

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

**Análise da Confiabilidade de Produtos baseada em Dados de Utilização da
Garantia**

Eduardo Fiorin Falcetta

Porto Alegre, 2000

**ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

**Análise da Confiabilidade de Produtos baseada em Dados de Utilização da
Garantia**

Eduardo Fiorin Falcetta

Orientador: Flávio S. Fogliatto, *Ph.D.*

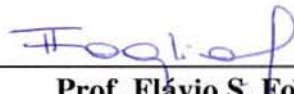
Banca Examinadora:

Prof. Dra. Dinara Westphalen Xavier Fernandez
Prof. Dr. Flávio J. Lorini
Prof. Dr. José Luis Duarte Ribeiro

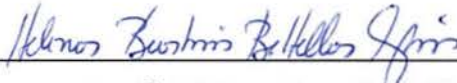
**Trabalho de Conclusão do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia
apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como
requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia – modalidade
Profissionalizante**

Porto Alegre, 2000

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de mestre em ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo coordenador do Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Prof. Flávio S. Fogliatto
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Prof^a. Helena Beatriz Cybis
Coordenadora do Mestrado Profissionalizante em Engenharia

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dinara Westphalen Xavier Fernandez, Dra.
Departamento de Estatística / UFRGS

Prof. Flávio J. Lorini, Dr.
Departamento de Engenharia Mecânica / UFRGS

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
PPGEP / UFRGS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa, Lucilene, pelo apoio, paciência e compreensão demonstrado durante a realização deste trabalho e, aos meus filhos, Júlia e Diego, que mesmo sem entender, souberam compreender e aceitar o tempo que deixei de dedicar à eles, para conclusão desta tarefa.

Sou grato também ao meu orientador, Flávio S. Fogliatto, pelo apoio e contribuições oferecidas para a elaboração e conclusão desta dissertação.

Por fim, agradeço à Springer Carrier, por ter me proporcionado a possibilidade da realização deste curso de pós-graduação e formação como mestre.

SUMÁRIO

LISTAS	VIII
RESUMO	XII
ABSTRACT.....	XIII
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. COMENTÁRIOS INICIAIS.....	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. <i>Objetivo Principal</i>	3
1.2.2. <i>Objetivos Secundários</i>	3
1.3. LIMITAÇÕES	3
1.4. MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	4
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	5
CAPÍTULO 2.....	6
CONCEITOS BÁSICOS SOBRE UNIDADES CONDICIONADORAS DE AR	6
2.1. PRINCÍPIO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	7
2.1.1. <i>Propriedades Termodinâmicas</i>	7
2.1.2. <i>Ciclo de Refrigeração</i>	9
2.2. UNIDADES CONDICIONADORAS DE AR	15
2.2.1 <i>Histórico</i>	15
2.2.2. <i>Descrição de Operação de Unidades Condicionadoras de Ar Individuais</i>	17
CAPÍTULO 3.....	21
REVISÃO SOBRE CONFIABILIDADE.....	21

3.1. CONCEITOS TEÓRICOS DE CONFIABILIDADE	22
3.2. ESTIMATIVAS DE CONFIABILIDADE.....	23
3.2.1. <i>Tempo-até-Falha</i>	24
3.2.2. <i>Função Confiabilidade</i>	26
3.2.3. <i>Função de Risco</i>	27
3.2.4. <i>Relações entre as Funções</i>	27
3.2.5. <i>Etapas da vida operacional de um sistema a partir de sua função de risco</i>	29
3.2.6. <i>Tempo Médio até Falha e Tempo Médio entre Falhas</i>	31
3.2.7. <i>Distribuições Utilizadas em Confiabilidade</i>	31
3.3. ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS DE DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE	37
3.3.1. <i>Método dos Momentos</i>	37
3.3.2. <i>Método da Máxima Verossimilhança (MLE)</i>	38
3.4. MODELAGEM DOS DADOS DE TEMPOS-ATÉ-FALHA	39
3.4.1. <i>Tipos de Censura</i>	40
3.4.2. <i>Modelos Paramétricos de Confiabilidade</i>	41
3.5. PAPEL DE PROBABILIDADE.....	45
3.6. TESTES DE ADERÊNCIA.....	46
3.6.1. <i>Teste do Qui-Quadrado</i>	46
3.6.2. <i>Teste Kolmogorov-Smirnov</i>	47
3.7. AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS	49
3.7.1. <i>Sistemas em Série</i>	50
CAPÍTULO 4.....	51
METODOLOGIA PROPOSTA PARA MODELAGEM DE DADOS DE TEMPO-ATÉ- FALHA	51
4.1. METODOLOGIA APLICADA NA ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DOS SUBSISTEMAS	52
4.1.1. <i>Identificação dos modelos de distribuições dos sub-sistemas</i>	52
4.1.2. <i>Procedimento para análise de dados modelados por distribuições unimodais</i>	53
4.1.3. <i>Procedimento para análise de dados modelados por distribuições multi-modais</i> .	54
4.1.4. <i>Heurística para análise de dados de tempos-até-falha modelados por distribuições de probabilidade bimodais</i>	55
4.1.5. <i>Normalização das distribuições misturadas</i>	57
4.1.6. <i>Análise de confiabilidade do sistema completo</i>	57
CAPÍTULO 5.....	58

ESTUDO DE CASO.....	58
5.1 . DEFINIÇÃO DO MODELO DE UNIDADE CONDICIONADORA DE AR A SER ANALISADO	58
5.2 . DADOS E INFORMAÇÕES UTILIZADAS NA REALIZAÇÃO DO ESTUDO ..	59
5.3 . DEFINIÇÃO DO DIAGRAMA DE BLOCOS E TIPO DE SISTEMA ANALISADO	60
5.4 . DEFINIÇÃO DOS MODELOS DA DISTRIBUIÇÃO DE CONFIABILIDADE DOS COMPONENTES E SUB-SISTEMAS	62
5.5 . DEFINIÇÃO DO MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA	82
5.6 . ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS SOBRE CONFIABILIDADE DO PRODUTO.....	86
5.7 . ANÁLISE CRÍTICA DO PROCEDIMENTO ADOTADO PARA ANÁLISE DOS DADOS DE GARANTIA.....	90
CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
ANEXOS	100
ANEXO A: RELAÇÃO DE COMPONENTES DA UNIDADE <i>RCA075B</i>	100
ANEXO B: TABELA DE CÓDIGOS E DESCRIÇÃO DE FALHAS APRESENTADAS PELO MODELO DE APARELHO ANALISADO	102

LISTAS

Lista de Figuras

Figura 1. Sistema básico de refrigeração com expansão direta	12
Figura 2. Características do refrigerante durante o ciclo de refrigeração	13
Figura 3. Berçário do Pittsburgh's Allegheny General Hospital	16
Figura 4. Foto publicitária de um dos primeiros modelos de condicionador de ar individual produzido pela Carrier S.A.	17
Figura 5. Vista detalhada de uma unidade condicionadora de ar Springer Carrier, modelo RCA075B.....	18
Figura 6. Ligação entre o estado da variável $X(t)$ e o tempo até falha T	24
Figura 7. Exemplo de Função acumulada de falha $F(t)$	25
Figura 8. Exemplo de Função densidade de probabilidade $f(t)$	25
Figura 9. Exemplo de Função confiabilidade $R(t)$	26
Figura 10. Histograma representando taxa de falhas no tempo.....	29
Figura 11. Curva da Banheira.	30
Figura 12. Função de distribuição empírica obtida e a função de densidade acumulada de uma distribuição normal para 100 valores aleatórios	48
Figura 13. Exemplo de Diagrama de Blocos.	49
Figura 14. Gráficos de Papel de Probabilidade típicos de componentes do produto analisado.	54
Figura 15. Diagrama de Blocos do Produto Analisado.	62
Figura 16. Histograma de frequência da função densidade de probabilidade e gráficos de barras das funções de risco e confiabilidade do componente condensador.	66

Figura 17. Gráficos dos papéis de probabilidade para distribuições Exponencial e Weibull do componente condensador.....	67
Figura 18. Histograma de frequência da função densidade de probabilidade e gráfico de barras das funções de risco e confiabilidade da <i>distribuição 1</i>	70
Figura 19. Gráficos dos papéis de probabilidade para distribuições Exponencial, Weibull e Lognormal da <i>distribuição 1</i>	73
Figura 20. Gráfico gerado pela função confiabilidade da <i>distribuição 1</i>	75
Figura 21. Histograma de frequência da função densidade de probabilidade e gráfico de barras das funções de risco e confiabilidade para os dados da <i>distribuição 2</i>	75
Figura 22. Gráficos dos papéis de probabilidade para as funções Exponencial, Weibull e Lognormal dos dados correspondentes a <i>Distribuição 2</i>	76
Figura 23. Gráfico gerado pela função confiabilidade da <i>distribuição 2</i>	78
Figura 24. Gráfico gerado pela função confiabilidade da soma normalizada das <i>distribuições 1 e 2</i> na Tabela 9.	80
Figura 25. Gráfico da função de confiabilidade do componente condensador considerando apenas a <i>distribuição 1</i>	81
Figura 26. Gráfico da função de confiabilidade do sistema.....	86
Figura 27. Gráficos das funções de confiabilidade dos componentes tubulação e hélice.	88

Lista de Quadros e Tabelas

Quadro 1. Resultados dos testes de aderência para os dados da <i>distribuição 1</i>	73
Quadro 2. Resultados dos testes de aderência para os dados da <i>distribuição 1</i>	74
Quadro 3. Parâmetros do modelo de Weibull para os dados da <i>distribuição 1</i>	74
Quadro 4. Resultados dos testes de aderência para modelo Weibull da <i>distribuição 2</i>	77
Quadro 5. Resultados dos testes de aderência para modelo Lognormal da <i>distribuição 2</i>	77
Quadro 6. Parâmetros do modelo de Weibull para os dados da <i>distribuição 2</i>	77
Tabela 1. Relações entre as funções $F(t)$, $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$	28
Tabela 2. Equações das funções $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$ para diferentes modelos de probabilidade. ...	36
Tabela 3. Valores dos coeficientes c_{11} , c_{22} e c_{12} para cálculo de variâncias e covariâncias em amostragens que seguem modelo de Weibull	45
Tabela 4. Unidades do modelo RCA075B produzidas entre janeiro/1998 e junho/1999.	64
Tabela 5. Informações de tempos-até-falha (TTF) do componente condensador.....	65
Tabela 6. Dados obtidos com aplicação da heurística.....	68
Tabela 7. Simulação de dados de tempos-até-falha (TTF) do condensador.	71
Tabela 8. Dados de tempos-até-falha (TTF) das duas distribuições geradas pela heurística para o condensador.	72
Tabela 9. Resultados obtidos na soma normalizada das funções <i>distribuição 1</i> e <i>distribuição 2</i>	79
Tabela 10. Modelos de distribuições e seus parâmetros dos componentes que não apresentaram mistura de distribuições nos dados de tempos-até-falha.....	82
Tabela 11. Modelos de distribuições e seus parâmetros dos componentes que apresentaram mistura de distribuições nos dados de tempos-até-falha.	83
Tabela 12. Determinação da função de confiabilidade e funções derivadas para o sistema em estudo.	84

Tabela 12. Determinação da função de confiabilidade e funções derivadas para o sistema em estudo (<i>continuação</i>).....	85
Tabela 14. Análise de criticidade dos componentes em relação à confiabilidade do sistema no período de 1 ano.....	87
Tabela 15. Análise de criticidade dos componentes em relação à confiabilidade do sistema no período de 3 anos.	88
Tabela 16. Comparativo entre quantidade de falhas e componentes críticos do produto analisado.	89

RESUMO

Empresas de manufatura alocam uma grande quantidade de recursos no projeto de produtos confiáveis. Quando adequadamente projetados, tais produtos apresentam um número mínimo de falhas operacionais durante seu período de garantia e, de forma geral, durante sua vida útil. Falhas incorridas durante o período de garantia do produto implicam em custos indesejáveis. Assim, a incidência dessas falhas, bem como sua natureza, são normalmente registradas pelas empresas, na busca de informações que permitam aprimorar o projeto de produtos. Modelos de confiabilidade apropriados para estudos de engenharia são freqüentemente desenvolvidos a partir da análise de informações de desempenho em campo dos produtos de interesse. Esta dissertação propõe e exemplifica uma metodologia de análise de confiabilidade de produtos manufaturados, utilizando as informações disponíveis de volume produzido em um período de tempo e dados de tempos-até-falha obtidos da utilização da garantia do produto analisado. Como aplicação, foi realizada a modelagem da distribuição de confiabilidade de um modelo de aparelho condicionador de ar individual. Além da definição do modelo de distribuição da confiabilidade do produto e seus parâmetros, foram identificados os componentes críticos do sistema, os quais apresentam maior impacto sobre a confiabilidade do produto, quando ocorre melhoria de suas distribuições individuais de confiabilidade. O trabalho apresenta, também, uma introdução sobre a teoria e princípio de funcionamento de unidades condicionadoras de ar, bem como uma revisão sobre os conceitos teóricos de confiabilidade, estimativas de parâmetros de modelos de distribuições, métodos de modelagens de distribuições e avaliação de confiabilidade utilizados na metodologia proposta.

ABSTRACT

Manufacturing companies have spent a great amount of resources in developing reliable products. When adequately designed, such products present a small number of failures during their warranty periods and, in general, during their operational life. Failures during the warranty period may cause undesirable costs. Thus, the nature and incidence of these failures are normally registered by companies, in search of clues on how products may be optimized in terms of their performance. Reliability models in engineering projects are usually developed through the analysis of field data on product behavior. This work proposes and exemplifies a methodology for the reliability analysis of manufactured products. Using information on quantities produced and failures observed during the warranty period. The modeling of the reliability distribution of a window room air conditioning is presented as an application. The work also presents an introduction to the theoretical and functional principles of air conditioning equipments as well as a review of basic concepts.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. COMENTÁRIOS INICIAIS

Falhas em produtos geram insatisfação em clientes, além de custos mensuráveis e custos de difícil mensuração pelas empresas. Custos mensuráveis podem incluir reposição de componentes ou de todo o produto, mão-de-obra para reparo, logística e, muitas vezes, necessidade de um departamento exclusivo para atender as solicitações de substituições ou reparos de produtos em campo. Custos de difícil mensuração podem incluir a perda de novos negócios e danos à imagem do produto e da empresa junto ao consumidor.

Uma das ferramentas a ser utilizada na redução do índice de falhas de produtos manufaturados é a Análise da Confiabilidade. Através de um estudo de Confiabilidade, é possível identificar modos e efeitos de falhas, aspectos de projeto, manufatura, manutenção e uso que podem afetar a probabilidade de falha do produto. Para tanto, é necessário, primeiramente, adquirir conhecimento sobre como o produto opera, seu projeto e modos de falha.

Durante o desenvolvimento de produtos, equipes de projeto deparam-se com problemas inerentes à variabilidade de materiais, processos e aplicações. A visão do projeto, na maioria dos casos, é determinística, não atendo-se à variabilidade dos parâmetros de projeto. Parâmetros básicos como massa, dimensões, coeficientes de fricção, força e esforço não são absolutos, mas sujeitos à variabilidade devido ao processo, variações de materiais, fatores humanos e aplicações. Alguns parâmetros também variam com o tempo. Entender as causas e efeitos da variabilidade é, portanto, necessário para a criação de produtos confiáveis e correção de falhas em produtos já desenvolvidos (O'Connor, 1995).

Por outro lado, existem problemas práticos que dificultam aplicações de conceitos estatísticos em problemas de Engenharia. Em muitos casos, por exemplo, os problemas surgidos apresentam muitos graus de incerteza ocasionados principalmente por fatores humanos na produção e uso dos produtos. Os métodos estatísticos existentes demandam *expertise* na resolução de complexos sistemas de equações matemáticas, o que pode tornar inviável a sua aplicação.

Atualmente, novos desafios estão surgindo na área de desenvolvimento de produtos. A necessidade de redução em custos e prazos de desenvolvimento, a maior exigência dos consumidores quanto a qualidade e segurança, a rápida evolução de novos materiais e novos métodos para análise de sistemas complexos contribuem para que análises de Confiabilidade tenham absoluta relevância no desenvolvimento de produtos.

Neste trabalho, propõe-se uma nova metodologia para a análise de confiabilidade de produtos manufaturados a partir de informações de tempos-até-falha obtidos da utilização de sua garantia. A metodologia proposta é aplicada em um estudo de caso, na modelagem da confiabilidade de unidades condicionadoras de ar individuais. Este produto, popularmente conhecido como “ar-condicionado individual”, controla as condições de temperatura e umidade no ambiente em que está instalado e possui uma grande variedade de modelos e capacidades. Neste estudo, analisou-se um modelo de unidade condicionadora de ar individual, tendo sido definida a curva de confiabilidade do produto a partir da metodologia proposta.

Através dos dados de produção e dados históricos de falhas em campo, existentes no banco de dados de utilização da garantia do produto analisado, é realizada, inicialmente, a modelagem matemática da confiabilidade dos vários sub-sistemas que compõem o produto. A seguir, analisa-se a confiabilidade do produto como um todo e, por fim, apresentam-se conclusões e sugestões de novos estudos a serem desenvolvidos com base na modelagem proposta neste trabalho.

Esta dissertação também apresenta uma revisão bibliográfica centrada em dois temas principais. Inicialmente, apresenta-se uma introdução sobre a teoria e princípio de funcionamento de unidades condicionadoras de ar, as classificações utilizadas para este tipo de produto e uma descrição dos componentes e suas funções no modelo de aparelho analisado. Na seqüência, apresenta-se uma revisão sobre os conceitos teóricos de confiabilidade, estimativas de parâmetros de modelos de distribuições, e métodos de modelagens de distribuições e avaliação de confiabilidade utilizados na metodologia proposta.

1.2. OBJETIVOS

Os objetivos, principal e secundários, buscados a partir da realização deste trabalho, são apresentados abaixo.

1.2.1. Objetivo Principal

Este trabalho tem por objetivo principal definir uma metodologia que possa ser aplicada na modelagem e análise da confiabilidade de produtos manufaturados, utilizando dados de tempos-até-falha do produto procedentes da utilização de sua garantia. Embora seja focado um tipo específico de bem manufaturado, qual seja, aparelhos condicionadores de ar, é objetivo deste estudo definir um método de modelagem e análise que possa ser utilizado em diferentes produtos manufaturados existentes no mercado.

1.2.2. Objetivos Secundários

Os objetivos secundários almejados no desenvolvimento deste trabalho são:

- colaborar com a empresa enfocada no estudo de caso na análise da confiabilidade de um modelo específico de unidade condicionadora de ar, tipo individual, produzido em larga escala no Brasil;
- ampliar a bibliografia sobre análise de confiabilidade de bens manufaturados reparáveis e, em específico, de unidades condicionadoras de ar.

1.3. LIMITAÇÕES

As limitações desta dissertação de mestrado vêm listadas nos parágrafos abaixo. As duas primeiras limitações estão relacionadas ao estudo de caso apresentado; a última limitação é de caráter teórico.

O estudo de caso apresentado neste trabalho foi realizado em uma empresa específica do setor eletro-eletrônico e, portanto, não faz parte deste trabalho a generalização dos resultados obtidos a outras empresas do setor.

Não foi investigado o uso de técnicas não paramétricas de modelagem, como *jackknife* e *bootstrap* (ver Efron & Tibshirani, 1998 e Efron, 1981) para modelagem da enorme massa de dados existentes.

Restrita é a bibliografia disponível sobre casos práticos de modelagem de confiabilidade de bens de consumo. Embora tenha sido encontrado um grande número de referências sobre confiabilidade, a grande maioria do material encontrado apresenta exemplos teóricos, em que não são considerados aspectos práticos, como dados imprecisos e volume elevado de produção, vivenciados dentro de empresas. Esta restrição não se constitui exatamente em uma limitação do trabalho, mas sim em uma dificuldade encontrada no seu desenvolvimento.

1.4. MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O método de pesquisa científica adotado nesta dissertação pode ser enquadrado na categoria de *Pesquisa Ação*, conforme proposto por Patton (1990) *apud* Roesch (1994). A Pesquisa Ação pode ser descrita como uma sistemática para resolução de problemas específicos dentro de um grupo, organização e empresa. A Pesquisa Ação torna-se parte do processo de mudança promovido pela pesquisa, ao encorajar as pessoas envolvidas com o programa a analisar seus próprios problemas com vistas à sua resolução. Em estudos baseados na Pesquisa Ação, dificilmente consegue-se distinguir entre as etapas de pesquisa e de ação. Por tratarem-se de métodos informais e específicos ao problema analisado e ao contexto em que se insere, as etapas de pesquisa e ação terminam por intercalar-se nos estudos, sendo difícil sua diferenciação. A pesquisa ação pressupõe um elevado grau de envolvimento entre pesquisador e pesquisado, ao trabalhar uma questão de interesse compartilhado.

Um resumo do método de trabalho utilizado nesta dissertação contempla quatro etapas. Inicialmente, fez-se uma *Revisão Bibliográfica*. O objetivo principal nesta etapa era revisar conceitos teóricos considerados necessários na realização do trabalho. Também foram pesquisadas abordagens para o tratamento estatístico de problemas similares àquele apresentado neste estudo de caso. Na seqüência, fez-se um *Levantamento de Dados*. Nesta etapa, foram coletados os dados necessários para o desenvolvimento da modelagem da confiabilidade do produto em estudo. Também foram buscadas informações adicionais que permitissem melhorar a precisão do modelo definido neste trabalho. A terceira etapa foi de *Definição da Metodologia a ser Utilizada*. Após a pesquisa bibliográfica e o levantamento dos dados necessários para este estudo, foi definida a metodologia utilizada na modelagem de

confiabilidade deste trabalho. Finalmente, empreendeu-se um *Estudo de Caso*. Nele, foi realizada uma aplicação prática do método de análise de confiabilidade definida nesta dissertação.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, com os conteúdos apresentados nos parágrafos abaixo.

No capítulo 1 são apresentados os objetivos primários e secundários, delimitações e método de desenvolvimento da dissertação.

O capítulo 2 apresenta uma introdução teórica sobre aparelhos condicionadores de ar. Além de um breve histórico, são apresentados o princípio de funcionamento e a classificação de unidades condicionadoras de ar. Também são abordados, de maneira resumida, alguns conceitos físicos necessários para compreensão do princípio de funcionamento deste tipo de aparelho.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre Confiabilidade. São apresentados conceitos teóricos, definições e equações de confiabilidade necessárias para a compreensão da metodologia proposta e das análises realizadas nos capítulos seguintes da dissertação.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia proposta neste estudo, para modelagem e análise da confiabilidade de bens manufaturados a partir de dados de utilização de sua garantia.

No capítulo 5 é realizado um estudo de caso, onde a metodologia definida no capítulo 4 é aplicada na modelagem e análise da confiabilidade de um modelo específico de condicionador de ar.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS BÁSICOS SOBRE UNIDADES CONDICIONADORAS DE AR

Neste capítulo são apresentados os princípios de funcionamento das unidades condicionadoras de ar em geral, bem como características particulares dos modelos individuais, objeto de estudo deste trabalho. Aparelhos condicionadores de ar têm como função realizar troca de calor com o ambiente climatizado, no intuito de criar uma condição de conforto térmico aos ocupantes do ambiente, mantendo, para tanto, condições específicas de temperatura e umidade. Em alguns casos especiais, ambientes devem ser mantidos sob valores especificados de temperatura e umidade devido a equipamentos existentes ou experimentos realizados no interior destes espaços. Como exemplo, pode-se citar equipamentos utilizados em centrais telefônicas e computadores que exigem condições restritas de temperatura e umidade para operarem sem risco de falhas. Também alguns laboratórios necessitam condições ambientais especiais devido a experimentos neles realizados (Carrier, 1972 e Trane, 1977).

Este capítulo encontra-se dividido nas seguintes seções e conteúdos. O item 2.1 apresenta o princípio do sistema de refrigeração; no sub-item 2.1.1, são apresentadas as propriedades termodinâmicas de substâncias utilizadas em sistemas de refrigeração; o sub-item 2.1.2 descreve o princípio do ciclo de refrigeração de condicionadores de ar. O item 2.2 apresenta uma descrição de unidades condicionadoras de ar; no sub-item 2.2.1, é apresentado o histórico do surgimento dos aparelhos de ar condicionado; no sub-item 2.2.2, é descrito o funcionamento e apresentado os componentes de uma unidade condicionadora de ar.

2.1. PRINCÍPIO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Para compreender os processos que ocorrem nos aparelhos condicionadores de ar, é necessário destacar alguns conceitos elementares de termodinâmica e transferência de calor.

2.1.1. Propriedades Termodinâmicas

Uma propriedade é um atributo da matéria que pode ser avaliada quantitativamente, tal como temperatura, pressão e densidade. Processos tais como resfriamento, aquecimento ou desumidificação não são propriedades, mas para sabermos se um dado processo ocorreu com o ar e qual foi sua intensidade, precisamos conhecer as propriedades do ar antes e depois do processo. Por exemplo, se o ar entra na serpentina a 26,7°C e sai a 14°C, sabemos que houve um resfriamento.

Os conceitos e definições de termodinâmica apresentados a seguir estão baseados nos trabalhos de Wylen & Sonntag (1973), Creder (1985), Costa (1974) e Wander (1995).

a) Temperatura

Representa o estado térmico de uma substância e sua capacidade de trocar energia com o meio. Uma substância a uma temperatura mais alta pode ceder calor a outra com temperatura inferior. A temperatura medida através de termômetros é usualmente denominada temperatura de *bulbo seco*. A temperatura de *bulbo úmido* está diretamente relacionada com a umidade do ar. Quando o ar entra em contato com a água a temperatura ambiente, ocorre a evaporação de água. A energia para esta evaporação é retirada do próprio ar e, conseqüentemente, ocorre uma diminuição na sua temperatura. A quantidade de água evaporada depende da quantidade de água que já existe no ar em forma de vapor, já que o ar não pode absorver água indefinidamente. Assim, quanto maior for a umidade do ar, menor será a evaporação de água e menor será a diminuição de temperatura. Conseqüentemente, a temperatura de bulbo úmido ficará mais próxima da temperatura de bulbo seco. Quando a umidade é baixa, a temperatura de bulbo úmido pode ser menor que a temperatura de bulbo seco.

O ar não pode ser resfriado além de uma certa temperatura sem que ocorra o processo de condensação da água presente na forma de vapor. Isso é o que acontece, por exemplo, quando o ar encontra uma superfície fria. A temperatura em que ocorre a condensação do vapor de água presente no ar é denominada temperatura *de orvalho*. A diferença entre a temperatura de bulbo seco e a temperatura de orvalho aumenta à medida que a umidade do ar diminui, já que ocorre a diminuição do vapor de água disponível para condensação.

b) Umidade Absoluta e Relativa

A umidade *absoluta* corresponde a quantidade de água presente no ar. Sabe-se que a capacidade de absorção de água do ar aumenta com a temperatura. Associada a cada temperatura, existe uma quantidade máxima de vapor que pode ficar misturada com o ar. A relação entre a umidade absoluta e essa quantidade máxima é denominada umidade *relativa*. Por exemplo, uma umidade relativa de 50% significa que o ar ainda pode absorver uma quantidade de vapor igual àquela já nele existente; além desta quantidade, o vapor de água não é mais absorvido e se condensa.

c) Pressão

Pressão corresponde à força normal aplicada por unidade de área da superfície. Denomina-se por *pressão manométrica* o valor da pressão excedente ao valor da pressão atmosférica. Fluidos movimentam-se devido a diferença de pressão (deslocando-se de um local de alta pressão para outro com menor pressão).

d) Densidade e Volume Específico

A *densidade* de uma substância é definida como a massa ocupada por uma unidade de volume. O *volume específico* é o volume ocupado por uma unidade de massa. A massa de uma substância não muda em função de sua temperatura, pressão ou estado; o volume ocupado por esta massa, por outro lado, pode-se alterar. Um aumento de temperatura sem alteração de pressão resulta em expansão, principalmente em gases e vapores, com aumento de volume específico e diminuição de densidade. De maneira geral, quanto maior a temperatura, menor a densidade e menor o fluxo de massa em kg/s.

e) Calor

O calor *específico* de uma substância é a energia necessária para elevar em 1°C a temperatura de 1 kg desta substância. Em outras palavras, é a quantidade de energia que um fluido absorve para mudar sua temperatura. Quanto maior for o calor específico do fluido, maior a energia necessária para promover mudanças em sua temperatura.

O calor *latente* é a energia absorvida por um fluido ao mudar de fase, enquanto não houver alteração em sua temperatura. Quando ocorrer mudança de temperatura, a energia absorvida pelo fluido, antes ou após a mudança de fase, compõe o chamado calor *sensível*. Em ambos os casos, o fluido absorve ou rejeita calor e, portanto, muda sua *entalpia* (definida na seqüência). No processo de resfriamento e desumidificação do ar são retirados, simultaneamente, calor sensível, pela diminuição de temperatura e, calor latente, pela condensação do vapor de água contido no ar.

f) Entalpia

A *entalpia* de uma substância corresponde à quantidade de energia nela retirada ou inserida. Assim, a remoção ou adição de calor a uma substância altera sua entalpia. Ao contrário da temperatura, entalpia não é medida em valores absolutos, já que é difícil determinar a quantidade real de energia em uma substância. Por esse motivo, os valores dados são todos relativos a uma base escolhida arbitrariamente. Diferenças de entalpia expressam a quantidade de calor transferido em um processo térmico.

g) Propriedades Características do Equilíbrio Líquido-Vapor

A maioria dos sistemas de aquecimento ou refrigeração operam baseados na mudança de fase, líquido-vapor e vice-versa, de substâncias. O mecanismo de mudança de fase líquido-vapor de uma substância ocorre da seguinte maneira. A substância líquida recebe calor até alcançar sua temperatura de ebulição (e mudança de fase). Durante o processo de ebulição, a temperatura se mantém constante até que todo o líquido tenha-se transformado em vapor. A mudança de pressão implica em mudança na temperatura de ebulição da substância: uma maior pressão implica em aumento nesta temperatura, e vice-versa. A pressão em que ocorre a ebulição de uma substância é denominado *pressão de vapor de saturação* ou, simplesmente, *pressão de saturação*. É importante ressaltar que para cada pressão de saturação existe somente uma temperatura de evaporação ou condensação. Portanto, ao identificar-se a temperatura de condensação de um fluido qualquer, determina-se, por conseqüência, a sua pressão de saturação.

2.1.2. Ciclo de Refrigeração

Unidades condicionadoras de ar trabalham com, no mínimo, dois fluidos no seu sistema de refrigeração. No caso do tipo de aparelho em análise, um fluido é o próprio ar e o outro, chamado refrigerante, é o monoclorodifluorometano (CHClF_2), comercialmente denominado

Freon R22. Esse refrigerante atinge as temperaturas requeridas para o funcionamento do aparelho, sejam elas baixas ou altas, dentro das condições operacionais adequadas (Carrier, 1972).

O sistema utilizado nos aparelhos de ar condicionado individual é a expansão direta com condensação a ar. Nesse sistema, o refrigerante evapora em um trocador de calor denominado serpentina e a condensação é feita por outra serpentina, que também troca calor com o ar.

Conforme apresentado na seção anterior, fluidos apresentam algumas características especiais, quando em mudança de estado. Uma dessas características é de interesse nesta apresentação, a saber: ao mudar-se a pressão exercida sobre o fluido, muda-se a sua temperatura de evaporação. Quanto mais baixa a pressão, menor será a temperatura de evaporação do fluido.

Ao introduzir-se um líquido em um vaso, onde inicialmente existe vácuo, com paredes mantidas a uma temperatura constante, verifica-se a evaporação imediata do líquido. Nesse processo, o calor latente de vaporização será fornecido pelas próprias paredes do vaso. O efeito de resfriamento resultante nesse processo é o ponto de partida do ciclo de refrigeração (Wander, 1995).

A medida que ocorre a evaporação do líquido no vaso descrito acima, a pressão dentro do vaso sobe até que se alcance um valor máximo de temperatura – a pressão de vapor de saturação. Depois disto, nenhum líquido se evaporará e, naturalmente, o efeito de resfriamento cessará. Qualquer quantidade adicional de fluido introduzido permanecerá em estado líquido, no fundo do vaso. Ao remover-se parte do vapor do vaso através de sucção, a pressão tenderá a cair, provocando uma evaporação adicional do líquido. Mantendo-se o fluxo de líquido e a bomba em funcionamento contínuo, o processo de resfriamento descrito acima prossegue intermitentemente.

Para que o ciclo de refrigeração possa ocorrer, são necessários os seguintes elementos (Wander, 1995): (i) líquido refrigerante, (ii) recipiente onde a vaporização e o resfriamento possam ocorrer; este recipiente é o evaporador, (iii) bomba ou ventilador para remoção do vapor, denominado compressor, e (iv) fornecimento de energia, tal que o evaporador mantenha-se a uma temperatura constante. No aparelho em estudo, utiliza-se o fluxo de um fluido mais quente sobre as paredes externas do vaso para realização da evaporação do refrigerante.

O processo descrito acima demanda um consumo contínuo de líquido refrigerante o que, muitas vezes, resulta em um equipamento economicamente inviável. Esse processo é otimizado convertendo-o em um ciclo contínuo. A etapa inicial no ciclo de refrigeração ocorre com a mudança de estado líquido-vapor do elemento refrigerante; esta etapa foi descrita acima. Para fazer o vapor retornar ao estado líquido e, assim, completar o ciclo de refrigeração, é necessário o seu resfriamento. Os meios mais comumente utilizados no resfriamento do refrigerante são (a) água ou (b) ar, ambos a uma temperatura mais elevada do que a temperatura do ar que está sendo resfriado no evaporador. Como a temperatura de condensação deve ser ainda mais elevada que a desse meio, a pressão de vapor correspondente à temperatura de condensação deve ser bem mais elevada do que a pressão no evaporador. O aumento desejado de pressão é provocado pela bomba que age como um compressor.

A liquefação do refrigerante é realizada num condensador que é, essencialmente, um recipiente resfriado externamente pelo ar ou água. O gás refrigerante aquecido a alta pressão é conduzido do compressor para o condensador, onde se liquefaz. Como estão presentes no condensador o gás e o líquido refrigerante a uma mesma pressão, completa-se o ciclo através da utilização de uma válvula agulha ou outro dispositivo regulador que reduza a pressão do refrigerante, para injeção no evaporador. O dispositivo regulador é um componente essencial de uma instalação de refrigeração, sendo normalmente designado por *válvula de expansão*. A Figura 1 apresenta um o circuito básico de refrigeração com a expansão realizada por válvula de expansão utilizado em unidades condicionadoras de ar.

Como visto acima, para que o ciclo de refrigeração funcione nas condições de projeto é necessário ajustar as pressões e correspondentes temperaturas de trabalho utilizando, para tanto, o fluido refrigerante. Se o fluido refrigerante selecionado for água, por exemplo, serão necessárias pressões muito baixas, o que resultaria em problemas de vazamento no equipamento. Com o objetivo de solucionar esse problema, foram desenvolvidos diversos fluidos especiais (amônia, Dielene), muitos dos quais causadores de danos na camada atmosférica de ozônio. O fluido *Freon R22*, utilizado na maioria dos aparelhos domésticos, apresenta temperatura usual de evaporação de 7°C, o que corresponde a uma pressão absoluta de 621 kPa ou 90 psia, 6 vezes maior que a pressão atmosférica (Wander 1995). A temperatura de condensação do R22 é de 54°C, correspondente a 2126,5 kPa ou 308 psia, 21 vezes maior que a pressão atmosférica.

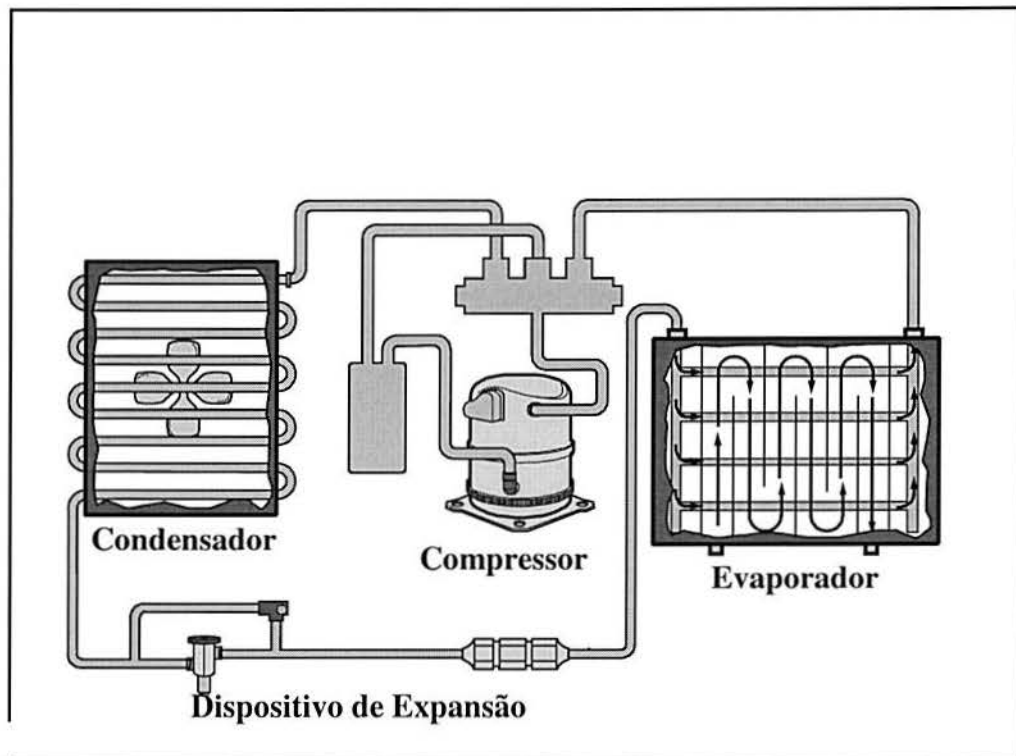


Figura 1. Sistema básico de refrigeração com expansão direta (Carrier, 1997).

O fluido refrigerante apresenta diferentes funções e características ao longo do ciclo de refrigeração, descritas a seguir. Os pontos listados abaixo referem-se a eventos característicos do funcionamento de aparelhos de ar-condicionado. Os locais de ocorrência dos eventos no aparelho são listados, utilizando como referência a Figura 2.

Ponto 1: Sucção do Compressor

No ponto de entrada do fluido refrigerante no compressor, denominado *sucção do compressor*, o fluido refrigerante encontra-se no estado de vapor superaquecido, a baixa temperatura. O superaquecimento caracteriza-se pelo aumento da temperatura além do ponto de evaporação do fluido refrigerante, mantida uma pressão constante.

O superaquecimento garante que o compressor não será danificado com a entrada do líquido (Carrier, 1972). No ponto 1, a pressão do sistema atinge seu valor mínimo. Isso se deve ao fato do refrigerante, ao longo do evaporador, sofrer uma perda de carga devida ao atrito do refrigerante com as paredes da tubulação que o conduz.

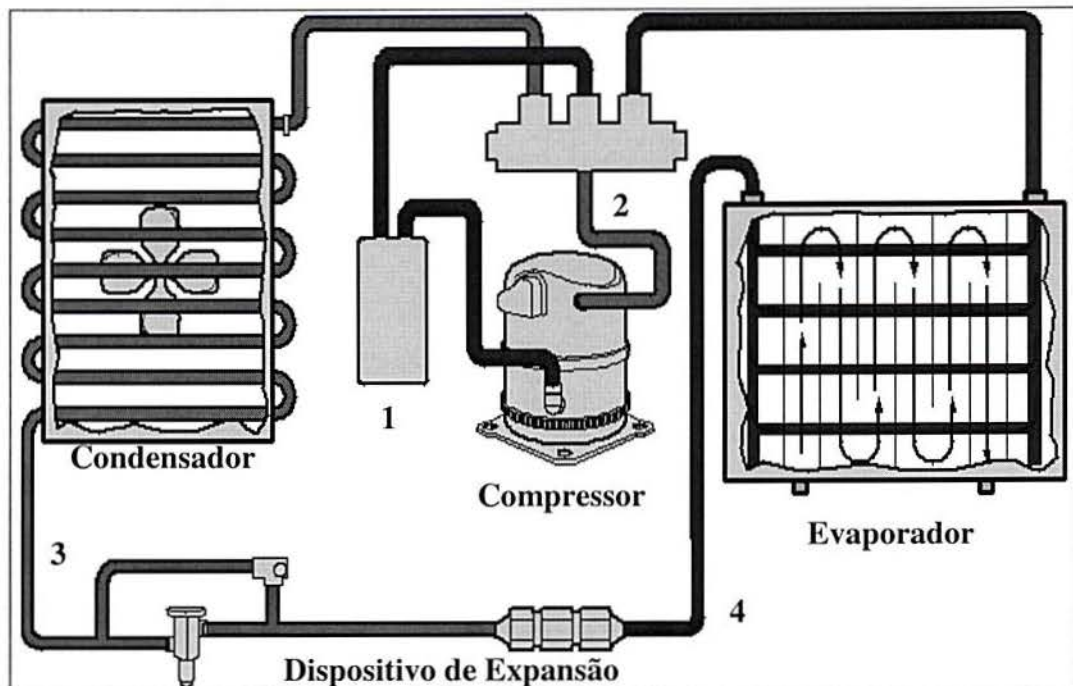


Figura 2. Características do refrigerante durante o ciclo de refrigeração (Carrier, 1997).

Depois de passar pelo evaporador, o refrigerante já retirou calor do ar para mudar de fase, apresentando uma entalpia razoavelmente alta. Como a troca de calor foi predominantemente latente, sua temperatura ainda está baixa, geralmente entre 15 e 20°C.

Ponto 2: Descarga do Compressor

Conforme mencionado anteriormente, a temperatura de condensação do refrigerante deve ser mais alta que a temperatura do agente externo utilizado na condensação (geralmente ar ou água). A pressão correspondente a essa temperatura é a pressão de condensação. O refrigerante entra no compressor superaquecido, saindo com uma temperatura ainda mais alta, além da temperatura de condensação. Esse aumento na temperatura do refrigerante deve-se, essencialmente, ao atrito entre o refrigerante e as paredes do compressor. O aquecimento das paredes da câmara de compressão eleva a temperatura de descarga do refrigerante, sendo este o ponto de maior temperatura e pressão do sistema (geralmente 80~90°C e pressão de 300psi). A entalpia neste ponto também atinge seu ponto máximo. Depois de absorver energia no evaporador, o refrigerante absorve a energia do trabalho de compressão, necessária para a continuidade do ciclo.

Ponto 3: Saída do Condensador

No condensador, o vapor superaquecido que sai do compressor é transformado em líquido sub-resfriado. Depois de liberar calor para a atmosfera, o refrigerante encontra-se em estado líquido, a alta temperatura e com maior densidade. Como a transferência de calor é latente na maior parte do processo, a temperatura na saída do condensador deveria ser igual à temperatura de condensação; todavia, é desejável diminuir esta temperatura, o que é feito através da operação de sub-resfriamento. O sub-resfriamento é importante para garantir um selo de líquido na entrada da válvula de expansão, além de favorecer a capacidade de refrigeração no evaporador. No sub-resfriamento normal, a temperatura do refrigerante é diminuída em aproximadamente 5°C. A temperatura do refrigerante no estado líquido fica um pouco abaixo dos 50°C.

Na saída do condensador, a entalpia é a mais baixa do ciclo, já que o objetivo é justamente devolver ao refrigerante sua capacidade de absorção de energia, através de uma entalpia baixa. O refrigerante absorve calor do ambiente no evaporador e recebe mais calor adicionado pelo compressor. Todo esse calor será liberado para o exterior, de modo que o ciclo possa recomeçar.

Ponto 4: Saída do Dispositivo de Expansão

Neste ponto, o refrigerante começa a realizar o trabalho para o qual foi projetado; isto é, trocar calor com o ambiente a ser climatizado. O refrigerante sofre uma redução de pressão devido a restrição oferecida pelo dispositivo de expansão. Como não há acréscimo de trabalho nem troca de calor na expansão, a entalpia permanece a mesma do ponto anterior. Durante a expansão do refrigerante dentro da válvula de expansão, o fluido passa do estado líquido para um estado de líquido e vapor. Esta vaporização parcial é decorrência do calor absorvido pelo próprio fluido. Esta absorção de calor por parte do fluido ocorre devido a alteração da sua pressão. Como consequência, tem-se uma diminuição de temperatura e pressão do fluido refrigerante.

Este é o ponto mais frio do sistema. Depois do fluido refrigerante perder toda sua energia no condensador, diminui ainda mais sua temperatura no dispositivo de expansão, para que possa trocar calor no evaporador. A partir deste ponto, o refrigerante entra no evaporador e o ciclo de refrigeração inicia novamente.

2.2. UNIDADES CONDICIONADORAS DE AR

O ar condicionado é definido como o controle simultâneo da temperatura, umidade, qualidade e movimento do ar, numa sala, ambiente ou edifício condicionado. Uma unidade condicionadora de ar consiste de uma superfície de transferência de calor para aquecimento e resfriamento, um ventilador para a circulação do ar, meios de limpeza do ar, motor, transmissão e gabinete (Trane, 1977).

Além destes componentes, aparelhos de ar condicionado necessitam de sistemas de compressão e condensação do fluido refrigerante e sistema de controle. Estes sistemas podem ser incorporados ao gabinete principal da unidade ou serem instalados remotamente, sendo interligados ao gabinete da unidade condicionadora via tubulações de refrigeração e interligações elétricas.

2.2.1 Histórico

Willis Carrier, engenheiro formado pela Universidade de Cornell, desenvolveu em 1902 o processo mecânico que permite retirar calor do ar. Em 1914, o mesmo Willis Carrier produziu a primeira unidade condicionadora de ar para atender os problemas específicos de uma empresa gráfica chamada Sackett-Wilhelms Lithography and Publishing Co., situada em New York, USA. Esta empresa estava tendo problemas com trabalhos de impressão durante os meses quente de verão. O papel, absorvendo a umidade do ar, estava-se dilatando, o que gerava imagens borradas e obscuras. Carrier desenvolveu uma máquina que fazia circular o ar por dutos artificialmente resfriados. Este processo, que controlava a temperatura e umidade, foi o primeiro exemplo de condicionamento de ar contínuo por processo mecânico.

Em 1914, foi realizada a primeira aplicação residencial de sistema de ar condicionado em uma mansão localizada na cidade Minneapolis, USA. No mesmo ano, também foi concluída a primeira instalação hospitalar de um sistema de ar condicionado. O sistema, instalado em um berçário de partos prematuros no Pittsburgh's Allegheny General Hospital (USA), introduzia umidade extra no ambiente do berçário, ajudando a reduzir a mortalidade infantil causada por desidratação.

Na década de 20, foi desenvolvido o Dilene, fluido refrigerante que substituiu a amônia nos sistemas condicionadores de ar. O ar condicionado tornou-se mais acessível ao público, sendo instalados sistemas condicionadores de ar em teatros, lojas de departamentos e prédios públicos dos Estados Unidos, inclusive o Senado Americano (em 1928) e os escritórios executivos da Casa Branca (em 1930).

No final da década de 30, foi desenvolvido um fluido refrigerante não inflamável – o freon, que tornou as unidades condicionadoras de ar mais seguras, baratas e possibilitou o desenvolvimento de máquinas de refrigeração com menores capacidades. Com isto surgiram as primeiras unidades condicionadoras de ar residenciais.

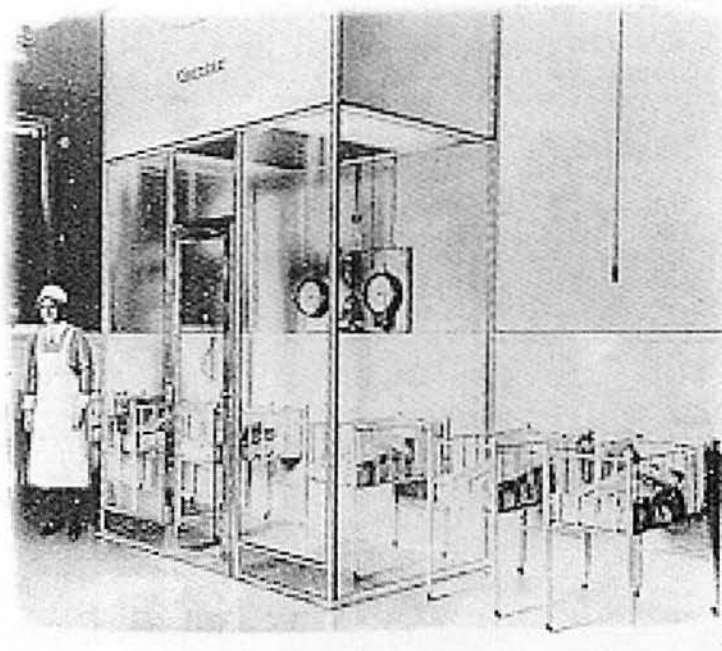


Figura 3. Berçário do Pittsburgh's Allegheny General Hospital (Springer Carrier, 1990).

Durante a década de 40, pequenos estabelecimentos comerciais passaram a utilizar condicionadores de ar, tendo estes ainda custo muito alto para aplicação residencial. Somente nos anos 50 iniciou-se a produção em massa de unidades relativamente eficientes para aplicações residenciais, tornando-os acessíveis aos consumidores de classe média dos Estados Unidos. Estas unidades, montadas em caixas de aço para instalação suspensas, foram os primeiros aparelhos condicionadores de ar individuais fabricados.



Figura 4. Foto publicitária de um dos primeiros modelos de condicionador de ar individual produzido pela Carrier S.A. (Springer Carrier, 1990).

2.2.2. Descrição de Operação de Unidades Condicionadoras de Ar Individuais

Unidades condicionadoras de ar podem ser classificadas de diversas formas, conforme o tipo de classificação escolhido (por capacidade de refrigeração, tipo de condensação, tipo de insuflamento, etc.).

No Brasil, comercialmente, aparelhos condicionadores de ar são divididos nos seguintes grupos: (i) individuais – são aparelhos completos, com capacidade de refrigeração de até 30000 Btu/h, que atendem a um único ambiente; (ii) *splits* – possuem dois módulos interligados, evaporador e condensador; o módulo *evaporador* atende ao ambiente condicionado e o módulo *condensador* possui o compressor e realiza a troca de calor com o ambiente externo; este tipo de unidade possui uma grande faixa de capacidade, de 10000 a 120000 Btu/h, existindo modelos que atendem a um único ambiente e modelos que devem ser conectados a rede de dutos de insuflamento e atendem a diversos ambientes independentes; (iii) *self contained* – unidades com capacidade de 5 a 44 toneladas de refrigeração (uma

tonelada de refrigeração, ou TR, corresponde a 12.000 Btu/h), possuem todos os componentes, inclusive compressor e condensador, inseridos em um único gabinete; normalmente são utilizados para atender sistemas de climatização comerciais de médio porte, como lojas, agências bancárias, escritórios; (iv) preparadores de água gelada (*chillers*) – são unidades com capacidade de 15 a, aproximadamente, 350 toneladas de refrigeração (TR) que produzem água gelada (ou aquecida, conforme a finalidade) que será utilizada em sistemas de ar condicionado central de prédios comerciais de grande porte, como supermercados, hospitais, *shopping centers* e aeroportos; e (v) *fan coils* – unidades dotadas apenas de trocador de calor e ventilação e que utilizam a água gelada, produzida por *chillers*, para troca de calor com o ambiente a ser climatizado; possuem uma ampla faixa de capacidade refrigeração, podendo atender desde um pequeno ambiente, como uma sala comercial, até a área total de um grande supermercado.

A Figura 5 apresenta uma vista detalhada do modelo de condicionador de ar utilizado neste estudo, com seus componentes numerados.

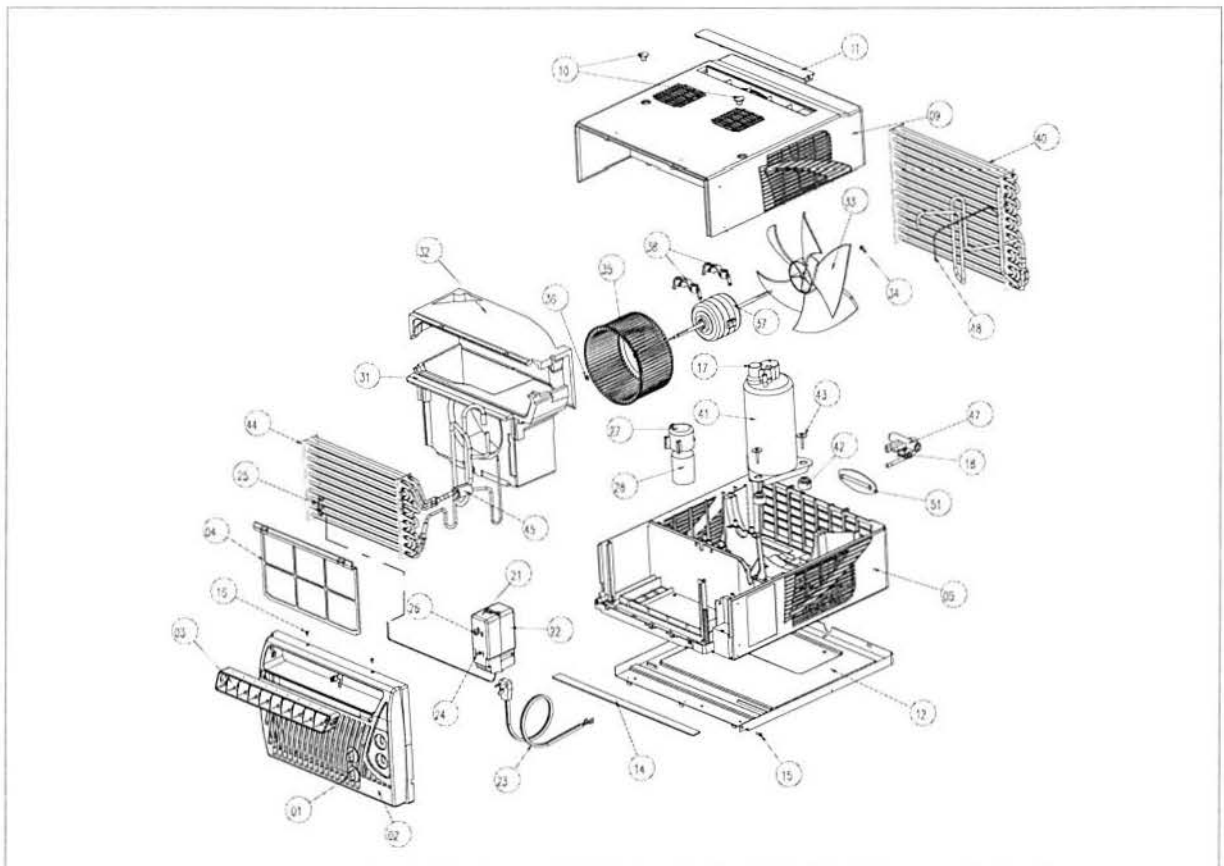


Figura 5. Vista detalhada de uma unidade condicionadora de ar Springer Carrier, modelo RCA075B.

Na Figura 5 podem ser vistos os quatro componentes básicos de um sistema de refrigeração, já descritos na seção 2.1.2, além de todos os demais componentes utilizados no modelo de condicionador de ar deste estudo.

Os componentes básicos do sistema de refrigeração são o compressor (item 41), condensador (item 40), o evaporador (item 44) e o dispositivo de expansão (item 48). Nos aparelhos condicionadores de ar individuais, o tipo de dispositivo de expansão utilizado é o tubo capilar. Este componente é utilizado em sistemas de refrigeração até 35000 Btu/h e é constituído de um tubo de cobre, com diâmetro e comprimento calculado para que realize a função de expansão, conforme explicado na seção 2.1.2. O condensador e o evaporador são trocadores de calor do tipo serpentina (Wander, 1995).

O motor do ventilador (item 37) possui eixo duplo, onde são conectados a turbina (item 35) e a hélice (item 33). A função da turbina é criar uma movimentação de ar no ambiente condicionado para que possa ocorrer a troca de calor deste ambiente com o evaporador do aparelho. O ar é insuflado através do conjunto caracol (itens 31 e 32) para o ambiente condicionado e retorna ao aparelho através da frente plástica (item 02), passando pelo filtro de ar (item 04) e evaporador, onde é retirado calor do ar ambiente pelo fluido refrigerante que está passando na tubulação da serpentina evaporadora. Após o evaporador, o ar é novamente insuflado no ambiente, fechando o ciclo. A temperatura do ar insuflado é aproximadamente 12°C. A função da hélice é incrementar a liberação de calor do fluido refrigerante para a atmosfera no condensador, aumentando a capacidade de troca de calor desta serpentina com o meio externo e, conseqüentemente, melhorando o rendimento do sistema de refrigeração da unidade.

No painel de controle (item 21) estão localizados a chave seletora (item 26) e o termostato (item 24). A função da chave seletora é ajustar a unidade para a função desejada, ventilação ou refrigeração, na velocidade de ventilação escolhida (alta ou baixa). O termostato permite o ajuste da temperatura no ambiente condicionado. Este componente possui um sensor fixado no lado externo do evaporador que realiza a leitura da temperatura no retorno do ar à unidade condicionadora. Comparando a temperatura no retorno do ar ao ajuste realizado pelo usuário, o termostato aciona ou desliga o compressor, de forma que a temperatura permaneça o mais próximo possível da temperatura regulada no seu cursor.

Outros componentes relevantes neste modelo são o filtro de ar (item 04), já citado acima, que tem como finalidade impedir que partículas de sujeira sejam aspiradas pela turbina e novamente lançadas no ambiente condicionado, o capacitor duplo (item 28), com dupla

capacitância, necessário para acionamento do motor da ventilação e motor do compressor por serem ambos motores de indução, o rabicho (item 23), cabo de alimentação elétrica da unidade, as conchas inferior e superior (item 09) e o chassi (item 12) da unidade.

Os demais componentes na Figura 5 são elementos de fixação e acessórios. No Anexo A, é apresentada a relação completa de componentes da unidade mostrada na Figura 5.

CAPÍTULO 3

REVISÃO SOBRE CONFIABILIDADE

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os fundamentos, conceitos, funções, estimativas, parâmetros, distribuições e testes referentes à Confiabilidade utilizados neste trabalho. Os conteúdos expostos basearam-se majoritariamente nos trabalhos de Elsayed (1996), Hoyland & Rausand (1994), Nelson (1990), Ribeiro & Fogliatto (1998) e Gibbons & Chakraborti (1992). Referências adicionais são fornecidas ao longo do texto.

O capítulo está dividido nas seguintes seções e conteúdos: o item 3.1 apresenta os conceitos teóricos de confiabilidade. No item 3.2 são apresentadas as principais funções utilizadas em estimativas de confiabilidade bem como as relações entre estas funções e as etapas da vida operacional de um sistema. Nesta seção também são introduzidas as principais distribuições utilizadas para modelagem de tempos-até-falha. No item 3.3, são apresentados dois métodos matemáticos utilizados para estimação dos parâmetros das distribuições de confiabilidade. O item 3.4 apresenta os tipos de dados geralmente coletados e os modelos paramétricos para definição dos parâmetros das distribuições. No item 3.5 é apresentado outro método utilizado para definição dos parâmetros da distribuição que também permite a análise gráfica da conformidade de dados amostrais a distribuições hipotetizadas. O item 3.6 descreve dois testes de aderência, utilizados neste trabalho, para verificação da compatibilidade dos valores observados em amostras a distribuições de probabilidade utilizadas em confiabilidade. No item 3.7 é apresentado o método de análise do sistema como um todo.

3.1. CONCEITOS TEÓRICOS DE CONFIABILIDADE

A confiabilidade de um determinado item pode ser definida como sua capacidade de realizar uma função requerida durante um determinado período de tempo, submetido à um determinado meio, em condições de projeto (Hoyland & Rausand, 1994).

Nesta definição, *itens* são componentes, sub-sistemas ou sistemas que constituem um produto ou serviço. *Função requerida* pode ser uma função única ou a combinação de funções necessárias para produzir um serviço específico. Itens são projetados para realizar uma ou mais funções requeridas. Um item considerado confiável, deve operar na aplicação para a qual foi desenvolvido satisfatoriamente em um período de tempo especificado.

A principal aplicação de confiabilidade em Engenharia é na prevenção de falhas. Falha pode ser definida como o término da disponibilidade de um item para realizar sua função requerida (Hoyland & Rausand, 1994). Falhas podem ser classificadas conforme seus modos de ocorrência.

Um modo de falha pode ser descrito como o efeito causador da falha em um item. Como os itens são desenvolvidos para realizar uma ou mais funções, um modo de falha é, portanto, definido como a não realização de uma destas funções. A maioria dos itens apresentam diferentes modos de falhas.

Na prática, para analisar a confiabilidade de um sistema, o analista deve deduzir um modelo estocástico que descreva o sistema analisado, ou escolher um modelo já desenvolvido que se adapte ao sistema. Para ser realista, o modelo adotado deve descrever as funções essenciais do sistema, não sendo necessário exatidão nesta descrição. Neyman (1954, *apud* Hoyland & Rausand, 1994), um dos pioneiros da matemática estatística, propõe que toda tentativa do uso da matemática para o estudo de algum fenômeno real deve iniciar com a construção de um modelo matemático. Este modelo não descreverá, na maioria dos casos, o fenômeno em sua plenitude. O modelo matemático proposto será apropriado se não ignorar detalhes relevantes na compreensão do fenômeno estudado. A solução do problema matemático pode estar correta e não condizer com a realidade, simplesmente porque a suposição original do modelo matemático diverge das condições práticas do problema considerado. Para termos certeza que o modelo matemático adotado é adequado, devemos

predizer um número mínimo de resultados a partir deste modelo e compará-los com observações realizadas.

Na prática, nenhum modelo matemático de fenômenos físicos é totalmente correto (Box, *et al.*, 1978). Em algumas situações particulares, todavia, alguns modelos são mais úteis que outros. Considerando que a modelagem matemática permite um estudo mais aprofundado do fenômeno em estudo, a obtenção de modelos matemáticos é chave em estudos de Confiabilidade.

Na maioria dos estudos de sistemas técnicos (mecânicos, químicos, elétricos, etc.) temos que trabalhar com modelos que representam os sistemas analisados. Estes modelos podem ser gráficos ou matemáticos. Os modelos matemáticos utilizados deverão ser capazes de apresentar dados e possibilitar o uso de métodos matemáticos e estatísticos para estimar parâmetros de confiabilidade, segurança ou risco. Modelos matemáticos devem apresentar as seguintes características: (i) devem ser suficientemente simples, para serem tratáveis através dos métodos matemáticos e estatísticos disponíveis; e (ii) devem ser suficientemente realistas, para deduzirmos resultados de relevância prática (Hoyland & Rausand, 1994).

A análise de confiabilidade de sistemas técnicos pode ser considerada uma tarefa multidisciplinar, pois envolve diferentes áreas de conhecimento na execução. Os conhecimentos e recursos mínimos para realização de um estudo de confiabilidade são os seguintes: (i) conhecimento detalhado dos aspectos técnicos do sistema analisado e dos mecanismos físicos que podem conduzir à falhas deste sistema; (ii) conhecimento dos conceitos matemáticos/estatísticos e métodos estatísticos necessários na análise; (iii) disponibilidade de dados reais para estimativa de parâmetros e teste dos modelos desenvolvidos; e (iv) disponibilidade de programas computacionais apropriados para análise de sistemas mais complexos. A quantidade de recursos necessários na análise de Confiabilidade depende da complexidade do sistema focado e profundidade da análise que desejamos realizar (Hoyland & Rausand, 1994).

3.2. ESTIMATIVAS DE CONFIABILIDADE

As principais funções utilizadas para analisarmos a confiabilidade de um produto são: (i) a função confiabilidade, $R(t)$; (ii) a função de risco, $h(t)$; (iii) o tempo médio entre falhas, MTBF (*Mean Time Between Failures*) para sistemas reparáveis; e (iv) o tempo médio até a falha, MTTF (*Mean Time to Failure*) para sistemas não-reparáveis.

A seguir são apresentadas as descrições destas funções, alguns conceitos e outras funções relevantes para um estudo de Confiabilidade.

3.2.1. Tempo-até-Falha

Tempo-até-falha designa o período desde que a unidade entrou em operação até o momento da falha. Consideraremos $t = 0$ como o tempo inicial. Como o tempo até a falha pode apresentar variações, pode ser considerado uma variável aleatória e designado por T . O estado da unidade no tempo t pode ser descrito pelo estado da variável $X(t)$, uma variável dicotômica, assim definida (Hoyland & Rausand, 1994):

$X(t) = 1$, 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 vem apresentado na Figura 6. Note que 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.

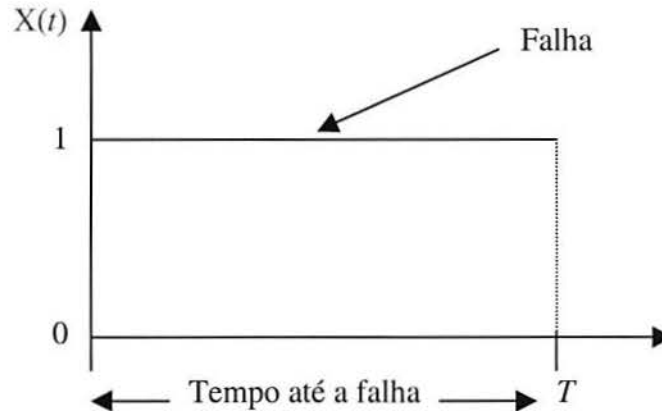


Figura 6. Ligação entre o estado da variável $X(t)$ e o tempo até falha T . (Hoyland & Rausand, 1994).

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

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

Portanto, $F(t)$ representa a probabilidade da unidade falhar dentro do intervalo de tempo $(0, t)$.

A densidade de probabilidade $f(t)$ é definida como (Mood *et al.*, 1974).

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

Quando Δt for pequeno teremos:

$$P(t < T \leq t + \Delta t) \approx f(t) \times \Delta t \quad (3.3)$$

A função acumulada de falha $F(t)$ e a função densidade de probabilidade $f(t)$ estão exemplificadas nas Figuras 7 e 8, respectivamente. Os gráficos neste capítulo foram obtidos através do programa computacional Proconf (1999).

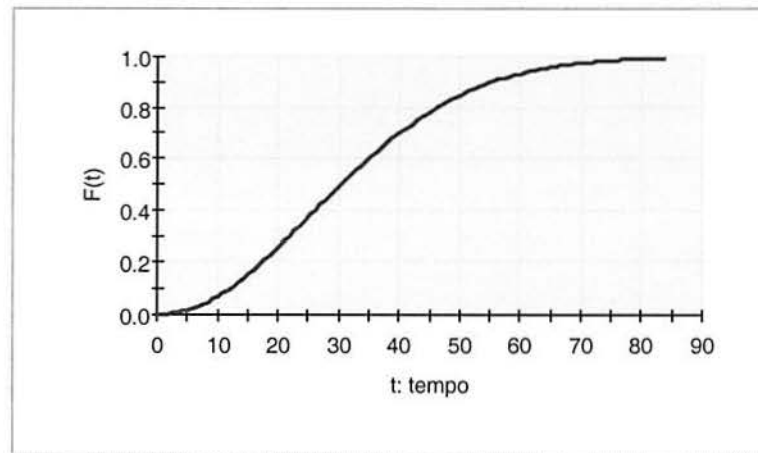


Figura 7. Exemplo de Função acumulada de falha $F(t)$.

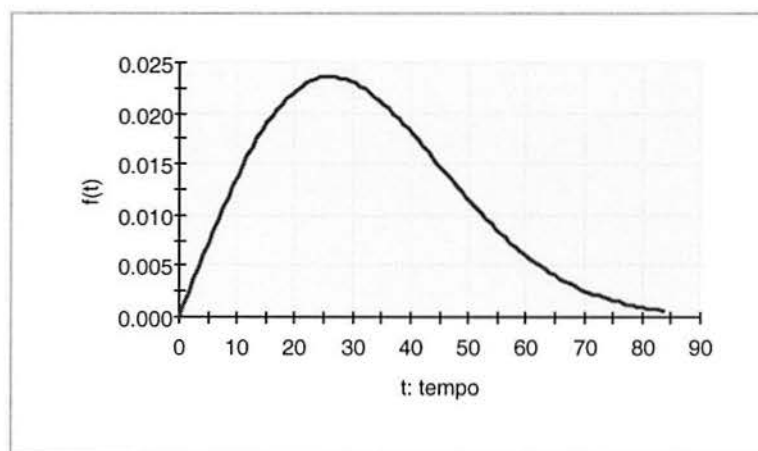


Figura 8. Exemplo de Função densidade de probabilidade $f(t)$.

3.2.2. Função Confiabilidade

Considere uma situação em que componentes são testados quanto a sua confiabilidade. Ao final de um tempo t , teremos: (i) n_0 = número total de componentes testados; (ii) $n_f(t)$ = número de componentes que falharam durante o teste no período t ; (iii) $n_s(t)$ = número de componentes que não falharam durante o teste no período t sendo que $n_0 = n_f(t) + n_s(t)$. A função confiabilidade $R(t)$ é definida como a função acumulada de sucesso no tempo t (Elsayed, 1996), isto é

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

Considerando que

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

verifica-se que a função de confiabilidade $R(t)$ corresponde ao complemento da função acumulada de falha $F(t)$; isto é

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

Na Figura 9 é apresentado um exemplo de função Confiabilidade.

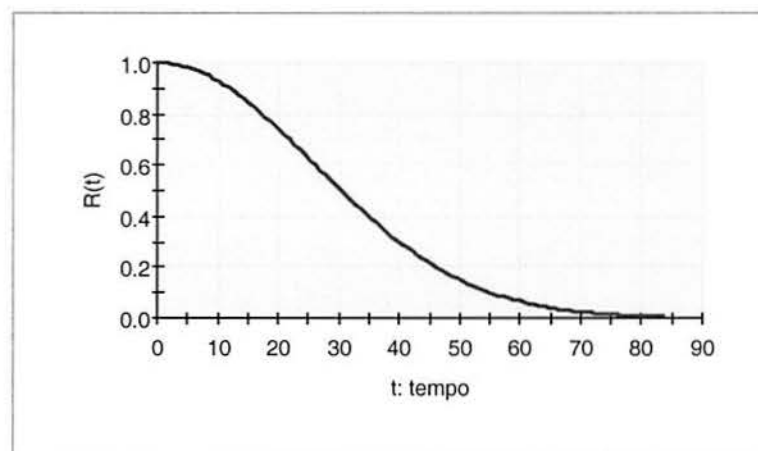


Figura 9. Exemplo de Função confiabilidade $R(t)$.

3.2.3. Função de Risco

A probabilidade de uma unidade falhar no intervalo de tempo $(t, t + \Delta t]$, dado que a unidade está operante no tempo t , é (Hoyland & Rausand, 1994):

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

Dividindo esta probabilidade pelo comprimento do intervalo de tempo Δt e considerando $\Delta t \rightarrow 0$, obtemos a função de risco da unidade:

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

Quando Δt é pequeno, pode-se usar a aproximação:

$$P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) \approx h(t) \times \Delta t \quad (3.9)$$

A função de risco de um intervalo de tempo também pode ser expressa como (Elsayed, 1996):

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

onde

$h(t_i)$ = função de risco no tempo t_i

$n_f(\Delta t_i)$ = número de falhas no intervalo Δt

$n_s(t_i - 1)$ = número de sobreviventes no início do intervalo t_i

Δt_i = intervalo de tempo $(t_i - 1, t_i)$.

3.2.4. Relações entre as Funções

Baseado nas equações (3.1) e (3.6), podemos descrever $f(t)$ como:

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

então,

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

Como $R(0) = 1$, temos

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

e

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

A função de confiabilidade $R(t)$ e a função acumulada de falhas $F(t)$ podem ser determinadas pela função de risco, $h(t)$. Através das equações (3.7) e (3.14), conclui-se que a probabilidade de falhas pode ser expressa, alternativamente, por

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

Um resumo das relações entre as funções $F(t)$, $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$ vem apresentado na Tabela 1 (Leemis, 1995).

Tabela 1. Relações entre as funções $F(t)$, $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$.

	$F(t)$	$f(t)$	$R(t)$	$h(t)$
$F(t)$	-	$\int_0^t f(u) du$	$1 - R(t)$	$1 - e^{-\int_0^t h(u) du}$
$f(t)$	$\frac{d}{dt} F(t)$	-	$-\frac{d}{dt} R(t)$	$h(t)e^{-\int_0^t h(u) du}$
$R(t)$	$1 - F(t)$	$\int_t^{\infty} f(u) du$	-	$e^{-\int_0^t h(u) du}$
$h(t)$	$\frac{d(F(t)/dt}{1 - F(t)}$	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(u) du}$	$-\frac{d}{dt} \ln R(t)$	-

3.2.5. Etapas da vida operacional de um sistema a partir de sua função de risco

Através da equação (3.14), fica claro que a função de confiabilidade $R(t)$ de uma unidade pode ser determinada unicamente por sua função de risco $h(t)$. Para determinar a forma de $h(t)$ na unidade analisada, Hoyland & Rausand (1994) apresentam o procedimento a seguir. Inicialmente, divide-se o intervalo $(0, t)$ em pequenos intervalos com comprimento igual a Δt . Em $t = 0$, coloca-se em operação n unidades idênticas. Quando uma unidade falhar, registra-se o tempo-até-falha, retirando-se a unidade do teste. Para cada intervalo de tempo i , anota-se (i) o número de unidades que falharam no $i^{\text{ésimo}}$ intervalo; (ii) o tempo de funcionamento de cada unidade ($T_{1i}, T_{2i}, \dots, T_{ni}$) no intervalo i , onde T_{ji} representa o tempo de funcionamento da unidade j no intervalo i . T_{ji} é igual a 0 se a unidade j falhar antes do intervalo i , onde $j = 1, 2, \dots, n$. Deste modo, somando-se as unidades que T_{ji} é diferente de zero em cada intervalo i , é obtido o número total de unidades funcionando neste período de tempo.

Conseqüentemente, podemos obter a função de risco no intervalo i dividindo o número de unidades que falharam pelo número total de unidades em funcionamento neste intervalo.

$$h(i) = \frac{n(i)}{\sum_{j=1}^n T_{ji}} \quad (3.16)$$

Assim como as funções $f(t)$ e $F(t)$, a função de risco pode assumir diversos formatos, conforme os valores assumidos pela variável aleatória T . Um exemplo de histograma representando a função de risco $h(t)$ é apresentado na Figura 10.

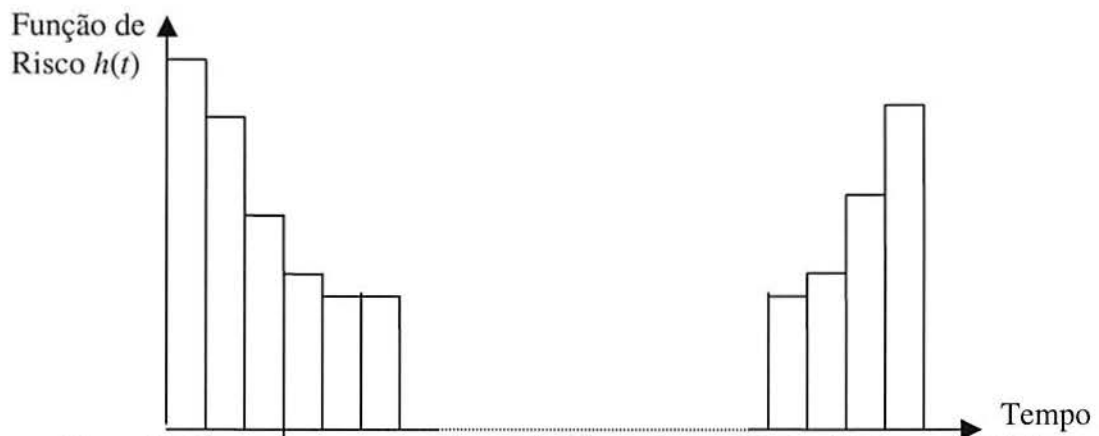


Figura 10. Histograma representando taxa de falhas no tempo (Hoyland & Rausand, 1994).

Quando o número de unidades em teste (n) for muito grande, devem ser utilizados pequenos intervalos de tempo no procedimento descrito acima. Se considerarmos $\Delta t \rightarrow 0$, a função $h(t)$ poderá ser aproximada por uma curva, conforme ilustrado na Figura 11.

O gráfico na Figura 11 é conhecido como “Curva da Banheira”, devido ao seu formato. A curva da banheira pode ser usada na representação da incidência de falhas em inúmeros produtos manufaturados. Três fases distintas podem ser visualizadas na figura, caracterizando as etapas da vida operacional do produto, relativamente à sua probabilidade de ocorrência de falhas. A função de risco é geralmente alta no início da vida operacional das unidades, devido a ocorrências de falhas não identificadas no controle de qualidade do produto: tais falhas caracterizam o período denominado de *mortalidade infantil* do produto.

Estas falhas somente virão a ser identificadas quando o sistema entrar em funcionamento. Após este período, a função de risco tende a estabilizar-se em um nível abaixo do inicial, caracterizando o período de *vida útil* do produto; este é o período de maior duração na maioria dos produtos com vida operacional caracterizada pela curva da banheira. A função de risco volta a crescer após o fim da vida útil do produto, constituindo o período denominado *velhice* (ou desgaste) do produto. Em sistemas mecânicos, a função de risco durante a vida útil geralmente apresenta uma suave inclinação ascendente, significando uma pequena tendência de aumento na possibilidade de falhas com o tempo de uso. Esta tendência pode ser explicada pelo desgaste constante decorrente da utilização de componentes mecânicos.

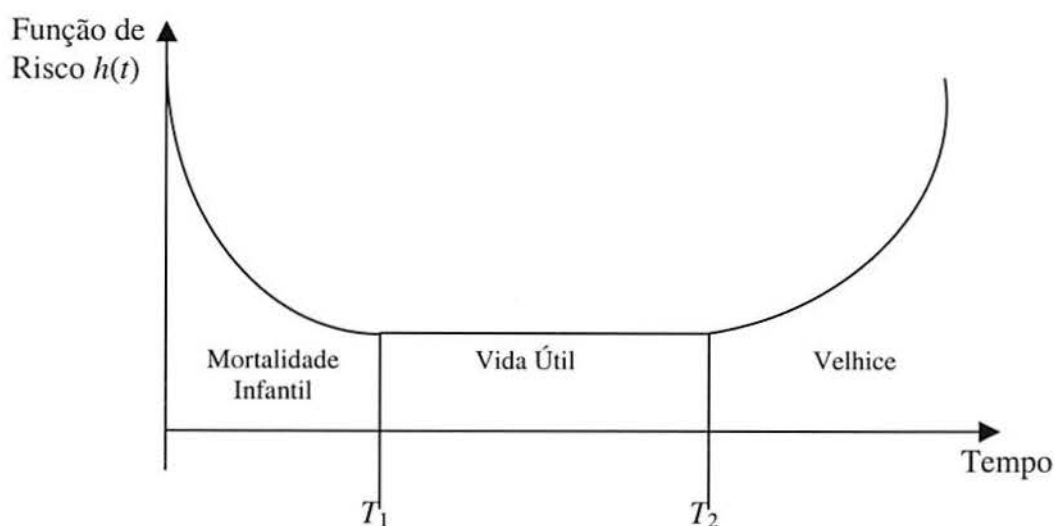


Figura 11. Curva da Banheira.

3.2.6. Tempo Médio até Falha e Tempo Médio entre Falhas

Uma forma de quantificar a confiabilidade de um sistema é através do *Tempo Médio até a Falha (MTTF)* para sistemas não-reparáveis e através do *Tempo Médio entre Falhas (MTBF)* para os sistemas que podem ser reparados.

Supondo que n sistemas idênticos não-reparáveis são observados até a ocorrência de falhas nos tempos t_1, t_2, \dots, t_n , a média dos tempos até falha, *MTTF*, estimada será (Elsayed, 1996):

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (3.17)$$

Uma vez conhecida a distribuição de probabilidade dos tempos-até-falha observados, a *MTTF* corresponderá ao valor esperado da variável aleatória T ; isto é

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt \quad (3.17)$$

A *MTTF* também pode ser estimada a partir da função de confiabilidade $R(t)$. Como

$R(t) = 1 - F(t)$ e $f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$, substituindo $f(t)$ na equação (3.17), obtém-se

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

Como $R(\infty) \rightarrow 0$ e $R(0) = 1$, a equação acima reduz-se para

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

3.2.7. Distribuições Utilizadas em Confiabilidade

Nem todos os componentes apresentam função de risco conforme a curva da banheira na Figura 11. A maioria dos componentes elétricos e eletrônicos, por exemplo, não

apresentam a região de *velhice*. Alguns componentes mecânicos não apresentam a região de falha constante, passando da região de *mortalidade infantil* diretamente para a região de *velhice*. O comprimento de cada região pode variar de componente para componente (ou sistema). As principais distribuições utilizadas para modelar tempos-até-falha de componentes são apresentadas a seguir:

a) Função de Risco Linear Crescente

Componentes mecânicos que sofrem deterioração com o tempo, tais como engrenagens, eixos e válvulas, apresentam função de risco linear crescente. Alguns componentes elétricos, tais como relés, também apresentam este comportamento. A função de risco linear crescente é expressa por (Elsayed, 1996):

$$h(t) = \lambda t, \quad (3.20)$$

onde λ é uma constante. A função de densidade de probabilidade $f(t)$ de uma variável T com função de risco dada pela equação (3.20) é característica de uma distribuição de Rayleigh, sendo dada por

$$f(t) = \lambda t e^{-\frac{\lambda t^2}{2}} \quad (3.21)$$

e

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{\lambda t^2}{2}\right). \quad (3.22)$$

A função de confiabilidade correspondente será:

$$R(t) = e^{-\frac{\lambda t^2}{2}}. \quad (3.23)$$

b) Função de Risco Linear Decrescente

Muitos componentes elétricos e mecânicos podem apresentar função de risco linear decrescente no início de sua vida útil (decrescente linearmente ou não linearmente com o tempo). A função de risco linear decrescente é expressa por

$$h(t) = a - bt, \quad (3.24)$$

onde $a \geq bt$, e a e b são constantes. As expressões de $f(t)$, $R(t)$ e $F(t)$ podem ser obtidas utilizando as relações na Tabela 1.

c) Função de Risco Não-Linear (Modelo de Weibull)

Este modelo é utilizado na modelagem de unidades com função de risco não-linear. A expressão que caracteriza a função de risco é

$$h(t) = \frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1}, \quad (3.25)$$

onde γ e θ representam os parâmetros de forma e escala da função, respectivamente, assumindo valores não-negativos. As funções derivadas de uma variável aleatória T com função de risco dada pela equação (3.25) são

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1} e^{-\frac{t^\gamma}{\theta}}, \quad \text{para } t > 0; \quad (3.26)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t^\gamma}{\theta}}, \quad \text{para } t > 0; \text{ e} \quad (3.27)$$

$$R(t) = e^{-\frac{t^\gamma}{\theta}}, \quad \text{para } t > 0. \quad (3.28)$$

Quando $\gamma > 1$, a função de risco apresenta crescimento linear, correspondendo à região de *velhice* da curva da banheira. Quando $\gamma = 1$, a função de risco é constante ao longo do tempo (região de *vida útil* da curva da banheira) e quando $\gamma < 1$, a função de risco decresce com o tempo (região de *mortalidade infantil* da curva da banheira). Devido a esta flexibilidade, o modelo de Weibull pode ser utilizado na análise de confiabilidade de diferentes tipos de componentes, como eletrônicos, mecânicos, mecanismos biológicos, etc. A média e a variância da distribuição de Weibull são dados por (Elsayed, 1996):

$$E[T] = \theta^{\frac{1}{\gamma}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (3.29)$$

$$Var[T] = \theta^{\frac{2}{\gamma}} \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\gamma}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \right]^2 \right\} \quad (3.30)$$

onde $\Gamma(n)$ representa a função Gama, uma integral indefinida, tabelada em textos de Cálculo Diferencial e Integral (ver Thomas & Finney, 1992, entre outros).

d) Modelo Misto de Weibull

Este modelo é utilizado quando os componentes analisados apresentam dois ou mais modelos de função de risco. Nestes casos, cada modo de falha é modelado por uma distribuição de Weibull com parâmetros diferentes. A função densidade de probabilidade neste caso é dada por (Elsayed, 1996):

$$f(t) = p \frac{\gamma_1}{\theta_1} t^{\gamma_1-1} e^{-\frac{t^{\gamma_1}}{\theta_1}} + (1-p) \frac{\gamma_2}{\theta_2} t^{\gamma_2-1} e^{-\frac{t^{\gamma_2}}{\theta_2}} \quad (3.31)$$

onde $\theta_1, \theta_2 > 0$ e $0 < \gamma_1 < \gamma_2$. O parâmetro p ($0 \leq p \leq 1$) define a probabilidade do componente falhar em cada modo de falha. A função confiabilidade derivada da função de densidade acima é expressa por:

$$R(t) = 1 - p \left[1 - e^{-\frac{t^{\gamma_1}}{\theta_1}} \right] - (1-p) \left[1 - e^{-\frac{t^{\gamma_2}}{\theta_2}} \right] \quad (3.32)$$

Se o segundo modo de falha ocorrer com uma defasagem temporal de δ unidades em relação ao primeiro modo de falha, as equações de densidade de probabilidade e confiabilidade podem ser expressas, respectivamente, por:

$$f_d(t) = p \frac{\gamma_1}{\theta_1} t^{\gamma_1-1} e^{-\frac{t^{\gamma_1}}{\theta_1}} + (1-p) \frac{\gamma_2}{\theta_2} (t-\delta)^{\gamma_2-1} e^{-\frac{(t-\delta)^{\gamma_2}}{\theta_2}}, \quad (3.33)$$

$$R_d(t) = 1 - p \left[1 - e^{-\frac{t^{\gamma_1}}{\theta_1}} \right] - (1-p) \left[1 - e^{-\frac{(t-\delta)^{\gamma_2}}{\theta_2}} \right]. \quad (3.34)$$

A defasagem δ nas expressões acima corresponde ao parâmetro de localização da distribuição de Weibull do segundo modo de falha.

A equação (3.31) pode ser generalizada para incluir mais de dois modos de falhas.

Neste caso, utiliza-se um parâmetro p_i , tal que $\sum_{i=1}^j p_i = 1$, onde p_i designa a probabilidade do produto falhar no $i^{\text{ésimo}}$ modo de falha, e j é o número de modos de falhas considerados.

e) Modelo Exponencial

O modelo exponencial é um caso especial do modelo de Weibull. Este modelo pode ser utilizado na modelagem de casos onde a função de risco é inicialmente constante e passa a crescer rapidamente com o tempo. É utilizado, por exemplo, para descrever o tempo de falha de produtos ou sistemas que operam sem problemas em condições normais de funcionamento, mas que podem vir a falhar em condições severas de operação (falhas por sobreaquecimento ou fissuras). A função de risco, a função de densidade de probabilidade e a função de confiabilidade neste caso são expressas por (Elsayed, 1996):

$$h(t) = be^{\alpha t} \quad (3.35)$$

$$f(t) = be^{\alpha t} e^{-\frac{b}{\alpha}(e^{\alpha t} - 1)} \quad (3.36)$$

$$R(t) = e^{-\frac{b}{\alpha}(e^{\alpha t} - 1)} \quad (3.37)$$

onde b é uma constante e $e^{\alpha t}$ representa o aumento da incidência de falhas da unidade no tempo.

f) Modelo Lognormal

Este modelo também é um caso especial do modelo de Weibull. É muito utilizado para descrever os tempos-até-falha de semicondutores e de grupo de mecanismos que operam em conjunto. Também é bastante utilizado para prognósticos de confiabilidade em testes de vida acelerada. A função de densidade de probabilidade desta distribuição é expressa por (Elsayed, 1996):

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0, t > 0. \quad (3.38)$$

A função acumulada de probabilidade correspondente à função de densidade acima é:

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma \tau \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \tau - \mu}{\sigma}\right)^2\right] d\tau \quad (3.39)$$

Se a variável aleatória X é definida como $X = \ln T$, onde T segue uma distribuição lognormal, então X é normalmente distribuído com média μ (parâmetro de escala) e desvio

padrão σ (parâmetro de forma). Neste caso, a função acumulada de probabilidade, a função de confiabilidade e a função de risco são dadas por:

$$F(t) = P(T \leq t) = P\left[z \leq \frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right] \quad (3.40)$$

$$R(t) = P[T > t] = P\left[z > \frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right] \quad (3.41)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)}{t\sigma R(t)} \quad (3.42)$$

g) Outros Modelos

Outros modelos relevantes, como o modelo Normal e o modelo Gama, não serão apresentados neste trabalho por não serem utilizados na modelagem realizada. A descrição destes modelos pode ser encontrada em Elsayed (1996) e em Hoyland & Rausand (1994), entre outros. Na Tabela 2, são apresentadas as funções de risco, de densidade de probabilidade e de confiabilidade dos principais modelos utilizados em estudos de confiabilidade em Engenharia. A tabela está baseada em Elsayed (1996) e Leemis (1995).

Tabela 2. Equações das funções $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$ para diferentes modelos de probabilidade.

<i>Modelos</i>	$h(t)$	$f(t)$	$R(t)$	Parâmetros
Constante	λ	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	λ
Linear Crescente	λt	$\lambda t e^{-\frac{\lambda t^2}{2}}$	$e^{-\frac{\lambda t^2}{2}}$	λ
Weibull	$\frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1}$	$\frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1} e^{-\frac{t^\gamma}{\theta}}$	$e^{-\frac{t^\gamma}{\theta}}$	γ, θ
Exponencial	$b e^{\alpha}$	$b e^{\alpha} e^{-\frac{b}{\alpha}(e^{\alpha}-1)}$	$e^{-\frac{b}{\alpha}(e^{\alpha}-1)}$	α, b
Normal	$\frac{\phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)}{\sigma R(t)}$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$1 - \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\tau-\mu}{\sigma}\right)^2} d\tau$	μ, σ
Lognormal	$\frac{\phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)}{t\sigma R(t)}$	$\frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2}$	$1 - \int_0^t \frac{1}{\tau\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \tau - \mu}{\sigma}\right)^2} d\tau$	μ, σ
Gama	$\frac{f(t)}{R(t)}$	$\frac{t^{\gamma-1}}{\theta^\gamma \Gamma(\gamma)} e^{-\frac{t}{\theta}}$	$\int_t^\infty \frac{1}{\theta^\gamma \Gamma(\gamma)} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\frac{\tau}{\theta}} d\tau$	θ, γ

3.3. ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS DE DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

As distribuições de probabilidade apresentadas na seção 3.2 são caracterizadas por parâmetros (λ no modelo exponencial, γ e θ no modelo de Weibull, e assim por diante). Em estudos de confiabilidade, uma vez definida a distribuição dos tempos-até-falha amostrados, deve-se estimar os parâmetros das distribuições a partir dos dados amostrais. A precisão na estimação dos parâmetros depende do tamanho da amostra e do método utilizado para estimá-los. As propriedades de um bom estimador são (Ribeiro & Fogliatto, 1998): (i) *não tendencioso* - o bom estimador não deve subestimar ou superestimar sistematicamente o valor do parâmetro que está sendo estimado; (ii) *consistente* - o bom estimador deve tender ao verdadeiro valor do parâmetro quando o tamanho da amostra aumenta; (iii) *eficiente* - deve apresentar variância mínima, ou seja, deve gerar intervalos de confiança estreitos na previsão do parâmetro; (iv) *suficiente* - deve utilizar toda a informação que a amostra contém.

Na seqüência, são apresentados dois métodos para estimação dos parâmetros em distribuições de probabilidade: o método dos momentos e o método da máxima verossimilhança.

3.3.1. Método dos Momentos

No Método dos Momentos, os parâmetros a serem estimados são associados com os momentos amostrais. Sejam t_1, t_2, \dots, t_n observações de uma variável aleatória T . O $k^{\text{ésimo}}$ momento de T é dado por:

$$M_k = \int_{-\infty}^{\infty} t^k f(t) dt. \quad (3.43)$$

A estimativa amostral do $k^{\text{ésimo}}$ momento de T é

$$M_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^k. \quad (3.44)$$

No caso da distribuição exponencial, por exemplo, têm-se os seguintes momentos populacionais e amostrais:

$$M_1 = \int_{-\infty}^{\infty} tf(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} t\lambda e^{-\lambda x} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{populacional}) \quad (3.45)$$

$$M_1 = \frac{1}{n} \sum t_i \quad (\text{amostral}) \quad (3.46)$$

Igualando-se os dois momentos, tem-se

$$\frac{1}{\hat{\lambda}} = \frac{1}{n} \sum t_i, \text{ ou } \hat{\lambda} = \frac{n}{\sum t_i}. \quad (3.47)$$

Assim, para que seja possível obter estimativas dos k parâmetros de uma distribuição de probabilidade, serão necessários os seus primeiros k momentos, populacionais e amostrais. Por utilizar os momentos de uma variável aleatória na determinação dos parâmetros de sua distribuição de probabilidade característica, o método é denominado *método dos momentos*.

3.3.2. Método da Máxima Verossimilhança (MLE)

O método da máxima verossimilhança baseia-se na avaliação da probabilidade de ocorrência dos valores amostrados da variável de interesse (Ribeiro & Fogliatto, 1998).

A partir da amostra aleatória, obtida de uma população com densidade $f(x)$ e parâmetro θ , a função de verossimilhança é o resultado da função de densidade avaliada em cada ponto da amostra; ou seja (Montgomery & Runger, 1995),

$$l(x, \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta) \quad (3.48)$$

Como exemplo, pode ser considerado um processo a partir do qual amostras de tamanho 15 são recolhidas periodicamente. A probabilidade de ocorrência de x defeitos nas amostras de 15 produtos é dada por:

$$P(X = x) = \binom{15}{x} p^x (1-p)^{15-x},$$

onde $x = 0, \dots, 15$ e p é a proporção de defeitos na produção. Em particular, a probabilidade de ocorrência de dois defeitos na amostra é dada por

$$P(X = 2) = \binom{15}{2} p^2 (1-p)^{13}.$$

Para n amostras de 15 unidades coletadas do processo são contados os defeitos e repetidos os mesmos procedimentos. O valor de p que maximiza o produto de $P(\text{número de defeitos da amostra } 1) \times P(\text{número de defeitos da amostra } 2) \times \dots$ é o estimador de máxima verossimilhança de p .

Para a determinação do estimador de máxima semelhança de um parâmetro θ , deve ser resolvida a equação:

$$\left. \frac{\partial}{\partial \theta} \right|_{\hat{\theta}} l(\mathbf{x}, \theta) = 0 \quad (3.49)$$

A função de verossimilhança na equação (3.49) assume um valor máximo em valores dos parâmetros da distribuição para os quais é mais provável que os valores amostrais venham a ser observados. Tais estimativas são denominadas estimativas de máxima verossimilhança dos parâmetros da distribuição amostrada.

3.4. MODELAGEM DOS DADOS DE TEMPOS-ATÉ-FALHA

Para realizarmos estudos de confiabilidade em componentes ou sistemas, precisamos de dados referentes aos tempos-até-falha dos componentes analisados. Estas informações podem ser obtidas de diversas maneiras (Elsayed, 1996): (i) dados históricos, coletados em bancos de dados dos fabricantes ou institutos de pesquisa; (ii) testes de vida funcional, normalmente realizados em protótipos de produtos em desenvolvimento e nas condições ambientais previstas para operação; (iii) testes de *burn in*, onde o sistema é testado em condições severas de operação por um curto período de tempo; ou (iv) testes acelerados, onde simula-se o ciclo de vida previsto para o sistema em um curto período de tempo.

Testes de vida funcional podem ser utilizados para estudos de confiabilidade mas, em produtos que possuem sistemas mecânicos complexos, como condicionadores de ar e automóveis, a quantidade de protótipos utilizados em testes funcionais é pequena, não oferecendo uma amostra significativa da população do produto. Por outro lado, conforme aumenta o valor agregado do produto, maior a quantidade de informações históricas armazenadas pelo fabricante referentes a falhas e vida útil de componentes, falhas de componentes em garantia e manutenções periódicas. Destes bancos de dados podem ser

obtidas informações suficientes para realização de estudos de confiabilidade destes produtos. Um exemplo de utilização de dados históricos de falhas de componentes em garantia vem apresentado no estudo de caso desta dissertação.

Testes de *burn in* são normalmente utilizados como teste final em linhas de montagem. Neles, são simuladas condições severas de operação do sistema por um período curto de tempo. É importante salientar que estes testes não devem danificar os componentes do sistema, já que os produtos testados deverão, posteriormente, ser comercializados. Testes de *burn in* podem não detectar falhas que venham a ocorrer com a utilização do produto em condições severas, não sendo muitas vezes apropriados em estudos de confiabilidade.

Conforme aumenta a complexidade do sistema analisado, aumenta o tempo necessário e o custo para realização de testes de desempenho com vistas a obtenção de dados de tempos-até-falha. Como exemplo, podemos citar unidades condicionadoras de ar, produto analisado neste trabalho. Para a realização de testes acelerados nestes equipamentos, é necessária a utilização de cabines de testes especiais, denominadas *calorímetros*. Nestas cabines, podem ser simuladas condições extremas de temperatura e umidade do ambiente condicionado e ambiente externo. Devido a complexidade das cabines, o custo de operação é alto, impossibilitando a realização de teste em todo ciclo de vida, mesmo acelerado, dos condicionadores de ar.

3.4.1. Tipos de Censura

Freqüentemente, não é possível conduzir testes de vida em um produto até que todas as unidades falhem, devido ao longo tempo necessário para que isto ocorra. Nestas circunstâncias, o tempo total de teste é determinado tal que alguns produtos falhem, restando outros, denominados *sobreviventes*, que permanecerão operando normalmente até o final do período de teste. A interrupção do teste antes que toda a amostra apresente algum tipo de falha é denominada *censura* do teste. Os diferentes tipos de censura existentes são descritos a seguir.

a) Censura Tipo I

São colocadas n unidades em teste por um período de tempo T . Registram-se os tempos-até-falha $t_1, t_2, t_3, \dots, t_r \leq T$ das r unidades que falharam neste período. As unidades sobreviventes são quantificadas através da subtração do número total de unidades pelas

unidades que falharam neste período ($n-r$). O número de falhas r é uma variável aleatória, pois depende da duração e nível de *stress* aplicado no teste.

A realização de estudos de confiabilidade e análise das falhas das unidades testadas depende da ocorrência de falhas no período T de teste. Assim, a duração do teste deve ser determinada de tal forma a ocorrerem falhas de, pelo menos, uma porção representativa das unidades. O tempo T , quando é interrompido o teste, é referenciado como *tempo de censura* e este tipo de censura é chamada *Censura Tipo 1* (Elsayed, 1996).

b) Censura Tipo 2

São colocadas n unidades em teste, até que r unidades falhem. O teste termina no tempo t_r . Como o número de falhas é especificado antecipadamente, saberemos quantas informações serão obtidas do teste, o que assegura a realização do estudo de confiabilidade. O período de duração do teste T , todavia, é uma variável aleatória, pois depende da duração e nível de *stress* aplicado no teste.

Neste tipo de teste, o parâmetro de censura é o número de falhas r que determina a duração do teste. Este tipo de censura é chamada *Censura Tipo 2* (Elsayed, 1996).

c) Censura Tipo 3

Trata-se da mistura dos dois tipos de censura apresentados acima. O teste é concluído depois que r unidades falharem ou quando terminar o período de teste T , o que ocorrer primeiro. O número de unidades que devem falhar (r) e o período de tempo (T) são determinados antes do início do teste (Hoyland & Rausand, 1994).

d) Censura Aleatória

Censura aleatória ocorre quando n unidades são testadas em diferentes períodos de tempo e não existe um número determinado de unidades que devem falhar ao final de cada período de tempo. Ou seja, não há parâmetro de tempo ou número de falhas determinado no momento da censura.

3.4.2. Modelos Paramétricos de Confiabilidade

Esta seção utiliza os conceitos introduzidos nas seções 3.2 e 3.3. São apresentados os modelos paramétricos das distribuições de probabilidade utilizadas neste trabalho. Através destes modelos é possível obter estimativas dos parâmetros destas distribuições utilizando diferentes tipos de amostras (dados completos e dados com censura).

a) Modelo Paramétrico para Distribuição Exponencial

Considere n unidades testadas, com tempos-até-falha t_i 's registrados em ordem crescente. Assim, teremos $t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq \dots \leq t_r \leq t_1^+ = \dots = t_{n-r}^+ = T$, onde t_i^+ é o tempo de censura da unidade i (caso algum tipo de censura tenha sido utilizado no teste).

Utilizando o Método da Máxima Verossimilhança, apresentado na seção 3.3.2, obtém-se o seguinte estimador de λ (Elsayed, 1996)

$$\hat{\lambda} = \frac{r}{\sum_{i=1}^r t_i + \sum_{i=1}^{n-r} t_i^+}. \quad (3.50)$$

Consequentemente, o tempo de vida média pode ser estimado como (Elsayed, 1996)

$$\hat{\mu} = \frac{1}{\hat{\lambda}} = \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^r t_i + \sum_{i=1}^{n-r} t_i^+ \right]. \quad (3.51)$$

Pode-se demonstrar que $2r\lambda / \hat{\lambda}$ segue uma distribuição do Qui-Quadrado, com $2r$ graus-de-liberdade. A média e a variância de $\hat{\lambda}$ são $r\hat{\lambda}/(r-1)$ e $\hat{\lambda}^2/(r-1)$ respectivamente (Lee, 1992).

O intervalo de confiança $100(1 - \alpha)$ de λ é (Elsayed, 1996):

$$\frac{\hat{\lambda} X^2_{1-\alpha/2, 2r}}{2r} < \lambda < \frac{\hat{\lambda} X^2_{\alpha/2, 2r}}{2r}, \quad (3.52)$$

e o intervalo de confiança da vida média é

$$\frac{2r\hat{\mu}}{X^2_{\alpha/2, 2r}} < \mu < \frac{2r\hat{\mu}}{X^2_{1-\alpha/2, 2r}}. \quad (3.53)$$

As expressões apresentadas acima são válidas para amostras obtidas mediante esquemas de censura do tipo 1, 2 e aleatória, bem como para amostras não-censuradas.

b) Modelo Paramétrico para Distribuição de Weibull

Para dados de falhas que seguem o modelo de distribuição de Weibull, os parâmetros estimados $\hat{\theta}$ e $\hat{\gamma}$ podem ser obtidos usando-se o método da máxima verossimilhança – MLE (Cohen, 1965 *apud* Harter & Moore, 1965 e Lee, 1980, 1992). Quando os tempos até falha de

n unidades testadas forem $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ e não houverem dados censurados, os estimadores $\hat{\theta}$ e $\hat{\gamma}$ dos parâmetros da distribuição são dados pelas equações abaixo (Elsayed, 1996)

$$\frac{n}{\hat{\gamma}} + \sum_{i=1}^n \ln t_i - \frac{1}{\hat{\theta}} \sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\gamma}} \ln t_i = 0, \quad (3.54)$$

$$-\frac{n}{\hat{\theta}} + \frac{1}{\hat{\theta}^2} \sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\gamma}} = 0. \quad (3.55)$$

O MLE de θ e γ pode ser obtido resolvendo-se as equações (3.54) e (3.55) simultaneamente. Substituindo $\hat{\theta}$ da equação (3.55) na equação (3.54), será obtido a diferença $D(\hat{\gamma})$:

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

O valor de $\hat{\gamma}$ pode ser encontrado numericamente através do método Newton-Raphson ou por tentativa e erro. Uma vez determinado o valor de $\hat{\gamma}$, pode-se obter $\hat{\theta}$ através de

$$\hat{\theta}^{\gamma} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i^{\hat{\gamma}}}{n}. \quad (3.57)$$

O intervalo de confiança $100(1 - \alpha)$ para os parâmetros θ e γ são dados por

$$\hat{\gamma} - Z_{\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\hat{\gamma})} < \gamma < \hat{\gamma} + Z_{\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\hat{\gamma})}, \quad (3.58)$$

$$\hat{\theta} - Z_{\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\hat{\theta})} < \theta < \hat{\theta} + Z_{\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\hat{\theta})}. \quad (3.59)$$

Quando as unidades testadas sofrerem censuras do tipo 1 ou tipo 2, os dados de falhas podem ser representados por $t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq \dots \leq t_r \leq t_1^+ = \dots = t_{n-r}^+ = T$. Supondo que os tempos de falha sigam o modelo de Weibull, as equações (3.54) e (3.55), adaptadas para dados censurados, são:

$$\frac{r}{\hat{\gamma}} + \sum_{i=1}^r \ln t_i - \frac{1}{\hat{\theta}} \left[\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\gamma}} \ln t_i + (n-r)t_r^{\hat{\gamma}} \ln t_r \right] = 0, \quad (3.60)$$

$$-\frac{r}{\hat{\theta}} + \frac{1}{\hat{\theta}^2} \left[\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\gamma}} + (n-r)t_r^{\hat{\gamma}} \right] = 0, \quad (3.61)$$

e a diferença $D(\hat{\gamma})$ será dada por

$$D(\hat{\gamma}) = \frac{\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\gamma}} \ln t_i + (n-r)t_r^{\hat{\gamma}} \ln t_r}{\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\gamma}} + (n-r)t_r^{\hat{\gamma}}} - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln t_i - \frac{1}{\hat{\gamma}} = 0. \quad (3.62)$$

Mais uma vez, o valor de $\hat{\gamma}$ pode ser encontrado através do método Newton-Raphson ou por tentativa e erro. Para um dado valor de $\hat{\gamma}$, $\hat{\theta}$ pode ser obtido através da expressão:

$$\hat{\theta}^{\gamma} = \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\gamma}} + (n-r)t_r^{\hat{\gamma}} \right]. \quad (3.63)$$

A variância das estimativas dos parâmetros da distribuição de Weibull, necessárias na operacionalização das equações (3.58) e (3.59), pode ser obtida através da seguinte relação, válida para amostragens não-censuradas ou censuradas (Bain & Engelhardt, 1991):

$$\begin{bmatrix} \text{Var}(\hat{\theta}_1) & \text{Cov}(\hat{\theta}_1, \hat{\gamma}) \\ \text{Cov}(\hat{\theta}_1, \hat{\gamma}) & \text{Var}(\hat{\gamma}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}\hat{\theta}_1^2/n\hat{\gamma}^2 & c_{12}\hat{\theta}_1/n \\ c_{12}\hat{\theta}_1/n & c_{22}\hat{\gamma}^2/n \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

onde c_{11} , c_{22} e c_{12} dependem da relação $p=r/n$, com valores dados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores dos coeficientes c_{11} , c_{22} e c_{12} para cálculo de variâncias e covariâncias em amostragens que seguem modelo de Weibull (Bain & Engelhardt, 1991).

ρ	C_{11}	C_{22}	C_{12}
1.0	1.108665	0.607927	0.257022
0.9	1.151684	0.767044	0.176413
0.8	1.252617	0.928191	0.049288
0.7	1.447258	1.122447	-0.144825
0.6	1.811959	1.372781	-0.446603
0.5	2.510236	1.716182	-0.935766
0.4	3.933022	2.224740	-1.785525
0.3	7.190427	3.065515	-3.438610
0.2	16.478771	4.738764	-7.375310
0.1	60.517110	9.744662	-22.187207

3.5. PAPEL DE PROBABILIDADE

Um método bastante utilizado para determinação de parâmetros em distribuições de probabilidade e para análise gráfica da conformidade de dados amostrais a distribuições hipotetizadas é o papel de probabilidade. Este procedimento transforma a função acumulada da distribuição em um gráfico linear.

Considere como exemplo a distribuição de Weibull, com função acumulada apresentada na equação (3.27). Extraíndo o logaritmo natural da expressão em (3.27) duas vezes, obtém-se:

$$\ln\left(\ln\frac{1}{1-F(t)}\right) = \gamma \ln t - \gamma \ln \theta \quad (3.65)$$

Isolando os termos dependentes do tempo, a equação passa a ser apresentada como:

$$\ln t = \frac{1}{\gamma} \ln\left(\ln\frac{1}{1-F(t)}\right) + \ln \theta \quad (3.66)$$

A expressão (3.44) apresenta o formato $Y = \left(\frac{1}{\gamma}\right)X + A$, ou seja, corresponde à equação de uma reta no espaço (X,Y) , onde X representa o eixo das abcissas, sendo dado por $X = \ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$ e Y representa o eixo das ordenadas, dado por $Y = \ln t$ (Kapur & Lamberson, 1977).

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

O papel de probabilidade para as demais distribuições de probabilidade pode ser obtido de maneira análoga; para maiores detalhes, ver Kapur & Lamberson (1977).

3.6. TESTES DE ADERÊNCIA

Através dos testes de aderência, é possível verificar a compatibilidade (ou aderência) de valores observados em amostras a distribuições de probabilidade utilizadas em confiabilidade. Como a distribuição de probabilidade dos dados amostrais é normalmente desconhecida, testa-se a hipótese de uma determinada distribuição se ajustar aos dados.

Nesta revisão são apresentados dois tipos de testes de aderência. O primeiro teste, denominado teste do Qui-Quadrado, compara os dados de densidade de probabilidade de falhas observados com os valores esperados para a distribuição em análise. Este teste é utilizado, preferencialmente, em distribuições discretas. O segundo teste, denominado teste Kolmogorov-Smirnov compara os dados de densidade acumulada de falhas com os valores esperados para hipótese nula da distribuição em análise. Este teste é utilizado, preferencialmente, em distribuições contínuas.

3.6.1. Teste do Qui-Quadrado

Uma amostra de tamanho n é retirada de uma população com função acumulada de falha $F(t)$. O teste do Qui-Quadrado é um teste de hipóteses, com hipótese nula dada por (Gibbons & Chakraborti, 1992)

$$H_0: F(t) = F_0(t),$$

para todo t , onde $F_0(t)$ é uma distribuição acumulada hipotetizada. A hipótese alternativa é dada por:

$$H_1: F(t) \neq F_0(t),$$

para algum t .

Assumindo que as n observações são agrupadas em k classes, f_i e e_i representam as frequências observadas e frequências esperadas, respectivamente, na $i^{\text{ésima}}$ classe ($i = 1, 2, \dots, k$). A estatística de teste, apresentada por Gibbons & Chakraborti, (1992), baseia-se na diferença $f_i - e_i$, sendo dada por

$$Q = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - e_i)^2}{e_i} . \quad (3.67)$$

A distribuição de probabilidade da variável Q para grandes amostras é aproximadamente Qui-Quadrado, com $k - 1$ graus-de-liberdade.

3.6.2. Teste Kolmogorov-Smirnov

Este teste é baseado em uma função de distribuição empírica. Dados n pontos amostrais Y_1, Y_2, \dots, Y_n , a função de distribuição empírica é definida como:

$$E_N = n(i)/n \quad (3.68)$$

onde $n(i)$ é o número de pontos menores que Y_i . Esta é uma função degrau que aumenta na proporção de $1/n$, relativamente ao valor de cada ponto amostral.

A Figura 12 mostra um gráfico que representa a função de distribuição empírica obtida e a função de densidade acumulada de falhas de uma distribuição normal, a partir de uma amostra composta por 100 valores aleatórios. O teste Kolmogorov-Smirnov é baseado na máxima distância entre as duas curvas (Chakravarti *et al.*, 1967).

Este teste é exato, diferentemente do teste do Qui-Quadrado que depende do tamanho da amostra para que as aproximações sejam válidas.

As limitações do teste K-S são: (i) somente aplicável para distribuições contínuas; (ii) tende a ser mais sensível próximo ao centro das distribuições do que em suas caudas.

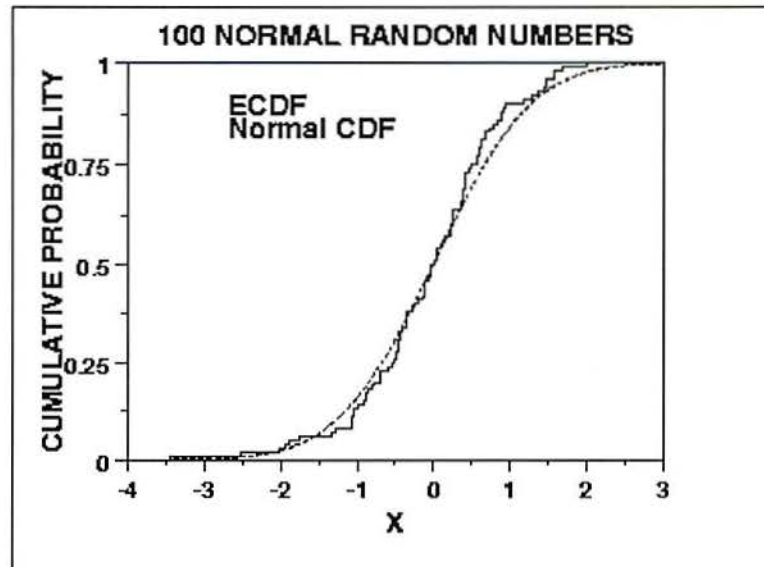


Figura 12. Função de distribuição empírica obtida e a função de densidade acumulada de uma distribuição normal para 100 valores aleatórios (Chakravarti *et al*, 1967).

As hipóteses que compõem o teste Kolmogorov-Smirnov são:

H_0 : Os dados seguem a distribuição especificada;

H_1 : Os dados não seguem a distribuição especificada.

A estatística de teste é dada por:

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq N} \left| F(Y_i) - \frac{i}{N} \right| \quad (3.69)$$

onde $F(Y_i)$ é a função distribuição acumulada de falhas da distribuição que está sendo testada, a qual deve ser contínua e especificada.

A hipótese de que a distribuição analisada segue a distribuição especificada é rejeitada se o valor do teste estatístico D_n for maior que o valor crítico $D_{n,\alpha}$ onde α corresponde ao nível de significância do teste (Chakravarti *et al*, 1967).

Os valores de $D_{n,\alpha}$ para diferentes valores de n e α , encontram-se tabelados em Gibbons & Chakraborti, 1992.

3.7. AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS

Todo sistema (ou produto) é composto de subsistemas ou componentes organizados de forma a desempenhar sua função de projeto, com índices aceitáveis de desempenho e confiabilidade (Elsayed, 1996). Os componentes utilizados, suas qualidades, desempenhos e aplicações têm efeito direto sobre o desempenho do sistema. Portanto, devem ser analisadas a importância e confiabilidade de cada componente, para que possamos avaliar a confiabilidade global do produto ou sistema em questão.

Para iniciar a avaliação de confiabilidade de sistemas é necessário, primeiramente, montar o diagrama de blocos do produto, onde são apresentados todos os subsistemas ou componentes utilizados e suas inter-relações. A partir do diagrama de blocos, é possível verificar o tipo de ligação entre componentes (série, paralelo, série-paralelo, etc.) e avaliar a confiabilidade do sistema como um todo.

Um exemplo de diagrama de blocos para um abajur vem apresentado na Figura 13. Os componentes operacionais no exemplo são: plugue, cabo elétrico, interruptor, soquete e lâmpada. Se um destes componentes falhar, o abajur deixa de funcionar; portanto, o arranjo dos componentes neste produto é em série.

No restante desta revisão, somente são enfocados sistemas de componentes arranjados em série, já que um desses sistemas será objeto de análise no estudo de caso. Informações acerca de outros tipos de arranjos, tais como paralelo, mistos e arranjos complexos, podem ser encontrados em Leemis (1995) e Elsayed (1996).

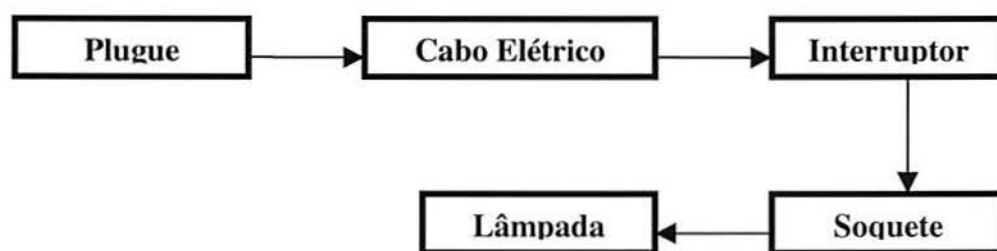


Figura 13. Exemplo de Diagrama de Blocos.

3.7.1. Sistemas em Série

Um sistema em série é composto de n elementos conectados em série. A falha de qualquer um dos componentes resultará na falha de todo sistema. Consequentemente, a confiabilidade de um sistema em série sempre será menor que a confiabilidade de seu elemento mais fraco.

Para a determinação da confiabilidade do sistema em série, é necessário o conhecimento da probabilidade de sucesso dos elementos que o compõem. A confiabilidade do sistema, considerando elementos *dependentes*, é dada por:

$$R = P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \text{ ou}$$

$$R = P(x_1)P(x_2 | x_1)P(x_3 | x_1x_2)\dots P(x_n | x_1x_2x_3\dots x_{n-1}) \quad (3.70)$$

onde x_i representa o estado operacional do $i^{\text{ésimo}}$ elemento (operante ou inoperante), $P(x_i)$ é a probabilidade associada a cada um destes estados e R representa a confiabilidade do sistema.

A confiabilidade de um sistema em série composto por n elementos independentes é dada por:

$$R = P(x_1)P(x_2)\dots P(x_n) \text{ ou } R = \prod_{i=1}^n P(x_i). \quad (3.71)$$

Também pode-se calcular a probabilidade de falha do sistema e, a partir desta, obter a confiabilidade do sistema em série; isto é:

$$P_f = P(\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_n), \quad (3.72)$$

onde \bar{x}_i representa a falha do $i^{\text{ésimo}}$ elemento, $P(\bar{x}_i)$ a probabilidade do $i^{\text{ésimo}}$ elemento não estar operando, $+$ denota união de eventos e P_f designa a densidade acumulada de falha do sistema. A confiabilidade do sistema em série pode ser, então, obtida por

$$R = 1 - P_f. \quad (3.73)$$

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA PROPOSTA PARA MODELAGEM DE DADOS DE TEMPO-ATÉ-FALHA

Este trabalho tem como finalidade modelar a distribuição da confiabilidade de unidades condicionadoras de ar individuais. Para tanto, foi necessário desenvolver uma nova metodologia para definição do modelo baseado nas informações disponíveis acerca daquele produto. Estas informações foram obtidas a partir de dados referentes ao volume de unidades condicionadoras produzidas em um determinado período de tempo e os tempos-até-falha destas unidades. Através destes dados, são realizadas as modelagens das distribuições de taxa de falhas de cada componente e sub-sistema. Com as modelagens individuais definidas, é possível realizar a modelagem geral do sistema.

Apesar de desenvolvida a partir de um estudo de caso, a metodologia detalhada a seguir será descrita de maneira genérica. Mediante pequenas adaptações, a metodologia pode ser aplicada a qualquer item manufaturado; a única condição necessária para sua utilização é a existência de dados de desempenho em campo do item de interesse.

A metodologia de modelagem proposta neste trabalho visa a utilização de dados pareados de data de produção e tempos-até-falha obtidos em campo, de unidades manufaturadas.

As informações de tempos-até-falha podem apresentar fatores incidentes. Pode não ser conhecido, por exemplo, o período de tempo entre data de produção e início de operação do produto. Este fator é denominado “tempo de prateleira” do produto e é aleatório, nem sempre podendo ser estimado com precisão e nem sempre seguindo um padrão lógico de comportamento. Outro fator incidente são as unidades de tempo nas informações de data de produção e tempos-até-falha que podem não ser as mesmas, demandando uma padronização.

Este capítulo está dividido nas seguintes seções e conteúdos. O item 4.1 apresenta a descrição da metodologia de cálculo aplicada neste trabalho. No sub-item 4.1.1 é apresentado o processo de identificação dos modelos de distribuições dos subsistemas. No sub-item 4.1.2 é descrito o procedimento de comparação entre as distribuições individuais geradas pelos dados coletados e as distribuições existentes. O sub-item 4.1.3 apresenta a descrição do procedimento de comparação entre as distribuições mistas geradas pelos dados coletados e as distribuições existentes. No sub-item 4.1.4 é descrita a heurística utilizada para separação das distribuições mistas. No sub-item 4.1.5 é descrito o processo de normalização das distribuições mistas. O sub-item 4.1.6 apresenta o processo de análise de confiabilidade do sistema completo.

4.1. METODOLOGIA APLICADA NA ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DOS SUBSISTEMAS

Primeiramente, é analisado o modo de operação, estrutura, funcionalidade e configuração do item em estudo. Nesta análise, é identificado o tipo de sistema que está sendo trabalhado, são definidos os componentes que compõe cada sub-sistema e a ordem de conexão destes através do diagrama de blocos do produto (ver seção 3.7).

Alguns sub-sistemas são constituídos de apenas um componente e outros possuem dois ou mais componentes. Para os sub-sistemas constituídos de dois ou mais componentes, inicialmente é realizado o estudo individual para cada componente. A seguir, é realizado o estudo do sub-sistema, sendo analisado e definido o tipo de sub-sistema que está sendo estudado e a ordem de conexão dos seus componentes.

4.1.1. Identificação dos modelos de distribuições dos sub-sistemas

Com as informações disponíveis de data de produção e tempos-até-falha, são realizadas as modelagens da distribuição da função de risco de cada componente e sub-sistema. A seguir, são obtidos o histograma de frequência da função de densidade de probabilidade e os gráficos de barras da função de risco e função de confiabilidade dos conjuntos de dados de cada componente e sub-sistema.

Com os gráficos conhecidos, é iniciado o processo de identificação dos modelos de distribuição de cada sub-sistema. São realizadas comparações entre os gráficos gerados e os gráficos dos modelos teóricos de distribuições conhecidas, tais como a distribuição Exponencial, distribuição de Weibull e distribuição Lognormal. A compatibilidade é verificada visualmente, buscando-se identificar uma similaridade entre os histogramas obtidos e aqueles correspondentes às distribuições de probabilidade teóricas. A compatibilidade também é analisada através do papel de probabilidade (ver seção 3.5).

Alguns componentes podem ter seus dados de falha modelados por uma única distribuição (isto é, uma distribuição simples ou unimodal), enquanto outros só podem ser apropriadamente modelados se utilizarmos uma mistura de distribuições (distribuição mista ou multi-modal). No primeiro caso, basta identificar a distribuição simples que mais se assemelha aos gráficos obtidos a partir dos dados amostrais e calcular seus parâmetros. No segundo caso, é necessário estratificar os dados de tempos-até-falha relativamente à sua distribuição de procedência.

4.1.2. Procedimento para análise de dados modelados por distribuições unimodais

Considere dados com gráficos empíricos apresentando similaridade com alguma distribuição teórica existente. Neste caso, define-se primeiramente qual distribuição teórica melhor se adapta aos dados empíricos. Esta definição, conforme apresentado na seção anterior, é realizada por comparação visual entre distribuições empíricas e teóricas, pela análise de seus respectivos papéis de probabilidade. A fim de confirmar a compatibilidade dos valores das amostras coletadas com os modelos de distribuições tabeladas, são aplicados os testes de aderência do Qui-Quadrado (ver seção 3.6.1) e de Kolmogorov-Smirnov (ver seção 3.6.2). Estes métodos analíticos, todavia, nem sempre geram resultados plenamente confiáveis, por serem sensíveis ao critério utilizado para agrupamento de dados em classes e ao tamanho da amostra utilizada; conforme Gibbons & Chakraborti (1992).

Definida a distribuição teórica que melhor modela os dados de tempos-até-falha do componente ou sub-sistema, calculam-se os seus parâmetros através do Método da Máxima Verossimilhança (ver seção 3.3.2). Conhecidos os valores dos parâmetros, são determinadas as curvas de densidade de probabilidade, função de risco e confiabilidade da distribuição do item em estudo. Estas informações são utilizadas posteriormente na análise de confiabilidade do sistema.

4.1.3. Procedimento para análise de dados modelados por distribuições multi-modais

Em alguns estudos de confiabilidade de componentes ou sub-sistemas, os tempos-até-falha analisados são gerados a partir da ocorrência de dois ou mais modos de falha preponderantes. Como resultado, têm-se dados oriundos de duas ou mais populações distintas, que podem ou não seguir uma mesma distribuição de probabilidade. Dados procedentes de populações com distribuições distintas apresentam histogramas de frequência multi-modais, só podendo ser apropriadamente modelados por mais de uma distribuição de probabilidade. No caso do produto analisado neste estudo, por exemplo, diversos componentes apresentaram o comportamento descrito acima, conforme pode-se verificar a partir de seus papéis de probabilidade, obtidos utilizando-se o pacote computacional Proconf (1999) e exemplificados abaixo.

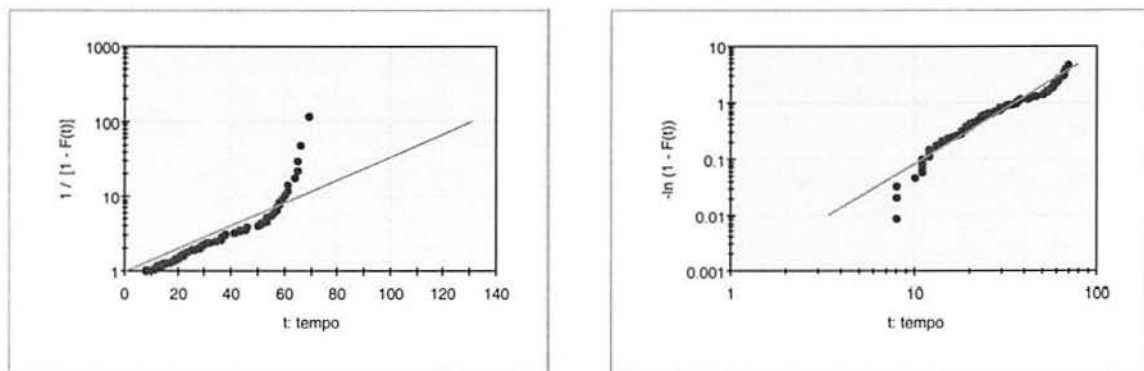


Figura 14. Gráficos de Papel de Probabilidade típicos de componentes do produto analisado.

Na Figura 14, o gráfico da esquerda apresenta os dados de tempos-até-falha no papel de probabilidade da distribuição exponencial. O gráfico da direita apresenta os dados de tempos-até-falha no papel de probabilidade da distribuição de Weibull. Estes dados parecem seguir uma distribuição exponencial até tempos no intervalo entre [30, 60] semanas e, a seguir, assumir uma distribuição com taxa de falha crescente.

A derivação matemática de modelos resultantes da mistura de duas ou mais distribuições de probabilidade pode ser extremamente complexa, devido à quantidade de parâmetros a serem estimados. Na maioria das aplicações, através de métodos como o da máxima verossimilhança para obtenção de estimadores dos parâmetros, não se chegariam a expressões operacionalizáveis na prática. Mesmo quando da mistura de distribuições de probabilidade com um único parâmetro, como é o caso da distribuição exponencial, não é possível obter-se um formulário de baixa complexidade para determinação dos parâmetros

distribucionais. Devido a essas dificuldades, foi desenvolvida uma heurística para modelagem de dados de tempos-até-falha, onde o objetivo é separar os dados de uma distribuição em relação a outra e assim serem determinados os parâmetros de forma e escala para cada distribuição. A descrição desta heurística é apresentada a seguir, supondo uma mistura de duas distribuições.

4.1.4. Heurística para análise de dados de tempos-até-falha modelados por distribuições de probabilidade bimodais

A heurística proposta para a modelagem estatística de dados oriundos de distribuições de probabilidade bimodais é implementada em seis etapas, descritas na seqüência.

1. Através da análise de papéis de probabilidade para diferentes distribuições teóricas unimodais, determine a mistura de distribuições que melhor parece modelar os dados de tempos-até-falha. Por exemplo, os dados apresentados na Figura 14 parecem resultar da mistura de uma distribuição exponencial e de uma distribuição de Weibull.
2. Determine um tempo t aproximado em que as distribuições parecem começar a se misturar. Para os dados exemplificados na Figura 14, por exemplo, um valor razoável para t seria 40 semanas.
3. Analise o histograma de freqüência dos dados amostrais. Caso a mistura de distribuições contemple uma distribuição com um único parâmetro, estime a taxa de falha em todas as classes do histograma que antecedem (ou sucedem) t e, a partir da média das taxas, estime o parâmetro da distribuição correspondente. Caso a mistura de distribuições somente contemple distribuições com múltiplos parâmetros, trunque os dados amostrais em t e estime os parâmetros de uma das distribuições da mistura.
4. Seja $f_1(t)$ a função de densidade da distribuição de probabilidade com parâmetros estimados na etapa 3. Estime a probabilidade acumulada de falhas até o tempo t e, a partir deste valor de probabilidade, estime o número n_1 de pontos na amostra pertencentes à distribuição com densidade $f_1(t)$. Conhecendo os parâmetros de $f_1(t)$, simule uma amostra, de tamanho n_1 , de tempos-até-falha.
5. Realize a separação dos dados pertencentes as duas distribuições de probabilidade. Para tanto, compare os dados de tempos-até-falha amostrados com os dados obtidos

na simulação. Os n_1 dados amostrais mais próximos dos simulados na etapa 4 serão os dados de tempos-até-falha da distribuição com densidade $f_1(t)$. Os demais valores são considerados como pertencendo à segunda distribuição.

6. Depois da separação dos dados, verifique sua aderência às distribuições inicialmente hipotetizadas para a mistura de distribuições; para tanto, utilize as técnicas apresentadas nas seções 3.5 e 3.6. A seguir, calcule parâmetros distribucionais e determine as curvas de densidade de probabilidade, função de risco e confiabilidade.

A heurística acima apresenta algumas características e deficiências que merecem comentários:

- (i) A separação entre dados das distribuições não é total, devendo permanecer valores misturados, mesmo após a conclusão da heurística. Desta forma, apesar de ser possível verificar visualmente uma melhor aderência dos dados estratificados às suas distribuições de origem (relativamente aos dados misturados), tal melhoria no desempenho pode não ser suficiente para validar hipóteses relativas às distribuições em testes analíticos, como o de Kolmogorov-Smirnov e o teste do Qui-Quadrado.
- (ii) Em algumas amostras, após estratificação dos dados em suas distribuições originais, pode-se verificar a existência de valores espúrios, que não parecem pertencer a nenhuma distribuição. Esses valores podem ser resultantes da incidência de modos de falha de baixa frequência de ocorrência, não apresentando-se em quantidade suficiente para caracterizar sua distribuição de probabilidade de origem. Nestes casos, o analista deverá decidir pela manutenção ou remoção dos dados espúrios da amostra, usando critérios qualitativos. Para algumas distribuições é possível utilizar testes para identificação dos valores espúrios da amostra (Elsayed, 1996).
- (iii) Não considera-se a eventual censura nos dados amostrais. Portanto, pode haver alguma distorção nos parâmetros de forma e escala determinados após a heurística, com a inclusão dos dados censurados na amostra.

4.1.5. Normalização das distribuições misturadas

Quando o sub-sistema ou componente em análise apresentar dados oriundos da mistura de duas ou mais distribuições de probabilidade, depois de identificadas as distribuições teóricas de melhor ajuste aos dados e obtidos seus parâmetros, as distribuições resultantes devem ser normalizadas.

Sejam $f_1(t)$ e $f_2(t)$ as funções densidade de probabilidade das duas distribuições abordadas na seção 4.1.4. Através dos parâmetros destas funções, são calculados os valores das ordenadas de $f_1(t)$ e $f_2(t)$ para os valores de t , a partir de $t = 1$ até $t = w$, sendo w o ponto onde $f_1(t)$ e $f_2(t)$ igualam-se a zero. A seguir são somadas as funções $f_1(t)$ e $f_2(t)$ para cada tempo t . A soma normalizada será obtida através divisão de cada valor de soma de $f_1(t)$ e $f_2(t)$ pelo valor obtido no somatório acumulado. Com isto, o somatório acumulado da soma normalizada será 1. Os pontos da função de densidade de probabilidade empírica da distribuição analisada são obtidos da soma normalizada. Desta função, acumulando-se os valores obtidos, determina-se a função densidade acumulada de falhas. Subtraindo-se de 1 os valores gerados nesta função, são obtidos os pontos da função de confiabilidade empírica da distribuição analisada. Esta função empírica será utilizada na análise de confiabilidade do sistema.

4.1.6. Análise de confiabilidade do sistema completo

A partir do diagrama de blocos do produto e da definição das funções de confiabilidade dos componentes ou sub-sistemas, é possível determinar a curva de confiabilidade do produto ou sistema (ver seção 3.7). Também é possível ordenar os componentes e sub-sistemas por ordem de criticidade, ou seja, enumerar em ordem decrescente os componentes mais críticos do sistema. Este cálculo é realizado conforme procedimento a ser apresentado na seção 5.5.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASO

Este capítulo tem como objetivo ilustrar a metodologia proposta no Capítulo 4 em um estudo de caso. A realização da análise de confiabilidade aqui apresentada teve início com a escolha do modelo de unidade condicionadora de ar a ser estudada. Com o modelo de aparelho definido, seguiu-se a metodologia proposta no capítulo anterior para definição do modelo de distribuição da função de confiabilidade a ser adotada para este tipo de aparelho de ar condicionado.

A divisão deste capítulo compreende as seguintes seções e conteúdos: o item 5.1 apresenta o modelo de unidade condicionadora de ar escolhido para modelagem da distribuição de confiabilidade neste estudo de caso. No item 5.2, são informados as origens dos dados e informações utilizadas neste trabalho. O item 5.3 apresenta o diagrama de blocos e tipo de sistema analisado. No item 5.4, é descrito o processo de modelagem das distribuições de confiabilidade dos componentes e sub-sistemas. O item 5.5 apresenta o processo de modelagem da distribuição de confiabilidade do sistema. No item 5.6 são analisados os resultados obtidos. O item 5.7 apresenta uma análise crítica do procedimento adotado para análise dos dados de garantia.

5.1. DEFINIÇÃO DO MODELO DE UNIDADE CONDICIONADORA DE AR A SER ANALISADO

Projetos de unidades condicionadoras de ar individuais são definidos pelo tamanho do chassi. Cada chassi origina diferentes modelos que possuem o mesmo conceito de projeto, mesmas dimensões e *design* semelhante. As diferenças são determinadas pela capacidade de

refrigeração, características de alimentação elétrica e variações nas funções de operação de cada modelo (duas ou três velocidades de ventilação, inclusão de função aquecimento e utilização de controle eletrônico).

Para este trabalho foi escolhido o modelo RCA075B, produzido pela Springer Carrier, desenvolvido sobre o chassi denominado *106*, que abrange capacidade de refrigeração de 5.500 Btu/h a 9.000 Btu/h. O modelo escolhido tem como principais características sua capacidade de refrigeração de 7.500 Btu/h, possuir as funções refrigeração e ventilação em duas velocidades e alimentação elétrica em 220V, 60Hz.

Este modelo de aparelho foi selecionado para análise por possuir o maior volume de produção e vendas dentre todos os modelos de unidades condicionadoras de ar produzidas pela Springer Carrier. Devido ao alto volume de produção, este aparelho apresenta, também, o maior banco de informações de falhas em campo entre todos os modelos produzidos pela empresa, podendo proporcionar uma modelagem de confiabilidade mais precisa. A partir da definição do modelo de confiabilidade deste produto, será possível estimar uma distribuição de confiabilidade aproximada para outros produtos que apresentem características semelhantes.

5.2. DADOS E INFORMAÇÕES UTILIZADAS NA REALIZAÇÃO DO ESTUDO

O modelo RCA075B teve seu início de produção no ano de 1997. Em setembro de 1997, foi realizada a primeira montagem deste produto em uma linha de produção, tendo sido fabricadas 55 unidades. A partir de novembro do mesmo ano, foi iniciada a produção normal do produto, sendo produzidas até o final do ano 8.415 unidades. Este estudo abrange informações das unidades produzidas entre Janeiro de 1998 e Junho de 1999. Neste período, foram produzidos 94.039 aparelhos do modelo, sendo registradas 4.081 falhas. A não inclusão das unidades produzidas em 1997 teve o objetivo de reduzir, neste estudo, a incidência de falhas originadas no período de “Mortalidade Infantil” do produto (ver seção 3.2.5).

As informações disponíveis para realização deste estudo foram coletadas no Departamento de Pós-Venda da empresa. Neste departamento, é realizado o controle de garantia de todos os produtos produzidos pela empresa, incluindo a reposição de componentes defeituosos. Foi através deste controle de substituição de peças que foram coletados os dados

referentes aos tempos-até-falha de todos componentes do modelo de unidade condicionadora de ar aqui enfocado.

O controle de reposição de componentes é realizado para, aproximadamente, três mil diferentes modelos de unidades condicionadores de ar. A codificação utilizada para identificação do tipo de falha apresentado por cada componente foi generalizada, podendo, assim, cada código de falha atender diferentes modelos de unidades condicionadoras de ar. O objetivo desta generalização é facilitar e otimizar o controle do Departamento de Pós-Vendas sobre os produtos dentro do período de garantia. Com isto, muitas vezes torna-se subjetivo, para uma análise de confiabilidade, o componente que apresentou defeito. No Anexo B são apresentadas as descrições das falhas utilizadas no controle de garantia para aparelhos individuais.

Um fato relevante refere-se às unidades de tempo das informações obtidas. Nos relatórios de falhas, são informados o mês em que ocorreu a falha, o código do defeito e número de série do produto. Com isto, é possível estimar o tempo-até-falha de cada aparelho. Já a data de produção destes aparelhos é apresentada na forma de semana e ano. Para tornar este trabalho mais preciso e unificar a unidade de tempo, todas as informações de tempos-até-falha foram consideradas como correspondendo à segunda semana do mês em que foram registradas. Com isto, a unidade de tempo utilizada neste trabalho será sempre *semana*.

Outro fator importante, que não pôde ser levantado devido à sua aleatoriedade, foi o “tempo de prateleira” do produto analisado. É conhecida a data de fabricação do produto, porém não é informada a data de início de operação dos modelos de aparelhos condicionadores de ar individuais. Na busca desta informação foi constatado que o tempo de prateleira é bastante variável, podendo variar, conforme constatação histórica, de duas a trinta e seis semanas. Na prática, devido ao alto valor agregado do produto, o tempo de prateleira verificado no varejo costuma ser inferior a quatro semanas. Na análise que se segue, desprezou-se o tempo de prateleiras das unidades estudadas.

5.3. DEFINIÇÃO DO DIAGRAMA DE BLOCOS E TIPO DE SISTEMA ANALISADO

O modelo de unidade condicionadora de ar RCA075B possui os seguintes componentes: tubulação, rabicho, rede elétrica, condensador, evaporador, compressor, termostato, capilar, chave seletora, motor, capacitor, hélice, turbina, barragem, frente plástica, gabinete, caracol,

calha, conjunto base, vanes e botões (ver Figura 5). Além destes componentes, este aparelho também possui alguns elementos de fixação (parafusos e suporte plásticos) que não foram considerados neste trabalho.

Na definição do diagrama de blocos, foram desconsiderados os componentes que não impedem o funcionamento do aparelho condicionador de ar caso venham a apresentar falhas. Estes componentes são: barragem, frente plástica, calha, conjunto base e vanes. Rabicho e rede elétrica, por apresentarem características e modos de falhas semelhantes, foram considerados como um único componente, denominado circuito elétrico. Também foi criado um sub-sistema, denominado evaporador, constituído dos componentes evaporador, caracol e concha. Este sub-sistema foi criado porque estes componentes trabalham integrados e a falha de um deles reflete na funcionalidade dos demais.

O modelo RCA075B, apresenta duas funções de operação: ventilação e refrigeração. Para definição do diagrama de blocos foi considerado a unidade operando na função refrigeração. Neste modo de operação, estão em funcionamento todos componentes utilizados no ciclo de refrigeração (ver seção 2.1.2) e também os componentes necessários a operação em modo ventilação, que são o motor e o sub-sistema evaporador.

Todos os componentes do produto em estudo estão ligados em série. Ocorrendo a falha de um dos componentes apresentados no diagrama de blocos, o aparelho como um todo apresenta falha de operação. O critério de ligação entre os componentes baseia-se na ordem de acionamento destes componentes quando a unidade é ligada. A Figura 15 apresenta o diagrama de blocos do modelo de aparelho analisado.

Quando o botão da chave seletora é girado e o termostato ajustado para a temperatura desejada, a unidade é energizada via rabicho e rede elétrica. O capacitor auxilia a partida do motor que, por sua vez, faz girar a turbina e a hélice. Neste momento, a unidade inicia a operação na função ventilação. Quando é selecionado a função refrigeração na chave seletora, o termostato fecha seu contato elétrico se a temperatura no retorno do ar à unidade estiver acima do ajustado. Neste momento, é acionado o compressor iniciando o ciclo de refrigeração do aparelho (ver seção 2.1.2). Neste ciclo, também são utilizados os componentes tubulação, condensador, capilar e o sub-sistema evaporador.

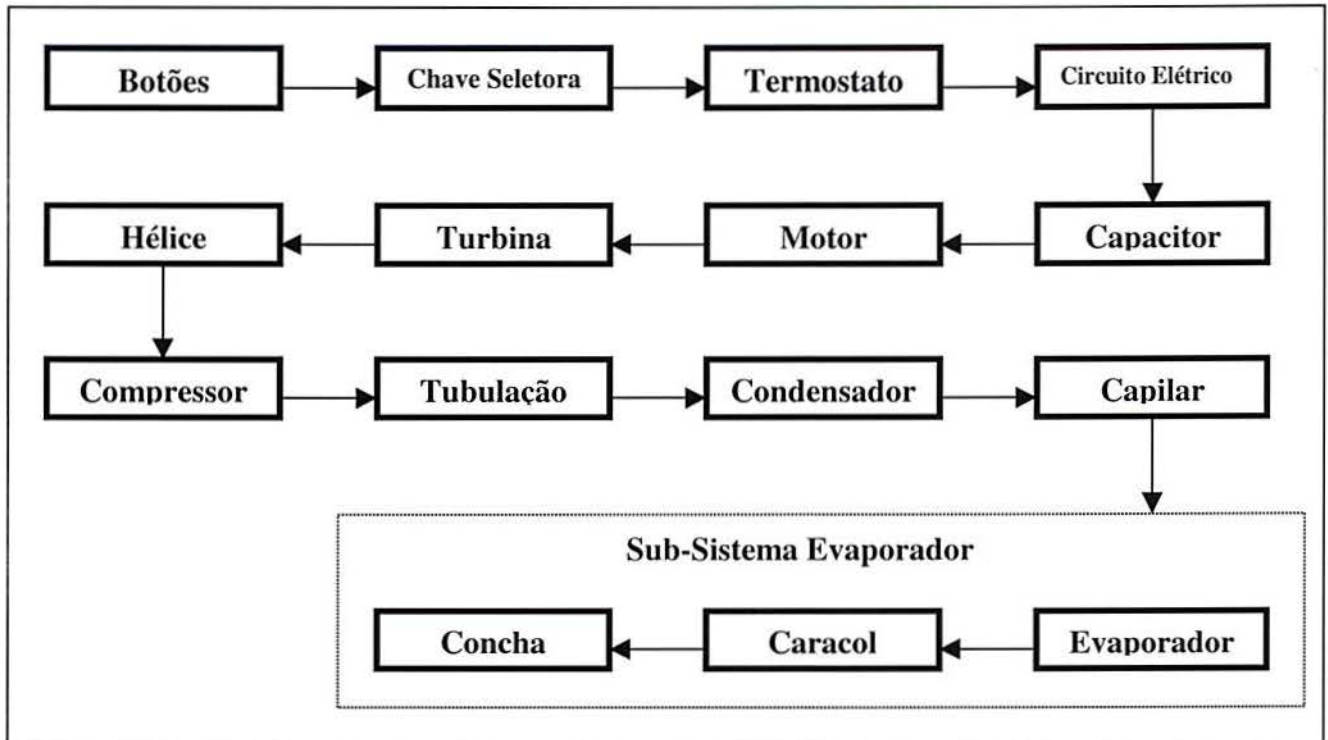


Figura 15. Diagrama de Blocos do Produto Analisado.

5.4. DEFINIÇÃO DOS MODELOS DA DISTRIBUIÇÃO DE CONFIABILIDADE DOS COMPONENTES E SUB-SISTEMAS

Conforme apresentado na seção 4.2.1., primeiramente é realizada a modelagem da distribuição de função de risco de cada componente e sub-sistema. A seguir são obtidos o histograma de frequência da função de densidade de probabilidade e os gráfico de barras das funções de risco e confiabilidade dos conjuntos de dados de cada componente. Através destes histogramas e seus papéis de probabilidade, é verificada a compatibilidade destes com as distribuições conhecidas através de comparação visual. Durante esta comparação é possível identificar quais distribuições seguem a forma de uma distribuição usualmente utilizada em estudos de confiabilidade (isto é, de uma distribuição teórica tabelada) e quais apresentam uma mistura de duas ou mais distribuições.

Nesta seção, é apresentada a descrição completa do procedimento de modelagem da função confiabilidade de um dos componentes que apresenta mistura de distribuições de probabilidade nos seus tempos-até-falha; o componente focado é o condensador. O

procedimento adotado na análise desse componente segue os passos introduzidos na seção 4.2.3. Para os demais componentes, são apresentados os resultados das modelagens, na forma dos parâmetros dos modelos de distribuições definidos; estas informações encontram-se na seção 5.5.

Todos os histogramas, gráficos de papel de probabilidade, cálculos de parâmetros dos modelos de distribuições e aplicações dos testes de aderência deste trabalho foram realizados com auxílio do *software* Proconf (1999). Para a determinação do modelo de confiabilidade do sistema e estudos de criticidade dos seus componentes, foi utilizado o *software* Prosis (1999). Estes *software* foram desenvolvidos com auxílio de pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O estudo do componente condensador é iniciado com a coleta dos dados de produção da unidade condicionadora de ar analisada. Estas informações encontram-se na Tabela 4. Nesta tabela, a coluna *Semana de Produção* apresenta a semana do ano em que foi produzido os aparelhos. A fim de facilitar os cálculos neste trabalho, as semanas foram numeradas de 1 (primeira semana de janeiro/1998) até 77 (quarta semana de junho/1999), correspondendo ao período de produção abrangido neste estudo.

Também são coletados os dados de tempos-até-falha do componente condensador; estas informações encontram-se na Tabela 5. Nesta tabela, a *Semana de Defeito* corresponde à semana em que o componente apresentou a falha. Conforme explicado na seção 5.2, as informações de tempos-até-falha obtidos no Departamento de Pós-Venda da empresa estão expressas em *mês da falha*. Para facilitar este estudo, todos os dados de tempos-até-falha foram considerados como ocorrendo na segunda semana do mês em que o componente apresentou defeito. Com isto, a unidade de tempo utilizada neste trabalho é *semana*. A coluna *Código do Defeito* refere-se ao tipo de falha apresentado pelo componente (ver códigos de defeitos no Anexo B).

Tabela 4. Unidades do modelo RCA075B produzidas entre janeiro/1998 e junho/1999.

Modelo: RCA075B								
Ano	Mês	Semana de Produção	Produção (Un.)	Ano	Mês	Semana de Produção	Produção (Un.)	
1998	jan/98	1	0	1998	set/98	40	2308	
	jan/98	2	3800		out/98	41	2100	
	jan/98	3	2250		out/98	42	2300	
	jan/98	4	1770		out/98	43	3852	
	jan/98	5	1281		out/98	44	2821	
	fev/98	6	1600		nov/98	45	3579	
	fev/98	7	2200		nov/98	46	900	
	fev/98	8	2200		nov/98	47	2950	
	fev/98	9	1658		nov/98	48	1010	
	mar/98	10	800		dez/98	49	1240	
	mar/98	11	700		dez/98	50	0	
	mar/98	12	2200		dez/98	51	400	
	mar/98	13	1800		dez/98	52	1500	
	abr/98	14	475		1999	jan/99	53	1500
	abr/98	15	1200			jan/99	54	3800
	abr/98	16	1225			jan/99	55	1900
	abr/98	17	0			jan/99	56	0
	abr/98	18	580	fev/99		57	1750	
	mai/98	19	720	fev/99		58	1500	
	mai/98	20	2500	fev/99		59	1000	
	mai/98	21	350	fev/99		60	500	
	mai/98	22	0	mar/99		61	700	
	jun/98	23	0	mar/99		62	0	
	jun/98	24	400	mar/99		63	0	
	jun/98	25	1200	mar/99		64	1600	
	jun/98	26	1400	abr/99		65	800	
	jun/98	27	1800	abr/99		66	250	
	jul/98	28	1800	abr/99		67	0	
	jul/98	29	1800	abr/99		68	0	
	jul/98	30	400	abr/99		69	1000	
	jul/98	31	0	mai/99	70	620		
	ago/98	32	1700	mai/99	71	620		
	ago/98	33	2000	mai/99	72	120		
	ago/98	34	300	mai/99	73	1800		
	ago/98	35	0	jun/99	74	600		
	set/98	36	2500	jun/99	75	500		
	set/98	37	1500	jun/99	76	410		
	set/98	38	1000	jun/99	77	0		
	set/98	39	1000	Total				94039

Tabela 5. Informações de tempos-até-falha (*TTF*) do componente condensador.

<i>Item</i>	<i>Semana de Produção</i>	<i>Código do Defeito</i>	<i>Semana do Defeito</i>	<i>TTF</i>	<i>Item</i>	<i>Semana de Produção</i>	<i>Código do Defeito</i>	<i>Semana do Defeito</i>	<i>TTF</i>
1	2	104	20	18	42	33	105	55	22
2	4	104	33	29	43	34	105	46	12
3	13	104	33	20	44	34	105	55	21
4	46	104	68	22	45	36	105	55	19
5	1	105	29	28	46	40	105	77	37
6	2	105	55	53	47	41	105	77	36
7	2	105	59	57	48	48	105	68	20
8	3	105	29	26	49	49	105	72	23
9	3	105	37	34	50	62	105	77	15
10	3	105	68	65	51	3	106	20	17
11	3	105	72	69	52	4	106	15	11
12	6	105	20	14	53	8	106	63	55
13	7	105	68	61	54	12	106	24	12
14	8	105	20	12	55	15	106	72	57
15	8	105	24	16	56	27	106	72	45
16	8	105	33	25	57	40	106	51	11
17	8	105	37	29	58	44	106	59	15
18	8	105	51	43	59	44	106	68	24
19	8	105	51	43	60	49	106	72	23
20	8	105	59	51	61	56	106	77	21
21	10	105	24	14	62	2	109	20	18
22	10	105	42	32	63	2	109	68	66
23	12	105	20	8	64	3	109	33	30
24	13	105	24	11	65	4	109	68	64
25	13	105	24	11	66	7	109	68	61
26	13	105	33	20	67	8	109	20	12
27	13	105	42	29	68	8	109	68	60
28	15	105	51	36	69	13	109	59	46
29	15	105	68	53	70	32	109	55	23
30	18	105	77	59	71	33	109	55	22
31	19	105	29	10	72	37	109	68	31
32	19	105	55	36	73	49	109	68	19
33	19	105	72	53	74	5	141	55	50
34	19	105	77	58	75	5	141	63	58
35	26	105	55	29	76	7	141	15	8
36	27	105	68	41	77	7	141	20	13
37	28	105	55	27	78	8	141	46	38
38	29	105	37	8	79	8	141	59	51
39	29	105	42	13	80	12	141	68	56
40	32	105	51	19	81	7	144	72	65
41	33	105	51	18	82	32	144	68	36

O histograma de frequência da função de densidade de probabilidade e os gráfico de barras das funções de risco e confiabilidade para os dados na Tabela 5 são apresentados na Figura 16.

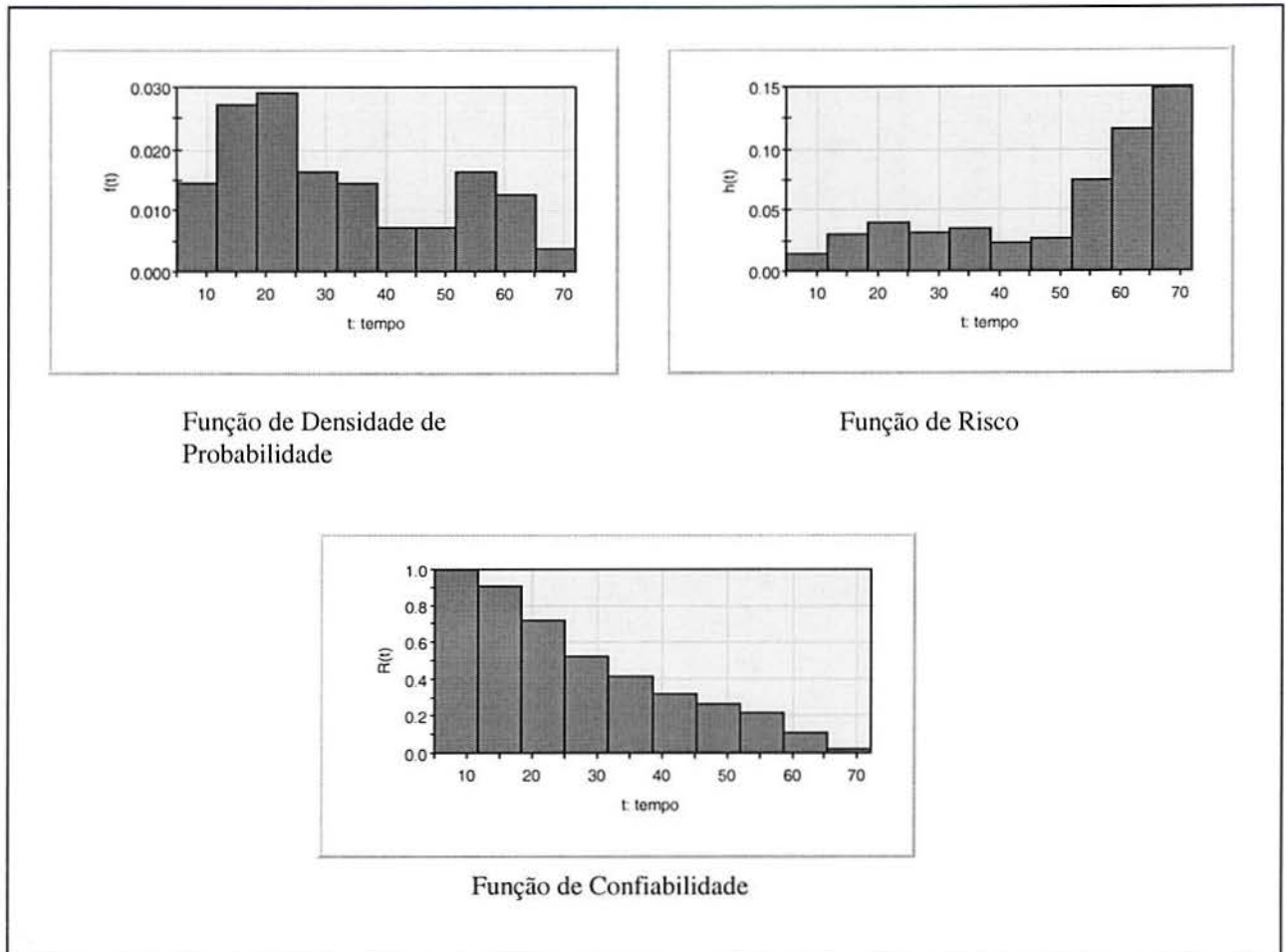


Figura 16. Histograma de frequência da função densidade de probabilidade e gráficos de barras das funções de risco e confiabilidade do componente condensador.

Nestes histogramas não estão inclusos os dados censurados. Para o condensador existem 88.403 dados censurados. Com a inclusão destes dados, de censura aleatória, a comparação visual dos papéis de probabilidade das distribuições e os resultados dos testes de aderência tornam-se distorcidos, não fornecendo informações confiáveis para definição da distribuição de confiabilidade dos componentes e do sistema.

Pode ser verificado, através de inspeção visual no histograma de densidade de probabilidade e gráfico de barras da função de risco na Figura 16, que os dados parecem ser oriundos de uma mistura de duas distribuições de probabilidade. Os dados tendem para uma distribuição exponencial até tempos no intervalo entre [30, 60] semanas assumindo, a seguir, uma distribuição com função de risco crescente como a de Weibull. Os papéis de probabilidade para distribuições Exponencial e Weibull, apresentados na Figura 17, parecem corroborar com as constatações visuais descritas acima.

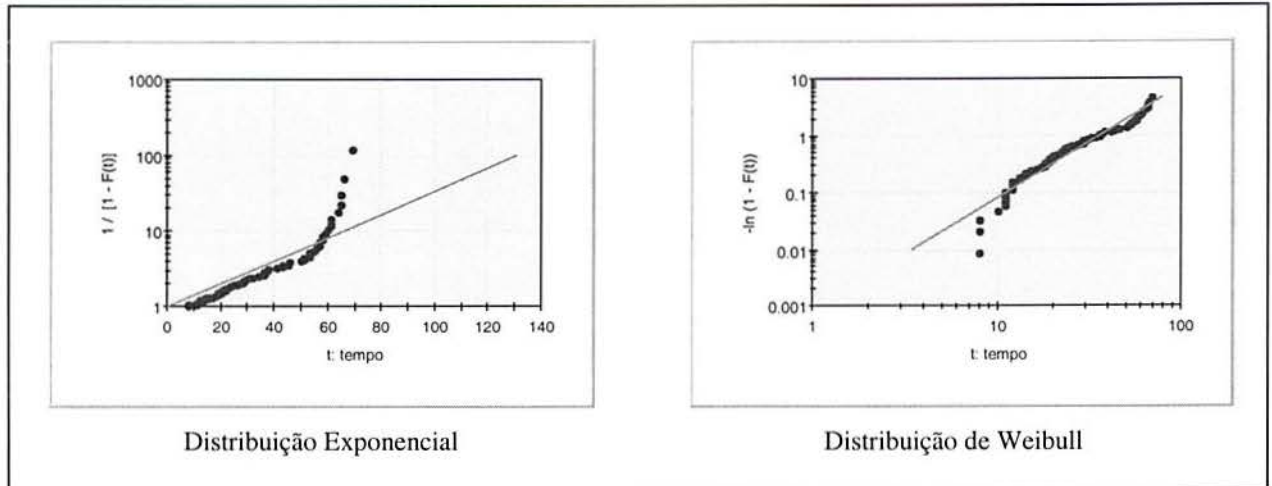


Figura 17. Gráficos dos papéis de probabilidade para distribuições Exponencial e Weibull do componente condensador.

Para a modelagem dos dados de tempos-até-falha em casos como este, foi criada uma heurística, descrita na seção 4.2.4. O objetivo desta heurística é separar os dados provenientes de diferentes distribuições de probabilidade.

Em primeiro lugar, definiu-se, a partir de inspeção nos papéis de probabilidade e do gráfico da função de risco, um tempo t a partir do qual dados de uma segunda distribuição de probabilidade parecem contaminar os dados oriundos da primeira distribuição. Com base nos papéis de probabilidade apresentados na Figura 17 e do gráfico de barras da função de risco, apresentado na Figura 16, esse tempo foi estimado em $t = 40$ semanas. A seguir, escreveram-se os dados de tempos-até-falha até $t = 40$ semanas em uma planilha de cálculos, onde foram gerados intervalos de classe de tamanho razoável; o objetivo é calcular valores de risco em cada intervalo. Para tanto utilizou-se a fórmula:

$$h(t) = \frac{n_f(t)}{n_s(t)\Delta t} \quad (5.1)$$

onde Δt denota a amplitude da classe, $n_s(t)$ denota o número de peças sobreviventes no início do período compreendido em Δt e $n_f(t)$ denota o número de falhas observadas no intervalo Δt . Os cálculos para os dados acima descritos vêm apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Dados obtidos com aplicação da heurística.

Intervalo	nr(t)	ns(t)	delta	h(t)
0-5	0	56	5	0.000
6-10	4	56	5	0.014
11-15	14	52	5	0.054
16-20	11	38	5	0.058
21-25	10	27	5	0.074
26-30	8	17	5	0.094
31-35	3	9	5	0.067
36-40	6	6	5	0.200
			Media	0.070

O valor médio do $h(t)$ obtido na Tabela 6, corresponde ao parâmetro λ da função densidade de probabilidade da exponencial. Através desta função, foi determinado o valor da confiabilidade no tempo limite ($t = 40$ semanas; ver seção 3.2.7).

Utilizando o *software* Proconf (1999), calculou-se o valor de $R(t = 40)$. No caso do condensador, o valor de $R(40) = 0,0605$. Através deste resultado foi possível obter o valor da probabilidade acumulada em $t = 40$ semanas; isto é:

$$F(40) = 1 - R(40) = 1 - 0,0605 = 0,9395.$$

O número de falhas até o tempo limite $t = 40$ foi estimado em 56 falhas (ver Tabela 5). Assim, o número de falhas da primeira distribuição passa a ser $56/0,9395 = 60$ falhas.

A seguir, também utilizando-se o *software* Proconf, foram simulados 82 dados de tempos-até-falha (número total de dados na Tabela 5) a partir de uma distribuição exponencial. Os dados simulados foram comparados com os dados reais e, a partir de $t = 40$, os 4 dados reais que mais se assemelharam aos simulados foram escolhidos como pertencendo à primeira distribuição para completar a amostra de 60 falhas. Nesta comparação foram descartados valores simulados maiores que o maior valor real. A Tabela 7 apresenta a comparação entre dados reais e simulados para o componente condensador.

Da comparação na Tabela 7 foram geradas duas amostras: a primeira contém os dados de tempos-até-falha até $t = 40$, além dos pontos adicionais selecionados (valores destacados na Tabela 7); a segunda amostra contém os pontos não incluídos na primeira amostra.

É importante salientar que as distribuições geradas por esta heurística ainda apresentam-se mutuamente contaminadas. Também podem haver pontos atípicos remanescentes, pertencentes a outra distribuição não contemplada. Em outras palavras, este método de

separação de distribuições pode não promover a separação total das distribuições. Todavia, com os resultados obtidos é possível identificar quais as distribuições existentes mais se assemelham às distribuições dos dados amostrados.

Para as duas amostras de dados de tempos-até-falha, são obtidos o histograma de frequência da função de densidade de probabilidade e os gráfico de barras das funções de risco e confiabilidade. Através destes gráficos e dos papéis de probabilidade, foi verificada sua compatibilidade com as distribuições teóricas conhecidas através de comparação visual.

A fim de diferenciar as duas distribuições geradas, na Tabela 8 são apresentados os tempos-até-falha correspondentes a cada uma delas. Foi denominado *distribuição 1* a distribuição gerada com dados até $t = 40$, acrescidos dos dados identificados na heurística. Os demais dados foram considerados como pertencendo à *distribuição 2*.

O histograma de frequência da função de densidade de probabilidade e os gráfico de barras das funções de risco e confiabilidade da *distribuição 1* são apresentados na Figura 18. Os papéis de probabilidade obtidos a partir dos mesmos dados, supondo distribuições Exponencial, Weibull e Lognormal são apresentadas na Figura 19. Observe que, mesmo após a separação das distribuições utilizando a heurística proposta, alguns valores de tempos-até-falha, em particular para tempos superiores a 60 semanas, parecem atípicos.

Por análise visual, é possível constatar que a *distribuição 1* apresenta semelhança com os modelos de Weibull ou Lognormal. Os testes de aderência, todavia, geraram resultados discordantes, como pode ser visto nos Quadros 1 e 2, respectivamente. Naqueles quadros, as distribuições hipotetizadas são rejeitadas no teste do Qui-Quadrado, mas não são rejeitadas, a 95% de confiança, no teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Isto deve-se, provavelmente, a presença de dados espúrios remanescentes, após a aplicação da heurística, conforme mencionado anteriormente. Observe todavia, que por análise visual dos papéis de probabilidade na Figura 19, os dados parecem conformar-se razoavelmente às distribuições de Weibull e Lognormal, corroborando o resultado obtido no teste K-S.

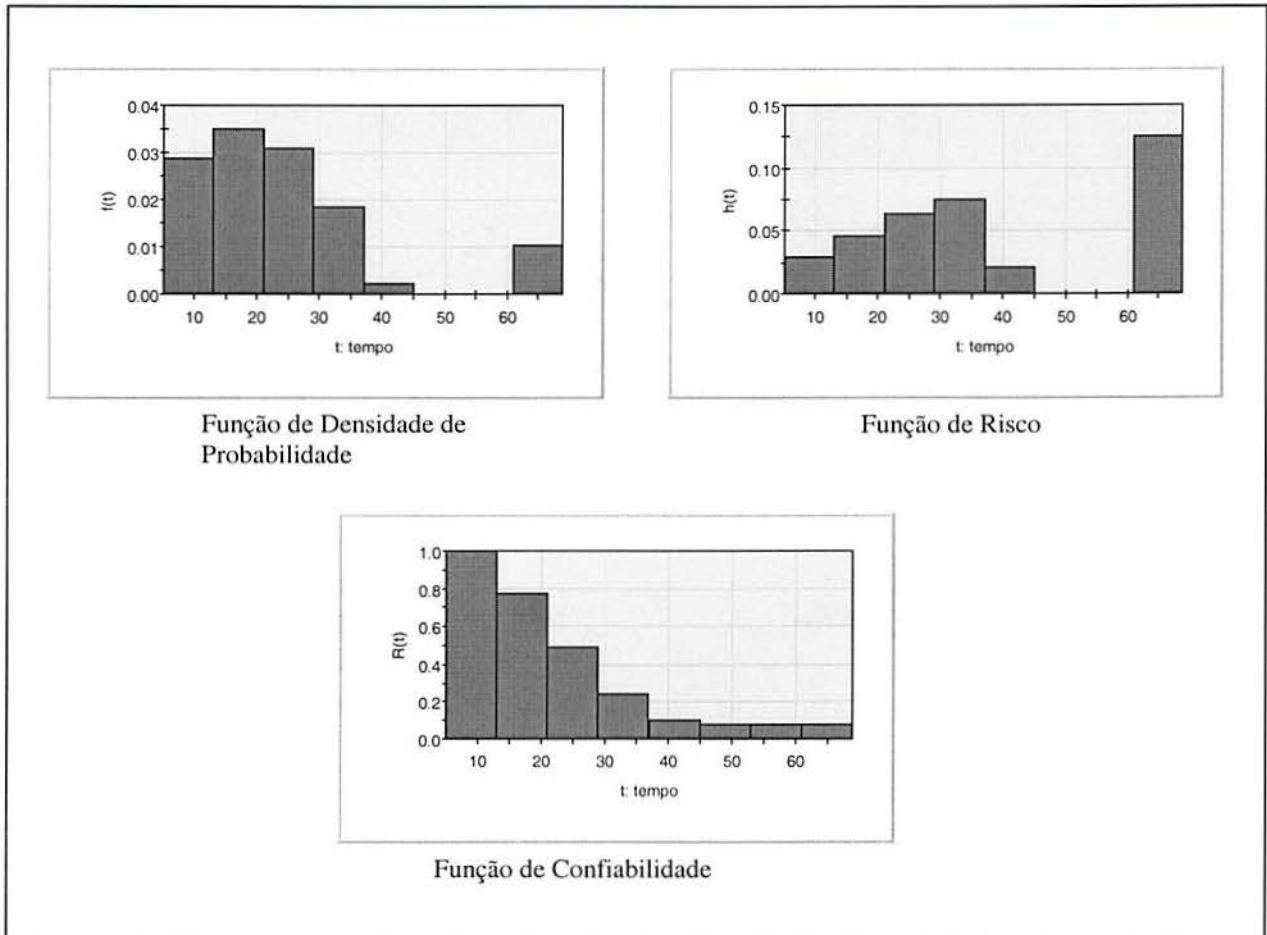


Figura 18. Histograma de frequência da função densidade de probabilidade e gráfico de barras das funções de risco e confiabilidade da *distribuição 1*.

É importante ressaltar, também, que no teste de Kolmogorov-Smirnov, as hipóteses de modelo de Weibull e modelo Lognormal para os dados da *distribuição 1* não puderam ser rejeitadas a 95% de confiança. Como este teste costuma gerar resultados mais confiáveis em amostras de tamanho pequeno (ver Pratt & Gibbons, 1981), a aceitação dos modelos de Weibull ou Lognormal para os dados da *distribuição 1* não poderia ser contestada em teoria.

Tabela 7. Simulação de dados de tempos-até-falha (*TTF*) do condensador.

Item	<i>TTF</i>	Dados Simulados	Item	<i>TTF</i>	Dados Simulados
1	8	0,09	48	31	12,3484
2	8	0,26	49	32	12,768
3	8	0,44	50	34	13,2002
4	10	0,62	51	36	13,65
5	11	0,81	52	36	14,11
6	11	0,99	53	36	14,58
7	11	1,18	54	36	15,07
8	11	1,37	55	37	15,58
9	12	1,56	56	38	16,11
10	12	1,76	57	41	16,66
11	12	1,95	58	43	17,23
12	12	2,16	59	43	17,82
13	13	2,36	60	45	18,45
14	13	2,57	61	46	19,09
15	14	2,78	62	50	19,77
16	14	2,99	63	51	20,49
17	15	3,20	64	51	21,24
18	15	3,42	65	53	22,03
19	16	3,65	66	53	22,87
20	17	3,87	67	53	23,76
21	18	4,10	68	55	24,71
22	18	4,34	69	56	25,73
23	18	4,57	70	57	26,83
24	19	4,82	71	57	28,02
25	19	5,06	72	58	29,32
26	19	5,31	73	58	30,74
27	20	5,57	74	59	32,33
28	20	5,83	75	60	34,11
29	20	6,09	76	61	36,16
30	21	6,36	77	61	38,54
31	21	6,63	78	64	41,40
32	22	6,91	79	65	44,99
33	22	7,20	80	65	49,78
34	22	7,49	81	66	57,07
35	23	7,79	82	69	72,74
36	23	8,09			
37	23	8,40			
38	24	8,72			
39	25	9,04			
40	26	9,37			
41	27	9,71			
42	28	10,06			
43	29	10,42			
44	29	10,78			
45	29	11,16			
46	29	11,54			
47	30	11,94			

Tabela 8. Dados de tempos-até-falha (*TTF*) das duas distribuições geradas pela heurística para o condensador.

Distribuição 1				Distribuição 2	
Item	<i>TTF</i>	Item	<i>TTF</i>	Item	<i>TTF</i>
1	8	31	21	1	41
2	8	32	22	2	43
3	8	33	22	3	43
4	10	34	22	4	45
5	11	35	23	5	46
6	11	36	23	6	50
7	11	37	23	7	51
8	11	38	24	8	51
9	12	39	25	9	53
10	12	40	26	10	53
11	12	41	27	11	53
12	12	42	28	12	55
13	13	43	29	13	56
14	13	44	29	14	57
15	14	45	29	15	57
16	14	46	29	16	58
17	15	47	30	17	58
18	15	48	31	18	59
19	16	49	32	19	60
20	17	50	34	20	61
21	18	51	36	21	64
22	18	52	36	22	69
23	18	53	36		
24	19	54	36		
25	19	55	37		
26	19	56	38		
27	20	57	61		
28	20	58	65		
29	20	59	65		
30	21	60	66		

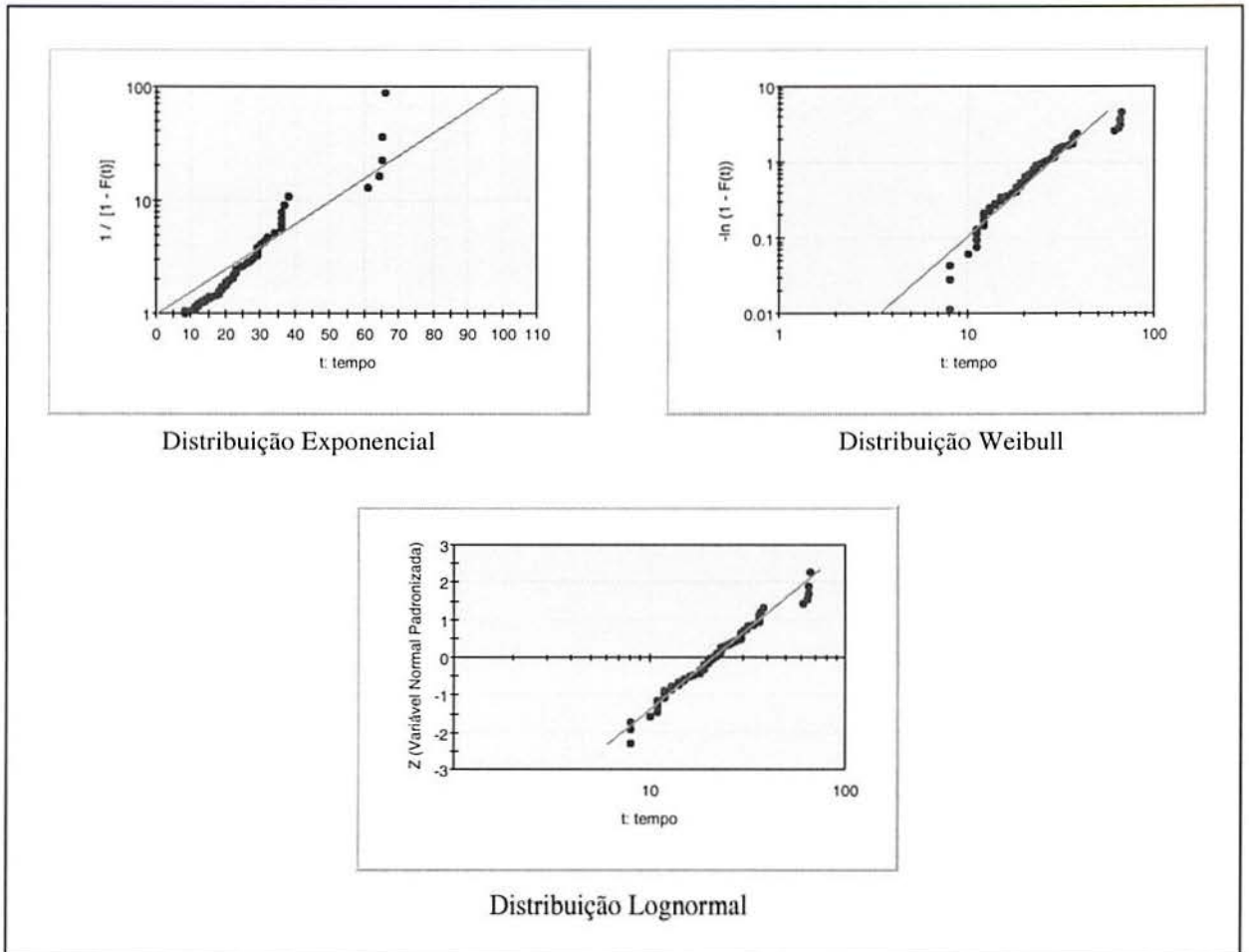


Figura 19. Gráficos dos papéis de probabilidade para distribuições Exponencial, Weibull e Lognormal da *distribuição 1*.

Quadro 1. Resultados dos testes de aderência para os dados da *distribuição 1*

Testes de Aderência para Modelo de Weibull	
Teste do Qui-Quadrado	
X ² = 27,00 com 5 graus de liberdade	Nível de Significância = 0,0001
Teste de Kolmogorov-Smirnov:	
DN = 0,1036	Nível de Significância = 0,101

Quadro 2. Resultados dos testes de aderência para os dados da *distribuição 1*

Testes de Aderência para Modelo Lognormal	
Teste do Qui-Quadrado	
X ² = 16,24 com 5 graus de liberdade	Nível de Significância = 0,0062
Teste de Kolmogorov-Smirnov:	
DN = 0,0596	Nível de Significância = 0,3347

Para os dados da *distribuição 1*, definiu-se como modelo de distribuição para os dados do componente, o modelo de Weibull. Esta escolha justifica-se por ser o modelo da distribuição Lognormal um caso particular do modelo de Weibull (ver seção 3.2.7). Assim, a escolha do modelo de Weibull tende a diminuir o erro que pode vir a ocorrer entre o modelo estimado e o modelo real da função de confiabilidade dos componentes analisados.

Com o modelo de distribuição definido, são determinados os valores dos seus parâmetros. Nos cálculos destes parâmetros devem também ser considerados os dados censurados existentes. Estes dados não haviam sido incluídos neste estudo durante a definição do modelo de distribuição adotado.

No Quadro 3, são apresentados todos os parâmetros para modelo de Weibull da *distribuição 1*. Na Figura 20, é apresentada a função confiabilidade correspondente à esta distribuição.

Quadro 3. Parâmetros do modelo de Weibull para os dados da *distribuição 1*.

Ajuste de Dados - Modelo de Weibull	
Parâmetro de Localização = 0	
Estimativas de Verossimilhança	
Gama = 1,6245	Var(Gama) = 5,3879E-06
Teta = 2079,806	Var(Teta) = 20,7829
Estimativa Não Tendenciosa	
Gama = 1,6245	Teta = 2080,014
Intervalo de Confiança para os Parâmetros a 95%	
Gama = 1,5929 até 1,6019	Teta = 2054,333 até 2134,471
MTTF = 1862,375	

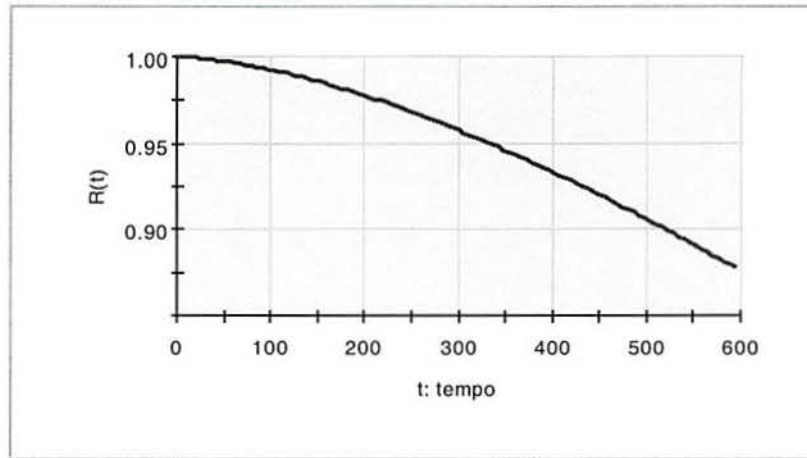


Figura 20. Gráfico gerado pela função confiabilidade da *distribuição 1*.

A seguir, é definido o modelo de distribuição que seguem os dados de tempos-até-falha da *distribuição 2*.

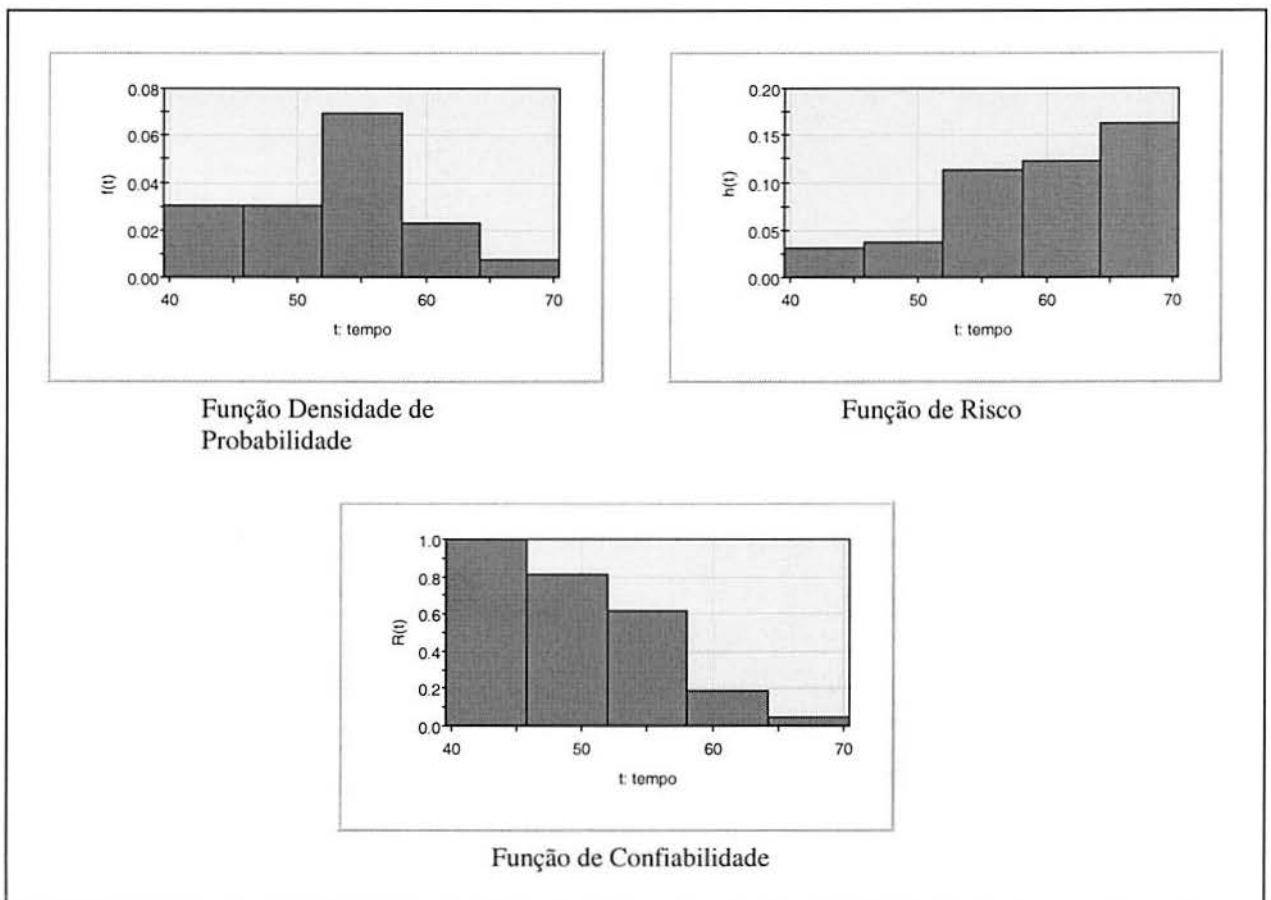


Figura 21. Histograma de frequência da função densidade de probabilidade e gráfico de barras das funções de risco e confiabilidade para os dados da *distribuição 2*.

O histograma de frequência da função de densidade de probabilidade e os gráfico de barras das funções de risco e confiabilidade da *distribuição 2* são apresentados na Figura 21. Os papéis de probabilidade obtidos para as distribuições Exponencial, Weibull e Lognormal estão apresentados na Figura 22. Através da análise visual, é possível constatar que os dados da *distribuição 2* parecem conformar-se aos modelos de Weibull e Lognormal. Os testes de aderência não rejeitam nenhum dos dois modelos, conforme apresentado nos Quadros 4 e 5. Como o modelo de Weibull é mais abrangente que o Lognormal, o modelo de distribuição adotado para a *distribuição 2* é o de Weibull.

O ajuste dos parâmetros da *distribuição 2* para modelo de Weibull foi calculado com auxílio do *software* Proconf (1999) e são apresentados no Quadro 6.

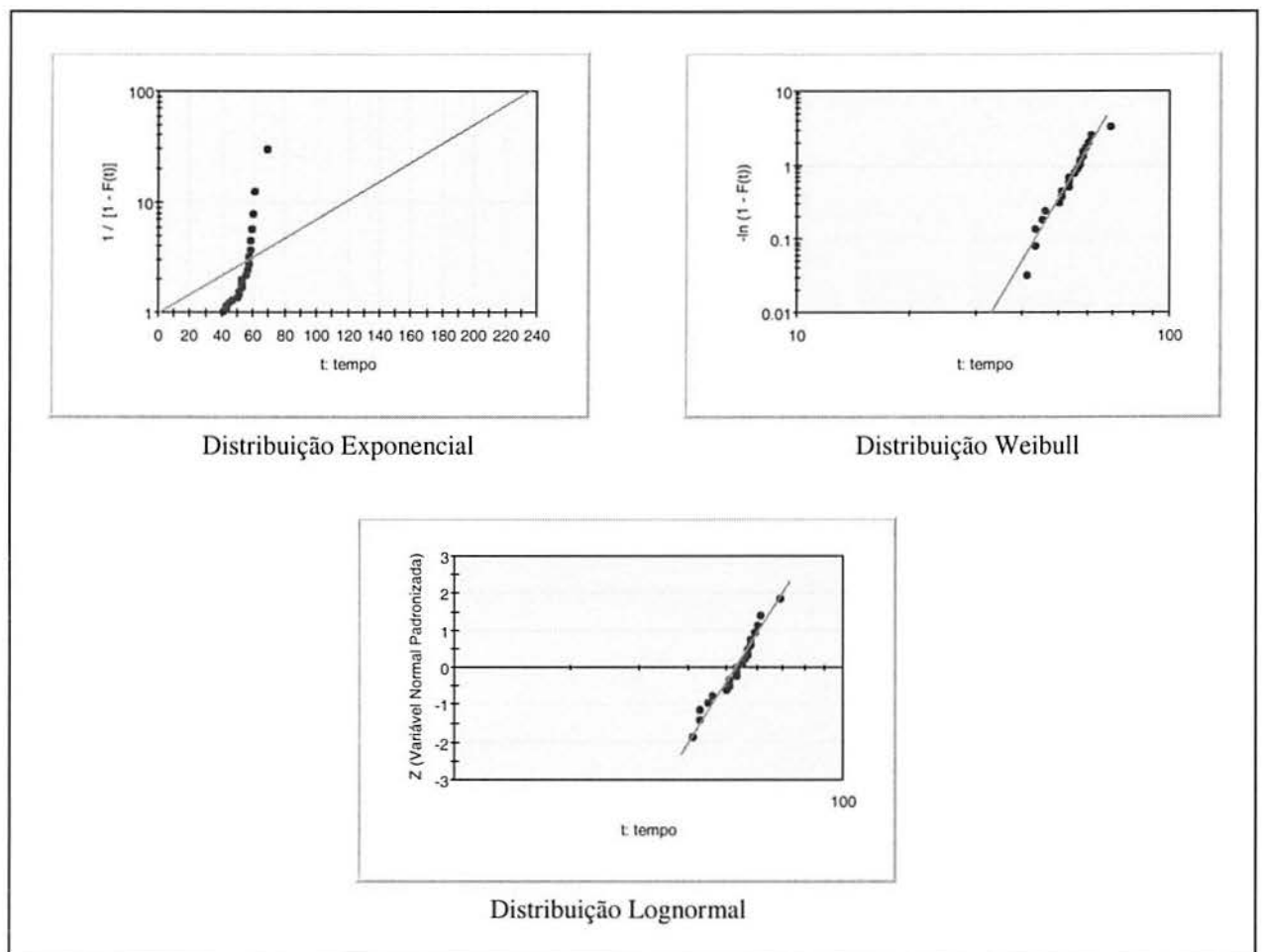


Figura 22. Gráficos dos papéis de probabilidade para as funções Exponencial, Weibull e Lognormal dos dados correspondentes a *Distribuição 2*.

Quadro 4. Resultados dos testes de aderência para modelo Weibull da *distribuição 2*.

Testes de Aderência para Modelo de Weibull	
Teste do Qui-Quadrado	
X ² = 1,62 com 5 graus de liberdade	Nível de Significância = 0,4445
Teste de Kolmogorov-Smirnov:	
DN = 0,0959	Nível de Significância = 0,413

Quadro 5. Resultados dos testes de aderência para modelo Lognormal da *distribuição 2*.

Testes de Aderência para Modelo Lognormal	
Teste do Qui-Quadrado	
X ² = 2,45 com 5 graus de liberdade	Nível de Significância = 0,294
Teste de Kolmogorov-Smirnov:	
DN = 0,1281	Nível de Significância = 0,2386

Quadro 6. Parâmetros do modelo de Weibull para os dados da *distribuição 2*.

Ajuste de Dados - Modelo de Weibull	
Parâmetro de Localização = 0	
Estimativas de Verossimilhança	
Gama = 12,7215	Var(Gama) = 0,0011
Teta = 91,6396	Var(Teta) = 0,0023
Estimativa Não Tendenciosa	
Gama = 12,7205	Teta = 91,643
Intervalo de Confiança para os Parâmetros a 95%	
Gama = 12,0505 até 12,1792	Teta = 91,405 até 92,2433
MTTF = 88,0075	

A função confiabilidade correspondente à distribuição com parâmetros dados no Quadro 6 é apresentada na Figura 23.

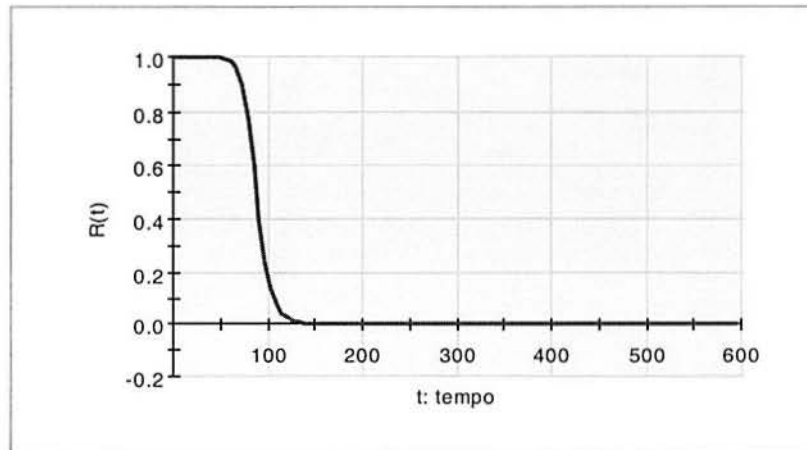


Figura 23. Gráfico gerado pela função confiabilidade da *distribuição 2*.

Conhecidas as distribuições de probabilidade que modelam os dados de tempos-até-falha do componente condensador, é necessário gerar uma distribuição única que possa ser usada nos cálculos de confiabilidade do sistema em estudo. Tal distribuição empírica será o resultado normalizado da soma dos valores de densidade de $f_1(t)$, uma distribuição de Weibull com parâmetros $\gamma = 1,62$ e $\theta = 2080,01$ (ver Quadro 3), e de $f_2(t)$, uma distribuição de Weibull com parâmetros $\gamma = 12,72$ e $\theta = 91,64$ (ver Quadro 6), quando $f_1(t)$ e $f_2(t)$ são avaliadas no intervalo $t = 0, \dots, +\infty$. Na prática, a avaliação de $f_1(t)$ e $f_2(t)$ foi truncada no tempo $t = 600$ semanas, quando os valores de densidade em ambas as distribuições tendiam a zero. Os valores de $f_1(t)$ e $f_2(t)$ foram, então, somados em cada tempo t . Para obtenção da soma normalizada, o valor de $f_1(t) + f_2(t)$, para cada t , foi dividido pelo valor acumulado das somas destas funções em todos os tempos calculados. A soma normalizada representa a função empírica de densidade de probabilidade de falhas do componente condensador.

Através da soma acumulada dos valores normalizados, foram obtidos os valores da função de densidade acumulada de falhas $F(t)$ e da função de confiabilidade do componente condensador para cada tempo t . Na Tabela 9 são apresentados os resultados obtidos no procedimento descritos acima para o condensador.

A figura 24 apresenta a função de confiabilidade do componente condensador, obtida a partir da distribuição empírica na Tabela 9.

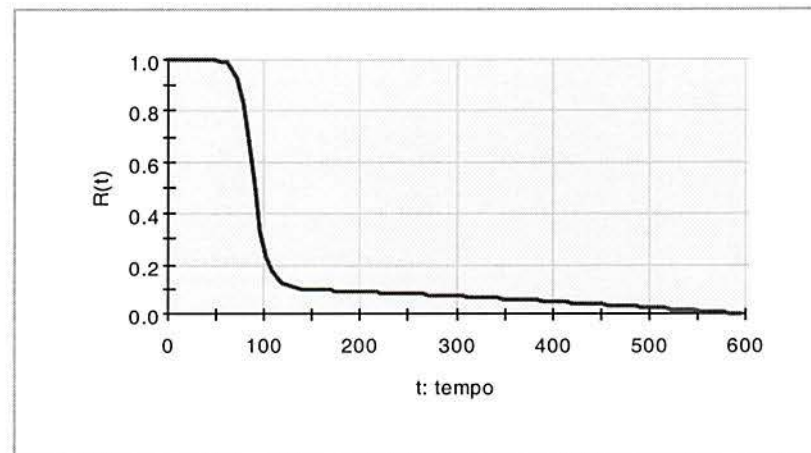


Figura 24. Gráfico gerado pela função confiabilidade da soma normalizada das *distribuições 1 e 2* na Tabela 9.

Na Figura 23, é possível observar que a *distribuição 2* apresenta um acentuado decréscimo de confiabilidade após $t = 75$, tornando-se aproximadamente igual a zero em $t = 150$. Esta queda acentuada impacta nos valores de confiabilidade da soma normalizada das duas distribuições ocasionando uma distorção no resultado final, que não representa a realidade do componente analisado. O principal motivo desta distorção na função confiabilidade da *distribuição 2* é dado pela pequena quantidade de tempos-até-falha desta distribuição (22 tempos-até-falha) e a elevada quantidade de dados censurados no mesmo período (17.105 dados censurados). Além disso, os dados obtidos representam informações do início da curva da função de densidade de probabilidade, não sendo suficientes para definição precisa dos parâmetros desta função.

A distorção visualizada na Figura 23 foi identificada em todos componentes que apresentaram mistura de duas distribuições. Também foi constatado que, para todos componentes que possuem mistura de distribuições, os dados pertencentes à primeira distribuição equivalem a $2/3$ do total de dados de tempos-até-falha disponíveis. Uma análise mais profunda e correção da distorção apresentada na *distribuição 2* pode ser realizada utilizando as técnicas propostas por Werner (1996).

Neste trabalho, com a finalidade de atenuar a diferença entre a função de confiabilidade real de cada componente e os resultados apresentados pela heurística, foi utilizado o recurso de não considerar a segunda distribuição na definição da função confiabilidade dos componentes onde constatou-se uma mistura de distribuições. O método de cálculo

desenvolvido permanece sendo utilizado para eliminar os dados não pertencentes à distribuição adotada.

A não utilização da distribuição $f_2(t)$ na modelagem dos tempos-até-falha dos componentes onde existe uma mistura de distribuições implica em um aumento na sua *MTTF* estimada. Isso ocorre já que a tendência de incremento na função de risco dos componentes analisados ocorre justamente quando os tempos-até-falha oriundos de $f_2(t)$ começam a permear a amostra. Para manter os dados correspondentes a $f_2(t)$ na análise dos componentes, deveria-se restringir o período da análise no intervalo de tempo entre 0 e 75 semanas (período para o qual dispunha-se de dados de garantia). Extrapolações fora do intervalo contemplado na garantia não são confiáveis, por dependerem quase exclusivamente de $f_2(t)$, da qual se dispõe de poucos dados. Por outro lado, optando-se pela remoção de $f_2(t)$ da análise, é importante ressaltar que os tempos-médios-até-falha dos componentes analisados tende a ser superdimensionados, devendo ser interpretados como tal.

A Figura 25 apresenta o resultado final obtido para o condensador, com os dados não pertencentes à *distribuição 1* eliminados pela heurística desenvolvida.

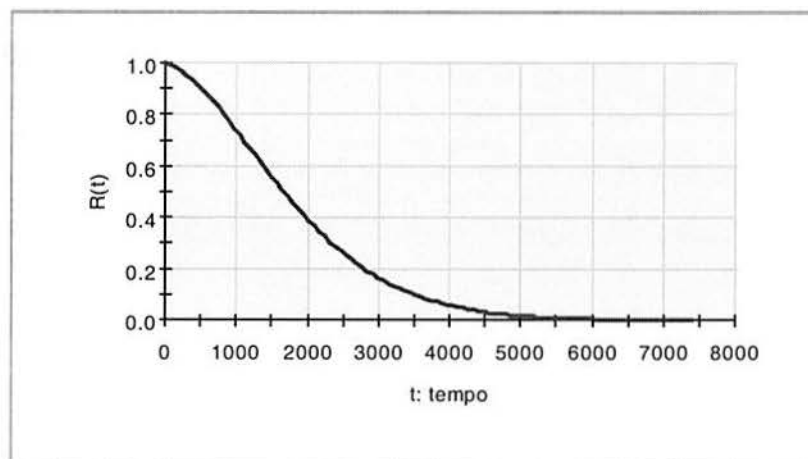


Figura 25. Gráfico da função de confiabilidade do componente condensador considerando apenas a *distribuição 1*.

Os modelos de probabilidade ajustados aos demais componentes do aparelho em estudo, vêm apresentados na próxima seção.

5.5. DEFINIÇÃO DO MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA

Após a definição dos modelos das distribuições de confiabilidade de todos componentes e sub-sistemas, é realizada a análise conjunta destas distribuições no sistema em estudo. O diagrama de blocos do sistema analisado é apresentado na seção 5.3. Como o sistema é do tipo *em série*, a confiabilidade em um tempo t é calculada através do produtório da confiabilidade de todos componentes e sub-sistemas no tempo analisado (ver seção 3.4).

Na Tabela 10, são apresentados os modelos de distribuições determinados neste estudo e seus parâmetros, para os componentes que não apresentaram mistura de distribuições no processo de análise de sua confiabilidade.

Tabela 10. Modelos de distribuições e seus parâmetros dos componentes que não apresentaram mistura de distribuições nos dados de tempos-até-falha.

Subsistemas			
Subsistema	Componentes	Distribuição Única	Parâmetros
Chave Seletora	Chave Seletora	Weibull	Gama = 2,51 Teta = 1819,416
Capacitor	Capacitor	Lognormal	Mi = 8,7168 Sigma = 0,015
Hélice	Hélice	Weibull	Gama = 2,71 Teta = 276,8294
Evaporador	Concha	Weibull	Gama = 2,26 Teta = 821,5621

Na Tabela 11, são apresentados os modelos de distribuições determinados neste estudo e seus parâmetros, para os componentes nos quais foi verificada a existência de mistura de duas distribuições durante o processo de análise de confiabilidade.

Tabela 11. Modelos de distribuições e seus parâmetros dos componentes que apresentaram mistura de distribuições nos dados de tempos-até-falha.

Subsistemas				
Descrição	Duas Distribuições Misturadas			
	Distribuição 1	Parâmetros	Distribuição 2	Parâmetros
Botões	Weibull	Gama = 1,56 Teta = 6082,533	Weibull	Gama = 10,75 Teta = 114,3485
Termostato	Lognormal	Mu = 0,0049 Sigma = 1729,891	Weibull	Gama = 9,19 Teta = 108,9731
Circuito Elétrico	Weibull	Gama = 1,18 Teta = 4918,977	Weibull	Gama = 9,36 Teta = 113,0928
Motor	Weibull	Gama = 1,53 Teta = 2250,595	Weibull	Gama = 13,72 Teta = 84,2368
Turbina	Weibull	Gama = 1,27 Teta = 6171,978	Weibull	Gama = 6,81 Teta = 179,2879
Compressor	Weibull	Gama = 1,37 Teta = 3246,616	Weibull	Gama = 14,28 Teta = 84,7553
Tubulação	Weibull	Gama = 1,47 Teta = 1509,68	Lognormal	Mi = 5,4779 Sigma = 0,0092
Condensador	Weibull	Gama = 1,6245 Teta = 2079,806	Weibull	Gama = 13,59 Teta = 92,8554
Capilar	Weibull	Gama = 1,51 Teta = 4472,027	Weibull	Gama = 10,27 Teta = 122,2564
Evaporador	Weibull	Gama = 1,07 Teta = 52041,347	Weibull	Gama = 23,82 Teta = 67,7379
	Weibull	Gama = 1,46 Teta = 14337,842	Weibull	Gama = 7,09 Teta = 167,8051

Concluída a definição das funções de confiabilidade de todos componentes e subsistemas, foi definida a função de confiabilidade do sistema; os valores obtidos para esta função são apresentados na Tabela 12. Naquela tabela, avaliou-se o resultado do produtório das funções de densidade dos componentes do sistema em tempos no intervalo [1, 450] semanas, resultando nos valores de confiabilidade apresentados. Como estatísticas derivadas de confiabilidade, foram calculados os valores de densidade acumulada de falha, da função de densidade e da função de risco do sistema; estes valores também estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Determinação da função de confiabilidade e funções derivadas para o sistema em estudo.

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE				
Tempo	Confiabilidade	Densidade Acumulada de Falha	Densidade de Probabilidade	Função de Risco
0	1	0	7,72E-04	7,72E-04
4,5455	0,9964	0,0036	8,97E-04	9,00E-04
9,0909	0,9918	0,0082	0,001	0,001
13,6364	0,9872	0,0128	0,001	0,0011
18,1818	0,9823	0,0177	0,0011	0,0011
22,7273	0,9772	0,0228	0,0011	0,0012
27,2727	0,9719	0,0281	0,0012	0,0012
31,8182	0,9664	0,0336	0,0012	0,0013
36,3636	0,9606	0,0394	0,0013	0,0014
40,9091	0,9544	0,0456	0,0014	0,0014
45,4545	0,948	0,052	0,0014	0,0015
50	0,9413	0,0587	0,0015	0,0016
54,5455	0,9342	0,0658	0,0016	0,0017
59,0909	0,9267	0,0733	0,0017	0,0018
63,6364	0,9189	0,0811	0,0018	0,0019
68,1818	0,9107	0,0893	0,0018	0,002
72,7273	0,9021	0,0979	0,0019	0,0022
77,2727	0,8931	0,1069	0,002	0,0023
81,8182	0,8837	0,1163	0,0021	0,0024
86,3636	0,8739	0,1261	0,0022	0,0025
90,9091	0,8636	0,1364	0,0023	0,0027
95,4545	0,8529	0,1471	0,0024	0,0028
100	0,8419	0,1581	0,0025	0,0029
104,546	0,8304	0,1696	0,0026	0,0031
109,091	0,8185	0,1815	0,0027	0,0033
113,636	0,8062	0,1938	0,0027	0,0034
118,182	0,7936	0,2064	0,0028	0,0036
122,727	0,7805	0,2195	0,0029	0,0037
127,273	0,767	0,233	0,003	0,0039
131,818	0,7533	0,2467	0,0031	0,0041
136,364	0,7392	0,2608	0,0031	0,0043

Tabela 12. Determinação da função de confiabilidade e funções derivadas para o sistema em estudo (continuação).

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE				
Tempo	Confiabilidade	Densidade Acumulada de Falha	Densidade de Probabilidade	Função de Risco
272,727	0,2521	0,7479	0,003	0,012
277,273	0,2385	0,7615	0,0029	0,0123
281,818	0,2254	0,7746	0,0028	0,0126
286,364	0,2126	0,7874	0,0027	0,0129
290,909	0,2004	0,7996	0,0026	0,0132
295,455	0,1886	0,8114	0,0026	0,0135
300	0,1772	0,8228	0,0025	0,0138
304,546	0,1663	0,8337	0,0024	0,0141
309,091	0,1558	0,8442	0,0023	0,0145
313,636	0,1458	0,8542	0,0022	0,0148
318,182	0,1362	0,8638	0,0021	0,0151
322,727	0,1271	0,8729	0,002	0,0154
327,273	0,1184	0,8816	0,0019	0,0158
331,818	0,1101	0,8899	0,0018	0,0161
336,364	0,1023	0,8977	0,0017	0,0164
340,909	0,0949	0,9051	0,0016	0,0168
345,455	0,0878	0,9122	0,0015	0,0171
350	0,0812	0,9188	0,0014	0,0174
354,546	0,075	0,925	0,0013	0,0178
359,091	0,0691	0,9309	0,0013	0,0181
363,636	0,0636	0,9364	0,0012	0,0185
368,182	0,0584	0,9416	0,0011	0,0189
372,727	0,0536	0,9464	0,001	0,0192
377,273	0,049	0,951	9,60E-04	0,0196
381,818	0,0448	0,9552	8,94E-04	0,0199
386,364	0,0409	0,9591	8,31E-04	0,0203
390,909	0,0373	0,9627	7,70E-04	0,0207
395,455	0,0339	0,9661	7,14E-04	0,0211
400	0,0308	0,9692	6,64E-04	0,0216
404,546	0,0279	0,9721	6,16E-04	0,0221
409,091	0,0252	0,9748	5,67E-04	0,0225
413,636	0,0227	0,9773	5,21E-04	0,0229
418,182	0,0205	0,9795	4,77E-04	0,0233
422,727	0,0184	0,9816	4,36E-04	0,0237
427,273	0,0165	0,9835	3,97E-04	0,0241
431,818	0,0148	0,9852	3,62E-04	0,0245
436,364	0,0132	0,9868	3,29E-04	0,0249
440,909	0,0118	0,9882	2,98E-04	0,0253
445,455	0,0105	0,9895	2,70E-04	0,0257
450	0,0093	0,9907	2,42E-04	0,0261

Os valores de confiabilidade na Tabela 12 foram grafados em função do tempo; o resultado vem apresentado na Figura 26.

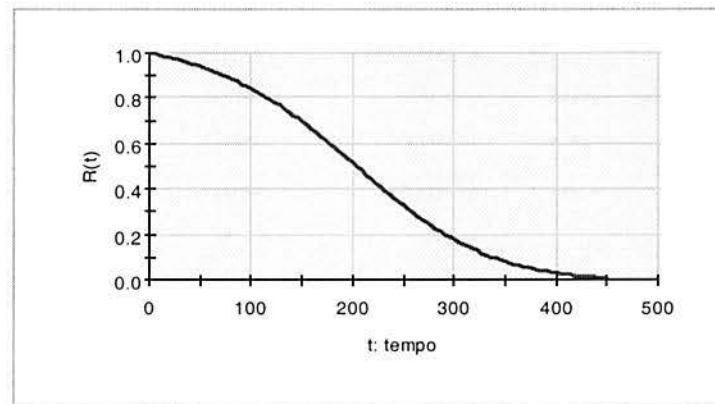


Figura 26. Gráfico da função de confiabilidade do sistema.

5.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS SOBRE CONFIABILIDADE DO PRODUTO

Com a definição da função de confiabilidade do sistema, é possível determinar a confiabilidade do produto em qualquer tempo t desejado. Pode-se determinar, por exemplo, que ao final do período de garantia de 156 semanas (três anos), a confiabilidade do produto analisado é da ordem de 0,6745 ou menor. Como em um sistema em série a confiabilidade do sistema é inferior à confiabilidade do componente com menor valor de confiabilidade no tempo t (ver seção 3.4.1), também foi analisada a criticidade dos componentes em relação a confiabilidade do sistema. Em um tempo t , são comparados os valores de confiabilidade de todos os componentes, bem como sua posição no arranjo estrutural do sistema. Para definição do componente crítico nestes casos, simplesmente identifica-se o componente com menor valor de confiabilidade. Isto deve-se ao fato de todos os componentes apresentarem a mesma importância estrutural em um sistema em série. Um aumento no valor da confiabilidade do componente crítico no período de tempo analisado ocasionará o maior acréscimo no valor da confiabilidade do sistema entre todos os componentes estudados. Estas informações, para o período de 52 semanas (ou seja, 1 ano), são apresentadas na Tabela 13. Os componentes estão apresentados na tabela em ordem decrescente de criticidade.

Tabela 13. Análise de criticidade dos componentes em relação à confiabilidade do sistema no período de 1 ano.

COMPONENTE CRITICO	
Tempo especificado para o estudo de confiabilidade: 52 semanas	
Componente Crítico do Sistema:Tubulação	
Confiabilidade do Sistema : 0,9382	
Componente	Confiabilidade do Componente
Tubulação	0.9873
Hélice	0.9893
Motor	0.9936
Termostato	0.9939
Rede Elétrica	0.9941
Compressor	0.9944
Condensador	0.9944
Turbina	0.9967
Capilar	0.9977
Concha	0.9980
Botões	0.9987
Capacitor	0.9993
Caracol	0.9995
Evaporador	0.9997
Chave Seletora	0.9999

Nesta análise, é possível observar que o componente crítico para melhoria da confiabilidade do sistema (ou seja, o componente que possui a menor confiabilidade no período de 52 semanas) é a tubulação. Em outras palavras, pode-se afirmar que a tubulação, dentre todos os componentes analisados, ocasionará maior acréscimo no valor de confiabilidade do sistema, se tiver sua confiabilidade aumentada no período de 52 semanas.

Na Tabela 14, apresenta-se um estudo de criticidade similar, para o período de 156 semanas (3 anos). Cabe salientar que o produto estudado teve seu período de garantia aumentado para 156 semanas, o que justifica esta análise. Pode-se observar que, para este período de tempo, o componente crítico do sistema passa a ser a hélice.

Na Figura 27 são apresentadas as curvas da função de confiabilidade dos componentes tubulação e hélice. Observando estes gráficos, é possível verificar que pode ocorrer alternância do componente denominado “crítico”, nos períodos de tempo analisados, caso os componentes do sistema apresentem diferentes funções de confiabilidade. Observe, por exemplo, que a função $R(t)$ da tubulação apresenta uma inclinação mais acentuada, se comparada à $R(t)$ da hélice, no intervalo entre 0 e 100 semanas. Desta forma, ao analisar-se a criticidade em $t = 52$ semanas, a tubulação aparece como componente crítico. Por outro lado,

no período entre 100 e 200 semanas, a $R(t)$ da hélice apresenta a inclinação mais acentuada; consequentemente, este componente é apontado como crítico na análise em $t = 156$ semanas.

Tabela 14. Análise de criticidade dos componentes em relação à confiabilidade do sistema no período de 3 anos.

COMPONENTE CRÍTICO	
Tempo especificado para o estudo de confiabilidade: 156 semanas	
Componente Crítico do Sistema: Hélice	
Confiabilidade do Sistema : 0,6745	
Componente	Confiabilidade do Componente
Hélice	0,8095
Tubulação	0,9613
Concha	0,9769
Motor	0,9806
Termostato	0,9814
Rede Elétrica	0,9822
Compressor	0,9830
Condensador	0,9830
Turbina	0,9899
Capilar	0,9930
Botões	0,9961
Capacitor	0,9967
Chave Seletora	0,9979
Caracol	0,9985
Evaporador	0,9992

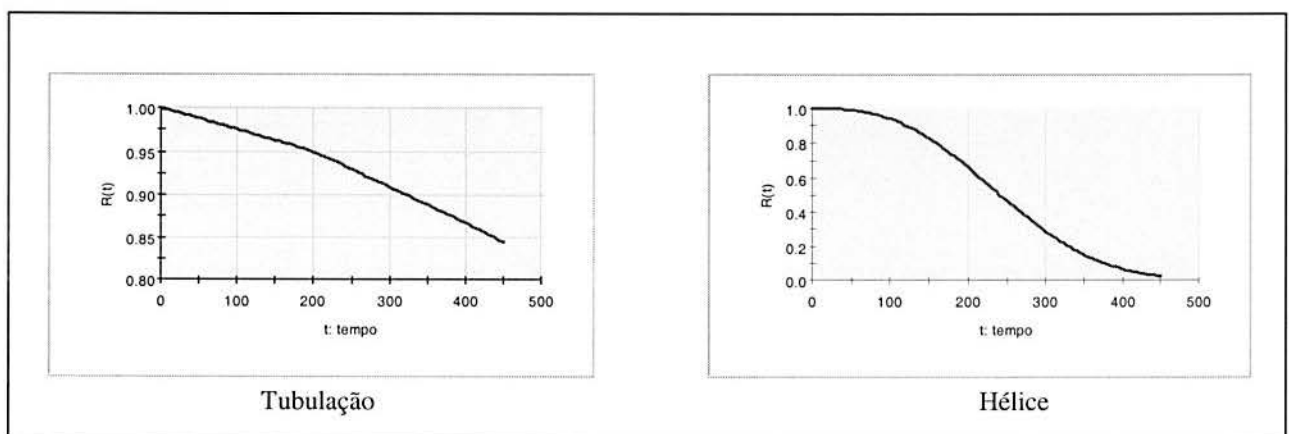


Figura 27. Gráficos das funções de confiabilidade dos componentes tubulação e hélice.

Para o modelo de condicionador de ar RCA075B, que teve sua função de confiabilidade modelada neste estudo de caso, a Tabela 15 compara os cinco componentes considerados críticos: (i) considerando a metodologia utilizada hoje na empresa; (ii) considerando os resultados de modelagem da função de confiabilidade obtidos em $t = 52$ semanas (1 ano); (iii) considerando os resultados de modelagem da função de confiabilidade obtidos em $t = 156$ semanas (3 anos). Estas informações estão apresentadas nas três porções da tabela, respectivamente. A metodologia em (i) utiliza somente a frequência de ocorrência de falhas na determinação do componente crítico (ou seja, nenhuma modelagem de confiabilidade é realizada).

Tabela 15. Comparativo entre quantidade de falhas e componentes críticos do produto analisado.

	Quantidade de Falhas (Jan/98 a Jun/99)		Função confiabilidade com $t = 52$ semanas		Função confiabilidade com $t = 156$ semanas	
	Componente	Quantidade	Componente	Confiabilidade	Componente	Confiabilidade
1º	Hélice	1284	Tubulação	0.9873	Hélice	0.8095
2º	Tubulação	402	Hélice	0.9893	Tubulação	0.9613
3º	Rede Elétrica	376	Motor	0.9936	Concha	0.9769
4º	Termostato	314	Termostato	0.9939	Motor	0.9806
5º	Compressor	275	Rede Elétrica	0.9941	Termostato	0.9814

Da comparação apresentada na Tabela 15 pode-se observar que:

- a) a metodologia utilizada pela empresa não engloba as alterações que ocorrem na função de confiabilidade do produto no decorrer do tempo, ou seja, a análise é estática enquanto modelos de confiabilidade são dinâmicos no tempo;
- b) a análise de criticidade a partir da quantidade de falhas feita em um intervalo de tempo inferior ao da garantia leva a conclusões erradas. A metodologia atual utilizada na empresa não tem nenhuma capacidade preditiva;
- c) o aumento na confiabilidade dos componentes priorizados pela metodologia atual resulta em uma confiabilidade para o sistema inferior àquela a ser obtida a partir do aumento da confiabilidade dos componentes, conforme priorização utilizando o método proposto.

5.7. ANÁLISE CRÍTICA DO PROCEDIMENTO ADOTADO PARA ANÁLISE DOS DADOS DE GARANTIA

A empresa enfocada no estudo de caso, detentora das informações utilizadas sobre tempos-até-falha do produto a partir da utilização de sua garantia, não realiza modelagem estatística da função de confiabilidade dos produtos manufaturados. A ferramenta utilizada, visando a melhoria da confiabilidade dos produtos, é a melhoria da qualidade dos cinco componentes que apresentarem maior número de falhas em um determinado período de tempo. Como foi concluído na seção anterior, este método para definição dos componentes denominados como “críticos” do sistema pode não ser o mais eficaz (ver Tabela 15).

Também cabe salientar que o período de garantia do produto analisado nesta dissertação foi estendido em 104 semanas, de 52 semanas para 156 semanas. Esta extensão do período de garantia foi definida por motivos estritamente mercadológicos. Conforme o que pode-se ver nos resultados apresentados na seção 5.6, este aumento no tempo de garantia ocasiona um aumento significativo no valor provisionado para despesas de garantia do produto.

É sugestão deste trabalho que seja realizado a modelagem da confiabilidade do produto e que esta seja revisada periodicamente, para que as previsões acerca do desempenho do produto sejam confiáveis para todo o período de tempo em que o produto está coberto pela garantia do fabricante. Desta forma, a metodologia utilizada para melhoria da confiabilidade do produto na empresa passa a ser pró-ativa diferentemente da atual, que é reativa. A revisão periódica deste trabalho deve-se à modificações que a função de confiabilidade sofre ao longo do tempo em que o produto é produzido. Estas modificações provêm das melhorias que são realizadas no processo de fabricação e projeto do produto, ocasionando um aumento na confiabilidade do mesmo.

Finalmente, é importante ressaltar algumas características do estudo de confiabilidade aqui realizado as quais, provavelmente, serão também observadas em outros estudos similares (modelagem a partir de dados de garantia); a saber:

- Os dados utilizados neste estudo apresentavam-se bastante censurados; para alguns componentes, a proporção entre falhas observadas e falhas censuradas era de 1/1000.

- O equipamento analisado apresenta uma vida média observada em campo superior a 7 anos. Os dados utilizados no estudo, todavia, contemplavam um período de apenas um ano e meio. Como consequência, a modelagem da distribuição de probabilidade dos tempos-até-falha do sistema só pode ser considerada eficiente para predições acerca de seus primeiros percentis. Em outras palavras, ao utilizar-se o modelo de confiabilidade obtido para o sistema na previsão de seu comportamento em tempos superior a um ano e meio, os valores de confiabilidade obtidos podem ser inferiores aos reais (devido às características em *(i)* e *(ii)*). Este tipo de distorção estará sempre presente em estudos similares, devendo ser corrigida através da análise crítica dos resultados obtidos.

CONCLUSÕES

Nesta dissertação, apresentou-se o desenvolvimento de uma metodologia para a análise de confiabilidade de produtos manufaturados a partir de informações de tempos-até-falha obtidos da utilização de sua garantia.

A metodologia proposta apresenta algumas características que a diferenciam daquelas existentes na literatura conforme exposto a seguir.

Ao utilizar dados de tempo-até-falha oriundos da utilização da garantia dos produtos analisados, promove um estudo de confiabilidade de baixo custo, se comparado, por exemplo, a estudos que utilizam dados de confiabilidade obtidos em ensaios acelerados.

A baixa complexidade da metodologia permite sua utilização por profissionais com pequeno treinamento em técnicas de modelagem de confiabilidade. Outras técnicas que utilizam o mesmo tipo de dados, como aquelas propostas por Moltoft (1994) e Lawless (1998), pressupõe conhecimentos aprofundados sobre modelagem estocástica e processos de renovação, sendo de difícil utilização prática.

Os passos metodológicos propostos não requerem programas computacionais dedicados para sua implementação. A maioria dos cálculos pode ser realizado com o auxílio de planilhas eletrônicas, como o Microsoft Excel (1994).

A definição da metodologia proposta foi motivada pelo estudo de um aparelho de ar condicionado fabricado pela Springer Carrier S. A. Como suporte teórico para o desenvolvimento da metodologia aqui apresentada, foi analisado o princípio de funcionamento, classificação e tipo de aplicação do aparelho de ar condicionado em questão. Também foram estudados os modelos de distribuições de confiabilidade existentes na literatura, seus princípios, definições de parâmetros, testes de aderência e modelagem de confiabilidade de sistemas. Baseado nas informações disponíveis, foi definida a metodologia para análise de confiabilidade do produto, incluindo procedimentos e heurística necessária

para definição do modelo a ser adotado. Para verificação da operacionalidade da metodologia proposta, foi realizado um estudo de caso, onde foi definida a distribuição da função de confiabilidade do produto em estudo.

O método proposto permite a modelagem de confiabilidade de componentes que tem seus tempos-até-falha gerados a partir da ocorrência de dois ou mais modos de falha preponderantes, ou seja, dados oriundos de duas ou mais populações distintas, que podem ou não seguir uma mesma distribuição de probabilidade. Através dos resultados obtidos, é possível realizar uma análise da confiabilidade do produto e identificar os componentes críticos que devem ser melhorados. A metodologia apresentada também permite mensurar os ganhos que podem ser obtidos no aumento da confiabilidade do produto.

No estudo de caso realizado, foram identificados dois fatos relevantes que dificultaram a definição do modelo da distribuição de confiabilidade do sistema; (i) elevado número de dados aleatoriamente censurados correspondentes aos dados de utilização da garantia, estratificados para os diversos componentes do sistema; (ii) ausência de informações prévias sobre os modelos de probabilidade que descrevem o tempo-até-falha dos componentes que compõem o sistema. Apesar destas dificuldades, a modelagem obtida foi capaz de gerar, no estudo de caso, previsões bastante confiáveis para análises de confiabilidade de horizonte restrito.

Como sugestão para futuros trabalhos, pode-se citar:

- a) Aperfeiçoamento da heurística proposta para definição do modelo de distribuição seguido pela função confiabilidade dos componentes e subsistemas que apresentem mistura de mais de duas distribuições de probabilidade;
- b) Desenvolvimento de outros métodos que possam ser empregados na análise de confiabilidade de produtos manufaturados e que não apresentem distorção nos resultados obtidos devido à elevada quantidade de dados censurados ou a função de risco do produto ainda se encontrar na fase de mortalidade infantil.
- c) Incorporação de métodos de estimação de parâmetros de distribuições desconhecidas baseadas em simulação na metodologia proposta. Um exemplo de método com estas características é o método de Kaplan e Meier (1958).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIN, L.J.; ENGELHARDT, M. **Statistical analysis of reliability and life-testing models; theory and methods**. New York: Marcel Decker, 1991. vii, 496p.

BOX, G.E.P., HUNTER, W.G., HUNTER, J.S. **Statistics for experimenters; An introduction to design, data analysis, and model building**. New York: John Wiley, 1978. 653p.

CARRIER CORPORATION. **Fundamentals of vapor compression systems: Thermal analysis and design**. Syracuse, NY, Dec.1997. Paginação irregular.

CARRIER system design manual. Syracuse: Carrier Air Conditioning, 1972. Paginação irregular.

CHAKRAVARTI, I.M.; LAHA, R.G.; ROY, J. **Handbook of methods of applied statistics**. New York: Wiley, 1967. 2v.

COHEN JUNIOR, A.C. Table for maximum likelihood estimation in the Weibull distribution based on complete and on censored samples. **Technometrics** V.7, p.579-588, 1965.

COSTA, E.C.C.. **Física aplicada à construção: Conforto térmico**. 2.ed. São Paulo: Blücher, 1974. 258p.

CREDER, H. **Instalações de ar condicionado**. 2.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1985. 298p.

EFRON, B. Censored data and the bootstrap. **Journal of the American Statistical Association**. V.76, n. 374, 1981.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R.J. **An introduction to the bootstrap**. Boca Ratón, FL: Chapman & Hall, 1998. 436p.

ELSAYED, E. A. **Reliability engineering**. Reading, MA: Addison Wesley Longman, 1996. 737p.

GIBBONS, J.D.; CHAKRABORTI, S. **Nonparametric statistical inference**. 3.ed. rev. exp. New York: Marcel Decker, 1992. 544p.

HARTER, H.L.; MOORE, A.H.. Maximum likelihood estimation of the parameters of gamma and weibull populations from complete and from censored samples. **Technometrics**. V.7, p.1603-1617, 1965.

HOYLAND, A.; RAUSAND, M. **System reliability theory; Models and statistical methods**. New York: Wiley-Interscience, 1994. 518p.

KAPLAN, E.L.; MEIER, P. Nonparametric estimation for incomplete samples, **Journal of the American Statistical Association**, V.53, p.457-481, 1958.

- KAPUR, K.C.; LAMBERSON, L.R. **Reliability in engineering design**. New York: John Wiley, 1977. 586p.
- LAWLESS, J.F. Statistical analysis of product warranty data. **International Statistical Review**, V. 66, n. 1, p. 41-60, 1998.
- LEE, E.T. **Statistical methods for survival data analysis**. Belmont, CA: Lifetime Learning, 1980. xiii, 557p.
- LEE, E.T. **Statistical methods for survival data analysis** . New York: John Wiley, 1992. xiii, 482p.
- LEEMIS, L.M. **Reliability; Probabilistic models and statistical methods**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995. xv, 319p.
- MANUAL de ar condicionado. 52.ed. La Crosse, Wisconsin: The Trane Company. 1977. 458p.
- MICROSOFT Excel 5.0: **User's guide**. Redmond, WA, 1994.
- MOLTOFT, J. Reliability engineering based on field information – the way ahead. **Quality and Reliability International**, V. 10, p. 399-409, 1994.
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Applied statistics and probability for engineers**. New York: John Wiley, 1995.

MOOD, A.M.; GRAYBILL, F.A.; BOES, D.C. **Introduction to the theory of statistics.**

3.ed. New York: M^CGraw-Hill, 1974. xvi, 564p.

MOURA, E.C. **How to determine sample size and estimate failure rate in life**

testing. Milwaukee: ASQC Quality, 1991, V.15.

NELSON, W. **Accelerated testing; Statistical models, test plans, and data analyses.** New

York: Wiley-Interscience, 1990. 601p.

NELSON, W. **How to analyze reliability data.** Milwaukee: American Society for Quality

Control, 1983. V.6.

O'CONNOR, P.D.T. **Practical reliability engineering.** 3.ed. rev. Chichester: John

Wiley, 1995. 431p.

PRATT, J. W.; GIBBONS, J. D. **Concepts of nonparametric theory.** New York: Springer-

Verlag, 1981. 462p.

PROCONF. **Manual do Usuário.** Porto Alegre: Maxxi Gestão Empresarial, 1999.

RIBEIRO, J.L.D.; FOGLIATTO, F. S. **Confiabilidade de componentes e sistemas.** Porto

Alegre: UFRGS/PPGEP, 1998. Paginação irregular. (Notas de aula).

RIBEIRO, J.L.D.; TEN CATEN, C. S. **Estatística industrial aplicada.** Porto Alegre:

UFRGS/PPGEP, 1998. Não paginado (Notas de aula).

- ROESCH, S. M. A. **A dissertação de mestrado em Administração; Proposta de uma tipologia.** Porto Alegre: UFRGS/PPGA, 1994. 14p. (Documentos para Estudo 14/94)
- ROSS, Sheldon M. **Introduction to probability models.** 6.ed. San Diego: Academic Press, 1997. 669p.
- SPRINGER CARRIER. **A história do ar condicionado é a história do seu próprio conforto.** [s.l.], [1990]. 3p. (folder)
- STENVENSON, W. J. **Estatística aplicada à administração.** São Paulo: HARBRA, 1986. 495p.
- STOECKER, W. F. **Principles for air conditioning practice.** New York: Industrial Press, 1968. 148p.
- THE TRANE COMPANY. Manual de ar condicionado. 52ed. La Crosse, WA, 1977. 458p.
- THOMAS, G.B.; FINNEY, R.L. **Calculus and analytic geometry.** 8.ed. Reading, MA: Addison-Wesley, 1992. 976p.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica clássica.** São Paulo: Edgard Blücher; Brasília: IML, 1973. 616p.
- WANDER, P.R. **Curso de refrigeração e condicionamento de ar; Visão geral, simulação e calorímetros.** [Porto Alegre]: Springer Carrier Engenharia de Produto, 1995. Paginação irregular.

WERNER, L. **Modelagem dos tempos de falhas ao longo do calendário**. Porto Alegre:

UFRGS/PPGEP, 1996. 95p.

Anexos

Anexo A: Relação de Componentes da Unidade RCA075B

ITEM	DESCRIÇÃO	Quantidade
------	-----------	------------

GRUPO CHASSI		
1	BOTÃO	2
2	CJ. FRENTE PLÁSTICA - FR	1
3	CONJ. DEFLETOR DE AR	1
4	FILTRO	1
5	CONCHA INFERIOR	1
6	ISOLAÇÃO CONCHA INFERIOR	1
7	ISOLAÇÃO CONCHA INFERIOR	1
8	ISOLAÇÃO CONCHA INFERIOR	1
9	CONCHA SUPERIOR	1
10	TAMPÃO CONCHA SUPERIOR	2
11	TAMPA CONDENSADOR	1
12	BASE METÁLICA	1
13	ISOLAÇÃO DA BASE	1
14	ISOLAÇÃO DA BASE	1
15	PARAFUSO	5
16	PARAFUSO FRENTE PLÁSTICA	2

GRUPO ELÉTRICO		
17	PROTETOR TÉRMICO T89032- 220V	1
18	SOLENOÍDE	-
19	REDE ELÉTRICA FR	1
20	REDE ELÉTRICA PAINEL CONT. FR	1
21	PAINEL CONTROLE	1
22	PAINEL INSTRUÇÕES FR/CR	1
23	RABICHO	1
24	TERMOSTATO FR	1
25	PRES. FIX. BULBO TERMOSTATO	1
26	CHAVE SELETORA	1
27	TAMPA CAPACITOR FR/CR	1
28	CAPACITOR DUPLO - 220V	1

ITEM	DESCRIÇÃO	Quantidade
GRUPO MOTOR E VENTILAÇÃO		
31	CJ. CARACOL INFERIOR	1
32	CARACOL SUPERIOR	1
33	HÉLICE	1
34	PORCA DA HÉLICE	1
35	TURBINA	1
36	PORCA DA TURBINA	1
37	MOTOR 220V 60HZ	1
37	MOTOR 127V 60HZ	-
37	MOTOR 220V 60HZ	-
38	PRESILHA DO MOTOR	2
39	GAXETA DO MOTOR	-

GRUPO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO		
40	CONDENSADOR 2F - FR	1
40	CONDENSADOR 2F - CR	-
41	COMPRESSOR AE245 220V 3 PINOS	1
41	COMPRESSOR AE245 127V 3 PINOS	-
42	CALÇO COMPRESSOR	3
43	PARAFUSO COMPRESSOR	3
44	EVAPORADOR 2F	1
45	ISOLAÇÃO TUBULAÇÃO	1
46	ISOL. TUBULAÇÃO COMPRESSOR	-
47	VÁLVULA DE REVERSÃO	-
48	CONJ. CAPILAR 127V - FR	-
48	CONJ. CAPILAR 220V - FR	1
48	CONJ. CAPILAR 220V - CR	-

GRUPO ACESSÓRIOS		
49	TIRANTE DIREITO (LADO COMPR.)	1
50	TIRANTE ESQUERDO	1
51	EMBLEMA GABINETE	1

**Anexo B: Tabela de Códigos e Descrição de Falhas Apresentadas pelo
Modelo de Aparelho Analisado**

CÓDIGO DE FALHAS	
Tubulação	
110	Conector Entrada Evaporador/Conector Capilar
112	Conector do Compressor - Linha de Alta
113	Conector Saída Condensador - Conector Capilar
115	Conector Compressor - Linha de Baixa
119	Válvula - Linha de Alta do Compressor (só CR)
120	Válvula - Linha de Baixa do do Compressor (só CR)
121	Válvula - Linha de Baixa do Evaporador (só CR)
124	Conector Saída do Evaporador - Linha de Baixa
126	Tubulação Alta Quebrada na Solda
122	Tubulação Baixa Quebrada na Solda
128/131	Tubulação Alta Rachada
127	Tubulação Baixa Rachada
129/130	Vazamento Lacre do Alicate
577/617	Tubulação em Atrito
518	Carga de Gás
Válvula de Reversão (CR)	
293	Válvula de Reversão Trancada
294	Ruído
298	Vazamento no Corpo da Válvula de Reversão
Solenóide (CR)	
312	Solenóide Interrompida
313	Solenóide Aterrado
258/316	Solenóide com Ruído
317	Solenóide em Curto
Termostato Descongelante (CR)	
263/327	Termostato Descongelante Interrompido
329	Termostato Descongelante Solto
Rabicho	
279/348	Rabicho Interrompido
352	Rabicho em Curto-Circuito
Rede Elétrica	
397/409	Fio Solto
398/410	Ligação Errada
399/411	Fio Interrompido
404/416	Terminal Danificado
Condensador	
133	Entupimento Interno
141/144	Furado por Corrosão
104	Conector Saída do Condensador
105	Curvas do Condensador
106	Conector Entrada do Condensador
109	Vazamento Interno Condensador
Evaporador	
149	Entupimento Interno
155/161	Furado por Corrosão
102	Curvas do Evaporador - Solda
103	Conector Entrada do Evaporador

Compressor	
192	Compressor Desliga com Tranco
196	Vazamento na Carcaça do Compressor
160/166	Compressor Trancado
161/167	Compressor com Ruído
164/182	Compressor Não Parte com Capacitor Nominal
169/175	Compressor Não Comprime
171/177	Compressor com Alta Amperagem
173/179	Compressor em Curto Circuito
177	Compressor Queimado
389/402	Protetor Térmico Interrompido
391/404	Protetor Térmico Aterrado
Termostato	
182/202	Termostato Não Liga no Frio
183/203	Termostato Não Desliga no Frio
204	Termostato Não Desliga no CR
205	Termostato Não Liga no CR
206	Quebrado/Deslocado
186/217	Termostato com Bulbo Deslocado/Quebrado
192	Termostato Desregulado
703	Substituição Anel de Isolação do Termostato
Capilar	
218	Capilar Entupido
198/219	Capilar Quebrado/Trincado
Chave Seletora	
203/230	Chave Não Liga em Algumas Posições
231	Eixo Chave Quebrado
234	Chave em Curto Circuito
Motor	
215/248	Motor Não Parte
249	Eixo Motor Trancado
223/256	Motor em Curto Circuito
225/258	Motor com Ruído
226/259	Motor Aquece e Desliga
233/266	Presilha Motor Quebrada/Solta
274	Bucha do Motor Danificada
Capacitor	
236/281	Capacitor Interrompido
239/284	Capacitor Danificado
Hélice	
436	Hélice Torta/Empenada
430/437	Hélice Desbalanceada
431/438	Hélice Roçando na Base
432/439	Hélice Roçando na Barragem
440/441	Hélice Solta
435/442	Hélice Roçando no Condensador
429/443	Hélice Quebrada
Turbina	
444/446	Turbina Roçando no Caracol/Solta
448	Turbina Desbalanceada

Barragem	
455	Barragem Quebrada
457	Barragem Solta
458	Barragem Mal Montada
Frente Plástica	
461	Frente Plástica Arranhada
463/465	Frente Plástica Quebrada
582	Painel de Intruções Danificado
Gabinete	
482	Tinta do Gabinete Descascada
486	Corrosão do Gabinete
Caracol	
491/510	Caracol Quebrado
Calha	
530	Calha Quebrada
Conjunto Base	
535	Corrosão do Conjunto Base
Vanes	
642	Vane Danificado
514/643	Vane Solta/Trepidando
488	Comando de Exaustão Solto
489	Comando de Exaustão Quebrado
482/500	Comando de Ventilação Solto
501	Comando de Ventilação Quebrado
Botões	
571/625	Botões Danificados
626	Botões Faltantes
Concha	
536/709	Concha do Evaporador Quebrada
537	Concha Inferior Quebrada/Danificada
538	Concha Superior Quebrada
610	Mangueira p/ Dreno
694	Troca do Conjunto Fechamento
527	Colocação Isolação
528/707	Colocação de Isolação e Recortes Laterais
706	Isolação do Aparelho
Termistor	
193/704	Adaptação do Termistor
Produto	
705/797	Substituição do Produto
Painel Eletrônico	
645	Painel Eletrônico com Defeito
Outros	
999	Outros