mesmo procedimento adotado anteriormente aos subsistemas compressor e elétrico é aplicado ao subsistema refrigeração, obtendo-se os seguintes gráficos das funções de confiabilidade.

Gráfico 30 – Função de Confiabilidade – dados simulados Refrigeração

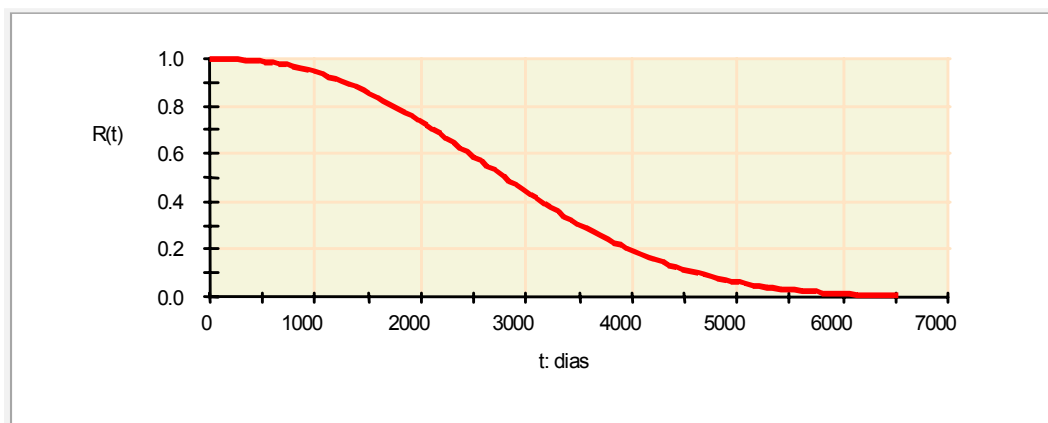


Gráfico 31 – Função Densidade Acumulada de Falha – dados simulados Refrigeração

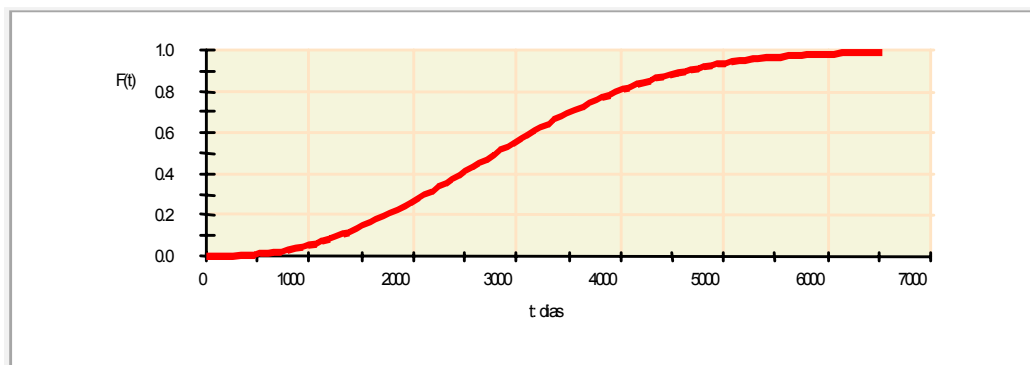
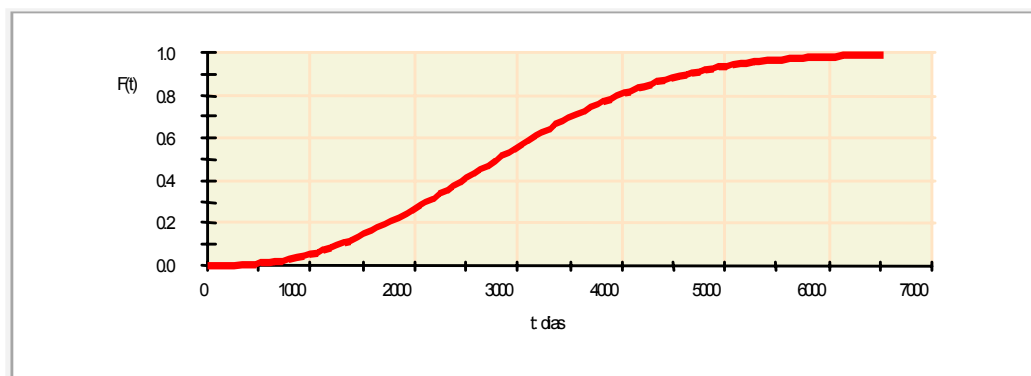
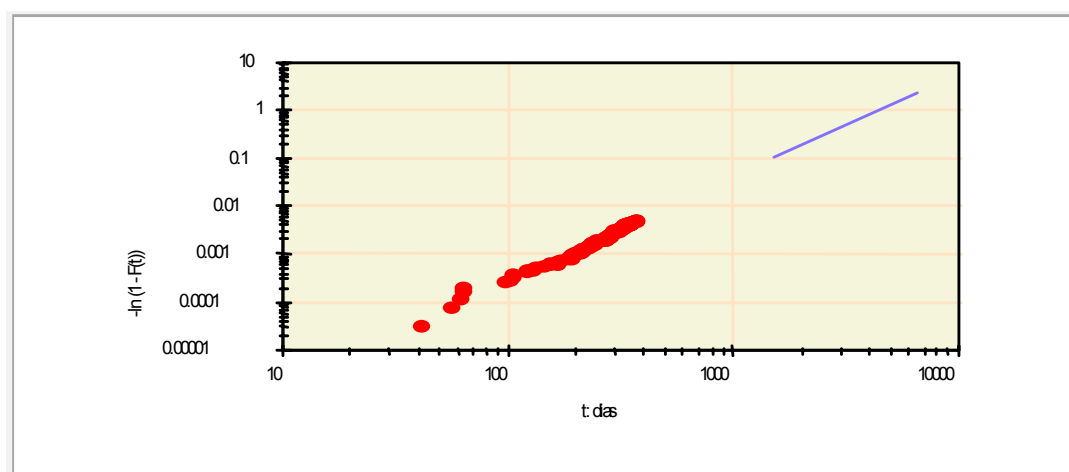


Gráfico 32 – Função de Risco – dados simulados Refrigeração**Gráfico 33 – Papel de probabilidade para o Modelo Weibull – dados simulados Refrigeração**

A partir da obtenção dos gráficos apresentados anteriormente, verifica-se a aderência dos dados ao modelo ajustado (Weibull), obtendo-se os seguintes resultados:

Qui-Quadrado ($p = 0,8434$) e Kolmogorov-Smirnov ($p = 0,9432$)

Quadro 9 – Estimativas para o ajuste simulado da distribuição Weibull - Refrigeração

AJUSTE DOS DADOS - MODELO WEIBULL	
Parâmetro de Localização = 0	
Estimativas da Verossimilhança Máxima:	
Gamma = 2,3985	
Theta = 3260,04	
Var(Gamma) = 1,3845E-04	
Var(Theta) = 276,1132	
Cov(Theta, Gamma) = -0,1786	
Estimativa não tendenciosa:	
Gamma = 2,3983	
Theta = 3260,49	
95% do Intervalo de Confiança:	
para Gamma = 2,354 até 2,3999	
para Theta = 3216,682 até 3349,116	
t10 = 1275,807	
t50 = 2798,431	
MTTF = 2890,327	

Os resultados obtidos para as estimativas indicam um MTTF de 7,92 anos. Posteriormente utilizando-se dos resultados das estimativas, foram determinados os cálculos das funções de confiabilidade, conforme demonstra a Tabela 7. A obtenção da estimativa da confiabilidade do subsistema refrigeração para um período de 365 dias (1 ano) é de 0,9948 e para o período de 730 dias (2 anos) é de 0,9728.

Tabela 7– Funções de confiabilidade para os dados simulados - Refrigeração

FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE					
Tempo	Confiabilidade	Densidade Acumulada de Falha	Densidade de Probabilidade	Taxa de Falha	
1	0	1	0	0	0
2	66,0063	0,9999	8,67E-05	3,46E-06	3,46E-06
3	132,0127	0,9995	4,57E-04	8,49E-06	8,50E-06
4	198,019	0,9988	0,0012	1,48E-05	1,48E-05
5	264,0254	0,9976	0,0024	2,20E-05	2,20E-05
6	330,0317	0,9959	0,0041	2,99E-05	3,00E-05
7	396,0381	0,9936	0,0064	3,84E-05	3,87E-05
8	462,0444	0,9908	0,0092	4,75E-05	4,79E-05
9	528,0508	0,9874	0,0126	5,70E-05	5,78E-05
10	594,0571	0,9833	0,0167	6,69E-05	6,81E-05
11	660,0635	0,9785	0,0215	7,72E-05	7,89E-05
12	726,0698	0,9731	0,0269	8,77E-05	9,01E-05
13	792,0762	0,967	0,033	9,84E-05	1,02E-04

CONTINUAÇÃO					
14	858,0825	0,9601	0,0399	1,09E-04	1,14E-04
15	924,0889	0,9525	0,0475	1,20E-04	1,26E-04
16	990,0952	0,9443	0,0557	1,31E-04	1,39E-04
17	1056,102	0,9352	0,0648	1,42E-04	1,52E-04
18	1122,108	0,9255	0,0745	1,53E-04	1,66E-04
19	1188,114	0,915	0,085	1,64E-04	1,79E-04
20	1254,121	0,9038	0,0962	1,75E-04	1,93E-04
21	1320,127	0,8919	0,1081	1,85E-04	2,08E-04
22	1386,133	0,8794	0,1206	1,96E-04	2,22E-04
23	1452,14	0,8661	0,1339	2,06E-04	2,37E-04
24	1518,146	0,8522	0,1478	2,15E-04	2,53E-04
25	1584,152	0,8377	0,1623	2,25E-04	2,68E-04
26	1650,159	0,8226	0,1774	2,33E-04	2,84E-04
27	1716,165	0,8069	0,1931	2,42E-04	3,00E-04
28	1782,171	0,7907	0,2093	2,50E-04	3,16E-04
29	1848,178	0,7739	0,2261	2,57E-04	3,32E-04
30	1914,184	0,7567	0,2433	2,64E-04	3,49E-04
31	1980,19	0,739	0,261	2,71E-04	3,66E-04
32	2046,197	0,721	0,279	2,76E-04	3,83E-04
33	2112,203	0,7026	0,2974	2,82E-04	4,01E-04
34	2178,209	0,6838	0,3162	2,86E-04	4,18E-04
35	2244,216	0,6648	0,3352	2,90E-04	4,36E-04
36	2310,222	0,6455	0,3545	2,93E-04	4,54E-04
37	2376,229	0,6261	0,3739	2,96E-04	4,72E-04
38	2442,235	0,6065	0,3935	2,98E-04	4,91E-04
39	2508,241	0,5868	0,4132	2,99E-04	5,10E-04
40	2574,248	0,567	0,433	3,00E-04	5,28E-04

5.5.1 Análise da Confiabilidade do Produto

Observadas as estimativas dos parâmetros por meio da simulação realizada aos três subsistemas, foi delineada a estrutura para análise da confiabilidade do sistema. Utilizando-se do *software* Prosis (1999) foram inseridos os resultados das estimativas, obtendo-se a confiabilidade do produto Freezer H210 para o período de 1 ano e para 2 anos. A tabela 8 apresenta os valores dos parâmetros estimados e que servirão de base para os cálculos da confiabilidade.

Tabela 8 - Estimativas dos parâmetros dos subsistemas componentes do Freezer H210

COMPONENTE	DISTRIBUIÇÃO	PARÂMETRO DE FORMA	PARÂMETRO DE ESCALA	PARÂMETRO DE LOCALIZAÇÃO
Compressor	Weibull	2,7943	3290,18	0
Refrigeração	Weibull	2,3983	3260,49	0
Elétrico	Weibull	2,3244	3310,97	0

Independente da variação do parâmetro de forma, os resultados observados para o parâmetro de escala da distribuição de Weibull nos subsistemas estiveram próximos do valor 3.000 dias na modelagem por simulação. Na avaliação da confiabilidade do sistema/produto utilizou-se o procedimento indicado em 3.6, obtendo-se as estimativas de confiabilidade apresentadas na tabela 9.

Tabela 9 – Estimativas de confiabilidade e funções para o Freezer H210

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE – FREEZER H210					
Observação	Tempo	Confiabilidade	Densidade Acumulada de Falha	Densidade de Probabilidade	Taxa de Falha
1	0	1	0	0	0
2	40,404	0,9999	6,70E-05	4,35E-06	4,35E-06
3	80,8081	0,9994	3,51E-04	1,07E-05	1,07E-05
4	121,2121	0,9987	9,29E-04	1,86E-05	1,86E-05
5	161,6162	0,9976	0,0019	2,78E-05	2,79E-05
6	202,0202	0,9962	0,0032	3,81E-05	3,82E-05
7	242,4242	0,9944	0,0049	4,92E-05	4,95E-05
8	282,8283	0,9921	0,0072	6,12E-05	6,17E-05
9	323,2323	0,9893	0,0099	7,38E-05	7,46E-05
10	363,6364	0,986	0,0131	8,72E-05	8,84E-05
11	404,0404	0,9822	0,0169	1,01E-04	1,03E-04
12	444,4444	0,9778	0,0213	1,15E-04	1,18E-04
13	484,8485	0,9728	0,0262	1,30E-04	1,34E-04
14	525,2525	0,9672	0,0318	1,45E-04	1,50E-04
15	565,6566	0,961	0,038	1,61E-04	1,67E-04
16	606,0606	0,9541	0,0448	1,77E-04	1,85E-04
17	646,4646	0,9467	0,0523	1,92E-04	2,03E-04
18	686,8687	0,9386	0,0604	2,08E-04	2,22E-04
19	727,2727	0,9298	0,0691	2,25E-04	2,41E-04
20	767,6768	0,9204	0,0785	2,41E-04	2,61E-04
21	808,0808	0,9104	0,0885	2,56E-04	2,82E-04
22	848,4848	0,8997	0,0992	2,72E-04	3,03E-04
23	888,8889	0,8884	0,1105	2,88E-04	3,24E-04
24	929,2929	0,8765	0,1225	3,03E-04	3,46E-04
25	969,697	0,8639	0,135	3,18E-04	3,68E-04

CONTINUAÇÃO

26	1010,101	0,8508	0,1482	3,33E-04	3,91E-04
27	1050,505	0,8371	0,1619	3,47E-04	4,14E-04
28	1090,909	0,8229	0,1762	3,60E-04	4,38E-04
29	1131,313	0,8081	0,1911	3,73E-04	4,62E-04
30	1171,717	0,7927	0,2064	3,86E-04	4,87E-04
31	1212,121	0,777	0,2222	3,98E-04	5,12E-04
32	1252,525	0,7607	0,2385	4,09E-04	5,37E-04
33	1292,929	0,744	0,2553	4,19E-04	5,63E-04
34	1333,333	0,7269	0,2724	4,28E-04	5,89E-04
35	1373,737	0,7095	0,2899	4,37E-04	6,16E-04
36	1414,141	0,6917	0,3077	4,45E-04	6,43E-04
37	1454,545	0,6737	0,3258	4,52E-04	6,71E-04
38	1494,949	0,6553	0,3442	4,58E-04	6,99E-04
39	1535,354	0,6368	0,3628	4,63E-04	7,27E-04
40	1575,758	0,6181	0,3816	4,67E-04	7,55E-04
41	1616,162	0,5992	0,4006	4,70E-04	7,84E-04
42	1656,566	0,5802	0,4196	4,72E-04	8,14E-04
43	1696,97	0,5612	0,4387	4,73E-04	8,44E-04
44	1737,374	0,5421	0,4579	4,74E-04	8,74E-04
45	1777,778	0,523	0,477	4,73E-04	9,04E-04
46	1818,182	0,504	0,4961	4,71E-04	9,35E-04
47	1858,586	0,4851	0,5151	4,69E-04	9,66E-04
48	1898,99	0,4663	0,5339	4,65E-04	9,98E-04
49	1939,394	0,4476	0,5527	4,61E-04	0,001
50	1979,798	0,4291	0,5712	4,56E-04	0,0011
51	2020,202	0,4109	0,5895	4,50E-04	0,0011
52	2060,606	0,3929	0,6075	4,43E-04	0,0011
53	2101,01	0,3752	0,6253	4,35E-04	0,0012
54	2141,414	0,3578	0,6427	4,27E-04	0,0012
55	2181,818	0,3408	0,6598	4,18E-04	0,0012
56	2222,222	0,3241	0,6765	4,09E-04	0,0013
57	2262,626	0,3078	0,6928	3,99E-04	0,0013
58	2303,03	0,2919	0,7087	3,89E-04	0,0013
59	2343,434	0,2765	0,7242	3,78E-04	0,0014
60	2383,838	0,2615	0,7393	3,66E-04	0,0014
61	2424,242	0,2469	0,7538	3,55E-04	0,0014
62	2464,646	0,2329	0,7679	3,43E-04	0,0015
63	2505,051	0,2193	0,7815	3,31E-04	0,0015
64	2545,455	0,2061	0,7947	3,19E-04	0,0015
65	2585,859	0,1935	0,8073	3,06E-04	0,0016
66	2626,263	0,1814	0,8194	2,94E-04	0,0016
67	2666,667	0,1698	0,831	2,81E-04	0,0017
68	2707,071	0,1587	0,8421	2,69E-04	0,0017
69	2747,475	0,1481	0,8528	2,57E-04	0,0017
70	2787,879	0,138	0,8629	2,44E-04	0,0018
71	2828,283	0,1283	0,8725	2,32E-04	0,0018
72	2868,687	0,1192	0,8816	2,20E-04	0,0018
73	2909,091	0,1105	0,8903	2,08E-04	0,0019
74	2949,495	0,1023	0,8985	1,97E-04	0,0019
75	2989,899	0,0946	0,9062	1,86E-04	0,002
76	3030,303	0,0873	0,9135	1,75E-04	0,002

CONTINUAÇÃO						
77	3070,707	0,0804	0,9203	1,64E-04	0,002	
78	3111,111	0,0739	0,9268	1,54E-04	0,0021	
79	3151,515	0,0679	0,9328	1,44E-04	0,0021	
80	3191,919	0,0622	0,9384	1,35E-04	0,0022	
81	3232,323	0,0569	0,9437	1,26E-04	0,0022	
82	3272,727	0,052	0,9486	1,17E-04	0,0022	
83	3313,131	0,0474	0,9531	1,09E-04	0,0023	
84	3353,535	0,0432	0,9573	1,01E-04	0,0023	
85	3393,939	0,0393	0,9613	9,31E-05	0,0024	
86	3434,343	0,0356	0,9649	8,60E-05	0,0024	
87	3474,747	0,0323	0,9682	7,92E-05	0,0025	
88	3515,152	0,0292	0,9713	7,28E-05	0,0025	
89	3555,556	0,0263	0,9741	6,69E-05	0,0025	
90	3595,96	0,0237	0,9767	6,12E-05	0,0026	
91	3636,364	0,0213	0,979	5,60E-05	0,0026	
92	3676,768	0,0191	0,9812	5,11E-05	0,0027	
93	3717,172	0,0172	0,9832	4,65E-05	0,0027	
94	3757,576	0,0153	0,985	4,23E-05	0,0028	
95	3797,98	0,0137	0,9866	3,83E-05	0,0028	
96	3838,384	0,0122	0,9881	3,47E-05	0,0028	
97	3878,788	0,0109	0,9894	3,13E-05	0,0029	
98	3919,192	0,0096	0,9906	2,82E-05	0,0029	
99	3959,596	0,0083	0,9917	2,54E-05	0,003	
100	4000	0,0074	0,9926	2,25E-05	0,0032	

A confiabilidade total do sistema observada para o período de um ano de garantia é de $R(365) = 0,9868$ e para o período de dois anos de garantia é de $R(730) = 0,9303$.

5.6 Modelagem através da Análise Bayesiana de Confiabilidade

A obtenção das estimativas dos parâmetros na análise bayesiana de confiabilidade pressupõe a utilização das distribuições *a priori* e *a posteriori* conforme foi visto na subseção 3.5.2 da seção 3.5. Esta modelagem foi estruturada a partir do caso em que o parâmetro de escala é desconhecido sendo portanto considerado uma variável aleatória. As informações fornecidas pelo fabricante foram fundamentais para que se pudesse construir a distribuição *a priori* e determinar os cálculos das estimativas.

A distribuição *a priori* considerava o parâmetro de forma γ como conhecido e igual a 2,6 conforme estudos realizados pelo fabricante para um produto similar ao modelo de análise, em períodos mais longos de acompanhamento de falhas no

campo, especificamente na Suécia. Nesta etapa do estudo os dados de falha foram agrupados na estrutura de ano, ou seja, ocorrências até 1 mês de uso correspondem ao período $\frac{1}{12} = 0,0833$ ano, e assim por diante.

Considerando o parâmetro de escala θ como uma variável aleatória com distribuição Uniforme entre 7 e 10 anos, conforme sugerem MARTZ & WALLER (1982, p.393), então a distribuição *a priori* de Θ é dada por $U(7,10)$. Calculando-se a $E(\Theta/t; s; \alpha_0, \beta_0)$ para os três subsistemas através do *software* Maple V (1997) obtêm-se respectivamente:

a) Subsistema compressor

$$E(\Theta \setminus 7,01; 7,10) = \frac{\Gamma(45,10.7,01) - \Gamma(45,7.7,01)}{7,01[\Gamma(44,10.7,01) - \Gamma(44,7.7,01)]} = 7,6036$$

b) Subsistema elétrico

$$E(\Theta \setminus 26,45; 7,10) = \frac{\Gamma(124,10.26,45) - \Gamma(124,7.26,45)}{26,45[\Gamma(123,10.26,45) - \Gamma(123,7.26,45)]} = 7,1051$$

c) Subsistema refrigeração

$$E(\Theta \setminus 22,61; 7,10) = \frac{\Gamma(109,10.22,61) - \Gamma(109,7.22,61)}{22,61[\Gamma(108,10.22,61) - \Gamma(108,7.22,61)]} = 7,1275$$

Posteriormente estima-se o limite superior do intervalo de confiança para 95% obtendo-se o valor de Θ para cada subsistema a partir das seguintes equações:

a) **Subsistema compressor**

$$P(\Theta \geq \theta^* \mid 7,01;7,10) = \frac{\Gamma(44,10.7,01) - \Gamma(44,\theta^*.7,01)}{[\Gamma(44,10.7,01) - \Gamma(44,7.7,01)]} = 0,05$$

$$\theta^* = 9,48$$

b) **Subsistema elétrico**

$$P(\Theta \geq \theta^* \mid 26,46;7,10) = \frac{\Gamma(123,10.26,46) - \Gamma(123,\theta^*.26,46)}{[\Gamma(123,10.26,46) - \Gamma(123,7.26,46)]} = 0,05$$

$$\theta^* = 7,31$$

c) **Subsistema refrigeração**

$$P(\Theta \geq \theta^* \mid 22,62;7,10) = \frac{\Gamma(108,10.22,62) - \Gamma(108,\theta^*.22,62)}{[\Gamma(108,10.22,62) - \Gamma(108,7.22,62)]} = 0,05$$

$$\theta^* = 7,64$$

Através da utilização dos valores de θ^* obtém-se as estimativas de confiabilidade dos subsistemas e então calcula-se a confiabilidade $R(t)$ do sistema completo para os períodos de 1 ano e 2 anos.

PERIODO	CONFIABILIDADE DO SISTEMA
t	$R(t)$
1 ano	0,9827
2 anos	0,9207

5.7 Análise dos Resultados

Os resultados observados mostraram-se similares nas duas alternativas de modelagens utilizadas. Verifica-se que, pelo método de simulação com dados censurados, a confiabilidade do produto para um período de um ano foi de 0,9868 e para um período de dois anos 0,9363, retratando num decréscimo de 0,0505 na confiabilidade de um período para outro. Quando utilizou-se das técnicas de análise bayesiana de confiabilidade, obteve-se uma confiabilidade de 0,9827 para o período de um ano e de 0,9207 para dois anos, apresentando assim um decréscimo de 0,062 entre os dois períodos. Os valores observados na técnica bayesiana posicionaram-se pouco abaixo dos valores obtidos pela técnica de simulação, no entanto, a diferença observada não chega a ser significativa.

Estas predições de confiabilidade consolidam as informações *a priori* disponibilizadas pela empresa em relação ao produto objeto deste estudo, indicando tanto na determinação da confiabilidade dos subsistemas como do sistema geral, estimativas dos parâmetros e do MTTF próximas do que a empresa espera quanto ao desempenho do produto no campo. A aplicação de técnicas distintas de análise de falhas serviu para constatar que ambas convergem para valores muito próximos quando estima-se a confiabilidade para um tempo $t = 730 \text{ dias}$.

Na análise da modelagem por simulação, após a verificação da aderência dos dados dos subsistemas dentro do período de garantia ao modelo de Weibull, introduziu-se a informação *a priori* a respeito do parâmetro θ , considerando-o próximo a 3000 dias conforme referência do fabricante. Esta informação proporcionou estimar o parâmetro de forma γ através de uma distribuição de falhas simulada, contemplando a censura a partir de 366 dias, desde que, a diferença fosse mínima quando comparada com a distribuição real das falhas dentro do período de garantia. Os resultados obtidos para os subsistemas indicaram estimativas do MTTF coincidentes com a expectativa da empresa, algo em torno de 8 anos. Individualmente os valores do MTTF para os subsistemas foram: compressor (8,03 anos), sistema elétrico (8,04 anos) e sistema de refrigeração (7,92 anos). Apesar dos resultados estarem próximos, algumas considerações tornam-se relevantes neste contexto, pois, o pressuposto inicial seria que o MTTF do sistema elétrico por

ser o mais crítico fosse menor que dos outros dois sistemas. Neste caso possivelmente a aleatoriedade da simulação proporcionou uma frequência de falhas menor nos períodos acima de um ano de garantia. Por outro lado, os valores estimados para o parâmetro de forma de cada distribuição atenderam às expectativas, projetando-se razoavelmente próximos aos valores obtidos em estudos anteriores realizados pela empresa na Europa com produtos similares. A expectativa era de obter-se valores aproximados a $\gamma = 2,6$ e as modelagens para os subsistemas apresentaram: compressor ($\gamma = 2,7943$), sistema elétrico ($\gamma = 2,3983$) e sistema de refrigeração ($\gamma = 2,3244$), resultados estes efetivamente próximos das premissas estabelecidas.

Nesta modelagem, a projeção dos custos adicionais com o implemento da garantia estendida para um período de dois anos, pode ser obtida através dos dados de campo, onde o custo médio por chamada do produto freezer H210 em garantia, é de aproximadamente R\$ 22,00. Em função da estimativa de confiabilidade de 0,9363 para dois anos, estima-se em 1356 falhas ao longo deste período, resultando num montante de R\$ 29.832,00, o que representa, em relação à população produzida, um custo de R\$ 1,38 por unidade em garantia. Comparado ao valor de R\$ 5.990,00 gasto no primeiro ano, o acréscimo torna-se significativo, pois, o custo por unidade no primeiro ano da garantia foi de R\$ 0,28.

Na análise bayesiana da confiabilidade formulou-se uma distribuição *a priori* de acordo com os pressupostos verificados em MARTZ & WALLER (1982) e BOX & TIAO (1992) para o caso em que o parâmetro de escala é uma variável aleatória. Como fora citado anteriormente, o fabricante conhecia o parâmetro de forma γ de estudos realizados na Europa com produtos similares e assumia seu valor como próximo a 2,6. Considerando a distribuição de θ como uma *Uniforme* entre 7 e 10 anos, determinou-se a distribuição *a posteriori* para cada subsistema, obtendo-se os seguintes valores: compressor ($\theta = 9,48$), sistema elétrico ($\theta = 7,31$) e sistema de refrigeração ($\theta = 7,64$). Transformando-se em dias estes resultados, obtêm-se; compressor (3460,2 dias), sistema elétrico (2668,2 dias) e sistema de refrigeração (2788,6 dias). Conforme avaliação do fabricante, por meio da Engenharia da Qualidade, estes resultados se apresentam de acordo com as suas expectativas em relação ao produto analisado. O indicador relevante da análise, foi a diferença

significativa ocorrida entre o valor do parâmetro de escala, na distribuição *a posteriori* do subsistema compressor e o valor obtido nos outros subsistemas. Os resultados demonstram a consistência da estimativa relacionada à incidência de falhas dos subsistemas dentro do período de garantia. Para a empresa, torna-se visível dentro das estimativas que os subsistemas elétrico e refrigeração apresentam MTTF pouco superior a 6 anos, fugindo da premissa que seria de 8 anos. Em função disso, a estimativa de confiabilidade para um período de dois anos foi de 0,9207, resultando numa previsão de 1.689 ocorrências de falhas ao longo do período. Esta incidência de falhas determina um total de R\$ 37.158,00 a ser alocado na cobertura dos custos para o período total de garantia. O custo unitário por produto em garantia é de R\$ 1,74.

6.CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste estudo proporcionou observar o desempenho do produto freezer H210 através da análise das falhas ocorridas no campo. A metodologia adotada possibilitou especificar a distribuição de probabilidade das falhas dentro do período de garantia do produto e através de dois métodos distintos, por simulação e análise bayesiana, realizar a estimativa de confiabilidade e custos adicionais com a extensão da garantia para um período de dois anos. Os resultados observados nas modelagens aplicadas ao estudo de caso, apresentaram-se próximos, com distribuições semelhantes, consolidando as premissas feitas no decorrer do estudo.

A participação dos técnicos da empresa envolvidos no processo contribuiu de maneira significativa na realização deste trabalho, caracterizando explicitamente o método da pesquisa-ação, em que, o comprometimento e a interação entre o corpo funcional e o pesquisador ocorrem de forma efetiva, proporcionando estabelecer objetivos e ações delineadas para a resolução dos problemas. Em todos os momentos da realização do estudo, os técnicos da Electrolux estiveram presentes e participaram de grupos de discussão, apresentando sugestões, avaliando informações técnicas e tomando decisões .

Dos resultados obtidos no estudo, algumas considerações podem ser feitas para cada um dos métodos adotados e por extensão, ao posicionamento da empresa em relação à confiabilidade do produto pesquisado. Na modelagem por simulação, constatou-se uma taxa de falhas significativamente maior no 2º ano de garantia do que no 1º ano, este resultado, em princípio foge às expectativas da empresa, pois, estudos anteriores realizados com o produto freezer H400, similar ao modelo em estudo, cuja garantia de fábrica era de dois anos, apresentou uma taxa de falhas no 2º ano cerca de 50% inferior à taxa observada no 1º ano, no entanto, sua frequência de ocorrências de chamadas nos primeiros três meses foi substancialmente maior. Como o método de simulação para a distribuição das falhas, por mais próxima que seja da distribuição verificada no 1º ano, estima de forma aleatória adequando-se à distribuição ajustada, é razoável supor que os dados de falha possam estar superestimados determinando uma estimativa de

confiabilidade inferior ao seu real valor. De qualquer forma, estes resultados não inviabilizam o procedimento adotado.

Em relação à análise bayesiana utilizada como modelagem alternativa, constatou-se a aplicabilidade do procedimento desde que exista alguma informação *a priori* a respeito da distribuição de probabilidade das falhas do produto em estudo. Tradicionalmente, as técnicas bayesianas têm sido pouco utilizadas na estimação de parâmetros em confiabilidade, em função da não existência de informações a respeito do comportamento das falhas ou mesmo da complexidade dos cálculos. No caso deste estudo, como haviam informações de análises similares realizadas pela empresa, optou-se também por realizar a análise da confiabilidade dentro dos preceitos estabelecidos pela teoria bayesiana. Neste contexto, verificou-se uma grande consistência entre os valores pré-estabelecidos e os resultados observados na distribuição *a posteriori*.

A utilização de informações prévias a respeito dos modelos de distribuição dos componentes dos sistemas, podem servir de instrumentos explicativos e determinantes na resolução de problemas similares relacionados à confiabilidade de outros modelos ou produtos fabricados pela empresa. O método da análise bayesiana de confiabilidade é vantajoso em relação aos demais, em função da sua aplicabilidade em séries de dados com censura elevada.

Apesar das modelagens terem apresentado custos proporcionalmente significativos para o 2º ano de garantia, estrategicamente para a empresa, os custos podem ser absorvidos pelo consumidor, pois os valores estimados não superam a R\$ 2,00 em nenhum dos casos analisados. Por outro lado uma melhoria na confiabilidade, principalmente nos componentes do subsistema elétrico resultará em acréscimo de desempenho do produto, reduzindo custos e aumentando a durabilidade.

Finalizando, sugere-se que em futuros estudos similares, se realize o desenvolvimento de modelagens para análise da confiabilidade, utilizando a estimação bayesiana para situações em que os parâmetros de forma e escala são variáveis aleatórias e, as estimações para a obtenção da distribuição *a posteriori* sejam simuladas com diferentes valores para a distribuição *a priori*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASU Asit P. ; SUN Kai. Multivariate Exponential Distributions with constant failure rates. **Journal of Multivariate Analysis**. v.61, p.159-169 ,1997.
- BECKER, João Luiz. Apontamentos das aulas de Métodos Estatísticos, Mestrado Interinstitucional PPGA-UFRGS/UNICENP, Curitiba:1998.
- BOX, George E. P. ; HUNTER William G. ; HUNTER Stuart J. **Statistics for experiments**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1978.
- BOX, George E. P. ; TIAO, George C. **Bayesian inference in statistical analysis**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1992.
- BREYFOGLE III, Forrest W. **Implementing Six Sigma: smarter solutions using statistical methods**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1999.
- CHURCHILL JR, G. ; PETER J. Paul. **Marketing: criando valor para os clientes**. São Paulo: Saraiva, 2000.
- COX, D.R. Regression models and life-tables. **Journal of Royal Statistical Society B**, v.34, p.187-220, 1972.
- DRUCKER, Peter. **Administrando em tempos de grandes mudanças**. São Paulo: Pioneira,1995.
- ELECTROLUX. **Curso de refrigeração doméstica**. Curitiba:1997.
- ELECTROLUX. **Manual da Garantia da Qualidade**. 1992.
- ELECTROLUX. **Quality Evaluation System**. Stockholm: 1998.
- ELSAYED, E.A. **Reliability engineering**. Reading, MA: Addison Wesley Longman, 1996.
- FALCETTA, E. F. **Análise da confiabilidade de produtos baseada em dados de utilização da garantia**. Dissertação de Mestrado, PPGEU-UFRGS, Porto Alegre, 2000, 104p.

- FOGLIATTO, F.S. ; FALCETTA, E. F. **Modelagem da confiabilidade de produtos a partir de dados de garantia.** In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO. Florianópolis. 2001.
- FREITAS, M. A. ; COLOSIMO, E. A. **Confiabilidade: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados.** Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1997.
- GORDON, I. **Marketing de relacionamento: estratégias técnicas e tecnologias para conquistar clientes e mantê-los para sempre.** São Paulo: Futura, 1998.
- HAHN, G. J. ; MEEKER, W. Q. Pitfalls and practical considerations in product life analysis, Part I: basic concepts and dangers of extrapolation. **J. Qual. Technology**, **14**(3), 144-185, 1982.
- HAMEL, Gary ; PRAHALAD, C.K. **Competindo pelo futuro: estratégias inovadoras para obter o controle do seu setor e criar mercados de amanhã.** Rio de Janeiro: Campus, 1995.
- HART, Christopher W. **Garantias extraordinárias: como criar um diferencial no mercado por meio de garantias.** São Paulo: Pioneira, 1996.
- HESKETT, J. L. ; SASSER JR , W. E. ; HART, C. W. **Serviços revolucionários: mudando as regras do jogo competitivo na prestação de serviços.** São Paulo: Pioneira, 1994.
- HOLMAN, J. P.; **Transferência de calor.** São Paulo: McGraw-Hill, 1983.
- HOYLAND, A. ; RAUSAND, M. **System reliability theory: models and statistical methods.** New York: Wiley-Interscience, 1994.
- JEFFREYS, H. **The theory of probability.** 3nd ed. Oxford: OUP, 1998.
- KALBFLEISCH, J. D. ; LAWLESS, J. F. ; ROBINSON, J. A. Methods for the analysis and prediction of warranty claims. **Technometrics**, **33**(3), 217-285, 1991.
- KOTTLER, Philip **Marketing para o século XXI: como criar, conquistar e dominar mercados.** 3 ed. São Paulo: Futura, 1999.
- LAKATOS, E. M. ; MARCONI, M. A . **Metodologia do trabalho científico.** 4 ed. São Paulo: Atlas, 1992.

- LAWLESS, J. F. Statistical analysis of product warranty data. **Int. Statistical Review**, **66**(1), 41-60, 1998.
- LEHMANN, E. L. ; CASELLA, G. **Theory of point estimation**. New York: Springer-Verlag, 1998.
- LLOYD, D. K. ; LIPOW M. **Reliability: management methods and mathematics**. Milwaukee: The American Society for Quality Control, 1984.
- MAPLE V RELEASE 5.0. **Manual do Usuário**. Waterloo, Waterloo Maple Inc., 1997.
- MARTINS, P. G. ; LAUGENI, F. P. **Administração da Produção**. São Paulo: Saraiva, 1998.
- MARTZ, H. F. ; WALLER, R.A. **Bayesian reliability analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- MATUSITA, Ana Paula ; QUEIROZ, Sérgio. **Mudança tecnológica e competitividade na indústria de linha branca**. In: SIMPÓSIO DE GESTÃO DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. XIX. 1997. Brasil. P.833-850 .
- MONTGOMERY, Douglas C. **Introduction to statistical quality control**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc. , 1990.
- MONTGOMERY, D. C. ; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. New York: John Wiley & Sons Inc. , 1994.
- MOOD, A. M. ; GRAYBILL, F. A. ; BOES, D. C. **Introduction to the theory of statistics**. 3rd. New York: McGraw-Hill, 1974.
- NACHLAS, J. A. ; KUMAR, A. Reliability estimation using doubly-censored field data. **IEEE Trans. On Reliability**, **42**(2),268-279, 1993.
- NELSON W. **Applied life data analysis**. New York: John Wiley & Sons Inc. , 1982.
- NELSON W. **Accelerated testing, statistical models, test plans and data analysis**. New York: John Wiley & Sons Inc. , 1990.
- PIDD, Michael. **Modelagem Empresarial: ferramentas para a tomada de decisão**. Porto Alegre: Artes Médicas, 1998.
- PROCONF. **Manual do Usuário**. Porto Alegre, Maxxi Gestão Empresarial, 1999.

- PROSIS. **Manual do Usuário**. Porto Alegre, Maxxi Gestão Empresarial, 1999.
- SEBER, G. A . F. ; WILD, C. J. **Non linear regression**. New York: John Wiley & Sons Inc, 1989.
- SHAO, J. **Mathematical statistics**. New York: Springer – Verlag,1999.
- SLACK, N. ; CHAMBERS, S. ; HARLAND, C. ; HARRISON, A. ; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 1996.
- SMITH, M. E. ; THORPE, R. ; LOWE, A. **Pesquisa gerencial em administração**. São Paulo: Pioneira, 1999.
- SPSS 10.0. **Manual do Usuário**. Chicago, SPSS Inc., 2000
- STATGRAPHICS PLUS 5.0. **Manual do Usuário**. Rockville, Manugistics, Inc., 2000
- STOECKER, W.F. ; JABARDO, J.M.S. **Refrigeração Industrial**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1998.
- SUZUKI, K. Estimation of lifetime parameters from incomplete field data. **Technometrics**, **27**(3), 263-271, 1985.
- THIOLLENT, Michel. **Pesquisa-Ação nas organizações**. São Paulo: Atlas,1997.
- WASSERMAN, G. S.; SUDJIANTO, A. A comparison of three strategies for forecasting warranty claims. **IIE Transactions**, **28**, 967-977,1996.
- WERNER, L. **Modelagem dos tempos de falhas ao longo do calendário**. Dissertação de Mestrado, PPGEF-UFRGS, Porto Alegre, 1996, 95p.
- YIN, Robert K. **Case study research**. 2nd. ed. London: Sage, 1994.

ANEXOS

Anexo A – Relatório de chamadas de campo para os produtos fabricados entre setembro de 1999 e agosto de 2000.