

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

Lauro Viçosa Bonetti

**DADOS DE GARANTIA E ANÁLISE QUALITATIVA DE ESPECIALISTAS COMO
BASE PARA ESTUDO DE CONFIABILIDADE NO SETOR DE MÁQUINAS
AGRÍCOLAS**

Porto Alegre

2009

Lauro Viçosa Bonetti

**DADOS DE GARANTIA E ANÁLISE QUALITATIVA DE ESPECIALISTAS COMO
BASE PARA ESTUDO DE CONFIABILIDADE NO SETOR DE MÁQUINAS
AGRÍCOLAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Profissional, na área de concentração em Qualidade.

Orientadora: Professora Liane Werner, Dr^a

Porto Alegre

2009

Lauro Viçosa Bonetti

**DADOS DE GARANTIA E ANÁLISE QUALITATIVA DE ESPECIALISTAS COMO
BASE PARA ESTUDO DE CONFIABILIDADE NO SETOR DE MÁQUINAS
AGRÍCOLAS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^a. Liane Werner, Dr^a

Orientadora PPGE/UFGRS

Prof^a. Carla Schwengber ten Caten, Dr^a

Coordenadora PPGE/UFGRS

Banca Examinadora:

Professor José Luis Duarte Ribeiro, Dr. - PPGE/UFGRS

Professor Gilberto Tavares dos Santos, Dr. - EBCT

Professor Ademar Michels, Dr. – UFSM

Resumo

Ultimamente as empresas têm buscado entender e aprimorar a confiabilidade de seus produtos para atender a crescente exigência dos clientes quanto à qualidade. Desta forma, as empresas também visam aumentar seus lucros, reduzir gastos com garantia e transmitir uma boa imagem de sua marca. Como contribuição a este tema, a presente dissertação apresenta um estudo de confiabilidade de um produto, baseado em recursos de baixo custo disponíveis nas empresas, os quais consistem os dados de garantia e a análise qualitativa dos especialistas. O objetivo do estudo representa desenvolver um método para modelar a vida útil de sistemas e componentes, e apresentar esta através da aplicação em um estudo de caso de certo equipamento agrícola. Para fundamentar a elaboração do método, o trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre confiabilidade e análise qualitativa. O estudo explora o comportamento dos dados de garantia da empresa, a metodologia Delphi para obtenção da opinião dos especialistas, e a multiplicação de duas funções Weibull para consolidação dos resultados. Como principais resultados são apresentados: a curva de confiabilidade do sistema; o comportamento de falha dos componentes; e avaliação sobre o funcionamento do método.

Palavras-chave: modelo de confiabilidade, Weibull, garantia, análise qualitativa de especialistas, metodologia Delphi.

Abstract

Lately, companies have been urged to understand and improve their product reliability in order to meet the increasing customer demand for quality. In doing so, the companies also aim at increasing its profits, reducing warranty claims, and transmitting a good image of its brand. As a contribution to this subject, this dissertation presents a product reliability study based on low cost resources available in the companies, such as warranty data and experts' qualitative analysis. The aim of this study is to develop a method to model the life cycle of systems and components, and demonstrate this method through a case study of agricultural equipment. This study presents a bibliographical review on reliability and qualitative analysis as well as other relevant subjects to support the method development. The study explores the company warranty data behavior, the Delphi methodology to obtain the experts' opinions, and the multiplication of two Weibull distributions for the outcome consolidation. The main results presented are: the system reliability curve; the components failure analysis; and a method evaluation.

Keywords: reliability model, Weibull, warranty, expert's qualitative analysis, Delphi methodology.

Lista de figuras

Figura 1 - Vendas de colheitadeiras nos últimos dez anos.....	9
Figura 2 - Curva da banheira.....	17
Figura 3 - Relação entre a função confiabilidade e a função acumulada de falha	19
Figura 4 - Gráfico das funções confiabilidade, densidade da probabilidade e taxa de risco para a distribuição de Weibull	24
Figura 5 - Gráficos da função da Confiabilidade dos modelos Exponencial, Weibull e Lognormal vs. Kaplan-Meier	29
Figura 6 - Exemplo do sistema automóvel para ilustrar o diagrama de blocos.....	30
Figura 7 - Diagrama de blocos do sistema em série.....	31
Figura 8 - Diagrama de blocos do sistema em paralelo ativo puro	32
Figura 9 - Fluxograma do método proposto	42
Figura 10 - Exemplo de dados de garantia fornecidos a softwares de confiabilidade.....	44
Figura 11 - Exemplo gráfico da modelagem de vida ou confiabilidade de um componente	50
Figura 12 – Diagrama de blocos do sistema.....	53
Figura 13 – Verificação dos papéis da probabilidade para componente AZ.....	57
Figura 14 – Gráfico das funções confiabilidade, densidade da probabilidade e taxa de risco para o componente HZ.....	59
Figura 15– Gráfico das funções confiabilidade, densidade da probabilidade e taxa de risco para o componente GZ.....	60
Figura 16 - Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente AZ.....	69
Figura 17 - Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente AZ.....	73
Figura 18 - Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente IZ	73
Figura 19- Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente KZ.....	74
Figura 20 - Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente NZ.....	74
Figura 21 - Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ para o sistema.....	77
Figura 22 - Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ para o subsistema ABCZ.....	77
Figura 23 – Comparativo da curva da confiabilidade do componente GZ utilizando a extrapolação dos dados de garantia e o método proposto	80

Lista de tabelas

Tabela 1 - Relação entre as funções $F(t)$, $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$	21
Tabela 2 – Coleta de dados do componente AZ.....	54
Tabela 3– Percentual de falha dos componentes no período de garantia	55
Tabela 4 – Teste de aderência às distribuições do componente AZ.....	56
Tabela 5 – Valores do parâmetro de forma e escala dos componentes	58
Tabela 6– Análise dos resultados da rodada 1 para o componente AZ.....	67
Tabela 7 – Percentual de consenso dos especialistas após a terceira rodada de perguntas	68
Tabela 8 – Pontos t_{98} , t_{50} e t_{02} para cada componente.....	69
Tabela 9 – Parâmetros das distribuições $R_1(t)$ e $R_2(t)$ para os componentes	72
Tabela 10 – Confiabilidade $R(t_A)$ calculada com os dados de garantia	76
Tabela 11 –Confiabilidade $R(t)$ e componentes críticos do sistema.....	78

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Comentários iniciais	9
1.2 Tema e Objetivos.....	10
1.3 Justificativa.....	11
1.4 Método.....	12
1.5 Limitações do trabalho	13
1.6 Estrutura do trabalho	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 Confiabilidade	15
2.1.1 Falha e Censura	16
2.1.2 Curva da banheira.....	17
2.1.3 Funções de confiabilidade	18
2.2 Distribuições de probabilidade	22
2.2.1 Distribuição Weibull	22
2.2.2 Utilização de duas distribuições de Weibull.....	24
2.3 Estimativa de parâmetros e testes de adequação	27
2.3.1 Método da Máxima Verossimilhança.....	28
2.3.2 Método dos papéis da probabilidade	29
2.4 Confiabilidade de sistemas	30
2.4.1 Sistema em Série	31
2.4.2 Sistema em Paralelo	31
2.4.3 Aplicações de sistemas de confiabilidade	32
2.5 Garantia	33
2.6 Análise qualitativa	35
2.6.1 Entrevistas	36
2.6.2 Metodologia Delphi.....	37
3. MÉTODO PROPOSTO.....	41
3.1 Definição do sistema e seus componentes.....	41
3.2 Etapa quantitativa dos dados de garantia.....	41
3.2.1 Coleta de dados de garantia	43
3.2.2 Análise estatística dos componentes.....	43

3.3	Avaliação dos resultados da etapa quantitativa	45
3.4	Etapa qualitativa	45
3.4.1	Entrevista diagnóstico.....	46
3.4.2	Análise do diagnóstico	46
3.4.3	Elaboração do questionário	47
3.4.4	Escolha dos especialistas	47
3.4.5	Aplicação do Método Delphi.....	47
3.5	Avaliação dos resultados da etapa qualitativa	48
3.6	Modelagem de vida útil dos componentes	49
3.7	Confiabilidade total do sistema	50
3.8	Conclusões e avaliação dos resultados	51
4.	ESTUDO APLICADO	52
4.1	Definição do sistema e seus componentes.....	52
4.2	Etapa quantitativa dos dados de garantia.....	53
4.2.1	Coleta de dados de garantia	53
4.2.2	Análise estatística dos componentes.....	55
4.3	Avaliação dos resultados da etapa quantitativa	61
4.4	Etapa qualitativa	62
4.4.1	Entrevista diagnóstico.....	62
4.4.2	Análise do diagnóstico	63
4.4.3	Elaboração do questionário	64
4.4.4	Escolha dos especialistas	65
4.4.5	Aplicação do Método Delphi.....	66
4.5	Avaliação dos resultados da etapa qualitativa	70
4.6	Modelagem da vida útil dos componentes	71
4.7	Confiabilidade total do sistema	76
4.8	Conclusões e avaliação dos resultados	78
5.	COMENTÁRIOS FINAIS	82
5.1	Conclusões.....	82
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	84
	REFERÊNCIAS	85

1. INTRODUÇÃO

1.1 Comentários iniciais

O mercado de máquinas agrícolas no Brasil tem apresentado um crescimento significativo nos últimos anos, o que pode ser associado ao crescimento da produção agrícola. Segundo Zago (2007), os dados do Ministério da Agricultura indicam que a produção agrícola no Brasil cresceu mais de 50% na última década. Isto reflete no aumento de vendas de máquinas agrícolas e no avanço tecnológico destes equipamentos. Ainda segundo o autor, na última década têm ocorrido, anualmente, grandes lançamentos de máquinas agrícolas no Brasil.

O setor de colheitadeiras no Brasil apresenta uma evolução nas vendas que acompanha o crescimento do mercado de máquinas agrícolas. A Figura 1 ilustra as vendas de colheitadeiras nos últimos dez anos. Considerando o período entre 2005 até meados de 2007 como um período de vendas atípico, atribuído à crise da agricultura, verifica-se que houve um crescimento significativo de vendas até o ano de 2004, retomando este crescimento em 2008.

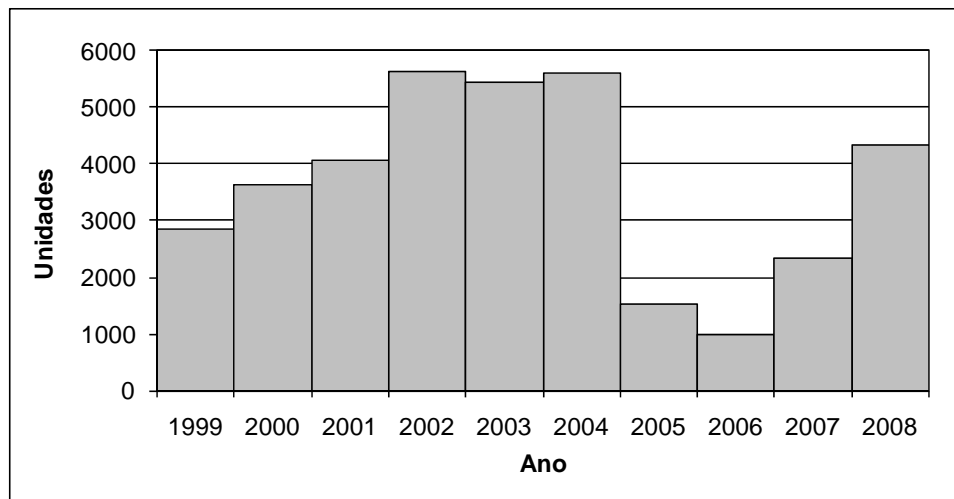


Figura 1 - Vendas de colheitadeiras nos últimos dez anos

Fonte: adaptado de Anfavea (2009)

Relacionado ao crescimento de vendas e também à maior exigência dos clientes, empresas do setor de máquinas agrícolas apresentam uma maior preocupação quanto à qualidade de seus produtos. Um produto com elevado nível de qualidade, também proporciona para as empresas: redução nos gastos com peças de garantia, redução de gastos com mão-de-obra de reparo, redução de gastos com logística, uma boa imagem do produto e

da empresa. Segundo Goel e Singh (1998), as principais características de qualidade exigidas pelo cliente correspondem àquelas essenciais para o sucesso e operação segura do produto.

Quando um produto ou componente deixa de funcionar diz-se que o mesmo falhou. O conceito de falha pode ser definido como o término da disponibilidade de um item para realizar sua função requerida, segundo Hoyland e Rausand (1994 apud FALCETTA, 2000). Certamente quanto menor o número de falhas que um produto apresenta, maior é a qualidade que o cliente associa ao produto.

As empresas que possuem elevada qualidade de seus produtos geralmente oferecem generosos prazos de garantia. Segundo Werner (1996), alguns fabricantes providenciam garantias atrativas com o intuito de aumentar a sua fatia no mercado. Isso mostra que garantia está se tornando um fator importante no processo de decisão dos consumidores.

Para atender essa maior preocupação com os prazos de garantia e a qualidade, empresas modernas buscam cada vez mais melhorar a confiabilidade de seus produtos. Conforme Werner (1996), a confiabilidade é de fundamental importância e vem nos auxiliar para fazer previsões sobre quando e que equipamentos, peças e instrumentos irão falhar. Já Droguett (2006) afirma que a estimativa da confiabilidade torna-se um elemento fundamental para a avaliação de desempenho, quando realizada nas etapas de desenvolvimento de um produto.

1.2 Tema e Objetivos

O tema desta dissertação é a Confiabilidade, aplicado na área de engenharia de uma empresa multinacional do ramo de máquinas agrícolas. Este tema vem merecendo destaque em empresas do ramo automotivo e começa a ser aplicado em empresas do ramo de máquinas agrícolas. O estudo utiliza dados quantitativos de falha, coletados do setor de garantia, e também dados qualitativos adquiridos de especialistas do ramo. Assim, esses tópicos também fazem parte do tema deste trabalho.

Esta dissertação tem como objetivos principais: (i) desenvolver um método para modelagem de vida útil de componentes e sistemas, (ii) realizar um estudo de caso em um sistema de um produto agrícola. O método a ser desenvolvido basear-se-á em dados de garantia e a opinião dos especialistas. Já o estudo de caso, demonstrará a aplicação do método desenvolvido. Como objetivos secundários citam-se: (i) adaptar e utilizar a metodologia Delphi para obter opinião de especialistas; (ii) estudar o comportamento dos

dados de garantia para obter a confiabilidade neste período; (iii) contribuir com a empresa na geração de conhecimento e informação sobre o sistema em estudo.

1.3 Justificativa

Os estudos de confiabilidade apresentam uma crescente aplicação na fase de projeto e desenvolvimento do produto. Segundo Falcetta (2000), isto pode ser explicado pela busca das empresas em melhorar a qualidade de seus produtos, reduzir tempo de desenvolvimento, reduzir custos na fase de projeto, e também a rápida evolução de novos materiais. Já conforme Kumar e Gaindhar (1996), confiabilidade é uma consideração importante para as fases de planejamento, projeto e funcionamento de qualquer sistema ou equipamento. E ainda segundo o autor, a confiabilidade representa uma ferramenta eficaz e eficiente para a avaliação de risco em projetos de sistemas. Baseado nesses aspectos justifica-se a utilização do tema confiabilidade nesta dissertação.

Em termos de utilização de análises de confiabilidade no desenvolvimento de novos produtos, pode-se considerar que confiabilidade é um tema recente no Brasil. Isto reflete em pouca literatura sobre o assunto na língua portuguesa. Sendo mais específico, existem poucos casos práticos de análises de confiabilidade que abrangem falhas do início (falhas prematuras) ao fim (falhas por desgaste) da vida útil dos produtos.

Os métodos existentes, normalmente são quantitativos e baseados em dados iniciais de falhas, sendo precisos somente no período inicial da vida do produto. Existem métodos que possuem dados de falha em períodos mais avançados do tempo, os quais requerem mais tempo para se obter os resultados. Neste caso, geralmente apresentam alto custo com testes de laboratório ou campo. Devido a isto, busca-se através desta dissertação, ampliar a bibliografia sobre análise de confiabilidade de produtos, desenvolvendo um método específico de modelagem de confiabilidade para a vida total do produto. Este método prioriza o uso de recursos de baixo custo disponíveis na empresa, representados pelos registros de garantia e pelo uso da opinião dos especialistas. Com o uso destes dados, o método é caracterizado pela mistura de dados quantitativos e informações qualitativas.

Muitas empresas modernas buscam a satisfação de seus clientes através da qualidade de seus produtos. Segundo Elsayed (1996), uma das características da qualidade que os clientes requerem de um produto manufaturado é a confiabilidade. Já para alguns clientes, confiabilidade significa o produto trabalhar adequadamente sem falhas. Em busca da

satisfação dos clientes justifica-se a busca pela melhoria da qualidade e da confiabilidade do produto.

Estudar a confiabilidade permite um melhor entendimento do projeto, o que possibilita uma maior segurança nas tomadas de decisões que afetem a qualidade do produto. Para tanto é necessário entender o comportamento das falhas e também verificar o impacto de cada componente na confiabilidade do sistema em diferentes momentos de sua vida útil. Estas afirmações justificam o desenvolvimento de um método para estudo da vida útil dos produtos, demonstrado por um estudo de caso.

1.4 Método

A natureza da pesquisa apresentada neste trabalho pode ser classificada como pesquisa aplicada. Esta classificação concretiza-se por gerar conhecimento para a aplicação prática, dirigido à solução de problemas específicos. Também é uma pesquisa de caráter quantitativo e qualitativo. A pesquisa quantitativa está associada à utilização de dados de garantia e também aos resultados da modelagem da confiabilidade. Já a pesquisa qualitativa está representada pelos depoimentos e informações de projeto fornecidas pelos especialistas da área.

O desenvolvimento deste trabalho é realizado em três etapas. Primeiramente, realiza-se uma revisão teórica sobre confiabilidade, equações e funções da confiabilidade, tipos de distribuição de probabilidade e confiabilidade de sistemas. Revisam-se também assuntos como, análise qualitativa, entrevistas, opinião de especialistas e métodos existentes para obtenção de dados qualitativos, como o Delphi. A revisão abrange estudos recentes de outros autores que utilizam análise de confiabilidade, assim como estudos sobre a aplicação do Delphi.

A segunda etapa envolve a proposta do método para o cálculo de confiabilidade. Apresentam-se os detalhes do método, descrevendo-se as etapas a serem seguidas para a realização de um estudo de caso. Na terceira etapa realiza-se o estudo de caso, que consiste em aplicar o método para realização da modelagem de confiabilidade dos componentes e do sistema. Realiza-se a análise dos resultados onde se verifica a consistência da modelagem de vida útil dos componentes e sistema. Também ocorre a identificação da forma como os diferentes componentes influenciam na confiabilidade do sistema ao longo de sua vida útil. Possíveis ajustes ou sugestões de melhoria no método, na coleta de dados, na modelagem da confiabilidade, entre outros, também são abordados nesta etapa.

1.5 Limitações do trabalho

O estudo é aplicado a um caso específico de sistema de máquina agrícola. Mostram-se apenas as informações relevantes para a realização dos cálculos e modelagem da confiabilidade, não informando a real descrição dos componentes e tampouco se detalhando a função dos mesmos dentro do sistema. Ocorre também a distorção dos valores dos tempos até a falha. Esta distorção é realizada de forma categórica, com a multiplicação de uma constante a cada tempo de falha, o que não compromete os resultados dos estudos. A omissão de informações não relevantes para o estudo e a distorção dos dados de falha ocorre devido a optar-se pela não divulgação de detalhes do projeto do produto que são de propriedade da empresa. Isto é perfeitamente justificável pelo motivo de não representar o foco desta dissertação.

Devido ao estudo ser realizado em um sistema específico, e também pela omissão dos detalhes dos componentes, o método aplicado nesta dissertação não pode ser generalizado e aplicado a sistemas que aparentemente possuam características similares. Para a aplicação do método em produtos de outro ramo como: o náutico, eletro-eletrônico, ferroviário, automotivo ou até mesmo a produtos agrícolas de outro segmento; o método pode mostrar-se inadequado.

O produto agrícola o qual é realizado o estudo apresenta um elevado número de componentes. Para a modelagem da confiabilidade desta dissertação, escolhe-se apenas um sistema formado por 15 componentes, não modelando a confiabilidade total do produto. A escolha destes componentes é devido a formarem o sistema de maior interesse, que representa um sistema fundamental para o funcionamento do produto. De forma semelhante, este método pode ser estendido aos demais sistemas que formam este produto, para o cálculo da confiabilidade total do produto.

1.6 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo é realizada uma introdução ao tema confiabilidade, justificando a sua atual importância nos produtos. Este capítulo também apresenta os objetivos, o método, as limitações e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo trata de uma revisão teórica sobre o tema confiabilidade. São revisados conceitos gerais de confiabilidade contemplando: (i) equações e funções da confiabilidade, (ii) tipos de distribuição de probabilidade e (iii) confiabilidade de sistemas.

Abordam-se ainda, estudos na área qualitativa e assuntos relacionados a este tema, como: entrevistas, opinião de especialistas e o método Delphi.

O terceiro capítulo apresenta o método desenvolvido para o cálculo de vida útil do produto. Este método é apresentado em um fluxograma e detalhado em etapas a serem seguidas para realização de um estudo.

O quarto capítulo consiste na aplicação do método para realização da modelagem de vida útil dos componentes e do sistema. Os resultados são analisados e verifica-se a forma com que a vida útil do sistema é impactada pela confiabilidade de seus componentes.

O quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir do trabalho desenvolvido. Sugestões de melhoria para trabalhos futuros, tanto no método quanto no estudo de caso, também são abordados neste capítulo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta uma revisão sobre o assunto confiabilidade, com abordagem de assuntos como: definições e conceitos de confiabilidade, tipos de distribuições, confiabilidade de sistemas, além de análise qualitativa, mais especificamente a metodologia Delphi. Este capítulo está dividido em 6 seções, onde são detalhados os assuntos acima citados, com intuito de prover a fundamentação teórica para o desenvolvimento desta dissertação.

2.1 Confiabilidade

Uma das características da qualidade que os clientes requerem de um produto manufaturado é a confiabilidade. Entretanto, quando perguntado o que eles entendem por confiabilidade, a resposta normalmente não é clara. Alguns clientes devem responder que significa que o produto esteja sempre funcionando quando se deseja utilizá-lo, enquanto outros clientes irão falhar completamente na tentativa de explicar o que eles entendem por confiabilidade (ELSAYED, 1996).

A confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um produto ou serviço realizar uma função requerida, durante um determinado período de tempo, em condições especificadas no projeto (ELSAYED, 1996). Desta forma, para Ribeiro (2008), precisa-se entender os quatro elementos nos quais a confiabilidade é constituída: probabilidade, desempenho, tempo de operação e condições de operação. A probabilidade é representada por um valor numérico (medida quantitativa); o desempenho são as funções o qual o produto irá cumprir; o tempo de operação consiste na vida útil esperada para o produto; e as condições de operação são representadas pelo ambiente o qual o produto está submetido.

Segundo Shingley (2001), a confiabilidade de um produto “R” pode ser expressa em um valor numérico entre $0 < R < 1$. Se um produto possui confiabilidade de 0,90 em um determinado momento, indica que o mesmo possui 90% de chances de durar além deste tempo. Em outras palavras, confiabilidade é usada para medir o sucesso do sistema (ELSAYED, 1992).

Atualmente, ocorre muita ênfase em melhorias pró-ativas nos produtos, o que requer a construção de uma elevada confiabilidade dos produtos na fase de projeto. O objetivo é evitar falhas de campo durante o tempo de vida estimado do produto. Isto objetiva obter a satisfação de clientes e a eliminação de altas despesas de reparação de unidades falhadas (DOGANAKSOY, HAHN e MEEKER, 2006a).

Para um entendimento pleno de confiabilidade torna-se necessário a definição de alguns conceitos básicos. Estes conceitos tratam de temas como falha, dados censurados e garantia; e estão diretamente relacionadas ao tema confiabilidade do produto. Estes temas são apresentados em subseções a seguir.

2.1.1 Falha e Censura

As situações estudadas em confiabilidade envolvem o tempo até a ocorrência de um evento de interesse, geralmente indesejável, que é chamado de falha. Para cada produto, deve-se definir de forma clara e precisa o que vem a ser falha. Existem situações em que a falha é clara, onde o equipamento rapidamente deixa de funcionar. Já em outras situações, os produtos se deterioram gradativamente com o tempo e existe uma fina linha divisória entre continuar cumprindo sua função e a falha. Nestas situações, uma forma razoável de definir falha é através da visão do consumidor, pois o produto falha quando o consumidor diz que ele falhou (FREITAS e COLOSIMO, 1997).

Ainda segundo os autores, um estudo de tempo de falha só deve ser descrito em termos probabilísticos e qualquer análise estatística de dados de confiabilidade deve ser baseada em conceitos bem definidos. Isto porque a prática mostra que produtos saindo da mesma linha de produção operando sob condições similares apresentam tempos de falha distintos (FREITAS e COLOSIMO, 1997). Uma descrição sobre os tipos de falhas de acordo com a evolução no tempo pode ser vista na seção 2.1.2 deste capítulo.

O modo de falha representa a maneira com que a falha é observada (DODSON e NOLAN, 1997). Ainda, conforme os autores, o modo de falha geralmente descreve a maneira que a falha ocorre e o seu impacto na operação do equipamento. Desta forma, muitos itens possuem mais de um modo de falha.

Uma característica decorrente de informações de falha, principalmente as que envolvem testes de laboratório, é a presença de observações incompletas ou parciais. Estas observações são ditas censuradas ou truncadas (FREITAS e COLOSIMO, 1997). Estes dados censurados surgem quando: (i) removidos de um teste ou serviço antes que ele falhe; (ii) ainda em funcionamento no momento da análise dos dados, e (iii) removidos do teste porque falharam de uma causa estranha, como por exemplo, o equipamento do teste falhar (NELSON, 2004).

Os dados censurados devem ser usados por dois motivos: a primeira explica que mesmo sendo incompletas, as observações censuradas nos fornecem informações sobre o tempo de vida do produto. A segunda razão diz respeito ao efeito da omissão das censuras no

cálculo das estimativas das medidas de confiabilidade de interesse. Por exemplo, ao tentar obter uma estimativa para o tempo médio de falha de um produto, certamente obtém-se um valor viciado se utilizadas somente as observações não censuradas (FREITAS e COLOSIMO, 1997).

2.1.2 Curva da banheira

A taxa de risco representa uma das mais importantes expressões para projetistas de sistemas, engenheiros, e grupos de manutenção. Esta expressão também se refere à taxa de falha. Quando perguntado sobre que tipo de função a taxa de risco exhibe em função do tempo, geralmente a resposta é a forma da curva da banheira (ELSAYED, 1996), conforme mostra a Figura 2.

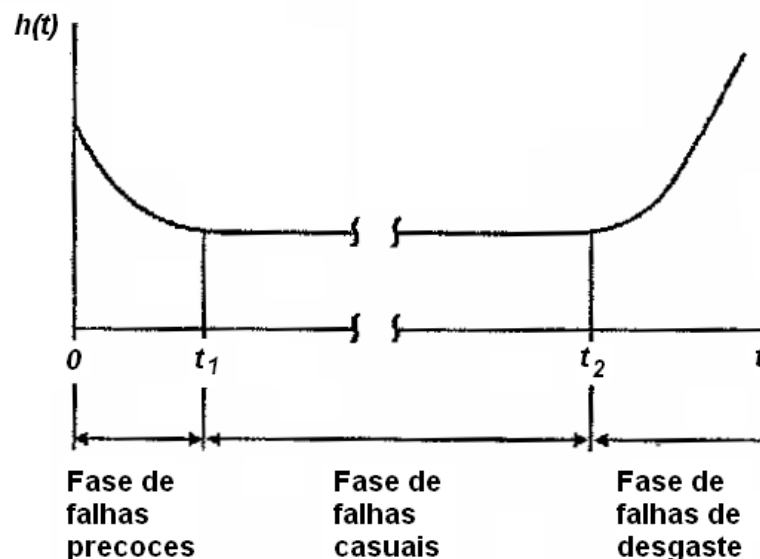


Figura 2 - Curva da banheira
 Fonte: Freitas e Colosimo, 1997, pág. 106

A curva da banheira mostra os tipos de falhas de acordo com a evolução do tempo. Basicamente existem três tipos básicos de falha: falhas precoces, falhas casuais e falhas por desgaste. Elsayed (1996) e Freitas e Colosimo (1997) definem e exemplificam estes três tipos de falha. As falhas precoces, que também são chamadas de falhas prematuras, são caracterizadas por uma taxa de falha alta que decresce rapidamente com o tempo. Estas falhas geralmente são ocasionadas por defeitos grosseiros de fabricação, itens que sofreram solicitações extraordinárias antes do uso, defeitos de instalação e componentes fora da especificação. Este tipo de falha pode ser minimizada, ou até mesmo totalmente eliminada. Para isto, usualmente se executam melhorias no processo de fabricação; realizando melhorias no controle de qualidade do produto; ou ainda, realizando pré-envelhecimento conhecido

como teste de *burn-in*. O período em que as falhas prematuras ocorrem também é conhecido como mortalidade infantil.

Ao final do período de falhas prematuras, a taxa de falhas eventualmente apresenta um valor constante. Nesta região, chamada de vida útil, ocorrem as falhas casuais ou aleatórias, que não seguem um padrão previsível ocorrendo de forma ocasional, devido à aleatoriedade da carga aplicada aos componentes. Podem ser relacionadas às solicitações normais de uso, diferentes combinações de condições de uso, ou ainda devido a debilidades inerentes ao projeto. Devido a estas características, as falhas casuais apresentam um tipo de falha difícil de ser eliminado.

As falhas por desgaste iniciam ao final da região de vida útil e são percebidas quando a taxa de falha aumenta significativamente. Esta região é chamada de região de envelhecimento ou desgaste, pois apresenta falhas devido ao processo natural de envelhecimento ou desgaste do produto. Esta região pode ser minimizada usando um programa adequado de manutenção preventiva ou a substituição do produto.

A forma da curva da banheira não é aplicada a todos os tipos de componentes. Alguns componentes elétricos e eletrônicos não mostram a região de desgaste. Outros componentes talvez não demonstrem a região de taxa de falha constante e exibem uma transição gradual entre a região de falha prematura e a região de desgaste. O comprimento de cada região varia de um componente para o outro (ELSAYED, 1996).

2.1.3 Funções de confiabilidade

Conforme visto anteriormente, a confiabilidade é usada para medir o sucesso do sistema. Porém, como quantificar a confiabilidade? Uma das medidas dos sistemas de confiabilidade é o tempo médio até a falha (MTTF do inglês, *Mean Time To Failure*). Refere-se ao MTTF para o tempo esperado entre duas falhas sucessivas, quando o sistema é do tipo não reparável. Porém, quando o sistema é reparável, refere-se ao tempo médio entre as falhas, MTBF do inglês, *Mean Time Between Failure* (ELSAYED, 1996). As formas usuais de especificar o tempo até a falha são através de funções, sendo que se pode destacar a função da confiabilidade, função acumulada de falha, função densidade da probabilidade e a função de taxa de falha.

Segundo a definição de Freitas e Colosimo (1997), a função da confiabilidade é a probabilidade de um produto desenvolver sua função sem falhar até certo tempo t . Para Elsayed (1996), se considerado que uma quantidade n_0 de componentes iguais foi submetida a um teste de tensão, após o tempo t observa-se que $n_{f(t)}$ componentes falharam e $n_s(t)$

componentes sobreviveram [$n_{f(t)} + n_s(t) = n_0$]. Como a função da confiabilidade é definida como a função da probabilidade cumulativa de sucesso, no tempo t , confiabilidade $R(t)$ é dada pela equação (1) (ELSAYED, 1996).

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)} = \frac{n_s(t)}{n_0} \quad (1)$$

A função acumulada de falha $F(t)$ é representada pelo complemento da função da confiabilidade. Logo, pode ser definida, conforme Elsayed (1996), pelas equações (2) e (3).

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2)$$

$$F(t) = 1 - \frac{n_s(t)}{n_0} = \frac{n_f(t)}{n_0} \quad (3)$$

A relação entre a função da confiabilidade $R(t)$ e a função acumulada de falha $F(t)$ pode ser vista na Figura 3.

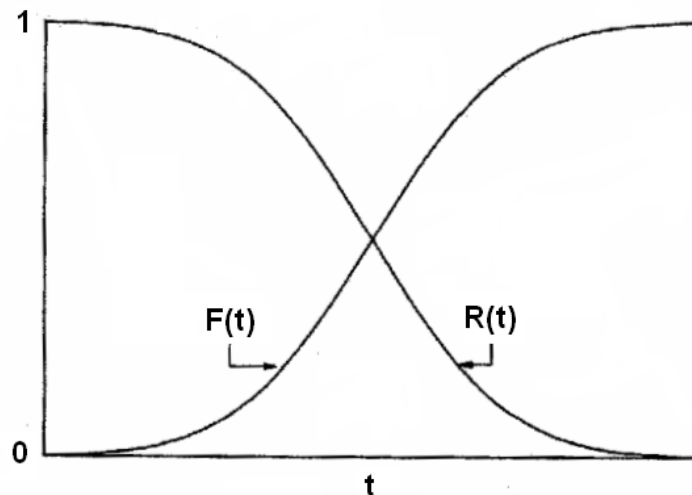


Figura 3 - Relação entre a função confiabilidade e a função acumulada de falha

Fonte: Dodson e Nolan, 1999, pág. 25

Outra função importante para o estudo de confiabilidade é a função densidade da probabilidade, representada por $f(t)$. Esta função é definida como a derivada da função acumulada de falha (DODSON e NOLAN, 1999), e para $t \rightarrow 0$ pode ser representada pela

equação (4). A mesma também pode ser relacionada com a função da confiabilidade (ELSAYED, 1996), o qual é mostrada na equação (5).

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4)$$

$$-f(t) = \frac{dR(t)}{dt} \quad (5)$$

A definição da função densidade da probabilidade também pode ser dada de acordo com a equação (6), onde é relacionada puramente com o número de componentes que falharam e o número total de componentes, para um determinado período de tempo representado por Δt (ELSAYED, 1996).

$$f(t) = \frac{n_f(\Delta t)}{n_0 \Delta t} \quad (6)$$

Tem-se ainda, a função taxa de risco $h(t)$, que representa a taxa de falha instantânea e consiste em uma medida de propensão à falha (DODSON e NOLAN, 1999). Esta função é definida conforme equação (7); e a função confiabilidade e função densidade da probabilidade podem ser obtidas através dela, como mostram as equações (8) e (9) respectivamente.

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (7)$$

$$R(t) = e^{-\int_{-\infty}^t h(u) du} \quad (8)$$

$$f(t) = h(t) e^{-\int_{-\infty}^t h(u) du} \quad (9)$$

A mesma função taxa de risco $h(t)$ pode ser obtida partindo-se da equação (7) e substituindo as funções densidade da probabilidade $f(t)$ e confiabilidade $R(t)$ por suas respectivas definições mostradas nas equações (1) e (6). Esta relação é mostrada na equação (10), (ELSAYED, 1996).

$$h(t) = \frac{n_f(\Delta t)}{n_s(t)\Delta t} \quad (10)$$

Um resumo das relações entre as funções $F(t)$, $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$ vem apresentado por Leemis (1995 apud FALCETTA, 2000) na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação entre as funções $F(t)$, $f(t)$, $R(t)$ e $h(t)$

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

Fonte: Leemis (1995 apud FALCETTA, 2000)

A utilização das funções de confiabilidade serve, entre outras coisas, para medir e comparar sistemas e componentes quanto ao número de falhas e o comportamento destas na evolução do tempo. Dentre as quatro funções apresentadas anteriormente, possivelmente a função da confiabilidade, $R(t)$, representa a função preferida pelos autores em seus estudos. Exemplos disto podem ser verificados em Yadav *et al.* (2006), Attardi, Guida e Pulicini (2004), Droguett (2006), entre outros. Esta função freqüentemente é acompanhada pela função da densidade de probabilidade, $f(t)$, ou pela função taxa de risco, $h(t)$.

A função acumulada de falha, $F(t)$ também é utilizada como o mesmo intuito da anterior. Sua utilização ocorre com menor freqüência que a função da confiabilidade, mas mostra-se de igual capacidade de compreensão, visto que representa o complemento da função da confiabilidade. Exemplos de estudos que são baseados na utilização da função acumulada de falhas podem ser encontrados em Woo e Pecht (2007) e Ferreira *et al.* (2002).

Há ainda outros autores que simplificam a forma de comparar a confiabilidade entre sistemas ou produtos, como Oliveira *et al.* (1999) que utiliza o tempo médio de operação (TMO), ou Doganaksoy, Hahn e Meeker (2006a), que utiliza dados de falhas por máquina (FPM).

2.2 Distribuições de probabilidade

A realização de modelagens de confiabilidade geralmente é representada pelas distribuições de confiabilidade, através do qual se busca a análise estatística dos dados sob o enfoque paramétrico. Embora exista uma série de distribuições probabilísticas utilizadas em análise de dados de confiabilidade, algumas delas ocupam uma posição de destaque por sua comprovada adequação a várias situações práticas. Entre estas, pode-se citar a Exponencial, Weibull e Lognormal (FREITAS e COLOSIMO, 1997).

Ainda segundo os autores, estas distribuições são caracterizadas pelos seus parâmetros. Como exemplo, a distribuição Exponencial tem o parâmetro λ que representa a taxa de falha constante. Já a distribuição de Weibull tem o parâmetro de forma e de escala. Para uma boa análise de dados, devem-se conhecer as características das distribuições, pois algumas vezes a mesma análise para diferentes distribuições podem obter resultados que diferem consideravelmente. Nas seções 2.2.1 e 2.2.2 são descritas a distribuição de Weibull e suas características, já que muitas outras distribuições como a exponencial, por exemplo, são casos particulares da Weibull.

2.2.1 Distribuição Weibull

O modelo de distribuição Weibull é de ampla aplicabilidade no campo da confiabilidade, e deve sempre ser usado quando não se tem informação sobre o desempenho do produto. Conforme Freitas e Colosimo (1997), esta distribuição apresenta uma grande variedade de formas, todas com uma propriedade básica: a sua função de taxa de falha é monótona. Isto é, ou ela é crescente, ou decrescente, ou constante. Dodson e Nolan (1999) ainda afirmam que a distribuição de Weibull tem popularidade devido à habilidade de ser utilizada em amostras pequenas e devido a sua flexibilidade.

Segundo Freitas e Colosimo (1997), a distribuição de Weibull é freqüentemente usada para descrever o tempo de vida de produtos industriais. Descreve também adequadamente o tempo de vida de produtos formados de várias partes (elementos) cuja falha ocorre quando a primeira parte falhar (componentes ligados em série). Podem ser citados como exemplo de aplicação desta distribuição, o cálculo do tempo de vida de mancais, componentes eletrônicos, cerâmica, capacitores e dielétricos. As equações (11), (12) e (13) representam a função

densidade da probabilidade, confiabilidade e taxa de risco respectivamente. A representação gráfica das mesmas é vista na Figura 4 para diferentes parâmetros de forma e escala (DODSON e NOLAN, 1999).

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right], t \geq 0 \quad (11)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right], t > 0 \quad (12)$$

$$h(t) = \frac{\beta t^{(\beta-1)}}{\eta^\beta}, t > 0 \quad (13)$$

Onde: η (eta) é o parâmetro de escala $0 < \eta < \infty$
 β (beta) é o parâmetro de forma $0 < \beta < \infty$

Conforme Dodson e Nolan (1999), o valor de β encontra-se tipicamente entre 0,5 e 8,0 e representa o parâmetro mais importante, pois define a forma da distribuição. Na medida em que β aumenta, a média da distribuição de Weibull se aproxima de η e a variância se aproxima de zero. O parâmetro de escala η também é conhecido como vida característica, pois 63,2% da população falha no ponto da vida característica, independentemente do valor de β .

Ainda segundo os autores, a distribuição de Weibull é utilizada em diversas situações porque dependendo do valor de β , ela pode ser igual ou se aproximar de outras distribuições. Podem ser citados alguns exemplos, como: para $\beta = 1$, a distribuição de Weibull é idêntica à exponencial; para $\beta = 2$, a distribuição Weibull é idêntica a Rayleigh; para $\beta = 2,5$ a distribuição de Weibull se aproxima da lognormal; e ainda para $\beta = 3,6$ a distribuição de Weibull se aproxima da distribuição normal.

Ao se observar a Figura 4, na função da confiabilidade, $R(t)$, percebe-se que para valores de $\beta < 1$ a confiabilidade decresce inicialmente e após estabiliza. Isto é característico de falhas resultantes de mortalidade infantil. Já para $\beta = 1$, a confiabilidade diminui gradualmente, caracterizando uma taxa de falha constante. E ainda, para valores de $\beta > 1$, a

confiabilidade diminui lentamente no início, e então diminui com maior intensidade; o que caracteriza falhas por desgaste (DODSON e NOLAN, 1999).

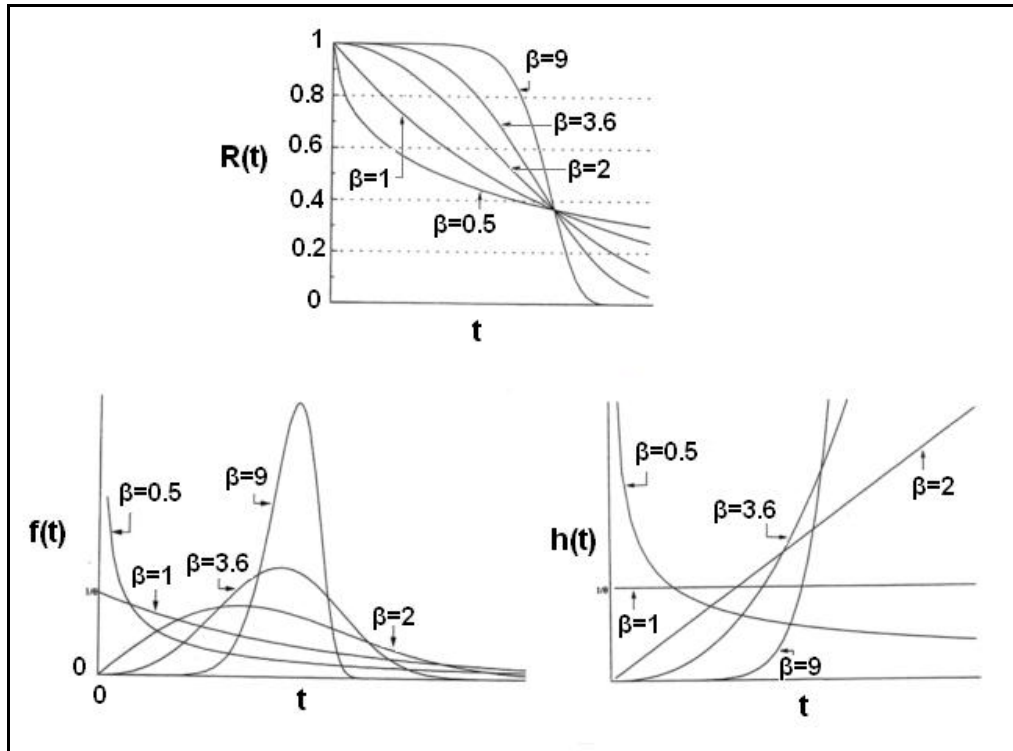


Figura 4 - Gráfico das funções confiabilidade, densidade da probabilidade e taxa de risco para a distribuição de Weibull

Fonte: Dodson e Nolan, 1999

Com relação à função taxa de risco, para valores em que o fator de forma for menor que um ($\beta < 1$), a taxa de falha é decrescente. Se $\beta = 1$, a taxa de falha é constante e de valor igual à $1/\eta$. Para funções cuja taxa de falha é crescente ($\beta > 1$), quanto maior o valor de β , mais rapidamente a taxa de falha aumenta (DODSON e NOLAN, 1999).

2.2.2 Utilização de duas distribuições de Weibull

A distribuição de Weibull tem sido usada amplamente para modelar tempos de falha. Porém, quando um conjunto de dados não pode ser modelado adequadamente pela distribuição de Weibull simples, uma alternativa pode ser envolver duas distribuições de Weibull (JIANG e MURTHY, 1997). Usualmente, os dados são ajustados graficamente através dos papéis da probabilidade, os WPP (*Weibull Plotting Paper*), possibilitando a definição dos parâmetros das distribuições (JIANG e MURTHY, 1995). Estes autores

classificam estas distribuições em modelos seccionais, multiplicativos e de riscos concorrentes.

O modelo seccional está subdividido em seccional (a) e (b). O modelo seccional (a) representa a associação seqüenciada de duas distribuições de Weibull com dois e três parâmetros, respectivamente. Já o seccional (b), é representado pela associação seqüenciada de duas distribuições de Weibull de dois parâmetros (JIANG e MURTHY, 1995). O modelo seccional (a) é dado pela equação (14).

$$R(t) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1}\right] & , \quad 0 \leq t \leq t_0 \\ \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta_2}\right)^{\beta_2}\right] & , \quad t_0 \leq t \leq \infty \end{cases} \quad (14)$$

Onde: γ é o parâmetro de localização

β_1 é o parâmetro de forma da distribuição 1

β_2 é o parâmetro de forma da distribuição 2

η_1 é o parâmetro de escala da distribuição 1

η_2 é o parâmetro de escala da distribuição 2

Aparentemente o modelo é caracterizado por seis parâmetros $(t, \eta_1, \eta_2, \beta_1, \beta_2, \gamma)$. Porém, impõe-se a condição que $R(t)$ e $f(t)$ sejam contínuas em t_0 , o que estabelece que se atendam às equações (15) e (16). Isto faz com que se evidenciem as equações (17) e (18). Desta forma, verifica-se que o número de parâmetros independentes são apenas quatro. Tem-se ainda que para $\gamma > 0$, deve-se ter $\beta_1 > \beta_2$; e ainda $\gamma > t_0$ (JIANG e MURTHY, 1995).

$$(t_0 / \eta_1)^{\beta_1} = [(t_0 - \gamma) / \eta_2]^{\beta_2} \quad (15)$$

$$(t_0 / \gamma) / t_0 = \beta_2 / \beta_1 \quad (16)$$

$$t_0 = \left[\eta_1^{\beta_1} (\beta_2 / \beta_1 / \eta_2)^{\beta_2} \right]^{1/(\beta_2 - \beta_1)} \quad (17)$$

$$\gamma = (1 - \beta_2 / \beta_1) t_0 \quad (18)$$

Já o modelo seccional (b) é dado pela equação (19). De forma semelhante, este modelo também é definido inicialmente por seis parâmetros, que após impostas às condições de continuidade, resultam apenas quatro parâmetros independentes. Para isto, denomina-se k como parâmetro aditivo, que é fator determinante para que $R(t)$ e $f(t)$ sejam contínuas em t_0 (JIANG e MURTHY, 1995).

$$R(t) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1}\right] & , \quad 0 \leq t \leq t_0 \\ k \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{\beta_2}\right] & , \quad t_0 \leq t \leq \infty \end{cases} \quad (19)$$

O modelo de riscos concorrentes representa dois modos de falhas com características distintas que se ajustam a distribuições de Weibull (JIANG e MURTHY, 1995). Estas distribuições possuem parâmetros diferentes e concorrem entre si. Este modelo é definido conforme equação (20) (JIANG e MURTHY, 1995). Estes autores afirmam que para evitar que esta equação se reduza a uma única distribuição de Weibull, deve-se respeitar que $\beta_1 \neq \beta_2$. Assume-se ainda que $\beta_1 < \beta_2$.

$$R(t) = \exp\left[-(t/\eta_1)^{\beta_1}\right] \times \exp\left[-(t/\eta_2)^{\beta_2}\right] \quad (20)$$

Para Jiang e Murthy (1995), no modelo multiplicativo as falhas dos produtos ocorrem em um tempo dado pelo máximo entre $\{T_1; T_2\}$, em que T_1 está associado a $R_1(t)$ e T_2 a $R_2(t)$. Este modelo é representado pela equação (21), onde $i = 1, 2$; e η_i e β_i representam o parâmetro de escala e de forma, respectivamente, para as duas sub-populações (JIANG e MURTHY, 1997). Pode-se assumir que $\beta_1 \leq \beta_2$ e $\eta_1 \leq \eta_2$ para o caso de $\beta_1 = \beta_2$.

$$F(t) = F_1(t)F_2(t) = [1 - R_1(t)][1 - R_2(t)] \quad (21)$$

com

$$R_i(t) = \exp\left[-(t/\eta_i)^{\beta_i}\right] \quad (22)$$

Como exemplo de modelo multiplicativo, pode-se citar dois componentes conectados em paralelo em uma rede de circuito elétrico (JIANG e MURTHY, 1995). Ainda conforme os autores, as distribuições de falhas para os dois componentes são representadas por $F_1(t)$ e por $F_2(t)$, respectivamente. Se os componentes são estatisticamente similares, então $F_1(t) = F_2(t)$ (JIANG e MURTHY, 1995).

Existem ainda outros modelos que envolvem mais de uma distribuição, não necessariamente distribuições de Weibull. Como por exemplo, podem ser citados: o modelo Uniforme-weibull, Bayesiano para dados mistos e o modelo GLFP (*General Limited Failures Population* – Modelo Geral de Falhas Limitadas). Conforme Majeske (2003), no modelo Uniforme-Weibull, utiliza estas duas distribuições para modelar falhas de veículos durante o período de garantia, sendo estas classificadas em prematuras e de desgaste. Já Nair, Tang e Xu (2001), propõem uma abordagem bayesiana para modelar dados mistos provenientes das duas fases iniciais (mortalidade infantil e vida útil) da curva da banheira. O diferencial deste modelo é que o mesmo utiliza duas distribuições exponenciais. Para o modelo GLFP, Chan e Meeker (1999) também propõem modelar falhas prematuras simultaneamente com as falhas por desgaste. Têm-se ainda o modelo proposto por Grodzenskii e Domrachev (2002), que mistura as distribuições de Weibull e Exponencial, e segundo os autores torna possível descrever produtos que possuem a função densidade de probabilidade em forma de “U”.

2.3 Estimativa de parâmetros e testes de adequação

Sabe-se que as distribuições são caracterizadas pelos seus parâmetros. Sendo assim, segundo Freitas e Colosimo (1997), os parâmetros devem ser estimados a partir das observações amostrais, de tal forma que o modelo fique determinado e possibilite responder às perguntas de interesse. Conforme Dodson e Nolan (1999) na engenharia de confiabilidade, os métodos para estimar parâmetros mais populares são: método da máxima verossimilhança, método dos papéis de risco, método dos papéis da probabilidade e método dos momentos.

As técnicas de estimativa de parâmetros manuais normalmente são complexas, e é comum a aplicação de softwares para realizar esta análise. Apresentam-se nas próximas seções alguns dos principais métodos. Para instruções detalhadas de como estimar estes métodos, pode-se consultar Freitas e Colosimo (1997) e Dodson e Nolan (1999).

Já os testes de adequação, consistem em calcular um teste estatístico sob a hipótese de que o modelo é adequado e obter uma probabilidade que reflita a plausibilidade desta hipótese. Se esta probabilidade for pequena, usualmente menor que 0,05, não se aceita o

modelo como sendo adequado; e caso contrário, não se rejeita o modelo (FREITAS e COLOSIMO, 1997).

Segundo Dodson e Nolan (1999), dois testes de adequação muito utilizados em análises de confiabilidade são: o teste do Qui-quadrado e o teste de Kolmogorov-Smirnov. O teste do Qui-quadrado requer um grande tamanho de amostra (geralmente maior que 25), e não pode ser utilizado com dados múltiplos censurados. O teste de Kolmogorov-Smirnov geralmente possui menos força que testes de distribuição-específica. Outro teste indicado pelos autores é o teste de Hollander-Proschan, o qual pode ser utilizado com dados múltiplos censurados. Sugerem-se os autores Freitas e Colosimo (1997) e Dodson e Nolan (1999) para detalhamento sobre estes testes, pois devido à utilização de softwares para cálculo dos mesmos, não serão detalhados neste trabalho.

2.3.1 Método da Máxima Verossimilhança

O método da máxima verossimilhança é um dos métodos mais usados para estimar parâmetros. Para a estimação dos parâmetros, o método se baseia nos resultados obtidos pela amostra e busca os valores dos parâmetros que maximizam a probabilidade de ter gerado estes resultados. Como exemplo, se a distribuição for a Weibull, para cada combinação diferente de η e β têm-se distribuições diferentes de Weibull. Este método escolhe os valores de η e β que melhor expliquem os resultados gerados pelos dados (FREITAS e COLOSIMO, 1999).

A função da verossimilhança para uma dada distribuição é representada pela probabilidade de obter a amostra dos dados. Sejam x_1, x_2, \dots, x_n independentes, variáveis aleatórias de uma função densidade da probabilidade $f(x, \eta)$, onde η representa o parâmetro simples da distribuição (DODSON e NOLAN, 1999). Então a função da verossimilhança pode ser representada pela equação (23).

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n; \eta) = f(x_1; \eta) f(x_2; \eta) \dots f(x_n; \eta) \quad (23)$$

Ainda segundo o autor, a estimativa de parâmetros por máxima verossimilhança, $\hat{\eta}$, maximiza a função verossimilhança. Esta estimativa é assintoticamente normal. Frequentemente o logaritmo natural da função verossimilhança é maximizado para simplificação dos cálculos. Devido às propriedades destes estimadores, este método permite a construção de intervalos de confiança para os parâmetros do modelo ou para funções destes parâmetros.

2.3.2 Método dos papéis da probabilidade

O método dos papéis da probabilidade representa um método gráfico. Este método é utilizado com frequência para verificar a adequação de modelos, e também pode ser utilizado para fornecer estimativa de parâmetros das distribuições. No caso da estimativa de parâmetros, para uma determinada distribuição, a função é transformada em uma expressão linear, normalmente por uma transformação logarítmica, e então é plotada. Se os pontos plotados formam uma linha reta, a distribuição assumida é aceitável, sendo que a inclinação e o ponto de interseção da reta fornecem as informações necessárias para estimar os parâmetros da distribuição de interesse. A posição média é normalmente utilizada para estimar a função da distribuição acumulativa. Porém outras funções também podem ser utilizadas, como a função da posição média e o estimador de Kaplan-Meier (DODSON e NOLAN, 1999).

Na verificação de adequação de modelos, comparam-se graficamente as funções de confiabilidade estimadas para cada modelo proposto (Exponencial, Weibull, Lognormal, entre outros) com uma função de confiabilidade de um método não paramétrico, como por exemplo, Kaplan-Meier. O modelo que melhor representa a amostra de dados é o modelo cujos pontos da função de confiabilidade estimada estiverem mais próximos dos valores obtidos pela estimativa não-paramétrica. Como exemplo, na Figura 5 pode ser visto a comparação dos modelos Exponencial, Weibull e Lognormal com o estimador de Kaplan-Meier. Verifica-se que os modelos Exponencial e Weibull parecem não ser adequados, enquanto o modelo Lognormal possui pontos que acompanham a reta, sendo este o modelo mais adequado para os dados em estudo (FREITAS e COLOSIMO, 1997).

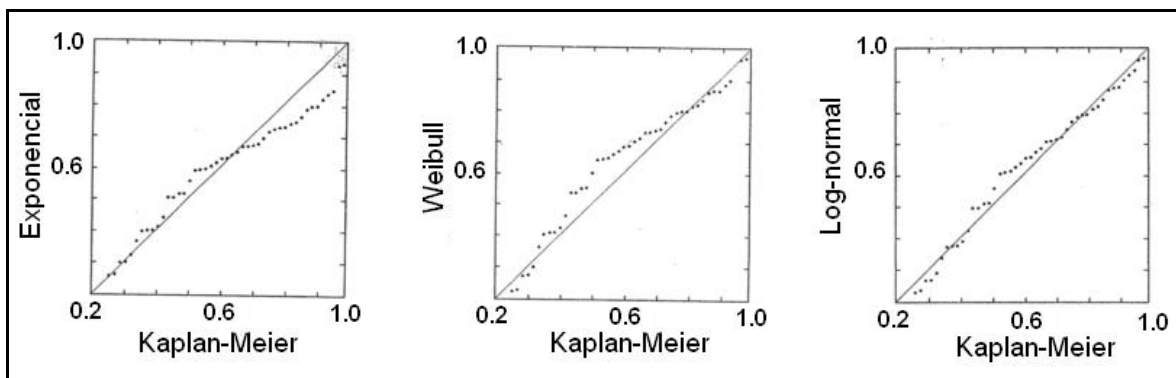


Figura 5 - Gráficos da função da Confiabilidade dos modelos Exponencial, Weibull e Lognormal vs. Kaplan-Meier

Fonte: Freitas e Colosimo, 1997

Quando os gráficos são construídos manualmente é necessário um papel da probabilidade para uma distribuição específica. Porém com a utilização de computadores e planilhas eletrônicas, papéis específicos não são necessários e as transformações podem ser feitas de forma rápida e fácil. Este método apresenta uma forma simples de obter os parâmetros para as distribuições, porém possui a desvantagem de possuir um forte componente subjetivo e não fornecem uma avaliação de suas respectivas precisões (FREITAS e COLOSIMO, 1997).

2.4 Confiabilidade de sistemas

Um sistema (ou um produto) é a coleção de componentes organizados de acordo com um projeto específico de maneira a desempenhar as funções desejadas com aceitáveis níveis de performance e confiabilidade. Os tipos de componentes utilizados, suas qualidades e a configuração do projeto o qual eles são organizados possuem um efeito direto na performance e confiabilidade do sistema (ELSAYED, 1996).

Ainda segundo Elsayed (1996), uma simples e eficiente maneira de avaliar a confiabilidade de sistemas é construindo o diagrama de blocos. Este diagrama consiste na representação gráfica dos componentes do sistema e como eles são conectados entre si. Para isto, os componentes ou subsistemas são representados por blocos (ou retângulos) onde é possível visualizar o tipo de ligação entre eles (série, paralelo, misto, etc.) e avaliar a confiabilidade do sistema. Na Figura 6, de Kumar *et al.* (2006), pode ser visto o exemplo do sistema automóvel, que é composto por cinco subsistemas representados pelos blocos. Os blocos estão conectados em série, onde cada bloco é essencial para o funcionamento correto do automóvel. Neste exemplo, ainda seria possível explorar cada um dos subsistemas na forma de diagrama de blocos, desmembrando os respectivos componentes que formam os subsistemas.

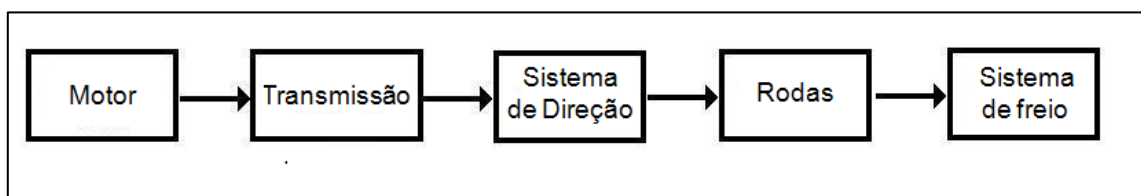


Figura 6 - Exemplo do sistema automóvel para ilustrar o diagrama de blocos

Fonte: Kumar *et al.* (2006)

2.4.1 Sistema em Série

Um sistema em série é composto de n componentes (ou subsistemas) conectados em série. A falha de qualquer um dos componentes resulta em uma falha do sistema completo (ELSAYED, 1996). Conforme Dodson e Nolan (1999), a confiabilidade do sistema é o produto da confiabilidade dos componentes, o qual pode ser representada pela equação (24). A representação do sistema em série pode ser vista no diagrama de blocos da Figura 7.

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \quad (24)$$

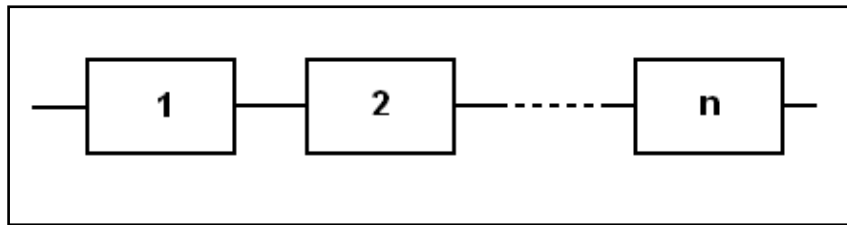


Figura 7 - Diagrama de blocos do sistema em série

Fonte: Dodson e Nolan (1999)

2.4.2 Sistema em Paralelo

Em um sistema em paralelo, componentes são conectados em paralelo e a falha de um ou de mais ramos ainda permitem os ramos remanescentes funcionarem adequadamente. Em outras palavras, a confiabilidade de um sistema em paralelo é a probabilidade de que ao menos um dos ramos esteja em operação (ELSAYED, 1996). Dodson e Nolan (1999) dividem os sistemas paralelos em: (i) sistema em paralelo ativo puro, (ii) sistema em paralelo ativo dividido e (iii) sistema em paralelo passivo. Para este estudo, devido à simples aplicação no estudo de caso, mostra-se apenas a definição de confiabilidade para o sistema em paralelo ativo puro, como pode ser visto na equação (25). A representação do sistema em paralelo pode ser vista no diagrama de blocos da Figura 8.

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (25)$$

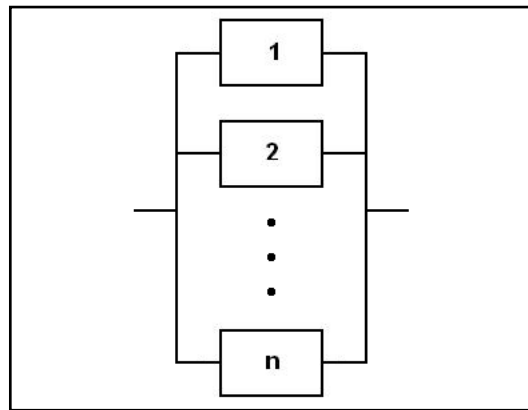


Figura 8 - Diagrama de blocos do sistema em paralelo ativo puro

Fonte: Dodson e Nolan (1999)

Conforme Elsayed (1996), há ainda muitos sistemas que são compostos de uma combinação de subsistemas em série e paralelo. Podem ser citados como exemplo os sistemas: paralelo-série, série-paralelo e paralelo misto. Ou ainda, outros sistemas mais elaborados, como o sistema *Consecutive-k-out-of-n:F* e os sistemas complexos, podem ser encontrados em Elsayed (1996) e Dodson e Nolan (1999).

2.4.3 Aplicações de sistemas de confiabilidade

A engenharia de confiabilidade possui uma ampla variedade nos tipos de componentes e sistemas aos quais é aplicada. De acordo com Halpern (1978), os estudos de confiabilidade iniciaram-se em equipamentos que possuíam uma determinada importância ou tecnologia. O autor cita aplicações em equipamentos militares, espaciais e aplicações comerciais; como equipamentos de segurança e equipamentos médicos.

Oliveira *et al.* (1999) calcula o tempo médio de operação (TMO) de sistemas de bombeio de dois diferentes fabricantes. O autor verifica que, mesmo ambos possuindo problemas de mortalidade infantil, um fabricante mostra ser até duas vezes melhor que o outro em termos de confiabilidade. Já no ramo de componentes eletrônicos, a aplicação do cálculo de confiabilidade é bastante comum e simples, visto que geralmente são modeladas pela distribuição exponencial possuindo taxa de falha constante. Lemes (2006) aplica um estudo de caso em componentes eletrônicos de uma central telefônica. Este estudo apresenta como base dados de garantia e exemplificam componentes como: capacitores, disjuntores, fusíveis e diodos.

Outro setor em que o uso da estimação da confiabilidade apresenta diversos exemplos de aplicação é o ramo automotivo. Este, em sua maioria, representado por componentes

mecânicos, onde o desgaste é um fator fortemente considerado. Alguns autores podem ser citados em estudos de componentes e sistemas mecânicos, como Yadav *et al.* (2006), em estudo sobre sistema de direção; Gutierrez-Pulido, Aguirre-torres e Christen (2006) em estudo sobre componentes de freios; Attardi, Guida e Pulicini (2004) em estudo sobre componentes de uma caixa de câmbio; e Kumar e Gaindhar (1996) sobre um sistema de transmissão. Neste ramo, apesar da diversidade de abordagens e objetivos utilizados, a confiabilidade apresenta papel importante na busca por redução de falhas e redução de custo de garantia.

Há ainda determinadas abordagens de outros tipos de componentes e sistemas que merecem destaque e podem ser utilizados como base para estudos futuros, mesmo em ramos diferentes. Em estudos de rolamentos, Ferreira *et al.* (2002) analisa a performance de 47.000 peças usadas em vagões de trens de transporte. Este estudo é realizado baseado na técnica de Monte Carlo, com duas diferentes metodologias de cálculo, e resultam na estimativa da vida nominal do componente.

Em análise de falha, Woo e Pecht (2007) buscam reproduzir os modos de falha de uma hélice de um refrigerador através de testes acelerados. Já Doganaksoy, Hahn e Meeker (2006b) realizam estudo de caso de freios de locomotivas para apresentar um método de análise de confiabilidade para produtos ou sistemas reparáveis. Ambos os exemplos, mostram que alguns métodos são amplos o suficiente para serem aplicados em componentes de diferentes ramos, desde que possuam certas características em comum.

2.5 Garantia

Segundo Elsayed (1996) garantia é um contrato ou acordo sobre o qual o produtor de um produto ou serviço concorda em reparar, substituir ou providenciar serviços quando o produto falha ou o serviço não atende aos requisitos do consumidor antes de um tempo especificado (prazo de garantia). Ou ainda, conforme Hill, Beall e Blischke (1991), quando um fornecedor garante um produto ele assume uma obrigação com o consumidor. Essa obrigação gera custos para o fornecedor através das falhas do produto. Em geral os termos de garantia requerem que o produto seja reparado, que uma reposição seja providenciada, ou que um reembolso em dinheiro seja dado.

Os principais objetivos da garantia de produtos e serviços, segundo Dalrymple & Parsons (1976), são: (i) estimular as vendas através da redução da ansiedade dos consumidores sobre os problemas de pós-venda, e (ii) repetir negócios, onde os consumidores ficaram satisfeitos. A fim de alcançar esses objetivos é necessário que a empresa esteja

estruturada para tranquilizar e satisfazer os consumidores. Isto consiste que os produtos e serviços sejam de qualidade, além de terem alta confiabilidade.

Sob diversos aspectos, a confiabilidade de um produto tem impacto na satisfação do usuário. Um desses aspectos é a durabilidade. Basta lembrar que um produto menos confiável pode necessitar de intervenções mais freqüentes para reparos, cujos gastos poderão anular a vantagem inicial de um custo mais baixo de aquisição (FREITAS e COLOSIMO, 1997).

Para analisar as informações provenientes dos clientes, segundo Burgess (1987), a empresa precisa implementar um sistema de registro da confiabilidade. Isto significa montar um sistema de coleta de informações tais como: tempo acumulado de operação, número de falhas, condições apresentadas no momento da ocorrência de cada falha. A existência de tal sistema é a base para os estudos de confiabilidade e para a administração dos serviços de garantia e assistência técnica.

No caso dos automóveis, estratégias de marketing tradicionalmente tem sido o fator que define o período de garantia do produto; enquanto que a confiabilidade e qualidade do produto são consideradas importantes fatores de suporte. Na realidade, os termos de garantia são freqüentemente determinados por pressões de marketing (KLEYNER e SANDBORN, 2004).

Podem ser encontrados na literatura alguns modelos para cálculo de previsão de garantias. Segundo Kleyner e Sandborn (2004), os tipos de modelos mais comuns são os que incluem estimativas futuras para produtos novos e os que fazem previsões em andamento para produtos correntes. O primeiro representa uma etapa no estágio de projeto do produto para antecipar os custos futuros com garantias; e o outro, parte dos dados de falha do início do período de garantia com o objetivo de antecipar os custos do final do período. Os mesmos autores mostram uma proposta de modelo de previsão de garantia, em que o método é baseado em simulação estocástica do retorno de garantia esperado para o produto.

Sob diversos aspectos pode ser vista a estreita relação existente entre garantia e confiabilidade do produto. Isto pode ser visto tanto na utilização do banco de dados de falhas (dados de garantia) para a estimativa de confiabilidade do produto; quanto no uso da confiabilidade para estimar o período de garantia do produto, evitando basear-se apenas em estratégias de marketing.

2.6 Análise qualitativa

Estudos para demonstrar ou estimar a confiabilidade dos produtos usualmente são baseados em dados e métodos quantitativos. Enquanto estudos quantitativos geralmente procuram seguir com rigor um plano previamente estabelecido (baseado em hipóteses claramente indicadas e variáveis que são objeto de definição operacional), a pesquisa qualitativa costuma ser direcionada ao longo de seu desenvolvimento (NEVES, 1996). Ainda segundo o autor, a pesquisa qualitativa não busca enumerar ou medir eventos e, geralmente não emprega instrumental estatístico para análise dos dados. Isto ocorre porque seu foco de interesse é amplo e parte de uma perspectiva diferenciada da adotada pelos métodos quantitativos. A obtenção de dados descritivos mediante contato direto e interativo do pesquisador com a situação objeto de estudo, fazem parte deste tipo de análise. Devido a isto, nas pesquisas qualitativas é freqüente que o pesquisador procure entender os fenômenos, segundo a perspectiva dos participantes da situação estudada e, somente depois, situe sua interpretação dos fenômenos estudados.

Em sua definição, a pesquisa qualitativa compreende um conjunto de diferentes técnicas interpretativas que visam a descrever e a decodificar os componentes de um sistema complexo de significados. Tem por objetivo traduzir e expressar o sentido dos fenômenos do mundo social; trata-se de reduzir a distância entre indicador e indicado, entre teoria e dados, entre contexto e ação. Os métodos qualitativos se assemelham a procedimentos de interpretação dos fenômenos que são empregados no nosso dia-a-dia, e que têm a mesma natureza dos dados que o pesquisador qualitativo emprega em sua pesquisa (MAANEN, 1979).

Existem variadas técnicas de obtenção de dados e informações para pesquisas qualitativas. Uma delas é a técnica de entrevistas individuais, que é caracterizada pelo entrevistado ficar frente a frente com o respondente, tendo a oportunidade de explorar em profundidade um determinado tema. O número de entrevistados é pequeno e o envolvimento do entrevistador é muito grande, interagindo diretamente com o respondente que detém as informações. Desta forma o entrevistado pode ser indagado detalhadamente e em profundidade, não existe a interação do entrevistado com outros participantes e o ambiente é caracterizado por uma conversa informal (RIBEIRO e MILAN, 2007).

Outro tipo de pesquisa qualitativa, de caráter exploratório, consiste nos grupos focados. Esta pesquisa é realizada por intermédio de um moderador, e de um grupo de 8 a 10 especialistas sobre o assunto em questão. O moderador tem o difícil papel de conduzir o

grupo, fazer as perguntas, sondar as informações, administrar o tempo, manter a atenção dos participantes e tomar nota das respostas ou gravá-las utilizando recursos de áudio e vídeo. Desta forma, os participantes provêm respostas sobre o tópico, sendo que novas idéias são estimuladas devido à interação do grupo. Esta interação entre os participantes também influencia nas respostas, de forma que alguns participantes podem se sentir constrangidos em revelar suas respostas devido à pressão do grupo. (EDMUNDS, 1999; GREENBAUM, 2000; SILVA, 2003).

Existem ainda outras técnicas qualitativas de previsão como, *Brainstorming*, Painel de Consenso e Delphi. Esta última é explorada com um detalhamento maior em seção posterior. As outras não são detalhadas, pois não apresentam utilização neste trabalho.

2.6.1 Entrevistas

Segundo Patton (1987 apud WERNER, 2004), realizar entrevistas é um procedimento que consiste em obter informações das pessoas sobre suas experiências, opiniões, sentimentos e conhecimentos. O princípio fundamental da entrevista qualitativa é prover uma estrutura em que cada respondente possa expressar seu entendimento com suas próprias palavras. Além disso, a qualidade da informação obtida durante uma entrevista é largamente dependente do entrevistador. Para isso, o entrevistador deve fazer com que a pessoa entrevistada permita que ele conheça seu mundo.

Da mesma forma, Denzin e Lincoln (2000) indicam que a entrevista não é uma ferramenta neutra, pois pelo menos duas pessoas estão envolvidas no seu desenrolar. Além disso, esta forma de obter os dados é influenciada pelas características do entrevistador. Para os autores, a entrevista é uma conversação, envolvendo a arte de perguntar e ouvir.

Para Ribeiro e Milan (2007), há duas formas de conduzir entrevistas individuais: condução estruturada ou semi-estruturada. Os autores relatam que na entrevista não-estruturada, o tópico da pesquisa é explicado, e tanto o entrevistador quanto o entrevistado tem a liberdade de condução do diálogo. Já na entrevista semi-estruturada, existe um roteiro básico, com um conjunto de questões que eventualmente ao longo da pesquisa serão posicionadas. A escolha por uma destas formas depende principalmente dos seguintes aspectos: o perfil do respondente, o tempo disponível para a entrevista e o conhecimento que o pesquisador detém sobre o assunto.

2.6.2 Metodologia Delphi

A metodologia Delphi passou a ser disseminada no começo dos anos 60, com base em trabalhos desenvolvidos por Norman Dalkey e Olaf Helmer, pesquisadores da Rand Corporation (ESTES e KUESPERT, 1976). O objetivo original era desenvolver uma técnica para aprimorar o uso da opinião de especialistas na previsão tecnológica.

A aplicação da metodologia é realizada através de um questionário, submetido a especialistas, onde se preserva o anonimato das respostas. O questionário deve ser direto e objetivo, pois representa o meio através do qual o especialista utiliza para expressar sua opinião sobre o assunto. Muitos resultados ruins da aplicação da metodologia Delphi estão relacionados à má elaboração de seus questionários (MULLEN, 2003). Goldschmidt (1975) afirma que não há nada nas características do Delphi que afirme que o questionário “não deve estar de acordo com as normas oficiais de elaboração de questionários”. Entretanto, a metodologia Delphi fornece à equipe de pesquisa um o grau incomum de poder.

Uma vez elaborado o questionário, suas respostas são tabuladas, recebem um tratamento estatístico simples, e os resultados são devolvidos aos participantes na rodada seguinte. A cada nova rodada, são solicitadas novas previsões para as mesmas perguntas, onde os participantes têm a oportunidade de reavaliar suas respostas. Assim sucessivamente, até que a divergência de opiniões entre especialistas tenha se reduzido a um nível satisfatório, e a resposta da última rodada seja considerada como a revisão do grupo (MARTINO, 1993). Esta metodologia é considerada por Dalkey e Helmer (1963) como “a mais confiável forma de se obter o consenso de um grupo de especialistas”.

Como principais vantagens da metodologia Delphi podem ser citadas: anonimato dos respondentes, confidencialidade das respostas, elevado volume de informações, facilidade de registro, *feedback* controlado, tratamento estatístico dos resultados. Por outro lado, as principais desvantagens ou restrições consistem em: demora do processo, dificuldade em elaboração do questionário, possibilidade de forçar consenso indevido (MARTINO, 1993; WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000; HSU & SANDFORD, 2007; CARDOSO *et al.*, 2005). Estes fatores devem ser levados em consideração na escolha da metodologia a ser utilizada para obtenção de previsão e consenso.

Já Buckley (1995), afirma que o Delphi não pode ser considerado uma metodologia totalmente confiável e segura para basear projetos, mas utilizá-lo apenas como um guia para obter opiniões. De forma semelhante, Cary e Salmon (1976) afirmam que o Delphi é uma

ferramenta melhor aplicada a encontrar opiniões semelhantes ou conflitantes do que a forçar um consenso.

Com o passar dos anos, a técnica Delphi ganhou diferentes aplicações na busca de consenso de opiniões para eventos futuros; como no planejamento de recursos, na área política, na educação e na tomada de decisões na área militar (ALVARENGA, CARVALHO, ESCÁRIA, 2007; HSU & SANDFORD, 2007; AMOS & PEARSE, 2008). Também tem apresentado variações visando ao consenso sobre conceitos, como no procedimento referenciado em Baxter (1998 apud LINDEN e GUIMARÃES, 2004) para um estudo sobre o conceito de conforto. Já Faucher *et al.* (2008), utiliza a metodologia para formar um conceito sobre o gerenciamento do conhecimento. Outra variação utilizada recentemente refere-se à aplicação do Delphi com a utilização da ferramenta de internet. Segundo Giovinazzo e Fischmann (2001), isto é perfeitamente possível, pois conserva as mesmas características (anonimato, *feedback* de respostas, preenchimento dos questionários) de uma pesquisa Delphi tradicional. Uma seqüência de execução do Delphi eletrônico é desenvolvida por estes autores (GIOVINAZZO, 2009).

Para se obter bons resultados na metodologia Delphi, o papel do especialista é fundamental. Castro e Lima (2001) definem especialista como um profundo conhecedor do assunto, seja por formação/especialização acadêmica, seja por experiência de atuação no ramo em questão. Quanto à quantidade de especialistas que devem ser consultados, não há um número mínimo ou máximo de componentes. Este pode constar de um pequeno grupo ou de um grupo numeroso, dependendo do tipo de problema a ser investigado e da população passível de ser consultada (ALVARENGA, CARVALHO, ESCÁRIA, 2007; SANTOS, VIDOTTO e GIUBLIN, 2005). O Delphi não necessita de um levantamento estatisticamente representativo da opinião dos especialistas. A metodologia é essencialmente uma consulta a um grupo limitado e seletivo de especialistas, que através da sua capacidade de raciocínio lógico, da sua experiência e da troca objetiva de informações procura chegar a opiniões conjuntas sobre as questões (WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000; MORICOCCHI, PINO e VEGRO, 1995).

Na execução prática da metodologia Delphi devem se tomar alguns cuidados para a correta aplicação. Estes cuidados referem-se principalmente quanto: ao número de rodadas que deve ser aplicado o questionário, à forma de medir o consenso e o nível de consenso esperado, à maneira de fornecer o *feedback* das rodadas aos especialistas e o alto nível de abstenção dos participantes.

Quanto ao número de rodadas, Sumsion (1998 apud MULLEN, 2003) afirma que “a metodologia Delphi clássica possui quatro rodadas”, mas “o consenso normalmente aparece na segunda ou terceira rodadas”. Walker e Selfe (1996 apud MULLEN, 2003) sugerem que “repetidas rodadas podem gerar cansaço dos participantes e resultar em atrito”, constatando que a maioria dos estudos realiza apenas duas ou três rodadas. Para Santos, Vidotto e Giublin (2005), o número de rodadas depende fundamentalmente da obtenção de um nível de consenso aceitável para os propósitos da pesquisa. Mesmo não se tratando de unanimidade, o número de rodadas ser tantas quanto à necessidade para obtenção de consenso é a preferência da maioria dos autores. Porém, há divergência na literatura em relação à necessidade de obtenção de consenso. Segundo Cardoso *et al.* (2005), “há posições que consideram o consenso o objetivo central do processo, enquanto outras apontam que o consenso deve ser buscado, mas pode eventualmente não ocorrer, sem prejuízo dos objetivos da pesquisa”.

O consenso esperado do grupo de especialistas usualmente varia de 51% (LOUGHLIN e MOORE, 1979 apud WATSON, 2008) a 75% (KEENEY IN MCKENNA *et al.*, 2000 apud WATSON, 2008) de consenso, medido em diferentes formas; dependendo basicamente do tipo de pesquisa, tipo de questionário e nível de conhecimento dos especialistas sobre o assunto (WATSON, 2008). A literatura possui ampla variedade de meios de obtenção de consenso. Santos (2008) utiliza a relação entre a média e desvio-padrão das respostas, realizando a análise do Coeficiente de Variação (CV). Já Cardoso *et al.* (2005), preferem utilizar a diferença entre o primeiro e terceiro quartis, objetivando resultados inferiores a 25% do intervalo máximo das respostas. Estes autores consideram o Coeficiente de Variação como critério complementar. Outra forma de medir o consenso é utilizar o parâmetro de 1 desvio padrão afastado da média original, ou seja, aproximadamente 68% dos resultados são esperados dentro deste intervalo (SHARKEY e SHARPLES, 2001). Tem-se ainda, a utilização do parâmetro Cronbach α , utilizado por Graham, Regehr e Wright (2003). Com o uso deste parâmetro é possível verificar a homogeneidade da opinião expressada pelos especialistas.

Outro fator importante na aplicação do Delphi é a maneira de fornecer o *feedback* das rodadas anteriores aos especialistas. Para Moricochi, Pino e Vegro (1995), o *feedback* pode incluir, além do resumo estatístico, informações que sejam relevantes sem a pretensão de induzir as respostas em determinada direção. Segundo estes autores, essas informações reduzem as influências psicossociológicas, facilitando a assimilação dos fatos. A forma mais usada é fornecer a mediana e os dois quartis, contendo 25% das respostas ao seu redor (ALVARENGA, CARVALHO, ESCÁRIA, 2007; MORICOCHI, PINO e VEGRO, 1995).

Desta forma, têm-se um resultado central e uma noção de como estão distribuídas as respostas da metade dos que responderam às perguntas situadas em torno da mediana (MORICOCCHI, PINO e VEGRO, 1995). Deve-se tomar o cuidado para que o especialista tenha conhecimento do que estas medidas representam, para uma correta avaliação.

O método Delphi também é caracterizado por um elevado índice de abstenção de respostas entre as rodadas. Normalmente há uma abstenção de 30% a 50% dos respondentes na primeira rodada, e de 20% a 30% na segunda rodada (WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000; SHARKEY e SHARPLES, 2001). Para Grisi e Britto (2003), isto ocorre devido à demora excessiva para realização do processo completo. Para estes autores, deve-se trabalhar para minimizar o tempo total do processo, com incentivo aos especialistas para um rápido retorno dos questionários e buscar a redução do tempo de análise dados entre as rodadas.

3. MÉTODO PROPOSTO

O método apresentado nesta dissertação é composto das seguintes etapas, não necessariamente seqüenciadas: definição do sistema e dos componentes; etapa quantitativa dos dados de garantia; avaliação dos resultados da etapa quantitativa; etapa qualitativa; avaliação dos resultados da etapa qualitativa; modelagem de vida útil dos componentes; modelagem do sistema; conclusões e avaliação dos resultados. As etapas quantitativas e qualitativas são subdivididas. A etapa quantitativa está subdividida em: coleta de dados de garantia, e análise estatística dos componentes. De forma semelhante, a etapa qualitativa está subdividida em: entrevista diagnóstico, análise do diagnóstico, elaboração do questionário, escolha dos especialistas e aplicação do método Delphi. O fluxograma que ilustra o método é apresentado na Figura 9, e suas etapas e fases são descritas de forma detalhada nas seções seguintes.

3.1 Definição do sistema e seus componentes

A primeira etapa do estudo representa a definição do sistema e seus componentes. Para realizar esta etapa será utilizada a técnica de diagrama de blocos, para ilustrar a estrutura do sistema. Entende-se estrutura como o desmembramento do sistema em subsistemas e componentes, e a respectiva quantidade em que estes são utilizados dentro do sistema. Estas informações representam a base para a etapa quantitativa, pois servem como fonte para a busca por dados de garantia.

A elaboração do diagrama de blocos torna possível uma melhor compreensão do funcionamento do sistema e, ainda é fundamental para a modelagem do sistema, realizado na etapa 5. Maiores detalhes sobre os sistemas e a elaboração do diagrama de blocos podem ser retomados na seção 2.5.

3.2 Etapa quantitativa dos dados de garantia

A etapa quantitativa, definida como Etapa 2A no fluxograma, é dividida em duas fases: coleta de dados de garantia e análise estatística da confiabilidade dos componentes. Esta etapa visa à obtenção da primeira análise de confiabilidade dos componentes individualmente, que será uma análise estatística. Os resultados desta análise são submetidos a uma avaliação de resultados da etapa (etapa 3A), e posteriormente, serão utilizados na modelagem final dos componentes (etapa 4).

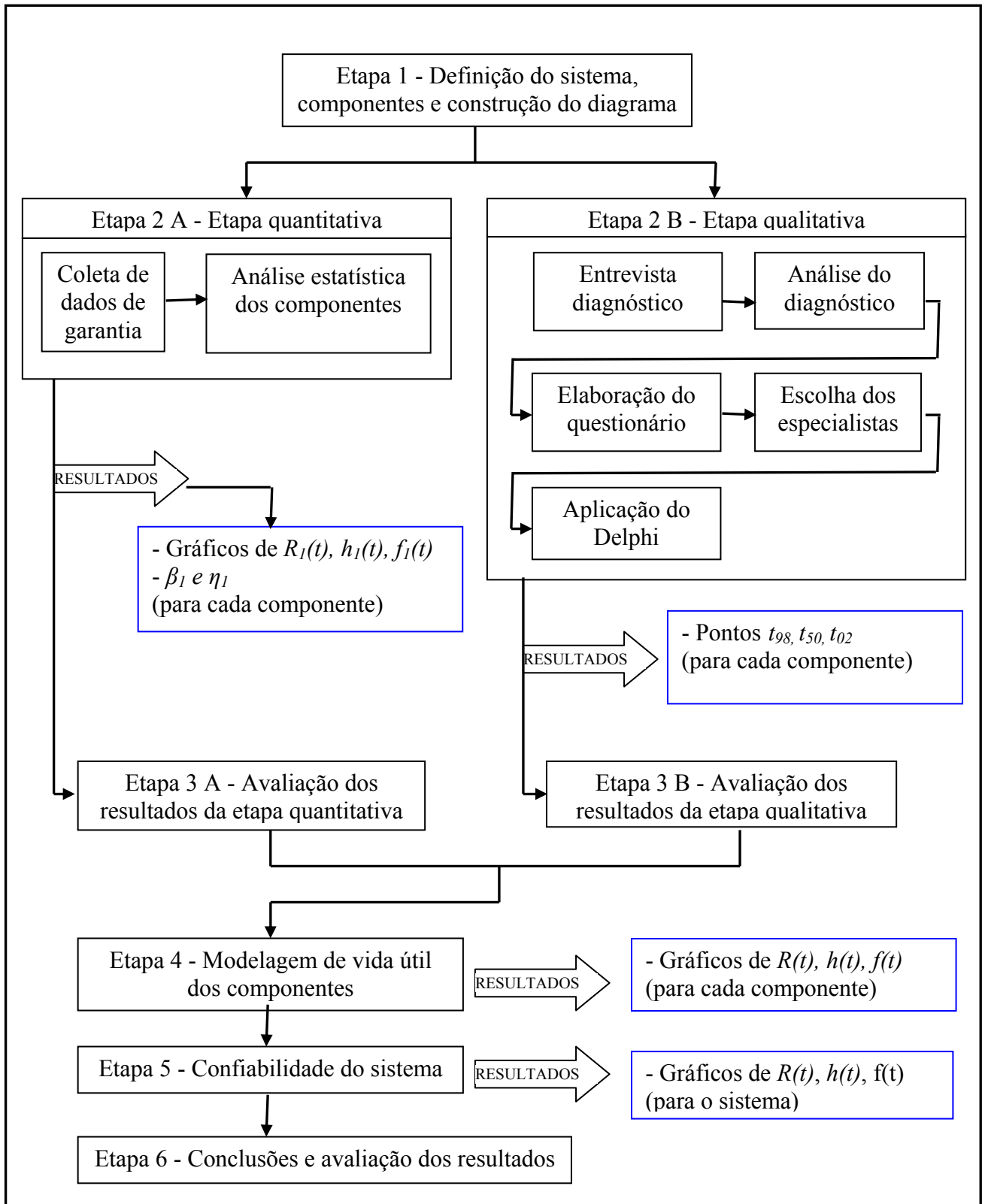


Figura 9 - Fluxograma do método proposto

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1 Coleta de dados de garantia

A coleta de dados de garantia representa a busca dos dados de falhas dos componentes do sistema dentro do período de garantia. Individualmente, para cada componente, buscam-se as seguintes informações neste banco de dados: número total de máquinas da amostra, número de itens que falharam nesta amostra, registro do tempo em que cada item falhou, período de garantia fornecido pelo fabricante. A amostra deve ser formada por máquinas que já tiverem ultrapassado o período de garantia, e seus dados de falha obtidos através dos registros de falha da garantia, respeitando o modelo de máquina e o intervalo de tempo em interesse. Como o percentual de falhas usualmente é baixo, busca-se uma amostra com uma quantidade elevada de máquinas, para se obter uma boa qualidade de informação.

O número total de máquinas da amostra é utilizado para definir o percentual de máquinas que cada componente falhou no período de garantia. Subtraindo-se deste número a quantidade de itens falhados, resta a quantidade de itens que ainda não falhou. Estes itens não falhados são utilizados nas análises como dados censurados

Dentre os demais dados, o número de itens que falharam na amostra e o respectivo registro de tempo da falha representam os dados mais importantes desta coleta. Junto com os dados censurados, os dados de falha são utilizados para modelar graficamente as curvas de confiabilidade. Desta maneira, obtêm-se os parâmetros - parâmetro de forma e de escala no caso da função Weibull - que definem a função da confiabilidade. De posse destes dados, torna-se possível a análise estatística dos componentes, a ser realizado na fase seguinte.

3.2.2 Análise estatística dos componentes

Nesta fase são utilizados os dados de garantia coletados para realizar a análise estatística de cada componente que faz parte do sistema. A partir de dados de falha, serão modeladas parametricamente as curvas de confiabilidade, densidade da probabilidade e função taxa de risco. O objetivo final desta etapa é obter os valores de β_1 e η_1 , ajustados a uma distribuição de Weibull para todos os componentes.

Para a utilização de dados de garantia neste tipo de análise, é comum haver um pequeno percentual de dados de itens falhados, e um grande percentual de itens que expiraram o período de garantia e a falha ainda não ocorreu. Sendo assim, é separado o número de itens que falharam no período de garantia e o respectivo tempo de falha de cada item, da quantidade de itens que ainda não falharam, que serão considerados dados censurados. Para os dados censurados, deve ser relacionado à censura com o tempo em que se sabe que estes itens atingiram sem falhar. Este tempo, normalmente coincide com o tempo em que expira o

prazo de garantia, porém sugere-se uma análise criteriosa da estratégia de garantia da empresa. Para o cálculo, sugere-se a utilização de algum software de confiabilidade, sendo que a Figura 10 exemplifica a forma em que os dados de garantia são fornecidos ao mesmo.

Componente MLR			
Itens que falharam em garantia	Tempo até a falha (hs)	Itens que não falharam em garantia	Tempo de suspensão (hs)
1	50	390	1000
1	125		
1	300		
1	335		
1	347		
1	403		
1	455		
1	578		
1	591		
1	602		

Figura 10 - Exemplo de dados de garantia fornecidos a softwares de confiabilidade

Fonte: Elaborado pelo autor

Para este método, definiu-se utilizar a distribuição de Weibull para modelar os dados dos componentes. Isto se deve: à sua variedade de formas, à sua flexibilidade, ao fato de se aproximar de outras distribuições dependendo do parâmetro de forma (β), e a normalmente ser utilizada quando não se tem informação sobre o desempenho do produto (FREITAS e COLOSIMO, 1997; DODSON E NOLAN, 1999). Esta definição representa uma simplificação no método, que devido aos motivos citados anteriormente, não caracteriza um problema.

Na seqüência é realizada a verificação da distribuição que melhor se ajusta aos pontos. Esta verificação pode ser feita utilizando os papéis da probabilidade, ou ainda através de teste de aderência. Isto se torna necessário, para confirmar que a distribuição de Weibull pode ser utilizada para os componentes em questão. Caso a distribuição de Weibull não apresente ajuste, somente algum outro tipo de distribuição, o método prevê uma avaliação deste comportamento na etapa 3A (avaliação dos resultados da etapa quantitativa), em busca de um melhor entendimento dos dados.

Utilizando a distribuição de Weibull, espera-se obter como resultado desta etapa, os valores das variáveis β_1 e η_1 (parâmetro de forma e parâmetro de escala), para cada componente. Em geral, estes valores são obtidos através do método da Máxima

Verossimilhança. Espera-se ainda, para cada componente, os gráficos da função da confiabilidade, $R_I(t)$; função densidade da probabilidade, $f_I(t)$; e da função taxa de risco, $h_I(t)$. Os valores de β_1 e η_1 serão utilizados na etapa de modelagem de vida útil dos componentes (etapa 4).

3.3 Avaliação dos resultados da etapa quantitativa

Após cada componente ter sido ajustado a uma distribuição de Weibull, com seus respectivos valores de β_1 e η_1 (referentes à primeira análise, etapa 2A), torna-se possível a avaliação criteriosa destes resultados. Esta avaliação visa principalmente aos componentes em que foram obtidos resultados diferentes do esperado. Entende-se por resultados diferentes do esperado, como: os dados não se ajustarem às distribuições, dados de falha insuficientes, dados de falha distorcidos, dados de confiabilidade diferentes dos especificados pelo fornecedor. Para os resultados destes componentes, busca-se entender os motivos de cada problema ter ocorrido, individualmente.

Nesta análise, sugere-se o envolvimento de pessoas com conhecimento sobre o funcionamento dos componentes, funcionamento do sistema, a aplicação do produto, análise de confiabilidade e o banco de dados. Este grupo busca soluções para resolver as questões dos componentes com problemas de análise, realizando um estudo detalhado destes componentes. Desta forma, identificam-se as causas dos problemas de análises e retorna-se à etapa anterior para uma nova análise estatística. Não se esperam componentes com problemas de análise sem causas identificadas, porém, se isto ocorrer, os componentes devem ser identificados e classificados como componentes diferenciados.

Um exemplo bastante comum de ocorrer são dados que não se ajustam a nenhuma distribuição devido à mistura de mais de um modo de falha. Para estes casos, deve-se buscar identificar estes modos de falha, separá-los e repetir a análise para este componente, considerando os diferentes modos de falha. Conforme Doganaksoy, Hahn e Meeker (2002), a separação por modos de falhas permite a utilização de distribuições simples como a de Weibull ao contrário de distribuições com múltiplos modos de falha, que são representadas somente por complexas distribuições.

3.4 Etapa qualitativa

A etapa qualitativa está situada no mesmo nível da etapa quantitativa, o que significa que estas etapas podem ser executadas em paralelo, por possuírem fontes de informações

independentes. A etapa qualitativa está dividida em 5 fases: entrevista diagnóstico, análise do diagnóstico, elaboração do questionário, escolha dos especialistas, aplicação do Método Delphi. Como resultado da seqüência destas cinco fases, busca-se obter um consenso entre os especialistas sobre a opinião da vida útil de cada componente, que serão utilizadas para a avaliação de resultados da etapa (etapa 3B), e posteriormente na modelagem final dos componentes (etapa 4).

3.4.1 Entrevista diagnóstico

A etapa qualitativa tem início na fase da entrevista diagnóstico, que visa auxiliar na obtenção de informações que ajudem na elaboração do questionário da etapa qualitativa. Para a estruturação do questionário, busca-se compreender a maneira que os especialistas visualizam as falhas dos componentes. Para tanto, primeiramente é preciso traçar o perfil dos especialistas a serem consultados, e logo em seguida, define-se uma amostra com um número representativo de especialistas. Posteriormente, realizam-se entrevistas individuais de caráter presencial e de forma não estruturada. Mesmo com caráter de entrevista não estruturada, o entrevistador pode simular perguntas que gostaria que o questionário contemplasse, para coletar informações sobre o entendimento da pergunta pelo especialista. A maneira de condução destas entrevistas individuais está descrita na seção 2.6.1.

Como resultados da entrevista diagnóstico serão obtidas informações que irão subsidiar a elaboração de um questionário simples, capaz de quantificar em valores numéricos a percepção que os especialistas possuem quanto à falha de cada componente. Estas informações serão analisadas e organizadas na fase seguinte.

3.4.2 Análise do diagnóstico

Esta etapa consiste da análise, interpretação e organização das informações obtidas nas entrevistas diagnósticos, de modo a tornar possível a elaboração do questionário. Conforme Ribeiro e Milan (2007), primeiramente deve-se realizar uma síntese e redução dos dados, devido à enorme quantidade de informações oriundas deste tipo de entrevista individual. Posteriormente parte-se para a análise e interpretação das informações.

Como análise, busca-se a identificação de fatores onde há convergência ou divergência entre os entrevistados. Mais especificamente, como fatores podem ser citados: o nível de conhecimento dos especialistas sobre os componentes, a interpretação de possíveis perguntas do questionário, capacidade do especialista para quantificar as falhas. Estas informações serão usadas na elaboração do questionário, conforme a explanação na fase que segue.

3.4.3 Elaboração do questionário

De posse das informações obtidas durante a entrevista diagnóstica, devidamente organizadas, torna-se possível a elaboração do questionário. Para a construção do questionário, seguem-se as recomendações da literatura, conforme pode ser visto na seção 2.6.1. O questionário visa, individualmente para cada componente, levantar informações relativas ao tempo do início das falhas por desgaste, tempo do término das falhas por desgaste e o tempo em que a metade das máquinas falha. Desta forma, estas informações serão reunidas para uma análise de confiabilidade, onde as mesmas representarão a porção desde o início das falhas por desgaste até o final da vida útil do componente.

O resultado desta etapa representa um questionário passível de aplicação da metodologia Delphi. Para isto, algumas características são essenciais, tais como: possuir simples interpretação, possuir pequena quantidade de perguntas, apresentação das perguntas de forma sequenciada, visar objetividade nas respostas. Estas características são importantes, pois os respondentes irão ser interrogados com relação a vários componentes diferentes, permitindo assim a obtenção de informações quantificáveis. Uma vez o questionário estruturado, será aplicado a um grupo de especialistas utilizando a método Delphi.

3.4.4 Escolha dos especialistas

As pessoas ao qual será aplicado o questionário formam um grupo de especialistas. Para a escolha destas pessoas, são levados em consideração alguns critérios, como: conhecimento sobre as características e o funcionamento dos componentes, sobre a forma de utilização destes componentes em seu ambiente de trabalho, e conhecimento dos casos de falha dos mesmos. Sobre a quantidade de especialistas, busca-se seguir os padrões estatísticos que assegurem que a amostra seja representativa.

3.4.5 Aplicação do Método Delphi

A escolha da aplicação do Método Delphi neste estudo é baseada no fato de o método apresentar características de anonimato, interação controlada dos participantes e pelo tratamento estatístico das respostas às consultas. Desta forma, busca-se obter dos especialistas informações quantificáveis da estimativa de tempo até a falha dos componentes de cada subsistema.

Seguindo o método Delphi, primeiramente é aplicado o questionário, elaborado na seção 3.4.3, ao grupo de especialistas. A cada especialista é submetido um questionário, que deve ser respondido para cada um dos componentes. Para isto utilizam-se meios de

comunicação como questionários impressos ou ferramentas de *e-mail*, respondidos de forma individual por cada especialista, para que não haja a influência do entrevistador e demais entrevistados. Os resultados apresentados na aplicação dos questionários são submetidos a sucessivas rodadas, que são reavaliadas pelos especialistas em cada uma.

As respostas da primeira rodada são avaliadas pelo pesquisador, onde são calculadas medidas estatísticas, tais como: a mediana e a amplitude interquartilica. Após avaliação, são informados os resultados aos especialistas, junto com a nova rodada de questionários. O especialista então tem a oportunidade de reavaliar suas respostas, de acordo com sua convicção acerca do assunto perante os resultados do grupo. As rodadas de questionários são repetidas até que haja um consenso da estimativa de falha de cada componente, entre o grupo de especialistas, sendo que não há limite mínimo nem máximo de rodadas. O critério para o consenso é definido de modo que a diferença entre o primeiro e o terceiro quartis seja inferior a 25% do intervalo máximo entre as respostas. Detalhes sobre esta metodologia podem ser vistos na seção 2.6.3 desta dissertação.

Os resultados desta fase resumem os resultados de toda a etapa qualitativa. Os resultados pretendidos são representados pelos pontos de tempo até o início das falhas por desgaste (t_{98}), o tempo em que a metade das máquinas falha (t_{50}) e tempo do término das falhas por desgaste (t_{02}) para cada componente. Estes pontos são obtidos após o consenso da opinião do grupo de especialistas e ajudarão a compor o gráfico de vida útil de cada componente. Eles são fundamentais na composição da curva, pois serão os pontos responsáveis pela formação das curvas da confiabilidade após o período de garantia.

3.5 Avaliação dos resultados da etapa qualitativa

Esta etapa apresenta a avaliação dos resultados obtidos na análise dos especialistas, o qual se verifica a coerência dos resultados dos componentes. Esta avaliação não se restringe somente à análise dos pontos t_{98} , t_{50} , t_{02} ; pois inclui ainda a avaliação de todas as sub-etapas para obtenção destes pontos. Sugere-se a avaliação de características como: nível de abstenção dos especialistas, dispersão das respostas (através da avaliação da amplitude interquartilica), coeficiente de variação, número de iterações para cada componente. Estas características estão diretamente relacionadas com a falta de consenso dos especialistas; elevada amplitude interquartilica; excessivo número de iterações. Este último caso consiste em um dos exemplos de falta de coerência de resultados, o que pode ser esperado neste tipo de avaliação.

Esta etapa não se restringe apenas à avaliação da falta de coerência anteriormente mencionada, mas a qualquer outro problema encontrado na etapa qualitativa, como por exemplo: estimativas de tempo de falha incompatíveis com resultados normalmente encontrados para componentes de desgaste, estimativas extremamente altas, estimativas extremamente baixas. Para todos os componentes em que se detectou algum tipo de incoerência ou problema, sugere-se uma investigação mais detalhada sobre o comportamento de falha destes componentes. Isto pode ser realizado através de reuniões com alguns especialistas.

Como finalização desta etapa, tem-se os resultados dos especialistas analisados quanto à coerência e consenso do grupo, para assegurar que a estimativa representa a opinião do grupo de especialistas.

3.6 Modelagem de vida útil dos componentes

Considera-se a modelagem de vida útil dos componentes como a descrição gráfica do comportamento probabilístico de falha de um componente desde o início até o final de sua vida útil. Esta modelagem pode ser representada pelo gráfico da confiabilidade $R(t)$, ou ainda, ter seu comportamento compreendido pelos gráficos da taxa de risco $h(t)$ ou densidade da probabilidade $f(t)$. Para isto, utiliza-se a metodologia desenvolvida por Ribeiro (2008), para unir as informações obtidas nos cálculos de confiabilidade dos dados de garantia (parte quantitativa), com os resultados das informações obtidas com os especialistas (parte qualitativa).

Define-se t_A como tempo em que inicia o desgaste do componente. Conforme Ribeiro (2008), para valores de t inferiores ao valor de t_A são utilizados os gráficos de $R_1(t)$, e seus respectivos valores de β_1 e η_1 obtidos na etapa quantitativa. Esta parte dos gráficos, onde os valores de t são inferiores aos valores de t_A , é chamada de parte quantitativa, e é constituída pelos valores de falhas dentro do período de garantia e a extrapolação dos gráficos baseada nestes valores.

Para valores onde t é igual ou maior que t_A , é definida como parte qualitativa, o qual é utilizada a multiplicação de duas funções da confiabilidade. A primeira é a já conhecida $R_1(t)$; e a segunda é definida como $R_2(t)$. Esta última é calculada a partir de β_2 e η_2 , que foram obtidos a partir de 3 pontos originados da pesquisa com os especialistas. Estes pontos são constituídos por t_{98} , t_{50} e t_{02} , que correspondem ao tempo estimado pelos especialistas para a

confiabilidade de 0,98; 0,50 e 0,02; respectivamente. Como a função $R_2(t)$ inicia em t_A , este elemento representa o parâmetro de localização desta distribuição.

A união da parte qualitativa com a parte quantitativa do gráfico resulta na modelagem de vida útil dos componentes, que é definida como $R(t)$. Um exemplo gráfico desta modelagem pode ser visto na Figura 11.

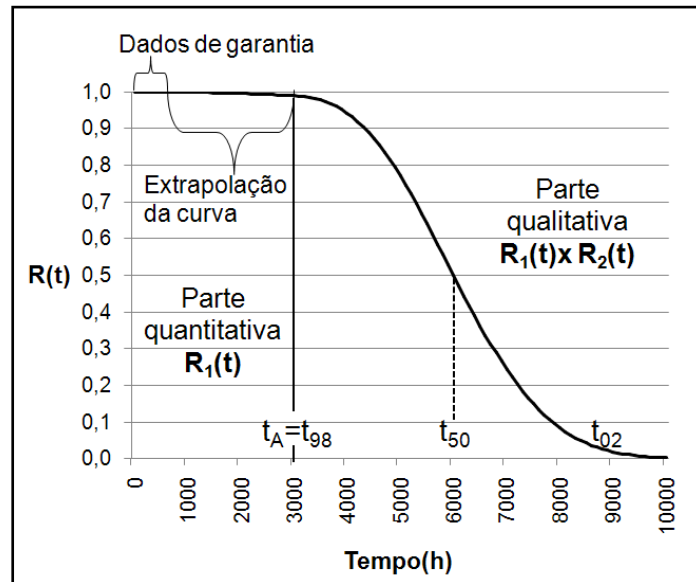


Figura 11 - Exemplo gráfico da modelagem de vida ou confiabilidade de um componente

Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico de vida útil dos componentes representa um dos principais resultados obtidos neste estudo. Com ele é possível verificar o comportamento das falhas para cada componente, e ainda, identificar a região de falhas prematuras (parte quantitativa) e a região de falhas por desgaste (parte qualitativa). Normalmente o gráfico possui a parte quantitativa e a parte qualitativa bem definidas; e o ponto de transição (t_A) é um dos mais importantes e difíceis de serem estabelecidos. De posse do gráfico de $R(t)$, torna-se possível a obtenção dos gráficos de $h(t)$ e $f(t)$, conforme as fórmulas de confiabilidade (ver seção 2.2.2), o que permite outras formas de visualizar e comparar o comportamento das falhas destes componentes.

3.7 Confiabilidade total do sistema

Conforme visto anteriormente, um sistema é composto de componentes destinados a cumprir uma determinada função. De posse dos valores individuais da confiabilidade dos componentes e do diagrama de blocos, torna-se possível a modelagem de confiabilidade do sistema. Para esta modelagem, seguem-se os padrões de cálculo de confiabilidade vistos na seção 2.5, de acordo com a organização dos componentes e classificação do sistema.

Como dados resultantes desta etapa têm-se os gráficos de confiabilidade $R(t)$, da taxa de risco $h(t)$ e da densidade de probabilidade $f(t)$ para o sistema. Estas informações servem de base para o entendimento do comportamento das falhas do sistema. Independentemente do momento da vida útil do sistema, pode ser feita uma análise mais detalhada de como cada componente influencia na confiabilidade total do sistema. Sugere-se a etapa seguinte para explorar este tipo de análise.

3.8 Conclusões e avaliação dos resultados

Para os resultados encontrados durante a aplicação do método, esta etapa reserva-se a contemplar as principais conclusões e avaliações dos resultados, tanto para os componentes como para o sistema. Inicialmente para os componentes, sugere-se uma sobreposição da curva da confiabilidade utilizando apenas os dados de garantia, com a curva da confiabilidade utilizando o método proposto. Realiza-se esta atividade para demonstrar a influência da opinião dos especialistas na construção da curva, trazendo os valores de confiabilidade mais próximos do real, reduzindo o erro causado pela grande quantidade de dados censurados. Esta verificação também pode ser realizada para a confiabilidade do sistema, onde se espera uma diferença ainda maior entre as curvas.

Nesta etapa também se classificam os componentes quanto à criticidade e o impacto de cada um na confiabilidade total do sistema. Consideram-se componentes críticos ao sistema, aqueles que possuem baixa confiabilidade se comparado a outro de mesmo nível funcional, que está ligado em série, por exemplo. Esta avaliação tem maior representação se realizada em um período de tempo superior ao final da garantia, pois para períodos de tempo inferiores a este, a avaliação pode ser executada de uma forma mais simples, utilizando somente os dados de garantia e percentuais de falha dos componentes.

Ainda nesta etapa, os resultados podem ser analisados conforme o enfoque específico de cada trabalho. Se o objeto de interesse está focado somente nos resultados finais do sistema, esta análise não necessita ser detalhada para os componentes, apenas focando nos resultados finais. Ou ainda, se o enfoque é dado para conhecer a influência da confiabilidade de cada componente no sistema em um determinado período de tempo, o enfoque deve ser direcionado aos componentes. Outra opção seria aplicar o método parcialmente para um determinado grupo de componentes, com o intuito de ter-se uma estimativa de vida útil específica para uma parte do sistema.

4. ESTUDO APLICADO

Para realizar o estudo, escolheu-se um sistema que faz parte de um modelo específico de um produto agrícola. O estudo de caso demonstra a aplicação do método conforme etapas apresentadas na Figura 9, de forma a obter uma análise de desempenho do sistema. No estudo utilizaram-se os recursos da empresa fabricante do produto agrícola utilizado no estudo. Entendem-se como recursos: o banco de dados de garantia da empresa, o software para cálculos estatísticos, o recurso intelectual dos especialistas, assim como a utilização das informações do produto para o estudo. Cabe ressaltar que por motivos de confidencialidade, os dados apresentados sofreram distorção em relação aos valores reais, de forma a não comprometer as análises.

4.1 Definição do sistema e seus componentes

O sistema escolhido para o estudo representa um dos principais sistemas funcionais para o produto agrícola o qual faz parte. Para a utilização do produto, este sistema deve estar obrigatoriamente em funcionamento. Uma vez ligado o sistema, todos os componentes entram em funcionamento ao mesmo tempo, acumulando o mesmo tempo de uso do produto. Para este produto, convencionalmente mede-se o tempo de uso em horas. Estas horas de uso são armazenadas no produto e podem ser facilmente visualizadas pelo usuário.

O sistema é composto por 15 componentes que são utilizados para a análise deste estudo. A forma como estes componentes estão conectados pode ser visto na representação do diagrama de blocos da Figura 12. O critério de ligação entre os componentes baseia-se na ordem em que os mesmos são acionados quando o sistema entra em funcionamento. Nota-se que existe o subsistema denominado ABCZ, que é constituído pelos componentes AZ, BZ e CZ, e funciona como uma unidade integrada. Neste caso, a falha de um dos componentes reflete na funcionalidade dos outros dois, e normalmente acarreta a falha dos mesmos.

Todos os componentes apresentam uma interação em série, inclusive os componentes do subsistema ABCZ. Desta forma, se um destes componentes falhar, acarreta na parada de funcionamento de todo o sistema. Devido a esta característica, e por se tratar de um sistema fundamental para o funcionamento do produto, o cliente percebe imediatamente quando ocorre a falha de algum destes componentes.

O produto apresenta garantia de 1 ano ou 1500 horas, expirando pelo prazo que vencer por primeiro. Os componentes deste sistema apresentam registro único de falha, ou seja, são

considerados componentes não reparáveis. Os registros de falha são armazenados em um banco de dados com o número de série do produto, modelo do produto, identificação do componente que falhou, descrição da falha e número de horas em que a mesma ocorreu. Neste banco de dados, consultas sobre as falhas dos componentes podem ser facilmente realizadas.

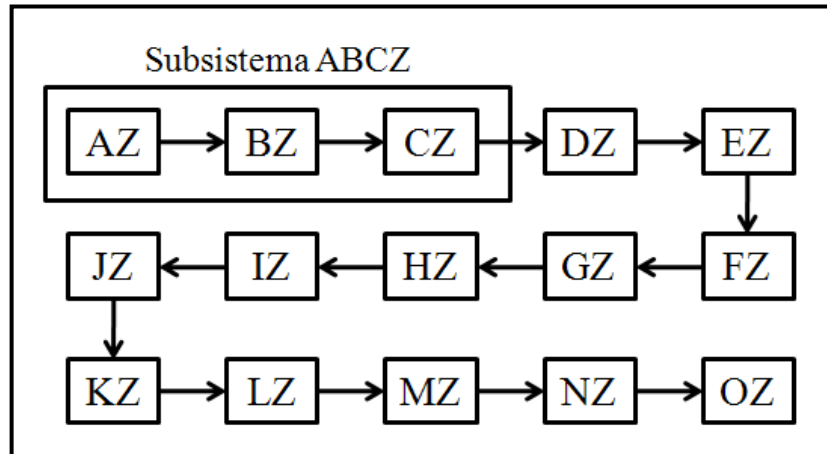


Figura 12 – Diagrama de blocos do sistema

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Etapa quantitativa dos dados de garantia

Para a etapa quantitativa, primeiramente é realizada a coleta dos dados de garantia dos componentes e posteriormente realiza-se a análise estatística da confiabilidade dos mesmos.

4.2.1 Coleta de dados de garantia

Para a obtenção dos dados de garantia, é necessário informar os componentes, o tipo de informação desejada e definir o tamanho da amostra. Os componentes foram identificados na etapa 4.1. As informações buscadas para cada componente são: quantidade de falhas da amostra e o número de horas em que cada falha ocorreu. Para o modelo específico em estudo foram produzidas 5156 máquinas, o qual se define como amostra. Estas máquinas foram usadas normalmente por seus clientes, e tiveram o seu período de garantia completo entre os anos de 2004 e 2008. Para a definição da amostra buscou-se uma elevada quantidade de máquinas deste modelo, para que fosse possível obter um número significativo de componentes falhados. A coleta dos dados de falha é realizada junto ao banco de dados do Departamento de Garantia.

Outra informação importante trata-se do período em que expira a garantia. Esta informação impacta diretamente na forma de tratar o restante da amostra que não falhou no período de garantia, que serão utilizados como dados censurados. Para o produto em análise, o

período de garantia expira em 1500h ou 1 ano, o que vencer primeiro. Então, na busca pela informação de qual seria o período que expira por primeiro, encontra-se que 95% das máquinas deste modelo expiram o período de garantia antes das 654 horas. Desta forma, para determinar as máquinas que não falharam dentro do período de garantia, é usado tempo de censura no valor de 654 horas.

Na Tabela 2 pode ser vista a coleta de dados do componente AZ. Nota-se que houve 79 falhas no período de garantia. Subtrai-se este número da população de 5156 máquinas e resulta nos 5077 itens que não falharam, sendo estes censurados no valor de 654hs. Os dados do restante dos componentes podem ser vistos no Apêndice A.

Tabela 2 – Coleta de dados do componente AZ

Componente AZ							
Componentes AZ que falharam em garantia: 79							
item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)
1	15	21	206	41	332	61	471
2	19	22	212	42	349	62	473
3	53	23	225	43	350	63	480
4	84	24	228	44	356	64	484
5	94	25	235	45	361	65	490
6	96	26	239	46	393	66	496
7	102	27	240	47	395	67	498
8	105	28	242	48	400	68	502
9	150	29	246	49	411	69	503
10	151	30	252	50	415	70	508
11	155	31	259	51	420	71	512
12	161	32	260	52	423	72	517
13	171	33	285	53	435	73	525
14	171	34	288	54	450	74	536
15	175	35	301	55	452	75	536
16	177	36	303	56	454	76	546
17	180	37	307	57	455	77	549
18	197	38	315	58	457	78	568
19	198	39	318	59	468	79	600
20	202	40	322	60	468		
Componentes AZ que não falharam em garantia: 5077							
total de itens que não falharam (un)				tempo da censura (h)			
5077				654			

Fonte: Elaborado pelo autor

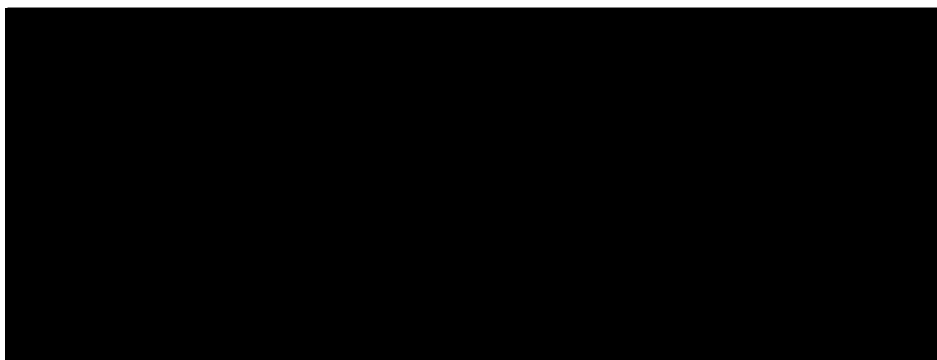
4.2.2 Análise estatística dos componentes

De posse dos dados de garantia coletados na sub-etapa anterior, parte-se para a análise estatística dos componentes. Neste momento sugere-se a utilização de softwares específicos para cálculos de confiabilidade ou o auxílio de planilhas eletrônicas. Para este estudo, utiliza-se o software Weibull ++ da Reliasoft em sua versão 7.

As informações necessárias para os cálculos podem ser exemplificadas pelo componente AZ na Tabela 2, e vistas de forma completa, para cada componente, no Apêndice A. Percebe-se que para todos os componentes, a quantidade de componentes não falhados dentro do período de garantia é muito superior aos componentes que falharam no mesmo período. Isto já era esperado, pois se sabe que para este produto, o número de falhas de cada componente dificilmente é superior a 2%, dentro do período de garantia.

Para uma análise superficial de falhas, é calculado o percentual de itens que falhou no período de garantia. Isto é feito dividindo o número de itens que falhou, pela quantidade de itens que passaram pela garantia. Este cálculo é bastante usual nas empresas, pois representa uma maneira simples e rápida de detectar itens críticos, do ponto de vista de custo de reparação e insatisfação do cliente no período de garantia. Os valores percentuais de falha no período de garantia podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3– Percentual de falha dos componentes no período de garantia



Fonte: Elaborado pelo autor

Para um detalhamento do estudo, parte-se para a obtenção das curvas de confiabilidade, densidade da probabilidade e função taxa de risco. Para o cálculo das mesmas, estipula-se 95% de intervalo de confiança, o que também pode ser observado graficamente. Para a estimativa dos parâmetros que modelam as curvas, utiliza-se o Método da Máxima Verossimilhança. O método é escolhido devido a ser amplamente utilizado, principalmente na aplicação de problemas práticos (ELSAYED, 1996).

Como premissa do método proposto, deve-se utilizar a distribuição de Weibull com dois parâmetros para modelar todos os componentes. Esta restrição é devido ao interesse no valor do parâmetro de forma e de escala desta distribuição. Porém, seria a distribuição de Weibull de dois parâmetros adequada para todos os componentes? Os dados realmente se ajustam a esta distribuição? Para esclarecer estes questionamentos, verificou-se, para cada componente, o melhor ajuste dos pontos a diferentes distribuições. Isto é realizado de forma analítica através do teste de aderência, e graficamente através dos papéis de probabilidade.

Utilizou-se o método da verossimilhança na realização do teste de aderência e a ferramenta do software Weibull ++ versão 7 da Reliasoft. Como resultado obteve-se o valor do ajuste, como exemplificado na Tabela 4, que mostra o componente AZ. Observam-se nesta tabela as diferentes distribuições, o respectivo valor do ajuste e se a distribuição é descartada ou não descartada. O valor do ajuste representa o valor da função logaritmo da verossimilhança, sendo desta forma negativo e quanto mais próximo ao valor de zero, melhor é o ajuste dos dados à respectiva distribuição.

Tabela 4 – Teste de aderência às distribuições do componente AZ

Tipo da distribuição	Valor do ajuste	Ajuste
Lognormal	-918,42	Não descartado
Exponencial 2	-918,75	Não descartado
Gama	-919,59	Não descartado
Weibull 2	-919,63	Não descartado
Weibull 3	-920,05	Não descartado
Exponencial 1	-920,59	Não descartado
Normal	-940,72	Descartado

Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se que para o componente AZ a distribuição que melhor se ajusta aos dados é a Lognormal. Entretanto, segundo o teste de aderência, não são descartadas as distribuições: Exponencial dupla, Gama, Weibull de dois parâmetros, Weibull de três parâmetros e Exponencial. Salienta-se que apenas a distribuição Normal é descartada.

Já na verificação gráfica através dos papéis da probabilidade, visto na Figura 13, observa-se que os gráficos das funções Exponencial e Exponencial duplo possuem pontos fora dos limites de confiança. Desta forma, também se descartam estas duas distribuições por serem consideradas inadequadas para descrever o comportamento destes dados. Como resultado da análise gráfica e do teste de aderência, considera-se que os dados podem ser

representados de forma eficiente pelas distribuições Lognormal, Gama, Weibull de dois parâmetros e Weibull de três parâmetros.

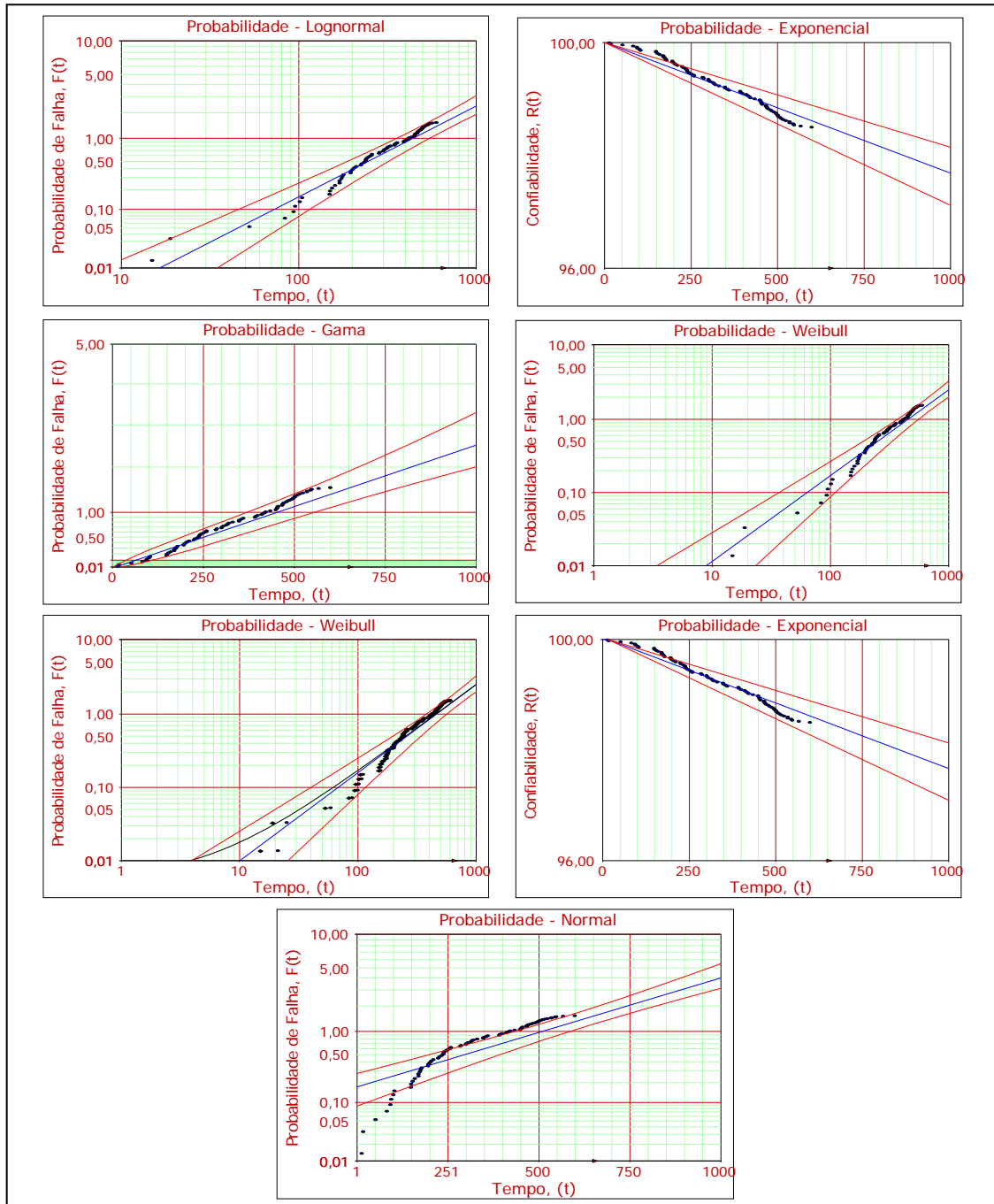


Figura 13 – Verificação dos papéis da probabilidade para componente AZ

Fonte: Elaborado pelo autor

Para os demais componentes, a verificação do ajuste nas diferentes distribuições pode ser visto no Apêndice B, onde é mostrado tanto o teste de aderência quanto os papéis da probabilidade. Para os 15 componentes do sistema, conclui-se que a distribuição de Weibull

de dois parâmetros pode ser utilizada para representar o comportamento das falhas. Isto é baseado no fato de esta distribuição não ser descartada na análise individual de cada componente, e também comprovada em verificação gráfica. Ressalta-se que os componentes JZ, MZ e NZ apresentam poucos dados de falha, o que dificulta o ajuste às distribuições.

Utilizando-se a distribuição de Weibull com dois parâmetros, verifica-se que as curvas apresentam diferentes formas ao comparar os diferentes componentes. Isto ocorre devido aos diferentes valores do parâmetro de forma, β_1 , e parâmetro de escala, η_1 , para cada componente. Os valores destas variáveis podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores do parâmetro de forma e escala dos componentes

Componente	β_1	η_1	Componente	β_1	η_1
AZ	1,38650	11457	IZ	1,43410	11283
BZ	1,36200	10777	JZ	2,13530	24712
CZ	1,38840	13184	KZ	1,40950	7850
DZ	0,84330	68331	LZ	0,91770	280520
EZ	1,52900	19108	MZ	0,67160	7614000
FZ	0,98480	41832	NZ	0,85540	6615600
GZ	1,07410	58057	OZ	0,75330	78335
HZ	0,38000	1488300000			

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que para todos os componentes analisados os valores de β_1 ficaram entre 0,3800 (para o componente HZ) e 2,1353 (no caso do componente JZ). Valores de β_1 inferiores a 1 normalmente representam falhas prematuras no período analisado, com taxa de falha em declínio, tendo a tendência a estabilizar. Este é o caso dos componentes DZ, HZ, LZ, MZ, NZ e OZ. A Figura 14 representa o comportamento gráfico para este tipo de componente, ilustrado pelo componente HZ.

Já para valores de β_1 próximos de 1, são característicos de componentes que apresentam taxa de falha constante no período analisado. Este é o caso dos componentes FZ e GZ, que devido a esta característica, as curvas se aproximam do comportamento da distribuição exponencial. Graficamente, pode ser visto o exemplo do componente GZ, de acordo com a Figura 15.

Tem-se ainda, componentes em que o valor do parâmetro β_1 é superior a 1. É o caso dos componentes AZ, BZ, CZ, EZ, IZ, JZ, KZ. Este comportamento caracteriza-se pela confiabilidade que diminui lentamente no início e aumenta a intensidade com o passar do

tempo. Isto é característico do modo de falha por desgaste. Ainda nesta avaliação, percebe-se que o componente JZ apresenta o valor de β_1 próximo de 2, o que a aproxima da distribuição do tipo Rayleigh. Os gráficos de todos os componentes podem ser vistos no Apêndice C.

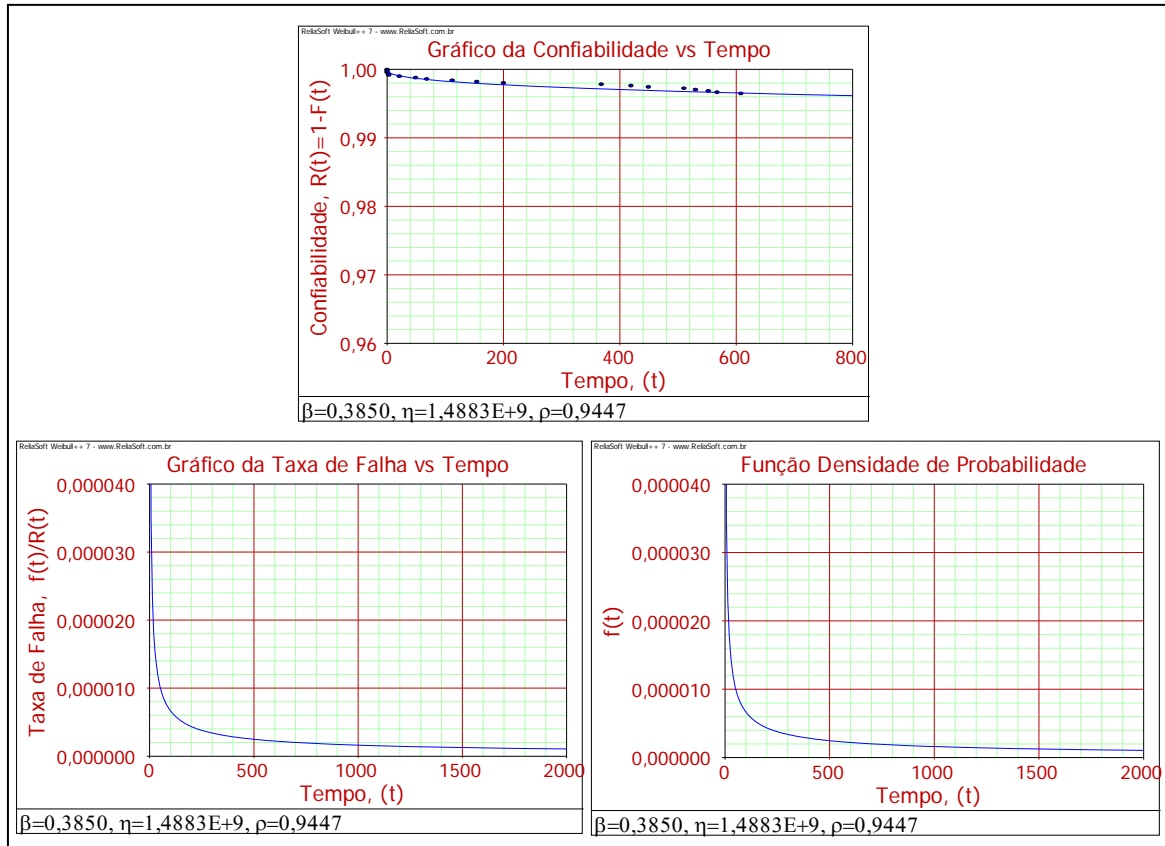


Figura 14 – Gráfico das funções confiabilidade, densidade da probabilidade e taxa de risco para o componente HZ.

Fonte: Elaborado pelo autor

Referente ao comportamento do parâmetro de escala dos componentes, percebe-se que ocorreram resultados variados. Para o componente KZ, o valor do parâmetro de escala η_1 foi menor que 10.000 horas. Mesmo apresentando um valor baixo se comparado aos outros componentes, este valor parece representar de forma coerente o comportamento de falhas destes componentes. Isto pode ser evidenciado pela proporcionalidade entre o período de 654 horas para cerca de 2% de itens com falhas; e o período de próximo a 10.000 horas para 63,2% dos itens (valor de η_1).

Já para a grande maioria dos itens, representados pelos componentes AZ, BZ, CZ, DZ, EZ, FZ, GZ, IZ, JZ, e OZ, o valor deste parâmetro ficou entre 10.000 e 80.000. Fazendo-se a mesma analogia, estes valores são considerados elevados, devido ao elevado nível de censura.

Isto também pode ser explicado pelo parâmetro de escala estar localizado em uma região extrapolada do gráfico. Ou seja, os pontos que formam a curva da confiabilidade $R(t)$ estão apenas até 654 horas, então considera-se incerto o comportamento dos dados em períodos próximos a 10.000 ou 80.000 horas (após a censura). Da mesma forma podem ser explicados os valores elevados de η_1 dos componentes MZ, NZ e HZ.

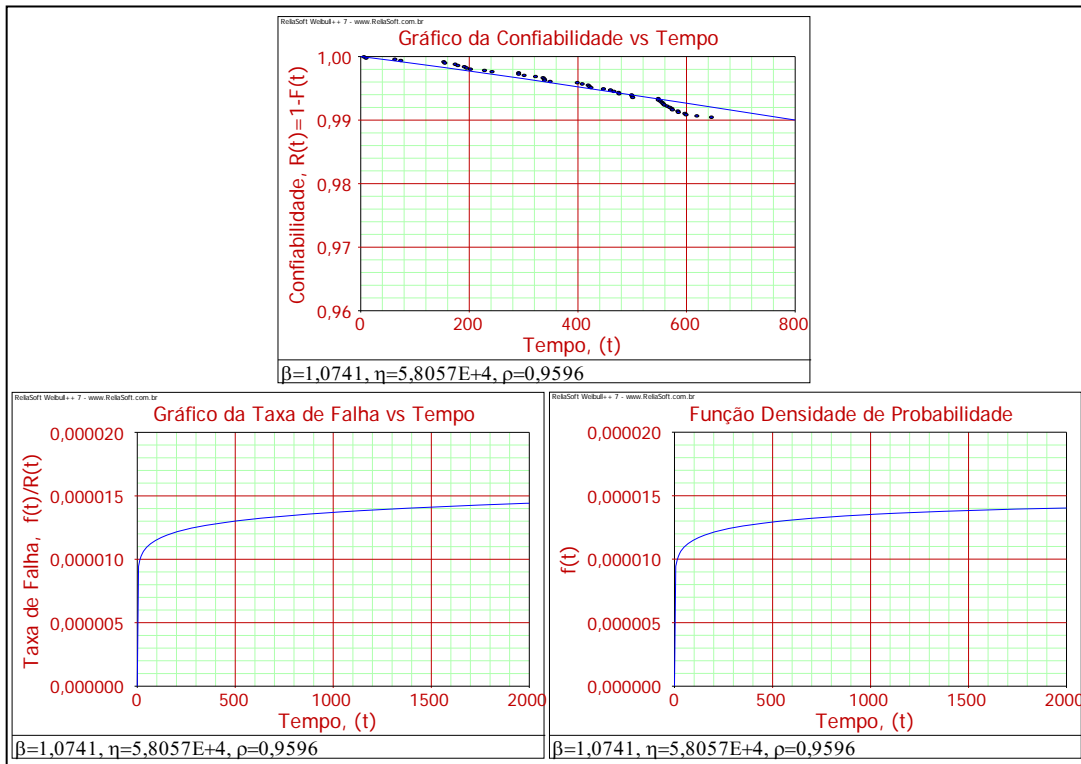


Figura 15– Gráfico das funções confiabilidade, densidade da probabilidade e taxa de risco para o componente GZ.

Fonte: Elaborado pelo autor

Outro fator importante refere-se ao comportamento dos componentes do subsistema ABCZ. Verifica-se que os valores de β_1 dos componentes AZ, BZ e CZ, que compõe o subsistema são muito similares; assim como o percentual de falha dos mesmos. Este fato pode ser explicado pela própria característica do subsistema, pois quando ocorre falha de um dos componentes normalmente acarreta a falha dos outros.

Como resultado desta etapa tem-se os gráficos de confiabilidade, densidade da probabilidade e taxa de risco, para todos os componentes. Ressalta-se que estes gráficos representam adequadamente o comportamento de falha de zero até aproximadamente 654 horas, reduzindo a confiança nos resultados à medida que se afasta deste intervalo. Têm-se

ainda como resultado desta etapa os valores do parâmetro de forma, β_1 , e parâmetro de escala, η_1 , para os componentes. Com estes resultados se tem as informações necessárias para a próxima sub-etapa que consiste em uma avaliação mais detalhada da análise de confiabilidade.

4.3 Avaliação dos resultados da etapa quantitativa

A avaliação dos resultados da etapa quantitativa é realizada para avaliar de forma criteriosa os resultados da análise estatística dos componentes. Tanto na coleta de dados quanto no cálculo do percentual de itens que falhou no período de garantia não houve problemas nem resultados fora do esperado. Os componentes que apresentaram maiores índices de falha foram os componentes KZ e OZ, com valores de 2,31% e 2,23% de falhas no período de garantia. Mesmo em se tratando de uma análise superficial, estes valores estão muito próximos dos valores máximos esperados de falha de 2%, o que aumenta a confiança sobre os resultados obtidos nos dados de falha.

Com relação ao ajuste dos valores de falha para a distribuição de Weibull de dois parâmetros, considera-se que todos os componentes são ajustáveis a esta distribuição. A distribuição de Weibull não foi a distribuição que melhor se ajustou para cada componente. Porém, a mesma apresentou valores de ajuste similares ao da respectiva distribuição de melhor ajuste, e não foi descartada para nenhum dos componentes. Estes resultados também são analisados graficamente.

Na avaliação do resultado dos valores de β_1 e η_1 dos componentes não se verifica resultados anormais. Faz-se apenas uma ressalva referente aos elevados valores do parâmetro de escala para a maioria dos componentes. Pode-se afirmar que estes valores já seriam esperados, devido ao elevado nível de censura. Ou seja, os dados da etapa quantitativa estão localizados na parte inicial da curva de confiabilidade, diferentemente da localização deste parâmetro. O parâmetro de escala está tipicamente localizado em posições mais avançadas de tempo, visto que representa o local que 63,2% dos itens apresenta falha.

Para a análise criteriosa dos gráficos das funções confiabilidade, densidade da probabilidade e taxa de risco, verifica-se que os componentes JZ, MZ e NZ apresentam poucos dados para a obtenção dos gráficos. Isto não invalida as análises gráficas para estes componentes, apenas reduz a confiança nos resultados. Para o restante dos componentes, não são encontrados problemas relacionados aos gráficos. De uma forma geral, considera-se que

os resultados não apresentam problemas representativos, e sendo assim, serão utilizados para a continuidade das etapas posteriores.

4.4 Etapa qualitativa

A etapa qualitativa é realizada em paralelo com a etapa quantitativa. A aplicação das suas cinco sub-etapas são descritas na seqüência.

4.4.1 Entrevista diagnóstica

A entrevista diagnóstica caracteriza o primeiro contato entre o entrevistador e o entrevistado. Para cumprir o objetivo de obter informações que ajudem na elaboração do questionário, partiu-se para a determinação da amostra para a entrevista diagnóstica. Salientam-se dois fatores importantes para que a amostra seja representativa: aleatoriedade e tamanho da amostra. Para estas entrevistas, mesmo sem a obrigatoriedade de uma amostra estatisticamente representativa, procurou-se seguir estas recomendações.

Para a escolha dos especialistas, definiram-se quatro áreas principais dentro da empresa. Estas áreas são: engenharia do produto, suporte ao cliente, teste de campo, engenharia de validação do produto. Definiu-se o total de quatro especialistas para compor a amostra, sendo compostos por um especialista de cada área. A quantidade de quatro especialistas para a entrevista diagnóstica representa um número adequado para atingir o objetivo desta sub-etapa, pois conforme Ribeiro e Milan (2007) é preferível poucas entrevistas longas em vez de muitas entrevistas curtas.

As entrevistas foram realizadas de forma presenciais, com duração média de 45 minutos. A condução das entrevistas foi realizada por um roteiro semi-estruturado que segue: contextualização do assunto, apresentação do objetivo da entrevista e solicitação da colaboração do entrevistado. Após o acordo do entrevistado, seguiu-se para a parte prática da entrevista conforme roteiro: apresentação do sistema em estudo, exemplo com um dos componentes do estudo, simulação de alguns tipos de perguntas, discussão sobre a forma de interpretação das perguntas, sugestões para obter o melhor entendimento das perguntas pelo entrevistado.

Durante as entrevistas, uma das informações que foram buscadas referiu-se à linguagem e interpretação do entrevistado. Neste quesito verificou-se a familiaridade do entrevistado quanto à linguagem acadêmica, linguagem técnica, linguagem de confiabilidade e interpretação de textos e tabelas. Também se analisou a familiaridade do entrevistado quanto ao funcionamento do sistema e dos componentes em estudo.

Como resultado das entrevistas diagnóstico desta sub-etapa obtiveram-se diversos relatos dos entrevistados coletados em forma de anotações. Estas informações foram filtradas e reunidas na sub-etapa posterior, de forma a obter pontos em comum entre os entrevistados. Estes pontos em comum auxiliaram na elaboração de um questionário objetivo e consolidado, que foi aplicado durante a etapa qualitativa. A entrevista diagnóstico ajudou o entrevistador a entender as principais dificuldades dos entrevistados.

4.4.2 Análise do diagnóstico

A análise do diagnóstico iniciou com a síntese e redução dos dados, devido à grande quantidade de informações obtidas nas entrevistas. Esta síntese contempla as principais informações mencionadas pelos entrevistados, organizadas de forma a facilitar a análise dos dados.

Na realização da análise e interpretação dos dados, seguiram-se principalmente as alternativas que contemplaram a ordenação por consenso e por importância. Na organização por consenso se identificaram os elementos onde houve consenso e divergência entre os entrevistados. Já na ordenação por importância, identificaram-se os elementos que despertaram maior interesse nos entrevistados.

Os principais elementos encontrados em comum entre os entrevistados foram: dificuldade de interpretação das perguntas, solicitação de foto ou ilustração do componente a ser questionado, dificuldade de mensurar valores de confiabilidade em lotes pequenos do produto. À medida que as entrevistas ocorreram, o entrevistador imediatamente tentava aperfeiçoar os questionamentos e atacar as principais falhas na obtenção dos resultados esperados. Para minimizar as dificuldades apresentadas pelos entrevistados foram adotadas algumas medidas no decorrer da entrevista diagnóstico, tais como: simulação de um exemplo para contextualização do produto, exibição de foto de um dos componentes em estudo, mencionando população com referência a lote de 100 produtos (percentual) na solicitação de confiabilidade.

Outro ponto que foi avaliado refere-se ao nível de conhecimento dos especialistas. Tanto em conhecimento sobre o produto, quanto em experiência de campo, observa-se que os especialistas apresentaram um avançado grau de conhecimento. Em relação à linguagem, verificou-se pouca familiaridade dos entrevistados com a linguagem acadêmica e boa familiaridade com termos técnicos e de confiabilidade.

Nesta sub-etapa concluiu-se que os especialistas apresentaram adequada capacidade de quantificar as falhas sobre o produto. Outro fator crucial para uma boa qualidade de respostas

representou a correta interpretação das perguntas. Com estas conclusões somadas às informações obtidas, seguiu-se para a elaboração do questionário.

4.4.3 Elaboração do questionário

Para a elaboração do questionário seguiu-se as recomendações da literatura exploradas na seção 2.6.1, juntamente com os resultados da análise do diagnóstico. Este questionário foi elaborado com o intuito de utilização na metodologia Delphi, apresentando o padrão e as características necessárias para isto. O questionário utilizado na primeira rodada encontra-se no Apêndice D, e a seqüência de construção do mesmo é detalhada a seguir. Já o questionário utilizado nas rodadas seguintes do método Delphi, contempla as informações sobre as respostas da rodada anterior, e pode ser visto no Apêndice E.

Na parte superior do questionário são expostos os dados de identificação do questionário, que consistem no título da pesquisa e a identificação do número da rodada. Em seguida apresentam-se os objetivos do questionário, juntamente com o agradecimento antecipado. Na seqüência, são descritas as instruções de utilização do questionário, onde se contemplam algumas características identificadas na entrevista diagnóstico. Estas características consistem de: foto e ilustração sobre o componente em estudo, elaboração de um exemplo para facilitar a interpretação das perguntas.

Após as instruções, apresentam-se as perguntas que representam um total de três, ordenadas em uma seqüência lógica de tempo. As perguntas são objetivas e diretas, tendo como possibilidade de resposta um valor numérico positivo entre zero e cem mil, restringidas pela planilha eletrônica. As perguntas buscam as respostas para o tempo, estimado por especialista, em que a confiabilidade atinge o valor de 98%, 50% e 2%, respectivamente para as perguntas 1, 2 e 3. As respostas representam respectivamente: o início das falhas por desgaste, o tempo em que a metade das máquinas falha e o término das falhas por desgaste.

Com o valor de 2% utilizado na pergunta 1 buscou-se desconsiderar eventuais componentes que falharam dentro período de garantia, ou que tiveram falhas de forma prematura. Esta afirmação é baseada nos registros históricos de falhas da garantia para componentes deste produto, onde dificilmente ultrapassam valores maiores que 2% (falhas prematuras). O valor de 50% utilizado na pergunta 2 representa o ponto em que a metade das máquinas apresentou falha no componente em estudo. Já com a pergunta 3, buscava-se um ponto extremo de componentes que obtiveram maior durabilidade. Foi escolhido o valor de 98% com a intenção de eliminar componentes de durabilidade muito maior que os demais.

Estes componentes podem ser exemplificados por clientes que submetem o produto a condições pouco exigentes de utilização.

Seguindo a orientação da metodologia Delphi, sabe-se que, para os questionários utilizados após a primeira rodada, devem ser fornecidas as informações do grupo de especialistas geradas nas rodadas anteriores. A forma escolhida foi de adicionar estas informações na parte superior do questionário. O restante do questionário permanece exatamente igual ao da rodada anterior, inclusive mantendo as respostas originais do especialista. As respostas originais de cada especialista foram mantidas para facilitar a avaliação do mesmo, comparando a sua resposta anterior com as informações recebidas do grupo de especialistas.

As informações do grupo de especialistas, que foi fornecida a partir da segunda rodada, foram simplesmente a mediana e o intervalo interquartil de cada uma das três perguntas. Estas foram expostas em uma linguagem mais acessível para facilitar a compreensão por parte dos especialistas. Inclusive foi citada no próprio questionário a explicação para cada afirmação. Depois de finalizada a elaboração dos questionários, seguiu-se para a escolha do grupo de especialistas.

4.4.4 Escolha dos especialistas

O grupo de especialistas foi escolhido de acordo com as quatro áreas principais, definidas anteriormente: engenharia do produto, suporte ao cliente, teste de campo, engenharia de validação do produto. Buscou-se o maior número de pessoas destas áreas, que apresentassem experiência em campo, conhecimento sobre o produto e familiaridade com dados de falha de componentes. Na empresa onde o estudo foi realizado, estas áreas são caracterizadas por ter poucas pessoas, porém com elevado conhecimento sobre os assuntos mencionados.

Definiu-se a quantidade total de doze especialistas, distribuídos da seguinte forma: cinco da engenharia do produto, dois da área de suporte ao cliente, três da área de teste de campo e dois da área de engenharia de validação do produto. Havia mais pessoas disponíveis na área de engenharia, porém sem o conhecimento adequado sobre o sistema em questão. A possibilidade de envolver um número maior de entrevistados, como por exemplo, pessoas representantes das concessionárias, foi descartada devido à grande chance de distorção e viés das respostas. Sabe-se que as concessionárias possuem uma cultura conservadora, exigindo que os problemas tenham solução efetiva e rápida da fábrica. Isto poderia levar estas pessoas

a estimarem de forma não realista, atribuindo um menor tempo até a falha dos componentes, como forma de exigir da fábrica uma melhoria do produto.

Desta forma obtém-se uma quantidade baixa de especialistas, porém com alto nível de conhecimento sobre os assuntos abordados. Sendo assim, tinha-se a expectativa de estimativas realistas e resultados confiáveis para a etapa qualitativa.

4.4.5 Aplicação do Método Delphi

Esta etapa descreve a aplicação do Método Delphi para a obtenção de consenso dos especialistas quanto à previsão de falha dos componentes. Iniciou-se com a aplicação da primeira rodada do questionário ao grupo de especialistas. O questionário foi enviado na forma de uma planilha eletrônica utilizando-se a ferramenta de *e-mail*. A forma escolhida visou facilitar a comunicação com os especialistas, e ainda, evitar a influência entre os entrevistados, que consiste uma das principais características do método Delphi.

Após obtenção das respostas dos especialistas, os resultados foram computados em uma planilha eletrônica. Para a análise dos resultados, foram utilizados a mediana e a amplitude interquartilica. Estes parâmetros foram calculados para cada uma das três respostas do questionário, individualmente para cada um dos componentes do sistema. Também foi realizado o cálculo do percentual de consenso obtido entre os especialistas, para a primeira rodada. Dentre as diferentes formas de medir o consenso dos especialistas, escolheu-se a utilizada por Cardoso *et al.* (2005). Este define que a diferença entre o primeiro e o terceiro quartis deve ser inferior a 25% do intervalo máximo entre as respostas. O valor resultante é subtraído de 100% e resulta no valor do consenso obtido pelo grupo. A Tabela 6 exemplifica as respostas obtidas dos especialistas, a mediana e os respectivos quartis, assim como o consenso obtido na primeira rodada de respostas do componente AZ.

O cálculo do consenso da pergunta 1 da primeira rodada para o componente AZ, é mostrado conforme equações 20 e 21.

$$Drq = \frac{(Q_3 - Q_1)}{(Ls - Li)} = \frac{(900 - 375)}{(3000 - 200)} = 19\% \quad (20)$$

$$Consenso = (100\% - Drq) = 81\% \quad (21)$$

Onde: Drq é a diferença relativa entre os quartis;

Q_3 é o terceiro quatil;

Q_1 é o primeiro quartil;

L_s é o limite superior das respostas;

L_i é o limite inferior das respostas.

Tabela 6– Análise dos resultados da rodada 1 para o componente AZ

Componente AZ - Rodada 1			
Especialista	Pergunta 1 - Respostas ordenadas (h)	Pergunta 2 - Respostas ordenadas (h)	Pergunta 3 - Respostas ordenadas (h)
1	200	800	1200
2	200	1000	1400
3	250	1100	2000
4	500	1200	2500
5	600	1300	4000
6	700	1500	4500
7	800	3000	6000
8	800	5000	6000
9	800	6000	12000
10	1000	7000	12000
11	3000	8000	14000
12	3000	8000	14000
Quartil 1	375	1150	2250
Mediana	750	2250	5250
Quartil 3	900	6500	12000
Consenso	81%	26%	24%

Fonte: Elaborado pelo autor

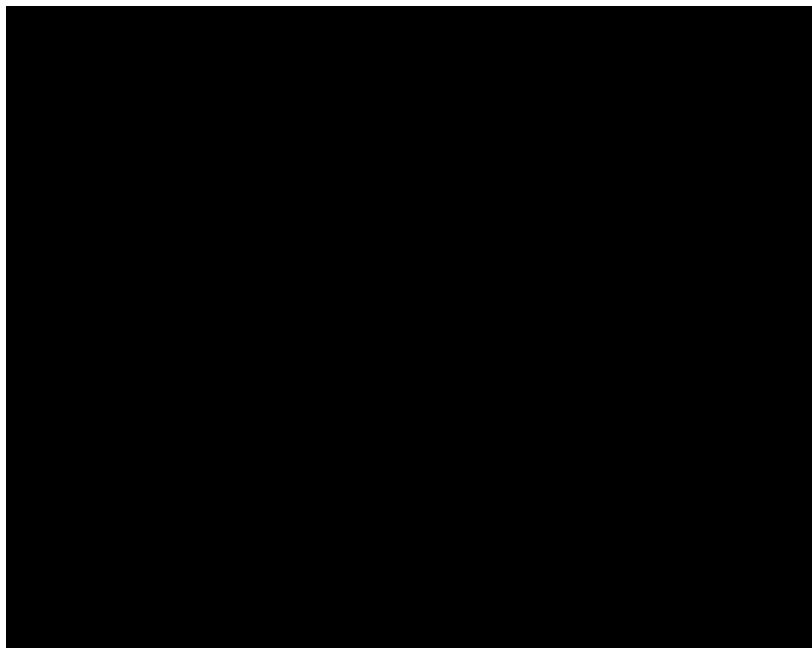
Verifica-se que para a primeira rodada, o consenso obtido no componente AZ foi de 81% para a pergunta 1, de 26% para a pergunta 2 e de 24% para a pergunta 3. Para o total de 45 perguntas (3 perguntas para cada um dos 15 componentes), obteve-se o consenso superior a 75% apenas para 2 perguntas. Na busca de consenso para um maior número de perguntas, partiu-se para a segunda rodada do Método Delphi.

Para a aplicação da segunda rodada, seguiu-se o questionário 2, onde foram fornecidos os dados da primeira rodada. Os dados fornecidos, basicamente apresentam o valor do primeiro quartil, valor do terceiro quartil e valor da mediana, para cada pergunta. O modelo para este questionário pode ser visto no Apêndice E. Após a segunda rodada, obteve-se consenso superior a 75% para 10 perguntas, de um total de 45. Seguiu-se a aplicação do

método até a terceira rodada de perguntas, e novamente foram fornecidas as informações da rodada anterior.

Após a terceira rodada, obteve-se consenso superior a 75% para 36 perguntas, do total de 45. Ao considerar-se um parâmetro de consenso superior a 70%, o total de perguntas acima deste valor passa a ser de 43. A pergunta que obteve menor consenso é a pergunta 3 do componente IZ com 64% de consenso. A Tabela 7 mostra o consenso obtido para as 3 perguntas de cada componente, após aplicação da terceira rodada.

Tabela 7 – Percentual de consenso dos especialistas após a terceira rodada de perguntas



Fonte: Elaborado pelo autor

Como se obteve um consenso para a maioria das perguntas, considera-se aceitável os resultados obtidos após a terceira rodada. Na Figura 16, pode ser exemplificada graficamente para o componente AZ, a evolução dos valores da mediana e do primeiro e terceiro quartil no decorrer das 3 rodadas. Esta informação também mostra a idéia de consenso com o passar das rodadas. Estes resultados podem ser vistos para os demais componentes no Apêndice F.

O método Delphi também é caracterizado por um elevado índice de abstenção de respostas entre as rodadas. Normalmente há uma abstenção de 30% a 50% dos respondentes na primeira rodada, e de 20% a 30% na segunda rodada (WRIGHT, 2000; SHARKEY e SHARPLES, 2001). Neste estudo, o índice de abstenção foi nulo. Isto pode estar relacionado aos seguintes motivos: baixa quantidade de especialistas (12), constante cobrança sobre a

obtenção de respostas, estudo realizado em um ambiente de trabalho pequeno onde o contato com os entrevistados é freqüente.

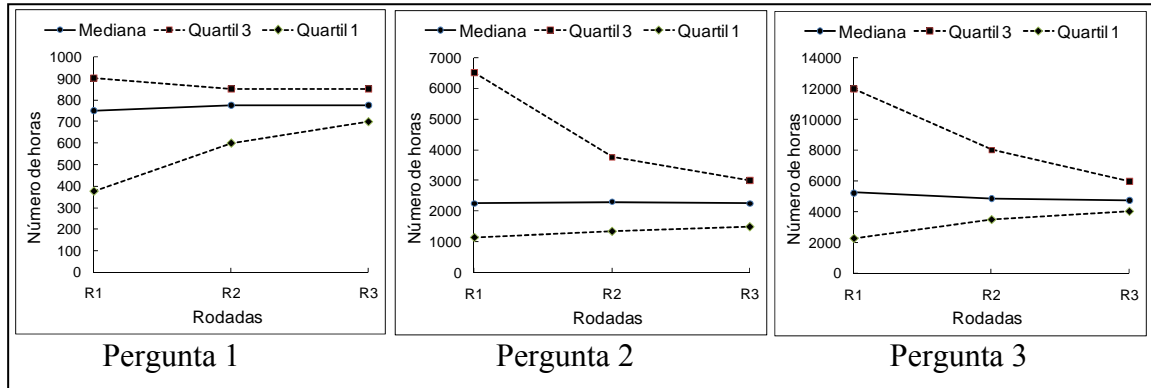


Figura 16 - Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente AZ

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 – Pontos t_{98} , t_{50} e t_{02} para cada componente

Componente	t_{98}	t_{50}	t_{02}
AZ	775	2250	4750
BZ	675	2000	4000
CZ	950	3200	6000
DZ	950	3000	5000
EZ	1200	3100	5250
FZ	1250	3075	5800
GZ	800	2975	5200
HZ	1000	3550	6500
IZ	1500	4350	8250
JZ	975	3150	5500
KZ	1550	4250	8100
LZ	1450	4000	8000
MZ	1150	3300	6000
NZ	1000	2000	3400
OZ	700	2000	4400

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme definidos pelo método proposto, os pontos t_{98} , t_{50} e t_{02} são representados pelo resultado das perguntas 1, 2 e 3 respectivamente. Esta relação pode ser feita apenas depois de estabelecido o consenso dos especialistas; que neste caso, é representada pela terceira rodada. Conforme visto anteriormente, o ponto t_{98} representa a estimativa do tempo até o início das falhas por desgaste, o ponto t_{50} o tempo em que metade dos componentes

falha, e o ponto t_{02} o tempo do término das falhas por desgaste. Estes valores podem ser vistos na Tabela 8, individualmente para cada componente. De posse do resultado destes valores para cada componente, a etapa a seguir irá avaliar os resultados aqui apresentados.

4.5 Avaliação dos resultados da etapa qualitativa

A avaliação dos resultados da etapa qualitativa busca avaliar coerência e eventuais problemas que tenham ocorrido na etapa qualitativa. Realizando a análise sobre o consenso obtido pelas respostas, verifica-se que ocorrem valores satisfatórios para a maioria das perguntas. Em relação à pergunta 3 dos componentes IZ e JZ, estas foram as que obtiveram menor percentual de consenso, com 64% e 67% respectivamente. Admite-se que serão utilizados os valores de suas respostas, mesmo não se obtendo o percentual esperado de consenso, devido à sua proximidade com o limite de 70%, o que não comprometerá a confiança nos resultados.

Em relação aos gráficos de evolução da mediana e quartis, percebe-se que as curvas tendem a um consenso para todos os componentes. Isto comprova a melhoria do percentual de consenso no decorrer das rodadas, o que demonstra a eficiência no Método Delphi em conseguir o consenso entre os especialistas. Um resultado anormal seria se estas curvas tendessem a se afastar. Ressalta-se também, que não houve abstenção de perguntas por parte dos especialistas.

Quanto à avaliação dos resultados finais dos pontos t_{98} , t_{50} e t_{02} , verifica-se uma coerência de resultados com a realidade. Esta avaliação é realizada comparando os resultados entre os componentes, e com analogia a outros componentes similares, o qual é conhecido o comportamento de falha durante o ciclo de vida do produto. Outra verificação importante pode ser realizada no ponto t_{98} , que representa o número de horas esperado para 2% de falhas do componente. Espera-se que este valor seja superior a 654 horas, pois este é o valor em que tipicamente representa o final do período de garantia; e também representa um percentual de falhas historicamente inferior a 2%. O valor encontrado para o ponto t_{98} foi superior a este valor para todos os 15 componentes, o que aumenta a confiança sobre as respostas obtidas do grupo de especialistas.

Desta forma, concluiu-se que a etapa qualitativa representa de forma adequada a opinião dos especialistas, com coerência de resultados para todos os componentes. Com o resultado dos pontos t_{98} , t_{50} e t_{02} para todos os componentes, atingiram-se os resultados esperados para a etapa qualitativa.

4.6 Modelagem da vida útil dos componentes

Com as informações obtidas nas etapas anteriores deste capítulo, tornou-se possível realizar a modelagem de vida útil dos componentes. Utilizou-se a metodologia desenvolvida por Ribeiro (2008) para unir as informações da etapa quantitativa com a etapa qualitativa, resultando na curva de vida útil dos componentes. A aplicação desta metodologia para os componentes deste sistema é vista nesta etapa.

As informações necessárias da etapa quantitativa são os valores do parâmetro de forma, β_1 , e do parâmetro de escala, η_1 . Por exemplo, os valores obtidos para o componente AZ foram $\beta_1 = 1,38650$ e $\eta_1 = 11457$. A Curva de Weibull formada por estes parâmetros forma a parte inicial da curva de vida útil do componente.

Já da etapa qualitativa, utilizou-se os pontos t_{98} , t_{50} e t_{02} para calcular os parâmetros β_2 e η_2 . Conforme visto na seção 4.4, os pontos t_{98} , t_{50} e t_{02} foram obtidos de pesquisa com especialistas, com a aplicação do método Delphi. Como exemplo, para o componente AZ os valores resultantes foram: $t_{98} = 775$, $t_{50} = 2250$, $t_{02} = 4750$. Estes dados correspondem a três pontos da curva de confiabilidade, definidos pelas coordenadas: $R(t_{98})$; $t_{98} = (0,98 ; 775)$, $R(t_{50})$; $t_{50} = (0,50 ; 2250)$ e $R(t_{02})$; $t_{02} = (0,02 ; 4750)$. Com estes três pontos, e o auxílio de software ou planilhas eletrônicas, obtiveram-se os valores de β_2 e η_2 para uma distribuição de Weibull. A curva de Weibull formada por estes parâmetros, e o parâmetro de localização t_A , é chamada de $R_2(t)$, e auxilia na composição da parte final da curva de vida útil do componente.

A Tabela 9 mostra os valores de β_1 , η_1 , β_2 , η_2 e t_A para os componentes do sistema. Salienta-se que para todos os componentes ocorreu uma redução considerável no valor do parâmetro de escala η_2 se comparado ao η_1 . Isto era esperado devido à eliminação da censura. Ou ainda, se analisarmos o fato de η_2 ser obtido dos dados qualitativos que representam dados mais confiáveis no período entre 1.000 e 5.000 horas, do que os dados usados para obter η_1 .

Para a modelagem de vida útil dos componentes, utilizou-se a curva $R_1(t)$ até o valor de t_A . Para o valor igual ou valores superiores a t_A utilizou-se a multiplicação das curvas $R_2(t)$ e $R_1(t)$. Isto pode ser exemplificado analiticamente pelas equações 33 a 36.

$$\text{Para } t < t_A, R(t) = R_1(t) \quad (33)$$

$$\text{Onde } R_1(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1}} \quad (34)$$

$$\text{Para } t \geq t_A, R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1}} \cdot e^{-\left(\frac{(t-t_A)}{\eta_2}\right)^{\beta_2}} \quad (35)$$

$$\text{Onde } R_2(t) = e^{-\left(\frac{(t-t_A)}{\eta_2}\right)^{\beta_2}} \quad (36)$$

Tabela 9 – Parâmetros das distribuições $R_1(t)$ e $R_2(t)$ para os componentes

Componente	β_1	η_1	β_2	η_2	t_A
AZ	1,3865	11457	1,83171	1970	775
BZ	1,362	10777	1,97733	1727	675
CZ	1,3884	13184	2,30895	2908	950
DZ	0,8433	68331	2,65995	2451	950
EZ	1,529	19108	1,81769	2447	1200
FZ	0,9848	41832	1,98159	2329	1250
GZ	1,0741	58057	2,51554	2578	800
HZ	0,38	1488300000	2,26214	3013	1000
IZ	1,43410	11283	2,0139	3447	1500
JZ	2,1353	24712	2,37252	2558	975
KZ	1,4095	7850	2,65741	4407	1550
LZ	0,9177	280520	1,85544	3157	1450
MZ	0,6716	7614000	2,13451	2562	1150
NZ	0,8554	6615600	1,97789	1204	1000
OZ	0,7533	78335	1,71742	1701	700

Fonte: Elaborado pelo autor

Depois de obtida a curva de confiabilidade $R(t)$, obteve-se as curvas da densidade da probabilidade, $f(t)$, e taxa de risco, $h(t)$, utilizando-se as equações (5) e (7) respectivamente (veja seção 2.2). Estas curvas podem ser vistas graficamente para o componente AZ conforme Figura 17. Para os demais componentes, as curvas encontram-se no Apêndice G.

De posse destes três gráficos, torna-se possível realizar diversos tipos de análise. Verifica-se, por exemplo, que após 1000 horas a confiabilidade do componente AZ diminui bruscamente, caracterizada pelo início das falhas por desgaste. Considerando que 95% do produto têm o período de garantia expirado com 654hs, constata-se que o componente está projetado para iniciar o período de desgaste após expirar o período de garantia.

Ou ainda, estas informações podem ajudar a tomar decisões sobre o plano de validação dos componentes. Se a empresa resolvesse construir uma bancada para testar a durabilidade do componente AZ, saberia que dificilmente teria que rodar mais de 5000 horas para que

todos componentes falhassem, independente do tamanho da amostra. Da mesma forma, o tempo de 2000 horas representa que 60% da amostra de componentes AZ ainda não apresentaram falha.

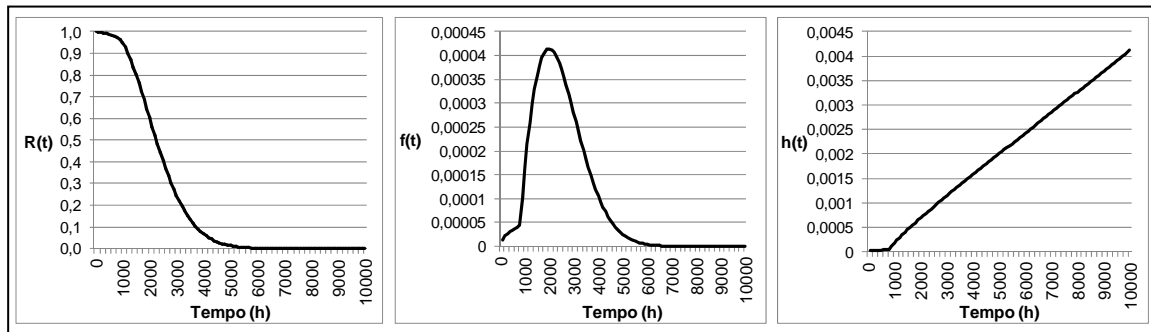


Figura 17 - Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente AZ

Fonte: Elaborado pelo autor

Dentre os quinze componentes que formam o sistema, o componente IZ é o que apresenta o maior tempo para que todos os componentes falhem. Cerca de 9000 horas seriam necessárias para que 100% dos componentes da amostra analisada tenham confiabilidade igual a zero. O componente KZ possui uma vida útil similar ao IZ. Porém, os componentes iniciaram a falhar prematuramente, visto que 2,33% já falharam ainda no período de garantia. Este consiste no componente com maior percentual de falhas no período de garantia. Então, no caso do KZ, mesmo com a grande durabilidade de alguns componentes, há outros que apresentaram uma durabilidade muito baixa, o que demonstra que este componente possui um comportamento pouco previsível. A Figura 18 e a Figura 19 mostram o comportamento para os componentes IZ e KZ respectivamente.

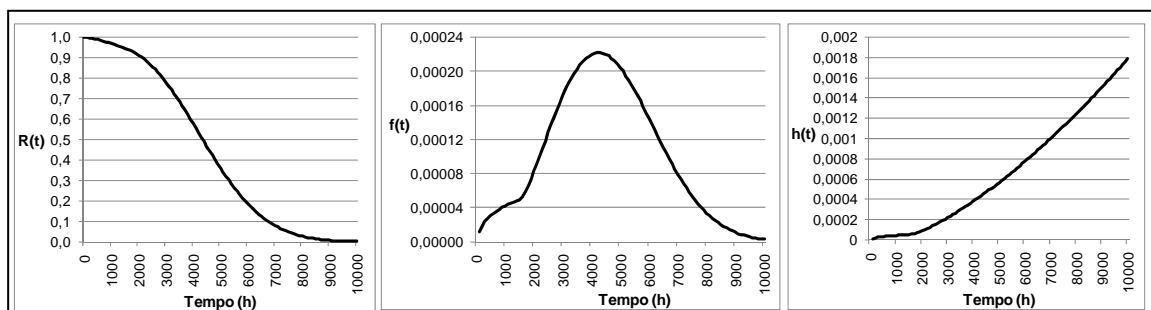


Figura 18 - Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente IZ

Fonte: Elaborado pelo autor

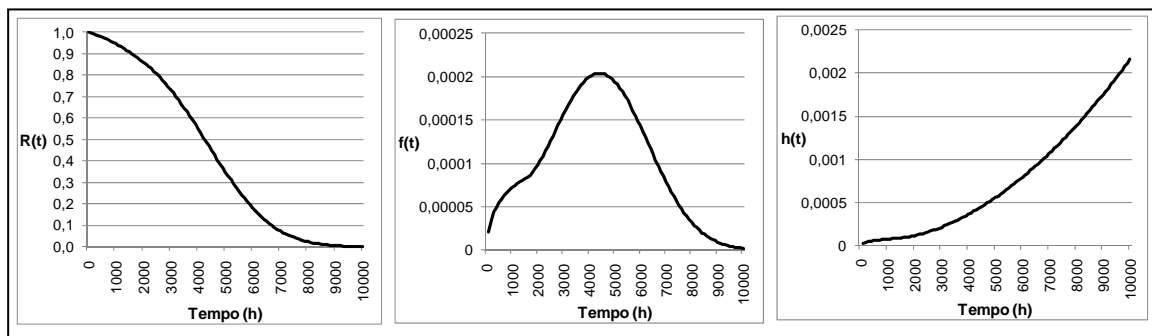


Figura 19- Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente KZ

Fonte: Elaborado pelo autor

Entretanto, o componente NZ possui comportamento oposto ao KZ. Obteve apenas 2 falhas (0,039%) durante o período de garantia, mas dificilmente algum item ultrapassaria 4000 horas sem falhar. Isto mostra que o componente NZ é o que apresentou menor tempo para que todos os itens falhem. Este tipo de comportamento deve ser analisado pela empresa, para verificar se deve buscar uma maior durabilidade do componente, ou se é aceitável apenas ultrapassar o período de garantia sem falhar. A Figura 20 mostra o comportamento de falhas do componente NZ.

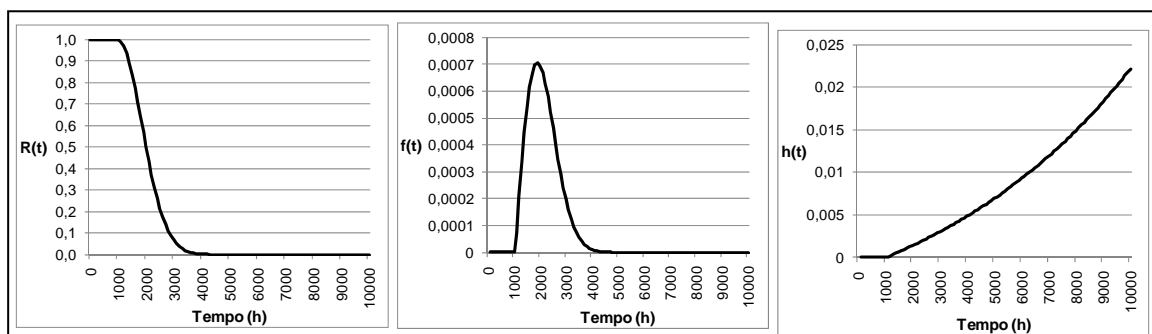


Figura 20 - Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente NZ

Fonte: Elaborado pelo autor

Outra característica notada foi a similaridade do comportamento dos componentes que compõem o subsistema ABCZ. Da mesma forma que se percebeu durante o período de garantia, a visualização gráfica do ciclo de vida dos componentes AZ, BZ e CZ é muito similar. O tempo aproximado para que todos os itens apresentem falha é de 5000 horas, 4200 horas e 6200 horas, respectivamente para os componentes AZ, BZ e CZ.

Uma peculiaridade deste método consiste no ponto de transição da etapa quantitativa para a etapa qualitativa. Esperava-se que houvesse uma mudança de comportamento nesta transição devido ao início do período por desgaste. O problema é que se verificou que muitas vezes esta transição ocorre de forma abrupta, o que raramente é verificado em curvas obtidas de dados de falha reais. Esta característica é apenas observada, pois não se encontrou solução para suavizar a curva no ponto de transição. Isto faz com que se reduza a confiança nos resultados próximos a este ponto.

Ainda referente ao ponto de transição, localizado em t_A , espera-se um valor superior ao término dos dados de garantia, definido neste estudo por 654 horas. Esta característica é buscada para que haja um melhor aproveitamento das informações, evitando regiões em que haja sobreposição dos dados de garantia com as informações obtidas dos especialistas. Como exemplo, para o componente AZ o tempo t_A obtido resultou em 775 horas. Isto significa que o período em que foi utilizada a extrapolação da curva $R_I(t)$ foi entre 654 horas e 775 horas.

Todos os componentes apresentaram o valor de t_A superior a 654 horas. Contudo, os valores de t_A encontram-se próximos a 654 horas, sendo que o valor mais próximo foi de 675 horas, para o componente BZ; e o maior valor foi de 1550 horas do componente KZ. Desta forma há indicativos de que os componentes possuíam um início das falhas por desgaste logo após a garantia ter expirado.

Outra análise que pode ser feita em relação a t_A , é o comparativo da confiabilidade estimada pelos especialistas e a confiabilidade calculada com os dados de garantia. A discrepância é mostrada através da tabela 10, onde é mostrado o valor de $R(t_A)$ calculado com a utilização dos dados de garantia para cada componente. Em comparação deste valor com a confiabilidade de 0,98 (obtida dos especialistas), conclui-se que os componentes AZ, BZ, CZ, DZ, EZ e OZ apresentam confiabilidade muito próximos. Ou seja, tanto a estimação dos especialistas quanto o cálculo com os dados de garantia apresentam resultados semelhantes.

Os componentes GZ, HZ, JZ, LZ, MZ, NZ apresentam o valor da confiabilidade $R(t_A)$ calculada com os dados de garantia consideravelmente superior a 0,98. Neste caso, os especialistas afirmam que estes componentes iniciam o período por desgaste antes que a extrapolação dos dados de garantia. Isto é perfeitamente aceitável devido à extrapolação ser menos confiável à medida que se afasta dos dados de garantia. Já os componentes FZ, IZ e KZ apresentam o valor da confiabilidade $R(t_A)$ consideravelmente inferiores a 0,98. Isto significa que os especialistas foram conservadores em sua estimativa de início das falhas por desgaste. Isto não representa um problema, pois para valores maiores que t_A a confiabilidade é

calculada através da multiplicação de $R_1(t)$ e $R_2(t)$, sendo desta forma, fortemente influenciada pelo valor de menor confiabilidade.

Tabela 10 – Confiabilidade $R(t_A)$ calculada com os dados de garantia

Componente	t_A	$R(t_A)$
AZ	775	0,976
BZ	675	0,977
CZ	950	0,974
DZ	950	0,973
EZ	1200	0,986
FZ	1250	0,969
GZ	800	0,990
HZ	1000	0,995
IZ	1500	0,946
JZ	975	0,999
KZ	1550	0,903
LZ	1450	0,992
MZ	1150	0,997
NZ	1000	0,999
OZ	700	0,972

Fonte: Elaborado pelo autor

Com a análise destes pontos de transição e a elaboração dos gráficos de confiabilidade, densidade da probabilidade e taxa de risco para os componentes do sistema; levantou-se informação suficiente para a obtenção das mesmas curvas para o sistema completo.

4.7 Confiabilidade total do sistema

Para o cálculo da confiabilidade total do sistema inicialmente foi realizado a análise do diagrama de blocos. Conforme pode ser visto na Figura 12, a ligação realizada entre os componentes é do tipo em série. Para obter a confiabilidade do sistema, multiplicou-se a confiabilidade individual dos componentes (ver seção 2.5.1 para sistemas em série). Desta forma foi obtida a curva da confiabilidade, $R(t)$, para o sistema conforme pode ser vista na Figura 21. Esta figura representa ainda a densidade da probabilidade, $f(t)$, e taxa de risco, $h(t)$, obtidas a partir dos dados de $R(t)$ do sistema.

Verificou-se que a curva da confiabilidade do sistema apresenta uma declividade constante entre 0 e 700 horas. Este período pode ser considerado como equivalente ao período de garantia. Este comportamento foi resultante da região de falha prematura dos componentes. Com 700 horas verifica-se que a confiabilidade seria de 82%. Este percentual, apesar de baixo se comparado com a literatura, apresenta-se realista para produtos agrícolas, pois são produtos

que apresentam elevado índice de manutenção. Posteriormente inicia-se a região de desgaste, onde se tornou perceptível uma declividade ainda maior da curva. Concluiu-se ainda, que dificilmente os sistemas ultrapassariam 2400 horas sem falhar.

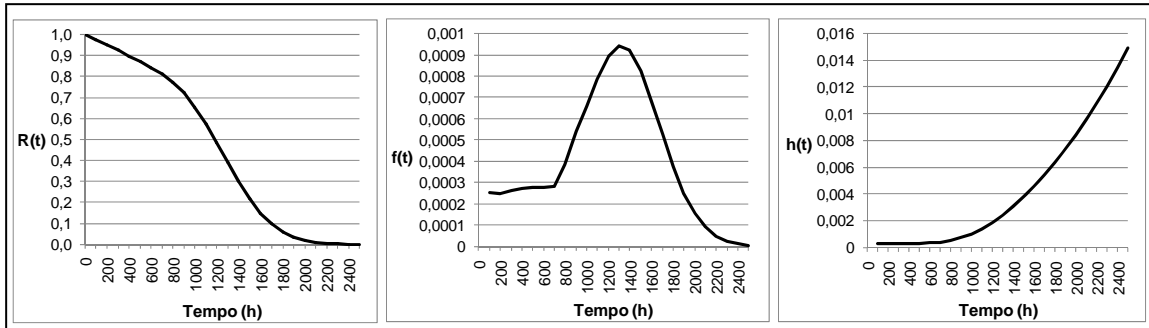


Figura 21 - Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ para o sistema

Fonte: Elaborado pelo autor

Em análise do gráfico de densidade da probabilidade do sistema, percebe-se que a região com maior densidade da probabilidade de falha é entre 1200 e 1500 horas. Outra conclusão importante refere-se ao gráfico da taxa de risco de falhas do sistema, que aumenta significativamente após as 800 horas.

Foi realizado também, o cálculo da confiabilidade do Subsistema ABCZ. Conforme visto na Figura 12, o subsistema ABCZ é composto pela ligação em série dos componentes AZ, BZ e CZ. Com a multiplicação da confiabilidade destes componentes, foi obtida a curva da confiabilidade, $R(t)$, que pode ser vista na Figura 22. O comportamento desta curva é muito similar ao dos componentes AZ, BZ e CZ, entretanto com a confiabilidade reduzida. A Figura 22 mostra ainda a densidade da probabilidade, $f(t)$, e a taxa de risco, $h(t)$, para o subsistema em questão.

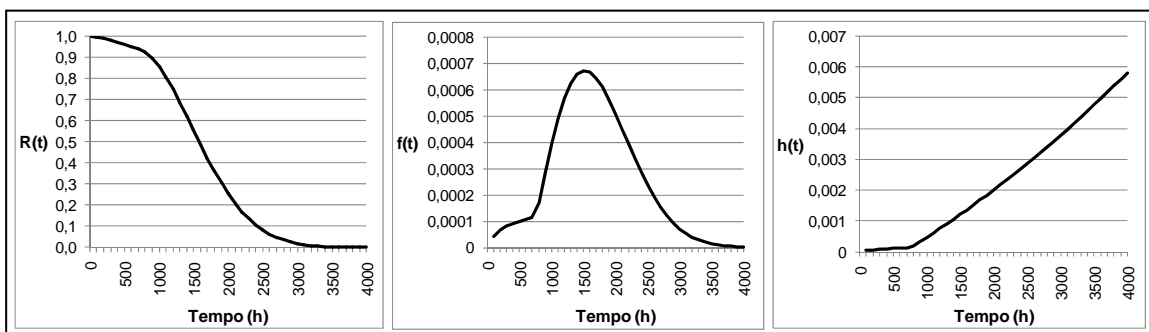


Figura 22 - Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ para o subsistema ABCZ

Fonte: Elaborado pelo autor

Outro tipo de análise que pode ser feita é da influência da confiabilidade dos componentes no sistema. A tabela 11 mostra a confiabilidade, $R(t)$, dos componentes e do sistema em função do tempo. Verifica-se que os componentes OZ, KZ, BZ e NZ representam os componentes críticos para o sistema em diferentes períodos de tempo, os quais são representados em destaque na Tabela 11. Sobre o componente OZ, este representa o componente crítico por maior período de tempo, localizado entre o início da vida do sistema até 500 horas, e novamente entre 800 e 2000 horas.

Tabela 11 – Confiabilidade $R(t)$ e componentes críticos do sistema

Tempo (h)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
R(t) de AZ	1,000	0,996	0,990	0,983	0,975	0,949	0,901	0,838	0,765	0,685	0,602	0,520	0,442
R(t) de BZ	1,000	0,996	0,989	0,981	0,966	0,927	0,865	0,785	0,694	0,597	0,500	0,408	0,324
R(t) de CZ	1,000	0,997	0,992	0,986	0,980	0,972	0,961	0,944	0,919	0,886	0,845	0,798	0,745
R(t) de DZ	1,000	0,993	0,987	0,982	0,977	0,972	0,965	0,952	0,931	0,899	0,856	0,801	0,736
R(t) de EZ	1,000	0,999	0,997	0,995	0,992	0,989	0,986	0,971	0,942	0,901	0,850	0,792	0,729
R(t) de FZ	1,000	0,995	0,990	0,985	0,980	0,975	0,970	0,961	0,938	0,903	0,856	0,799	0,736
R(t) de GZ	1,000	0,998	0,995	0,993	0,990	0,986	0,976	0,957	0,929	0,890	0,841	0,783	0,716
R(t) de HZ	1,000	0,998	0,997	0,996	0,996	0,995	0,993	0,985	0,969	0,946	0,915	0,877	0,833
R(t) de IZ	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,999	0,998	0,991	0,977	0,958	0,932
R(t) de JZ	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,995	0,984	0,962	0,931	0,888	0,835	0,774
R(t) de KZ	1,000	0,994	0,985	0,974	0,961	0,947	0,932	0,916	0,899	0,882	0,863	0,841	0,818
R(t) de LZ	1,000	0,999	0,998	0,996	0,995	0,994	0,993	0,992	0,988	0,974	0,951	0,922	0,887
R(t) de MZ	1,000	0,999	0,999	0,998	0,998	0,998	0,997	0,990	0,973	0,944	0,906	0,858	0,802
R(t) de NZ	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,971	0,892	0,777	0,640	0,500	0,370	0,260
R(t) de OZ	1,000	0,989	0,981	0,975	0,961	0,916	0,848	0,767	0,678	0,588	0,500	0,418	0,343
R(t) do Sistema	1,000	0,953	0,904	0,854	0,792	0,675	0,506	0,315	0,158	0,063	0,020	0,005	0,001

Fonte: Elaborado pelo autor

Com o cálculo das curvas de confiabilidade do sistema, subsistema e componentes; e a análise da influência da confiabilidade dos componentes no sistema, cumpre-se o objetivo principal do estudo de caso. A avaliação completa e as conclusões sobre o estudo de caso são exploradas na próxima etapa.

4.8 Conclusões e avaliação dos resultados

Esta etapa apresenta as principais conclusões sobre a aplicação do método no sistema. Verificaram-se a funcionalidade do método na aplicação prática, características da mesma, assim com oportunidades de melhoria.

Na análise quantitativa, verificou-se que a grande parte dos componentes tem a garantia expirada em até 654 horas. Este foi o tempo utilizado para a censura dos dados na análise de

confiabilidade dos dados de garantia. Viu-se também, que a distribuição de Weibull de dois parâmetros pôde ser utilizada para os 15 componentes, atendendo à restrição de utilização desta distribuição para o método proposto.

Houve componentes (JZ, MZ e NZ) que mesmo com a coleta de dados de 5156 máquinas, apresentaram poucos dados de falha o que dificultou o ajuste das distribuições. Em relação ao parâmetro de forma, β_1 , obtido para os componentes, esperava-se que a maioria apresentasse $\beta_1 < 1$, caracterizado por falhas prematuras. Apenas sete componentes encontraram-se nesta situação, o que se concluiu que os demais componentes apresentaram comportamento de falhas não trivial.

Em relação à análise quantitativa, a entrevista diagnóstica foi realizada de forma produtiva, onde as principais dificuldades dos entrevistados puderam ser minimizadas na elaboração do questionário. O questionário foi elaborado de forma a buscar o tempo estimado pelos especialistas para o início das falhas por desgaste, o tempo em que a metade das máquinas falha e o término das falhas por desgaste, para cada componente.

Com a utilização do Método Delphi para obter consenso da opinião dos especialistas, após 3 rodadas obteve-se um consenso superior 70% para 43 perguntas, do total de 45 perguntas. Não houve abstenção de perguntas por parte dos especialistas. Com o consenso obtido na maioria das respostas, foi possível obter os pontos t_{98} , t_{50} e t_{02} para todos os componentes.

Na análise de vida útil dos componentes, foi possível verificar que os componentes possuem diferentes comportamentos de falha, impactando diferentemente no comportamento de falhas do sistema. Verificou-se, por exemplo, que o componente KZ possui o maior índice de falhas dentro do período de garantia, impactando significativamente na confiabilidade do sistema naquele período. Tem-se ainda o componente OZ, que representa o componente crítico por maior período de tempo do sistema. Já o componente NZ, é o que menos falha no período de garantia, mas quase a totalidade dos componentes falha até 4000 horas. Este representa o componente com menor durabilidade total e representa o componente crítico no final da vida útil do sistema. Estas informações auxiliam a empresa a tomar decisões, como por exemplo, se: (i) deve trabalhar para melhorar a durabilidade dos componentes que falham no período de garantia (como o KZ e OZ); ou (ii) buscar a maior durabilidade total do sistema, atacando os componentes com menor vida útil (no caso do NZ).

Concluiu-se com as análises que um sistema destes atingiria a confiabilidade igual a zero em aproximadamente 2400 horas. Viu-se também que a taxa de risco aumenta

significativamente após as 800 horas, e que a região com maior densidade da probabilidade de falha é entre 1200 e 1500 horas. Os resultados finais foram mostrados e discutidos com alguns dos especialistas, que analisaram os mesmos, considerando uma boa coerência e representação dos dados vivenciados por eles no campo. Isto reforça que tanto para o comportamento de falhas dos componentes quanto para o comportamento de falhas do sistema, os valores apresentaram-se consistentes e representativos.

Em relação ao método de análise de vida útil, analisou-se o ponto de transição da etapa quantitativa para a etapa qualitativa. Verificou-se que a transição foi realizada de forma abrupta em alguns componentes, caracterizado por uma mudança repentina na forma da curva, o que reduz a confiança dos resultados próximos a este ponto. Este fator apresenta uma oportunidade de melhoria para este método.

De forma a comparar o método deste estudo, com o simples método de extrapolar a curva de confiabilidade obtida dos dados de garantia, realizou-se a análise gráfica para o componente GZ. Sabe-se que após o período de garantia, o método proposto tem uma forte influência da opinião dos especialistas. Já na extrapolação da curva dos dados de garantia, é pequena a confiança na curva para valores superiores a 654 horas, sendo menos confiáveis à medida que a curva avança no eixo do tempo. Extrapolações deste tipo não são confiáveis, pois acima de 654 horas a curva depende exclusivamente dos dados censurados. Ambos os gráficos podem ser vistos na Figura 23.

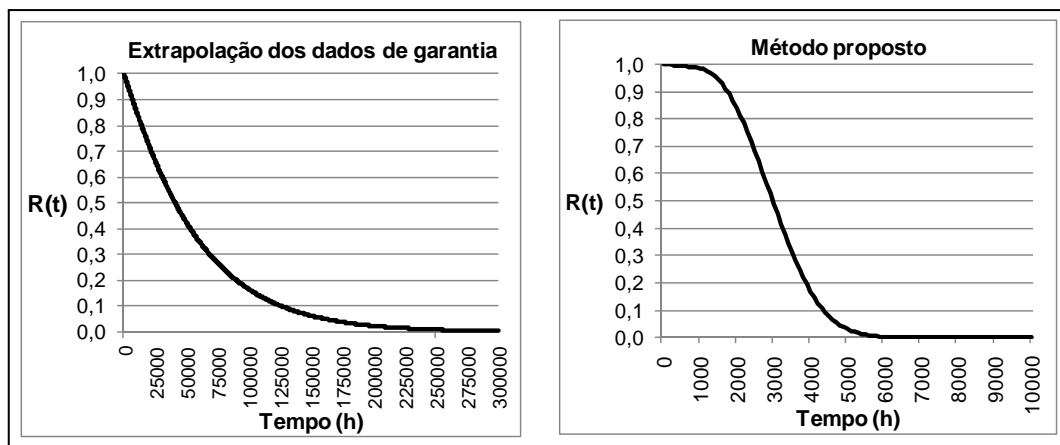


Figura 23 – Comparativo da curva da confiabilidade do componente GZ utilizando a extrapolação dos dados de garantia e o método proposto

Fonte: Elaborado pelo autor

Em análise aos gráficos da Figura 23, verifica-se na extrapolação dos dados de garantia que o ponto em que a curva se aproxima do eixo horizontal (t) é de cerca de 300.000 horas para a confiabilidade próxima a zero. Devido à elevada censura, este valor é extremamente alto e fora do padrão para a durabilidade destes componentes. Já no gráfico que representa o método proposto, o valor é de aproximadamente 6.000 horas, o que segundo alguns especialistas, consiste em um valor aceitável e próximo a realidade.

De uma forma geral, a aplicação do método no estudo de caso apresentou-se viável e trouxe bons resultados. Conclui-se que o estudo de caso apresenta resultados mais eficientes que a simples extrapolação dos dados de garantia. Uma alternativa seria utilizar somente a opinião dos especialistas, porém seria difícil mensurar as falhas prematuras. Observa-se também, que o método pode ser utilizado parcialmente, como na análise dos componentes ou do subsistema ABCZ.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

5.1 Conclusões

As empresas de diversos segmentos têm apresentado uma crescente procura pela melhoria da qualidade de seus produtos para atender às necessidades de seus clientes e gerar lucros. Para melhoria da qualidade, o acompanhamento do desempenho do produto e sua confiabilidade no decorrer do tempo se tornam essenciais. Para isto, é de suma importância que as empresas possuam uma forma rápida e de baixo custo para medir e acompanhar a confiabilidade de seus produtos.

O presente trabalho apresenta um método para modelar a confiabilidade do produto em sua vida útil total, utilizando recursos de baixo custo, como dados de garantia e opinião de especialistas, disponíveis na empresa. Este método é aplicado em um estudo de caso de um sistema e seus componentes, de certo equipamento agrícola.

Em relação ao método proposto, destaca-se a utilização de dados simples e de fácil obtenção. Quanto aos dados de garantia, é um registro muito comum para os fabricantes de produtos, onde a venda é direta ao consumidor final. Quanto à utilização dos especialistas, representa o aproveitamento do recurso intelectual da empresa. Esta facilidade de obtenção de dados, junto com a característica de unir dados quantitativos com dados qualitativos, dão consistência e credibilidade ao método proposto.

Em comparação do método proposto com a simples extrapolação dos dados de garantia (outro método que utiliza dados de fácil obtenção), o método proposto mostrou-se mais realista. Isto pôde ser verificado, comparando-se os valores da vida útil total dos componentes obtidos nos dois métodos, e analisando os resultados junto aos especialistas. Outros métodos clássicos para modelagem de confiabilidade buscam fontes de dados de bancada e testes de campo. Estes métodos geralmente apresentam bons resultados, mas com a desvantagem de elevado custo para obtenção de dados.

Outra característica do método proposto refere-se à flexibilidade, pois pode ser aplicado tanto para um componente individual, como para um sistema ou produto formado de vários componentes. Desta forma, o método pode ser utilizado para diferentes abordagens. Uma delas seria aplicá-la somente a um componente, com um maior detalhamento na parte qualitativa. Segue-se neste caso, a elaboração de um questionário mais detalhado, que resultaria em uma maior quantidade de pontos para formar a parte final da curva da confiabilidade.

Sobre as etapas do método, podem ser feitos alguns comentários. A etapa da entrevista diagnóstica apresentou um retorno positivo sobre os pontos a serem melhorados e incorporados no questionário. Grande parte das sugestões obtidas nesta etapa foi contemplada no questionário. Ressalta-se também, a importância das etapas de avaliação das etapas quantitativa e qualitativa. Com elas tornou-se possível para a pessoa que aplica o método, avaliar os resultados e estudar com maior detalhe algum componente com comportamento fora do esperado. Isto pode funcionar como um marco, para somente seguir adiante no método quando houver confiança e completo entendimento dos resultados.

Na etapa qualitativa, o método Delphi mostrou-se eficiente na obtenção de consenso dos especialistas. No estudo de caso, o consenso maior que 70% pôde ser alcançado após apenas três rodadas, para quase a totalidade dos componentes. Isto também está relacionado à utilização de poucas pessoas e com bom conhecimento do assunto. Além do rápido consenso, isto proporcionou baixa abstenção dos participantes e boa qualidade de informação.

Já na etapa quantitativa, verifica-se que a distribuição de Weibull de dois parâmetros funcionou de forma adequada para os componentes do estudo de caso. Como resultados desta etapa obtiveram-se valores de β_1 dos componentes entre 0,6716 e 2,1353 (com exceção do componente HZ, que $\beta_1 = 0,3800$). Isto mostra um alinhamento com a literatura, que informa que valores do parâmetro de forma tipicamente estão entre 0,5 e 8,0 (DODSON e NOLAN, 1999).

A união da etapa quantitativa com a etapa qualitativa representa um ponto crucial para este método. Identificou-se uma oportunidade de melhoria neste ponto, pela transição ter sido feita de forma abrupta para muitos componentes, reduzindo a confiança dos resultados próximo a este ponto. O comportamento de curvas de confiabilidade com variações deste tipo (abruptas) não foi encontrado em métodos similares na literatura. Mesmo com a oportunidade de melhoria, conclui-se que o método cumpriu sua função nesta etapa, pois esta união foi possível para todos os componentes sem apresentar problemas.

Após análise sobre o desenvolvimento do método proposto e sua aplicação no equipamento em estudo, os seguintes objetivos foram atingidos: a elaboração de um método para a análise de vida útil de componentes e sistemas; a análise do comportamento de falhas de um sistema e seus componentes. Para o sistema analisado, representa o entendimento dos componentes críticos em diferentes momentos de sua vida útil. Desta forma, o estudo possibilitou evidenciar dados para se trabalhar na melhoria da qualidade do produto e ter clientes mais satisfeitos.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se como complemento a este trabalho uma comprovação prática dos resultados modelados no método proposto. Isto pode ser feito ao comparar estes resultados, a resultados obtidos em testes de bancada ou campo. Para isto, torna-se necessário um considerável investimento de tempo e financeiro, para obter resultados práticos de campo, que sejam estatisticamente representativos. Com este comparativo, tornar-se-ia possível verificar se resultados obtidos com a utilização deste método seriam próximos da confiabilidade real, principalmente na parcela atribuída às informações obtidas dos especialistas.

Para as etapas que compõe o método, também podem ser feitas sugestões para trabalhos futuros. Na etapa qualitativa, sugere-se uma busca por aprimoramento do método, para que se torne possível ajustar diferentes tipos de distribuições, não restringindo somente a distribuição de Weibull de dois parâmetros. Isto tornaria o método mais abrangente, mas em contrapartida, associa-se o risco de aumentar a complexidade do método, ou distorcer os resultados. Na etapa qualitativa, pode se realizar a coleta de dados dos especialistas utilizando-se métodos diferentes do Delphi. Por exemplo, poderia ser utilizado o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) para sistematizar a opinião dos especialistas.

Outro ponto que pode ser mais bem explorado no método representa o ponto de transição entre a etapa quantitativa e a etapa qualitativa. Por constatar-se que esta transição ocorreu de forma abrupta para a grande maioria dos componentes, sugere-se um estudo para aprimoramento desta região. Isto traria uma maior confiança nos resultados próximos a este ponto.

Quanto à aplicação do método, sugere-se utilizá-lo em outras áreas, fora do ramo de máquinas agrícolas. Para isto, o método necessitaria de adaptações, as quais iriam contribuir para o aprimoramento do método.

Outra oportunidade para trabalhos futuros seria adicionar análise de custos ao método. Pode-se verificar, por exemplo, a viabilidade de se estender o período de garantia do fabricante para um determinado produto. Com isto, resultaria em uma oportunidade para incremento de vendas, mas também um aumento nos pedidos de garantia. Caberia ao fabricante analisar a viabilidade desta proposta.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, António; CARVALHO, Paulo S.; ESCÁRIA, Susana C. Delphi – Método e Aplicações. *Departamento de Prospectiva e Planeamento e Relações Internacionais*, Lisboa, Portugal: Divisão de Informação e Comunicação, n.5, set. 2007. Disponível em: <<http://www.dpp.pt>>. Acesso em: 25 maio 2008.

AMOS, Trevor; PEARSE, Noel. Pragmatic Research Design: an Illustration of the Use of the Delphi Technique. *Electronic Journal of Business Research Methods*, Rhodes University, Grahamstown, South Africa., v. 6, p. 95-102, 2008.

ANFAVEA. *Estatísticas: Máquinas Agrícolas Automotizes*. Banco de dados. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br>>. Acesso em: ago. 2009.

ATTARDI, Laura; GUIDA, Maurizio; PULICINI, Gianpaolo. A mixed-Weibull regression model for the analysis of automotive warranty data. *Reliability Engineering & System Safety*, Italy, n. 87, p. 265-273, May 2004.

BUCKLEY, Chris. Delphi: A methodology for preferences more than predictions. *Library Management*. University of New England at Amidale, New South Wales, Australia, v. 16, n. 7, p.16-19, 1995.

BURGUESS, J. A. Improving Product Reliability. *Quality Progress*, [S.l.], p.47-54, Dec. 1987.

CARDOSO, Luiz R. de A. ; ABIKO, A. K. ; HAGA, H. C. R.; INOUE, K. P.; GONÇALVES, Orestes M. Prospecção de future e Método Delphi: uma aplicação para a cadeia produtiva da construção habitacional. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 63-78, jul.-set. 2005.

CARY, J. W.; SALMON, P. W. *Delphi and Participatory Planning: Focusing the Planning Process in an Agricultural Service Organization*. Melbourne: University of Melbourne, 1976.

CASTRO, A. M. G.; LIMA, S. M. V. *Curso de capacitação de equipes para estudos prospectivos de cadeias produtivas industriais*. MDIC/STI, 2001.

CHAN, V.; MEEKER, W. A failure-time model for infant-mortality and wearout failure modes. *IEEE Transactions on Reliability*, [S.l.], v. 48, n. 4, p. 377-387, 1999.

DALKEY, Norman; HELMER, Olaf. An Experimental Application of the Delphi Method to the use of Experts. *Management Science*, Santa Monica, California, v. 9, p 458-467, 1963.

DALRYMPLE, D.J.; PARSONS, L. *Marketing Management*. New York: John Wiley & Sons, 1976.

DEZIN, N. K.; LINCOLN, Y. S. *Handbook of Quality Research*. 2. ed., London: Sage, 2000.

DODSON, B.; NOLAN, D. *Reliability Engineering Handbook*. New York, New York: Marcel Dekker; Tucson, Arizona: Quality Publishing, 1999.

DOGANAKSOY, Necip; HAHN, Gerald J.; MEEKER, Willian Q. Statistics Roundtable: Improving Reliability Through Warranty Data Analysis. *Quality Progress*, [S.l.], v.39, n.11, p.63-67, 2006a.

DOGANAKSOY, Necip; HAHN, Gerald J.; MEEKER, Willian Q. How to Analyze Reliability Data For Repairable Products. *Quality Progress*, [S.l.], v. 39, n. 06, p. 93-95, 2006b.

DOGANAKSOY, Necip; HAHN, Gerald J.; MEEKER, Willian Q. Reliability Analyzis By Failure Mode. *Quality Progress*, [S.l.], v. 35, n. 06, p. 47-52, jun. 2002.

DROGUETT, Enrique López. Análise Bayesiana da Confiabilidade de Produtos em desenvolvimento. *Revista Gestão & Produção*, São Carlos, SP, v. 13, n. 1, p. 57-69, jan.-abr. 2006.

EDMUNDS, H. *The Focus Group Research Handbook*. United States of America: American Marketing Association and NTC, 1999.

ELSAYED, E. A. *Reliability Engineering*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1996.

ELSAYED, E. A. *System Reliability Engineering*. Rutgers Univerity, Piscataway, NJ, USA: [s.n.], Lecture notes 1, 1992.

ESTES, G. M.; KUESPERT, D. Delphi in industrial forecasting. *Chemical and Engineering News*, EUA, v. 54, p. 40-47, Aug. 1976.

FALCETTA, Eduardo Fiorin. *Análise da Confiabilidade de Produtos baseada em Dados de Utilização da Garantia*. 2000. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)– Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

FAUCHER, Jean-Baptiste; EVERETT, André M; LAWSON, Rob. *Applying a modified Delphi approach to determine the current state of the concept of knowledge*. Dunedin, New Zealand: University of Otago, 2008.

FERREIRA, J. L. A.; BALTHAZAR, J. C.; ARAUJO, A. P. N. An investigation of rail bearing reliability under real conditions of use. *Engineering Failure Analysis*, Brasilia, Brazil, n. 10, p. 745-758, jun. 2002.

FREITAS, Marta. A.; COLOSIMO, Enrico A. *Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados*. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni - UFMG, 1997.

GIOVINAZZO, Renata A.; FISCHMANN, Adalberto A. *Delphi Eletrônico – Uma Experiência de Utilização da Metodologia de Pesquisa e seu Potencial de Abrangência Regional*. Buenos Aires, Argentina: [s.n.], 2001.

GIOVINAZZO, R. A. . Modelo de aplicação de metodologia Delphi pela internet: vantagens e ressalvas. *Administração On Line*, [São Paulo], v.2, n.2, p.1-7, abr.-jun. 2001. Disponível em: <http://www.fecap.br/adm_online/art22/renata.htm> Acesso em: 23 set. 2009.

GOEL, P. S.; SINGH, N. A framework for integrating quality, reliability, and durability in product design with life-cycle cost considerations. *Quality Engineering*, Philadelphia, Pennsylvania, United States of America, v. 10, n. 2, p. 267-281, 1998.

GOLDSCHMIDT, P.G. *Scientific inquiry or political critique?* Technological Forecasting and Social Change, v.7, Lexington, MA: Jessica Kingsley, p. 195-213, 1975.

GRAHAM, Brent; REGEHR, Glenn; WRIGHT, James G. Delphi as a method to establish consensus for diagnostic criteria. *Journal of Clinical Epidemiology*, Toronto, Canada, v. 56, p. 1150–1156, 2003.

GRISI, C. C. H.; BRITTO, R. P. Técnica de Cenários e o Método Delphi: uma aplicação para o ambiente brasileiro. In: SEMEAD - SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO, 6., 2003, FEA-USP, São Paulo. *Anais...* São Paulo: [s.n.], jul. 2003, Disponível em <<http://www.ead.fea.usp.br/Semead/6semead/MKT.htm>>. Acesso em: 21 setembro 2009.

GRODZENSKII, S. Ya; DOMRACHEV, V. G. Estimation of the parameters of a mixture of Exponential and Weibull distributions with progressive censoring. *Measurement Techniques*, [Russia], v. 45, n.11, p.10-12, 2002. Tradução de: Izmeritel'naya Tekhnika.

GUTIÉRREZ-PULIDO, Humberto; AGUIRRE-TORRES, Víctor; CHRISTEN, J. A. A Bayesian Approach for the Determination for Warranty Length. *Journal of Quality Technology*, Milwaukee, WI, USA, v. 38, n.2, p. 180-189, Apr. 2006.

- GREENBAUM, T. L. *Moderating Focus Groups*. USA: Sage Publications, 2000.
- HSU, Chia-Chien; SANDFORD, Brian A. The Delphi Technique: Making Sense of Consensus. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, Ohio, USA, v. 12, n. 10, p. 1-8, Aug. 2007.
- HALPERN, S. *The Assurance Sciences: An Introduction To Quality Control And Reliability*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1978.
- HILL, V. L.; BEALL, C.W.; BLISCHKE, W. R. A simulation model for warranty analysis. *International Journal of Production Economics*, [S.l.], v. 32, p. 131-140, 1991.
- JIANG, R.; MURTHY, D. N. P. Reliability modeling involving two Weibull distributions. *Reliability Engineering and System Safety*, The University of Queensland, St. Lucia, Australia., v. 47, p. 187-198, 1995.
- JIANG, R.; MURTHY, D. N. P. Parametric study of multiplicative model involving two Weibull distributions. *Reliability Engineering and System Safety*, The University of Queensland, St. Lucia, Australia v. 55, p. 217-226, 1997.
- KLEYNER, André; SANDBORN, Peter. A warranty forecasting model base don piecewise statistical distributions and stochastic simulation. *Reliability Engineering & System Safety*, [S.l.], v. 88, p. 207-214, Sep. 2004.
- KUMAR, P.; GAINDHAR, J. L. Reliability Analysis of an Automotive Transmission System. *Microelectronics Reliability*, [S.l.], v.36, n.1, p.97-100, 1996.
- KUMAR, D. U.; CROCKER, J.; CHITRA, T; SARANGA, H. *Reliability and Six Sigma*, New York, USA: Springer, 2006.
- LEMES, Danielli V. *Proposta de método de análise de confiabilidade de sistemas eletrônicos empregando dados de retorno em garantia*. 2006. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)—Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- LINDEN, Júlio C. de S. van; GUIMARÃES, Lia B. de. M. O conceito de conforto a partir da opinião de especialistas. In: ANAIS DO P&D, 6., 2004, São Paulo. *Anais...* Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. p.2.
- MAANEN, John, V. Reclaiming qualitative methods for organizational research: a preface. *Administrative Science Quarterly*, [S.l.], v. 24, n. 4, Dec. 1979.

MAJESKE, K. D. A mixture model for automobile warranty data. *Reliability Engineering and System Safety*, [S.l.], v. 81, p. 265-273, 2003.

MARTINO, J. P. *Technological forecasting for decision making*. 3th ed. New York: Mc Graw-Hill, 1993.

MORICOCCHI, Luiz; PINO, Francisco, A.; VEGRO, Celso, L.R. Método Delphi como alternativa para previsão de safras: O exemplo do café. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 25, n. 12, p. 47-52, dez. 1995.

MULLEN, Penelope M. Delphi: myths and reality. *Journal of Health Organization and Management*, Birmingham, UK, v.17, n.1, 2003.

NAIR, V.N.; TANG, B.; XU, L. Bayesian inference for some mixture problems in quality and reliability. *Journal of Quality Technology*, [S.l.], v. 33, p. 16-28, 2001.

NELSON, W. B. *Accelerated Testing - Statistical Models, Test Plans and Data Analysis*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

NEVES, J. L. *Pesquisa Qualitativa - Características, Usos e Possibilidades*. v.1, n. 3. Caderno de Pesquisas em Administração, São Paulo: FEA-USP, 1996.

OLIVEIRA, Luiz; BARDY, Mariana; SIMÕES FILHO, Salvador; NEVES, Edilnei. Análise de confiabilidade do sistema de bombeio centrífugo das plataformas do pólo nordeste da bacia dos campos. *Boletim Técnico Petrobrás*, Rio de Janeiro, n. 42, p.1-8, jan.-dez. 1999.

RIBEIRO, José Luis Duarte ; MILAN, G. S. *Entrevistas individuais: teoria e aplicações*. 2. ed. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2007.

RIBEIRO, José Luis Duarte. *Definição de parâmetros das distribuições Weibull para componentes elétricos e mecânicos*. Notas de Aula, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, abr. 2008.

SANTOS, Aguinaldo dos; VIDOTTO, Lisiane S.; GIUBLIN, Carlos R. A utilização do método Delphi em pesquisas na área da gestão da construção. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 5, n. 2, p. 51-59, abr.-jun. 2005.

SANTOS, Gilberto Tavares dos. *Modelo de confiabilidade associando dados de garantia e Pós-garantia a três comportamentos de falhas*. 2008. 169f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)– Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SILVA, S. C. *Alternativas para a previsão de demanda de gás natural: Um estudo orientado ao estado do Rio Grande do Sul*. 2003. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)– Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SHARKEY, Siobhan B.; SHARPLES, Ann Y. An approach to consensus building using the Delphi technique: developing a learning resource in mental health. *Nurse Education Today*, [S.l.], v. 21, p. 398–408, 2001.

SHIGLEY, J. E. *Mechanical Engineering Design*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

WATSON, Tom. Public relations research priorities: a Delphi study. *Journal of Communication Managemet*, Dorset, UK. v. 12, n. 2, p. 104-123, 2008.

WERNER, Liane. *Modelagem dos tempos de falhas ao longo do calendário*. 1996. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)– Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

WERNER, Liane. *Um modelo composto para realizar previsão de demanda através da integração da combinação de previsões e do ajuste baseado na opinião*. 2004. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)– Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

WOO, Seong-woo; PECHT, Michael. Failure analysis and redesign of a helix upper dispenser. *Engineering Failure Analysis*, New York, USA, n. 15, p. 642-653, Oct. 2007.

WRIGHT, James T. C.; GIOVINAZZO, Renata A. Delphi – Uma ferramenta de apoio ao planejamento prospectivo. *Caderno de pesquisas em Administração*, São Paulo, v. 01, n. 12, p. 54-65, 2. trim. 2000.

YADAV, Om Prakash; SINGH, Nanua; GOEL, Parveen S. Reliability demonstration test planning: A three dimensional consideration. *Reliability Engineering and System Safety*, [S.l.], n. 91, p.882-893, nov. 2006.

ZAGO, Gilberto. Anfavea - Retorno ao equilíbrio. *Revista Siderurgia Brasil*, São Paulo, ed. 35, mai. 2007. Disponível em: < <http://www.siderurgiabrasil.com.br/novosb/edicoes-anteriores/455-retorno-ao-equilibrio>>. Acesso em: 20 abr. 2008.

APÊNDICE A – Coleta de dados dos componentes

Componente AZ							
Componentes AZ que falharam em garantia: 79							
item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)
1	15	21	206	41	332	61	471
2	19	22	212	42	349	62	473
3	53	23	225	43	350	63	480
4	84	24	228	44	356	64	484
5	94	25	235	45	361	65	490
6	96	26	239	46	393	66	496
7	102	27	240	47	395	67	498
8	105	28	242	48	400	68	502
9	150	29	246	49	411	69	503
10	151	30	252	50	415	70	508
11	155	31	259	51	420	71	512
12	161	32	260	52	423	72	517
13	171	33	285	53	435	73	525
14	171	34	288	54	450	74	536
15	175	35	301	55	452	75	536
16	177	36	303	56	454	76	546
17	180	37	307	57	455	77	549
18	197	38	315	58	457	78	568
19	198	39	318	59	468	79	600
20	202	40	322	60	468		
Componentes AZ que não falharam em garantia: 5077							
total de itens que não falharam (un)				tempo da censura (h)			
5077				654			

Coleta de dados do componente AZ

APÊNDICE A – Coleta de dados dos componentes

Componente BZ

Componentes BZ que falharam em garantia: 95

item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)
1	15	25	206	49	340	73	480
2	19	26	212	50	349	74	484
3	30	27	225	51	350	75	486
4	53	28	228	52	356	76	487
5	84	29	235	53	390	77	490
6	94	30	239	54	393	78	492
7	96	31	240	55	395	79	496
8	102	32	242	56	400	80	498
9	105	33	246	57	411	81	503
10	109	34	250	58	415	82	507
11	142	35	252	59	420	83	508
12	150	36	259	60	423	84	512
13	151	37	260	61	435	85	525
14	155	38	271	62	439	86	525
15	156	39	285	63	450	87	529
16	161	40	288	64	452	88	536
17	170	41	301	65	452	89	536
18	171	42	303	66	454	90	546
19	172	43	307	67	455	91	549
20	175	44	315	68	457	92	554
21	177	45	318	69	468	93	554
22	186	46	322	70	471	94	568
23	197	47	332	71	473	95	590
24	202	48	337	72	480		

Componentes BZ que não falharam em garantia: 5061

total de itens que não falharam (un)	tempo da censura (h)
5061	654

Coleta de dados do componente BZ

APÊNDICE A – Coleta de dados dos componentes

Componente CZ							
Componentes CZ que falharam em garantia: 68							
item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)
1	15	18	228	35	349	52	473
2	30	19	240	36	350	53	480
3	53	20	242	37	351	54	484
4	84	21	259	38	392	55	491
5	96	22	269	39	393	56	496
6	105	23	272	40	395	57	498
7	109	24	273	41	400	58	502
8	150	25	277	42	411	59	503
9	151	26	285	43	415	60	507
10	171	27	286	44	420	61	512
11	177	28	288	45	423	62	517
12	180	29	301	46	444	63	525
13	197	30	307	47	452	64	536
14	206	31	315	48	453	65	546
15	212	32	318	49	455	66	549
16	225	33	325	50	468	67	589
17	225	34	340	51	471	68	600
Componentes CZ que não falharam em garantia: 5088							
total de itens que não falharam (un)				tempo da censura (h)			
5088				654			

Coleta de dados do componente CZ

APÊNDICE A – Coleta de dados dos componentes

Componente DZ							
Componentes DZ que falharam em garantia: 79							
item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)
1	1	21	100	41	268	61	417
2	1	22	112	42	270	62	418
3	5	23	122	43	274	63	425
4	6	24	130	44	282	64	450
5	6	25	133	45	290	65	465
6	12	26	162	46	294	66	513
7	15	27	170	47	303	67	524
8	20	28	178	48	320	68	534
9	22	29	179	49	323	69	540
10	34	30	193	50	345	70	542
11	39	31	196	51	351	71	545
12	48	32	197	52	352	72	556
13	56	33	200	53	352	73	582
14	60	34	201	54	365	74	585
15	62	35	209	55	367	75	594
16	69	36	210	56	375	76	600
17	72	37	220	57	393	77	600
18	83	38	247	58	400	78	613
19	96	39	250	59	410	79	656
20	99	40	267	60	416		
Componentes DZ que não falharam em garantia: 5077							
total de itens que não falharam (un)				tempo da censura (h)			
5077				654			

Coleta de dados do componente DZ

APÊNDICE A – Coleta de dados dos componentes

Componente EZ							
Componentes EZ que falharam em garantia: 27							
item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)
1	40	8	356	15	398	22	465
2	105	9	364	16	398	23	473
3	120	10	368	17	398	24	537
4	133	11	369	18	417	25	589
5	252	12	376	19	435	26	590
6	283	13	380	20	450	27	647
7	352	14	383	21	454		
Componentes EZ que não falharam em garantia: 5129							
total de itens que não falharam (un)				tempo da censura (h)			
5129				654			

Coleta de dados do componente EZ

APÊNDICE A – Coleta de dados dos componentes

Componente FZ							
Componentes FZ que falharam em garantia: 106							
item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)
1	1	28	298	55	416	82	513
2	1	29	299	56	416	83	518
3	15	30	300	57	421	84	518
4	33	31	300	58	426	85	522
5	40	32	310	59	432	86	523
6	44	33	311	60	441	87	525
7	45	34	312	61	441	88	535
8	76	35	320	62	448	89	550
9	79	36	340	63	448	90	550
10	82	37	340	64	450	91	550
11	95	38	341	65	450	92	553
12	104	39	345	66	450	93	562
13	115	40	352	67	465	94	565
14	127	41	365	68	473	95	579
15	200	42	368	69	478	96	580
16	215	43	373	70	480	97	584
17	232	44	375	71	480	98	585
18	245	45	381	72	481	99	588
19	247	46	381	73	486	100	593
20	254	47	394	74	486	101	594
21	270	48	398	75	491	102	595
22	280	49	400	76	499	103	600
23	281	50	402	77	501	104	600
24	283	51	407	78	503	105	600
25	289	52	407	79	503	106	600
26	296	53	407	80	509		
27	296	54	408	81	512		
Componentes FZ que não falharam em garantia: 5050							
total de itens que não falharam (un)				tempo da censura (h)			
5050				654			

Coleta de dados do componente FZ

APÊNDICE A – Coleta de dados dos componentes

Componente GZ

Componentes GZ que falharam em garantia: 51

item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)
1	7	14	292	27	448	40	560
2	11	15	292	28	461	41	565
3	64	16	302	29	467	42	570
4	75	17	323	30	476	43	574
5	154	18	337	31	477	44	575
6	156	19	339	32	500	45	585
7	175	20	340	33	501	46	586
8	180	21	350	34	502	47	598
9	192	22	400	35	549	48	600
10	196	23	409	36	549	49	620
11	203	24	420	37	553	50	647
12	229	25	422	38	556	51	714
13	243	26	425	39	558		

Componentes GZ que não falharam em garantia: 5105

total de itens que não falharam (un)	tempo da censura (h)
5105	654

Coleta de dados do componente GZ

Componente HZ

Componentes HZ que falharam em garantia: 19

item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)
1	1	6	22	11	201	16	531
2	1	7	50	12	369	17	553
3	1	8	69	13	420	18	568
4	3	9	113	14	450	19	609
5	4	10	155	15	511		

Componentes HZ que não falharam em garantia: 5137

total de itens que não falharam (un)	tempo da censura (h)
5137	654

Coleta de dados do componente HZ

APÊNDICE A – Coleta de dados dos componentes

Componente IZ							
Componentes IZ que falharam em garantia: 86							
item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)
1	65	23	237	45	373	67	501
2	96	24	247	46	382	68	505
3	117	25	250	47	384	69	508
4	135	26	265	48	387	70	512
5	140	27	280	49	387	71	518
6	148	28	284	50	389	72	521
7	151	29	287	51	390	73	540
8	152	30	289	52	392	74	548
9	155	31	291	53	393	75	555
10	162	32	294	54	398	76	560
11	170	33	305	55	405	77	562
12	177	34	312	56	408	78	568
13	179	35	321	57	417	79	587
14	182	36	325	58	418	80	591
15	199	37	326	59	428	81	592
16	201	38	343	60	439	82	598
17	206	39	344	61	439	83	599
18	220	40	352	62	452	84	600
19	229	41	357	63	455	85	600
20	229	42	365	64	457	86	613
21	230	43	365	65	465		
22	231	44	370	66	472		
Componentes IZ que não falharam em garantia: 5070							
total de itens que não falharam (un)				tempo da censura (h)			
5070				654			

Coleta de dados do componente IZ

APÊNDICE A – Coleta de dados dos componentes

Componente JZ

Componentes JZ que falharam em garantia: 2

item (un)	tempo da falha(h)
1	380
2	575

Componentes JZ que não falharam em garantia: 5154

total de itens que não falharam (un)	tempo da censura (h)
5154	654

Coleta de dados do componente JZ

APÊNDICE A – Coleta de dados dos componentes

Componente KZ							
Componentes KZ que falharam em garantia: 119							
item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)
1	8	31	214	61	303	91	437
2	10	32	216	62	303	92	449
3	36	33	223	63	311	93	452
4	48	34	226	64	312	94	461
5	59	35	227	65	316	95	463
6	60	36	228	66	330	96	468
7	99	37	231	67	338	97	472
8	110	38	233	68	339	98	482
9	120	39	234	69	345	99	485
10	125	40	237	70	346	100	486
11	133	41	246	71	353	101	487
12	137	42	249	72	365	102	491
13	145	43	250	73	370	103	499
14	148	44	250	74	370	104	502
15	150	45	250	75	374	105	507
16	152	46	253	76	375	106	514
17	158	47	261	77	375	107	519
18	160	48	263	78	378	108	523
19	167	49	264	79	379	109	529
20	180	50	265	80	393	110	549
21	180	51	265	81	402	111	551
22	180	52	267	82	405	112	560
23	189	53	268	83	407	113	568
24	192	54	270	84	410	114	579
25	193	55	271	85	415	115	583
26	193	56	279	86	415	116	584
27	196	57	280	87	425	117	590
28	204	58	284	88	427	118	591
29	205	59	290	89	428	119	600
30	211	60	295	90	430		

Componentes KZ que não falharam em garantia: 5037	
total de itens que não falharam (un)	tempo da censura (h)
5037	654

Coleta de dados do componente KZ

APÊNDICE A – Coleta de dados dos componentes

Componente LZ							
Componentes LZ que falharam em garantia: 23							
item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)
1	5	7	291	13	388	19	488
2	63	8	318	14	392	20	580
3	94	9	321	15	421	21	589
4	123	10	327	16	430	22	595
5	274	11	333	17	455	23	599
6	285	12	380	18	465		
Componentes LZ que não falharam em garantia: 5077							
total de itens que não falharam (un)				tempo da censura (h)			
5133				654			

Coleta de dados do componente LZ

APÊNDICE A – Coleta de dados dos componentes

Componente MZ

Componentes MZ que falharam em garantia: 7

item (un)	tempo da falha(h)
1	10
2	53
3	178
4	180
5	191
6	192
7	405

Componentes MZ que não falharam em garantia: 5154

total de itens que não falharam (un)	tempo da censura (h)
5149	654

Coleta de dados do componente MZ

Componente NZ

Componentes NZ que falharam em garantia: 2

item (un)	tempo da falha(h)
1	197
2	554

Componentes NZ que não falharam em garantia: 5154

total de itens que não falharam (un)	tempo da censura (h)
5154	654

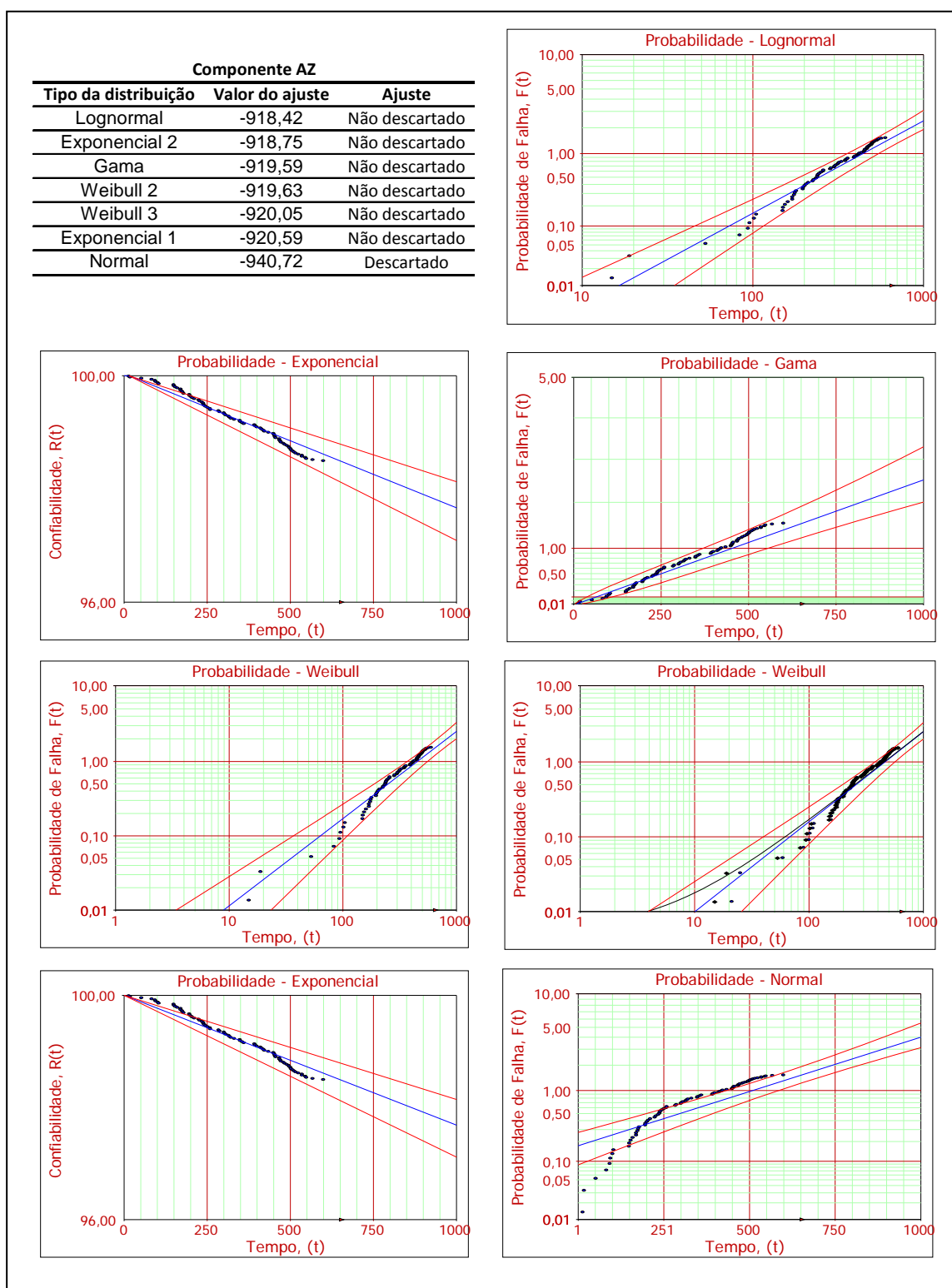
Coleta de dados do componente NZ

APÊNDICE A – Coleta de dados dos componentes

Componente OZ							
Componentes OZ que falharam em garantia: 115							
item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)	item (un)	tempo da falha(h)
1	1	30	95	59	189	88	345
2	2	31	99	60	195	89	360
3	3	32	100	61	196	90	362
4	3	33	101	62	197	91	363
5	3	34	104	63	198	92	366
6	7	35	106	64	216	93	367
7	9	36	110	65	221	94	368
8	15	37	116	66	230	95	374
9	19	38	117	67	236	96	380
10	20	39	119	68	248	97	384
11	25	40	120	69	248	98	395
12	27	41	123	70	250	99	404
13	29	42	124	71	250	100	411
14	31	43	130	72	258	101	415
15	35	44	133	73	260	102	437
16	35	45	135	74	265	103	450
17	39	46	135	75	291	104	460
18	41	47	139	76	292	105	477
19	44	48	149	77	299	106	496
20	56	49	156	78	305	107	502
21	63	50	160	79	306	108	513
22	67	51	170	80	315	109	517
23	82	52	174	81	318	110	539
24	82	53	180	82	320	111	554
25	86	54	180	83	328	112	580
26	87	55	182	84	331	113	586
27	92	56	185	85	333	114	596
28	95	57	189	86	343	115	600
29	95	58	189	87	343		
Componentes OZ que não falharam em garantia: 5041							
total de itens que não falharam (un)				tempo da censura (h)			
5041				654			

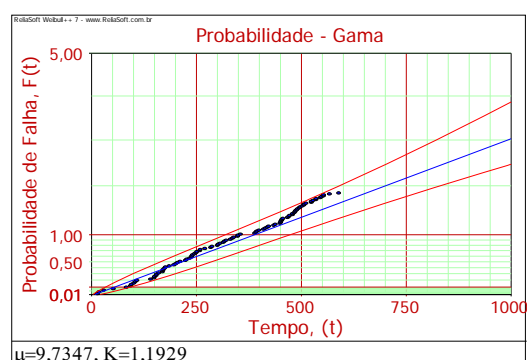
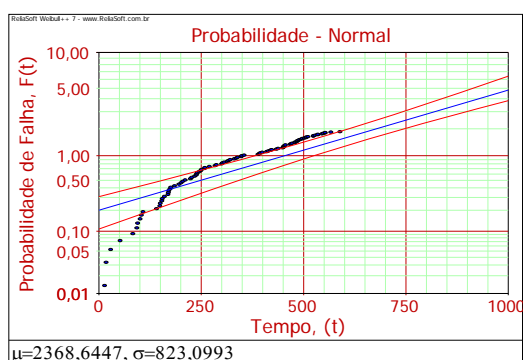
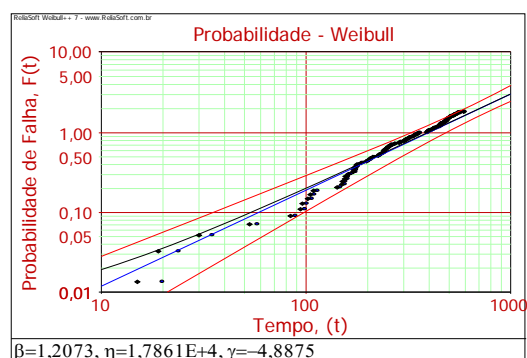
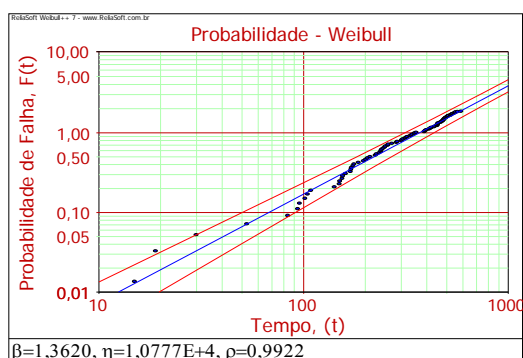
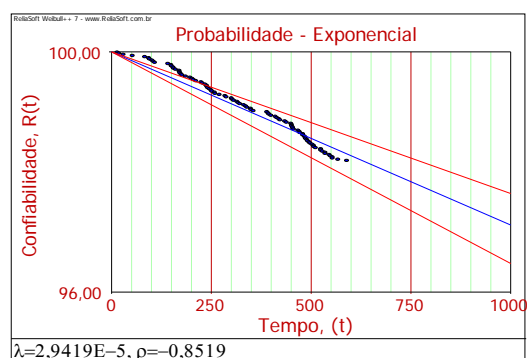
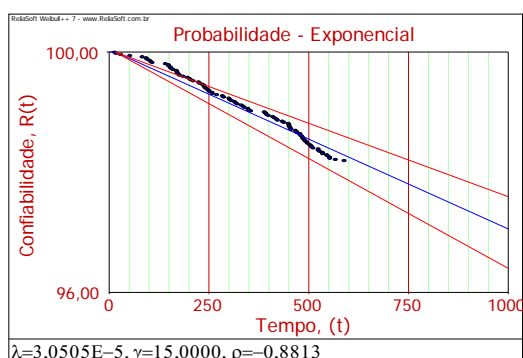
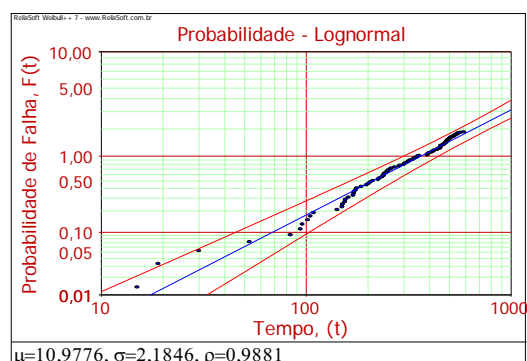
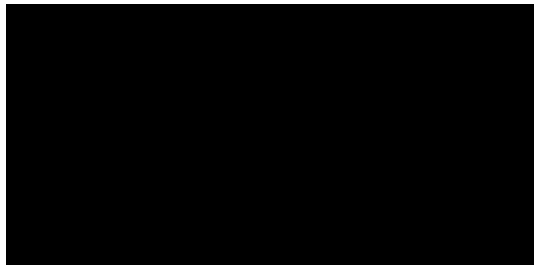
Coleta de dados do componente OZ

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



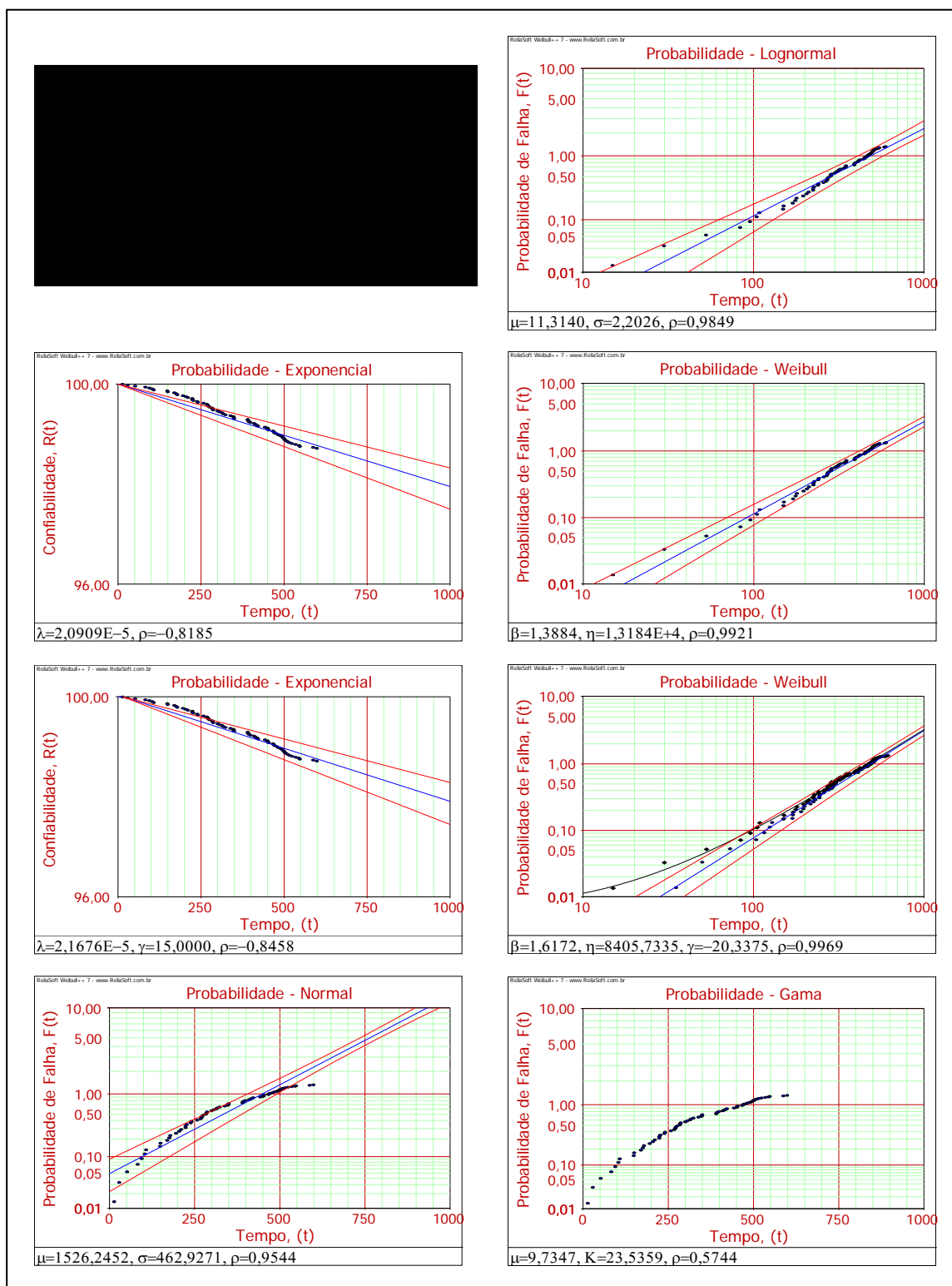
Verificação de ajuste do componente AZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



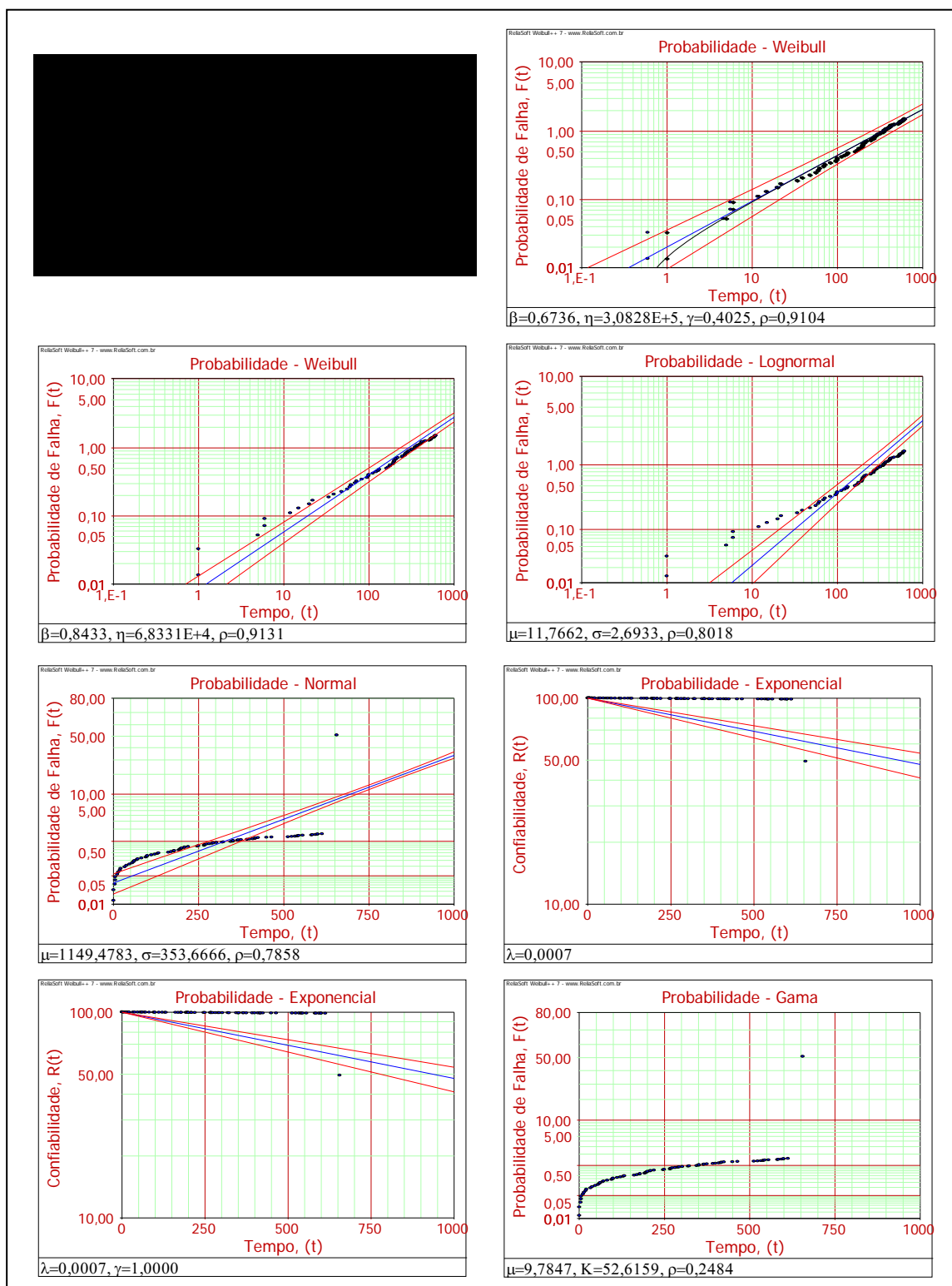
Verificação de ajuste do componente BZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



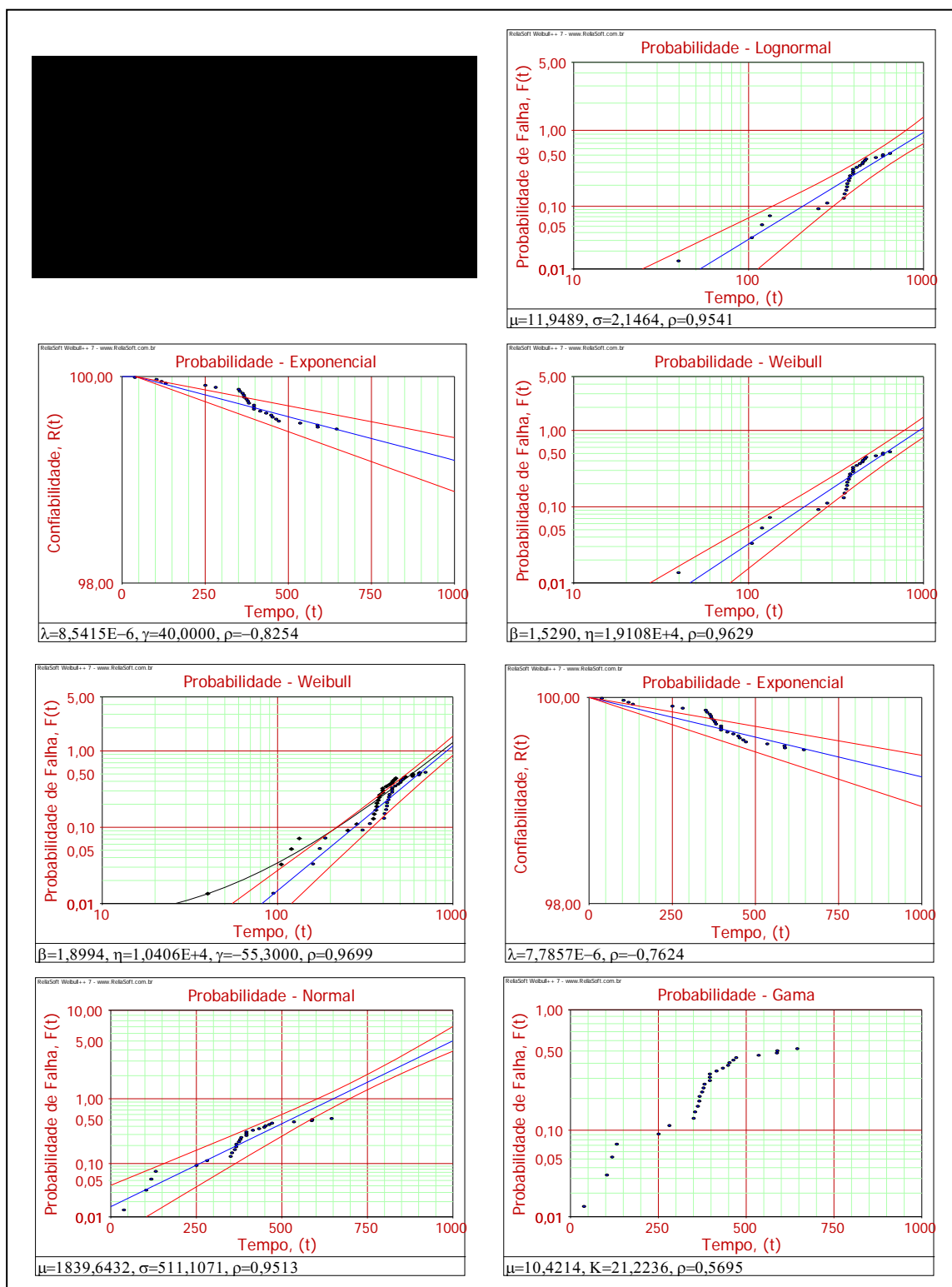
Verificação de ajuste do componente CZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



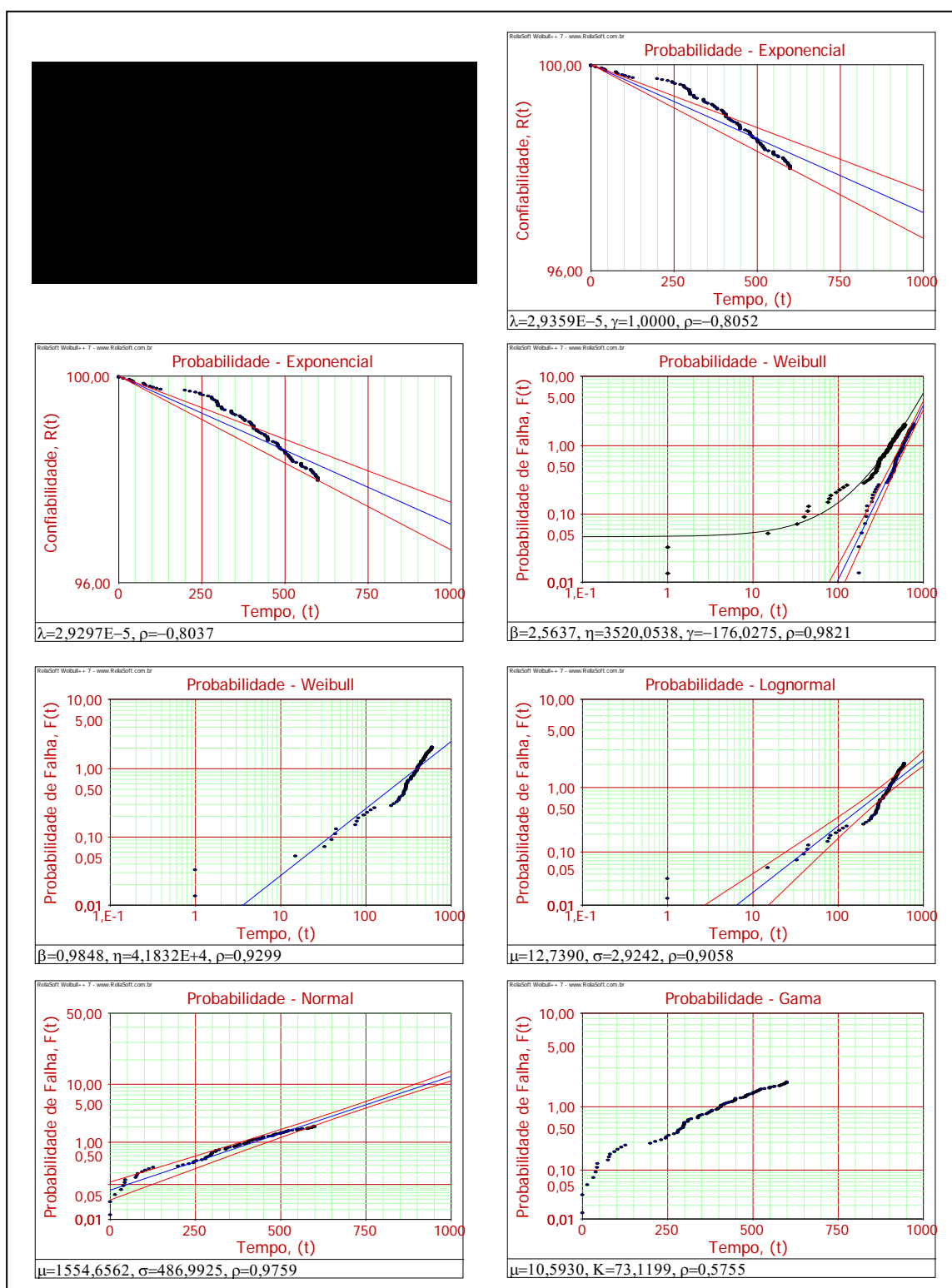
Verificação de ajuste do componente DZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



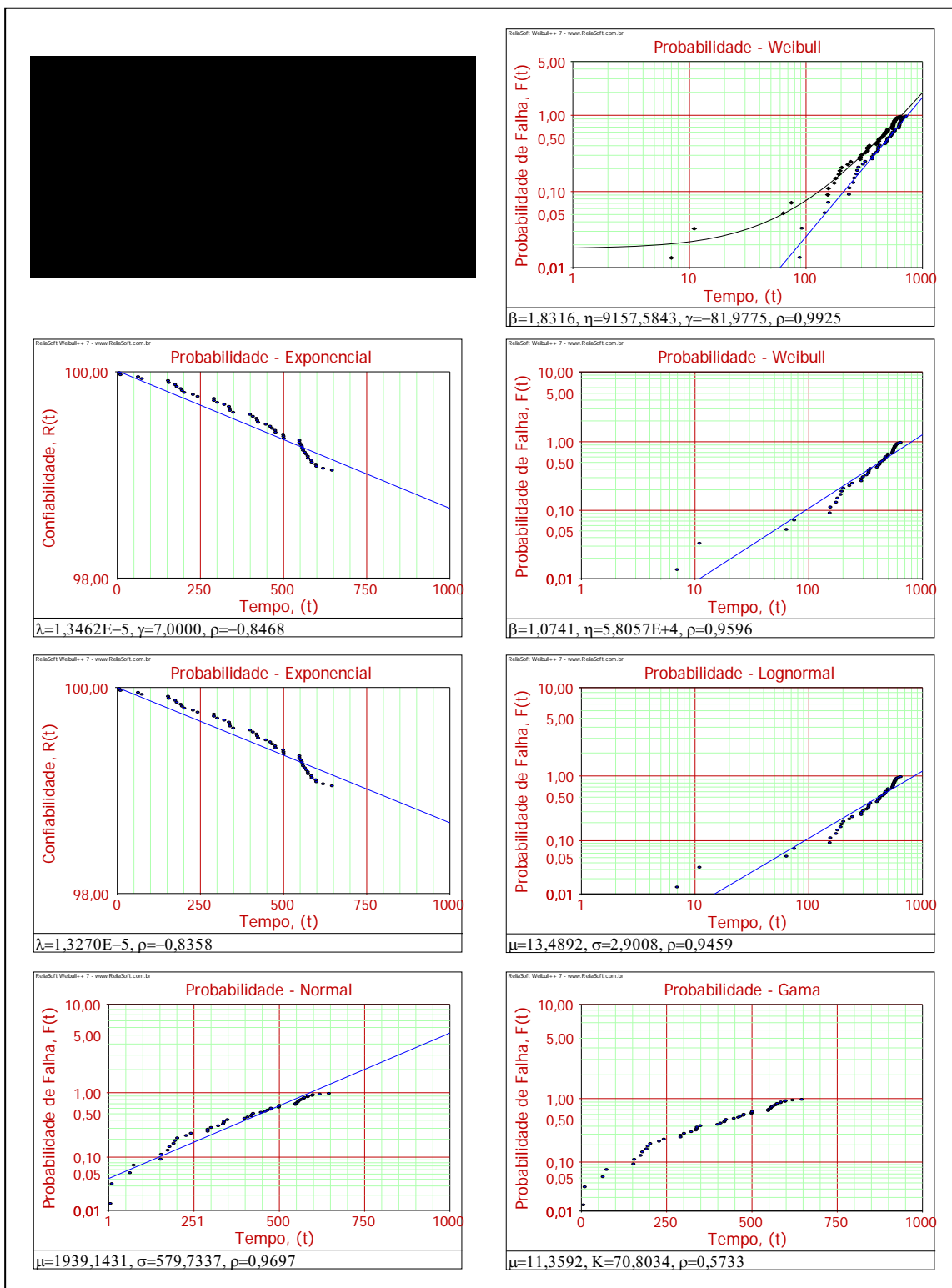
Verificação de ajuste do componente EZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



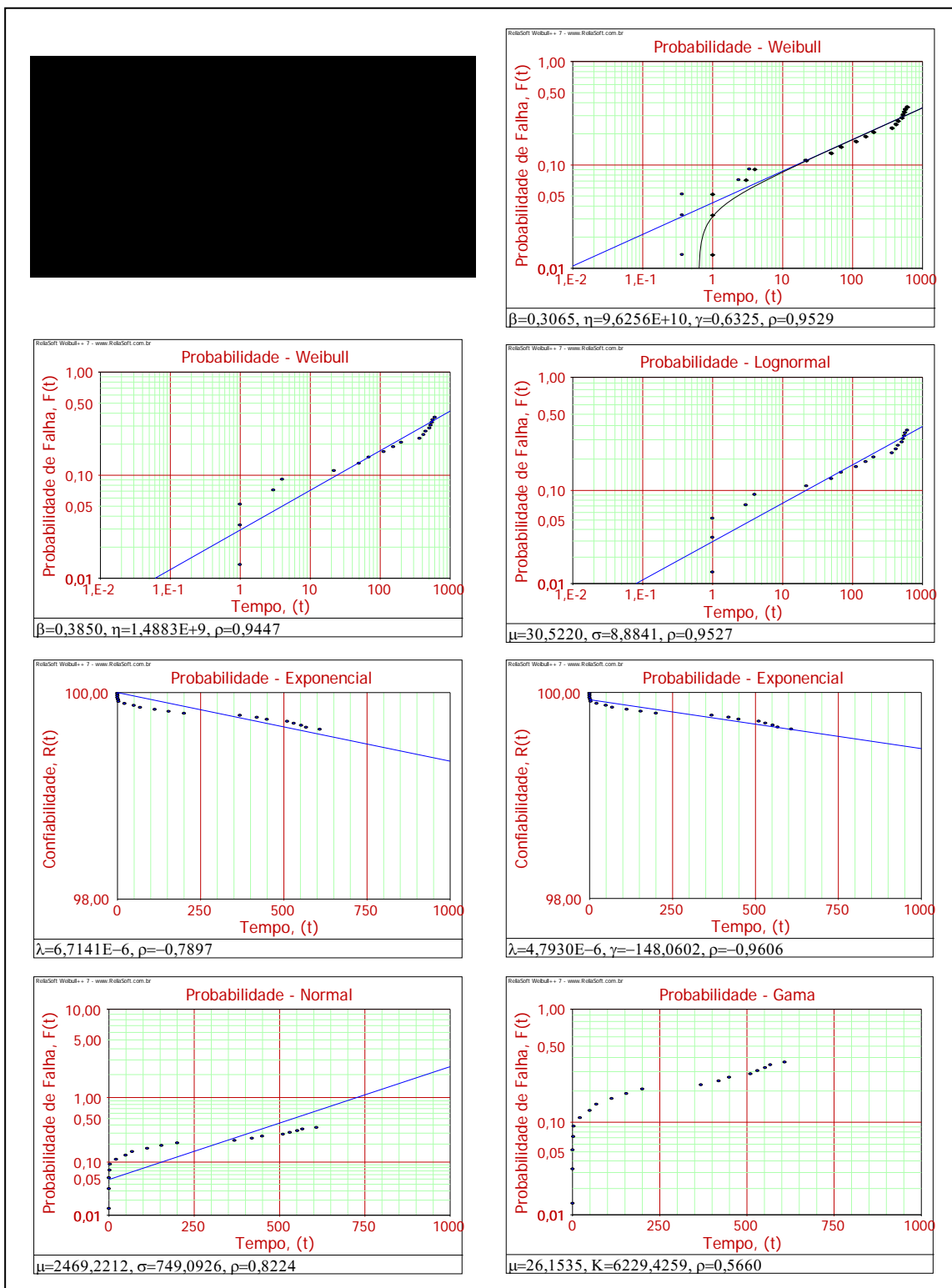
Verificação de ajuste do componente FZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



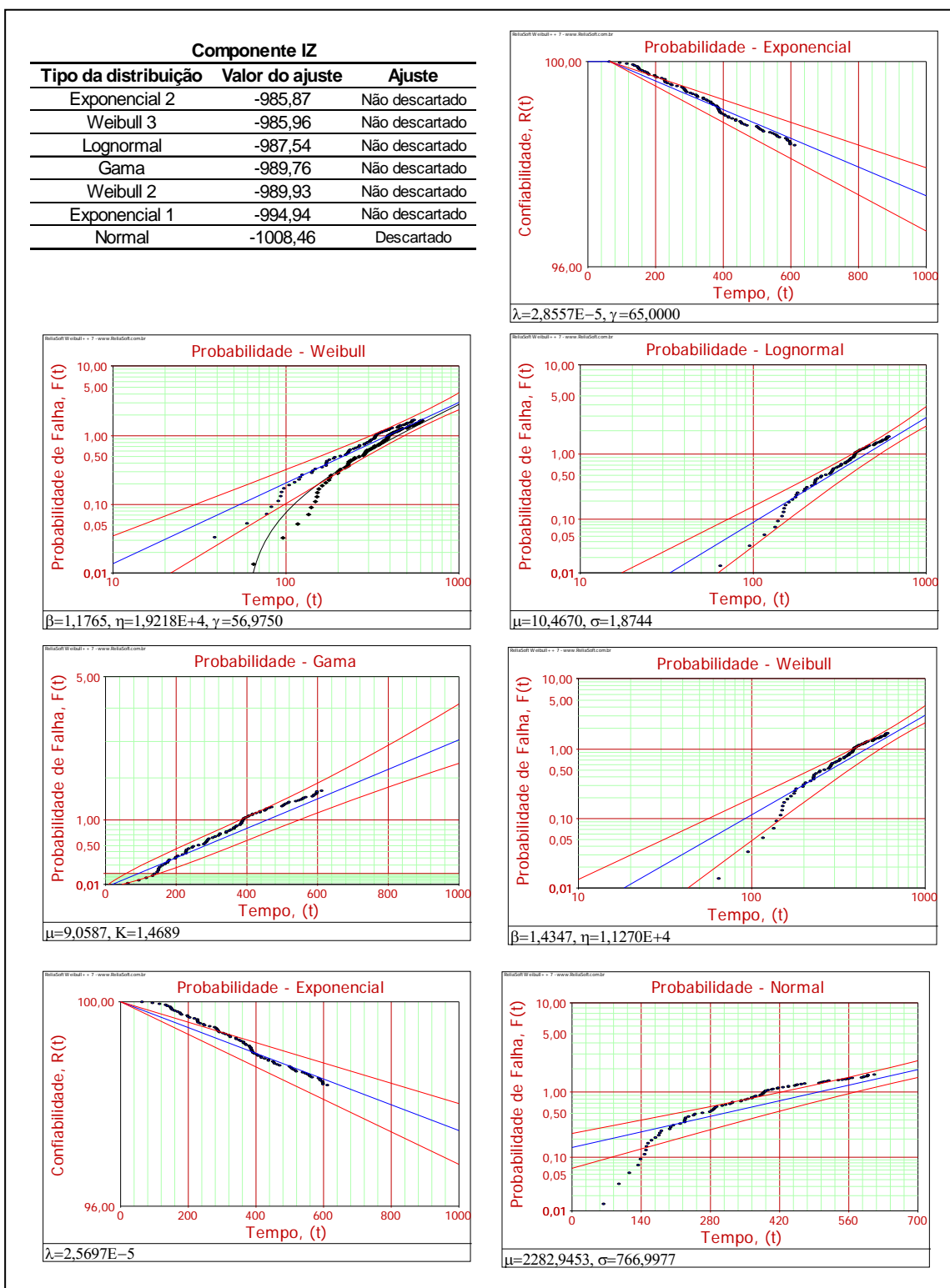
Verificação de ajuste do componente GZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



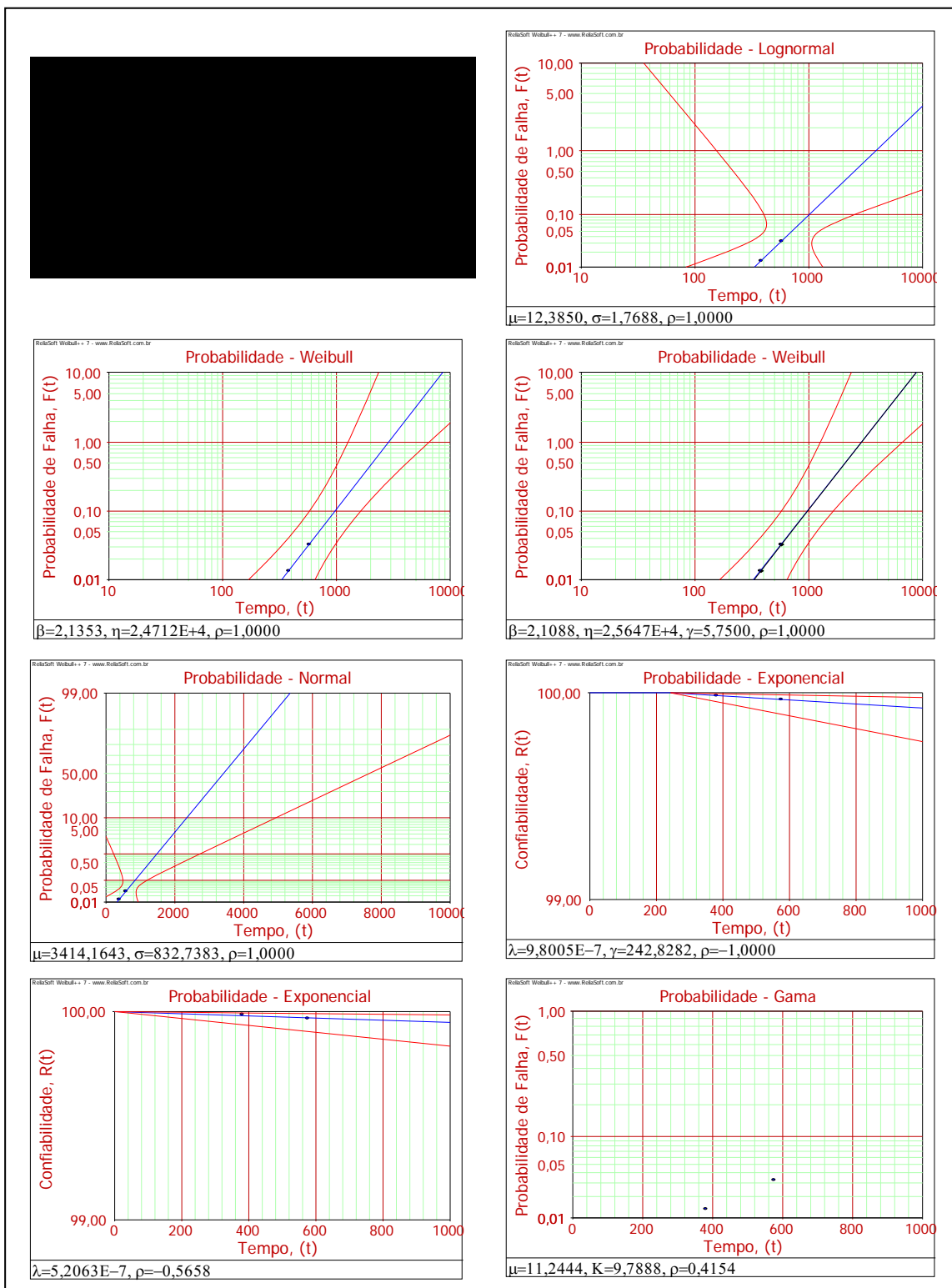
Verificação de ajuste do componente HZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



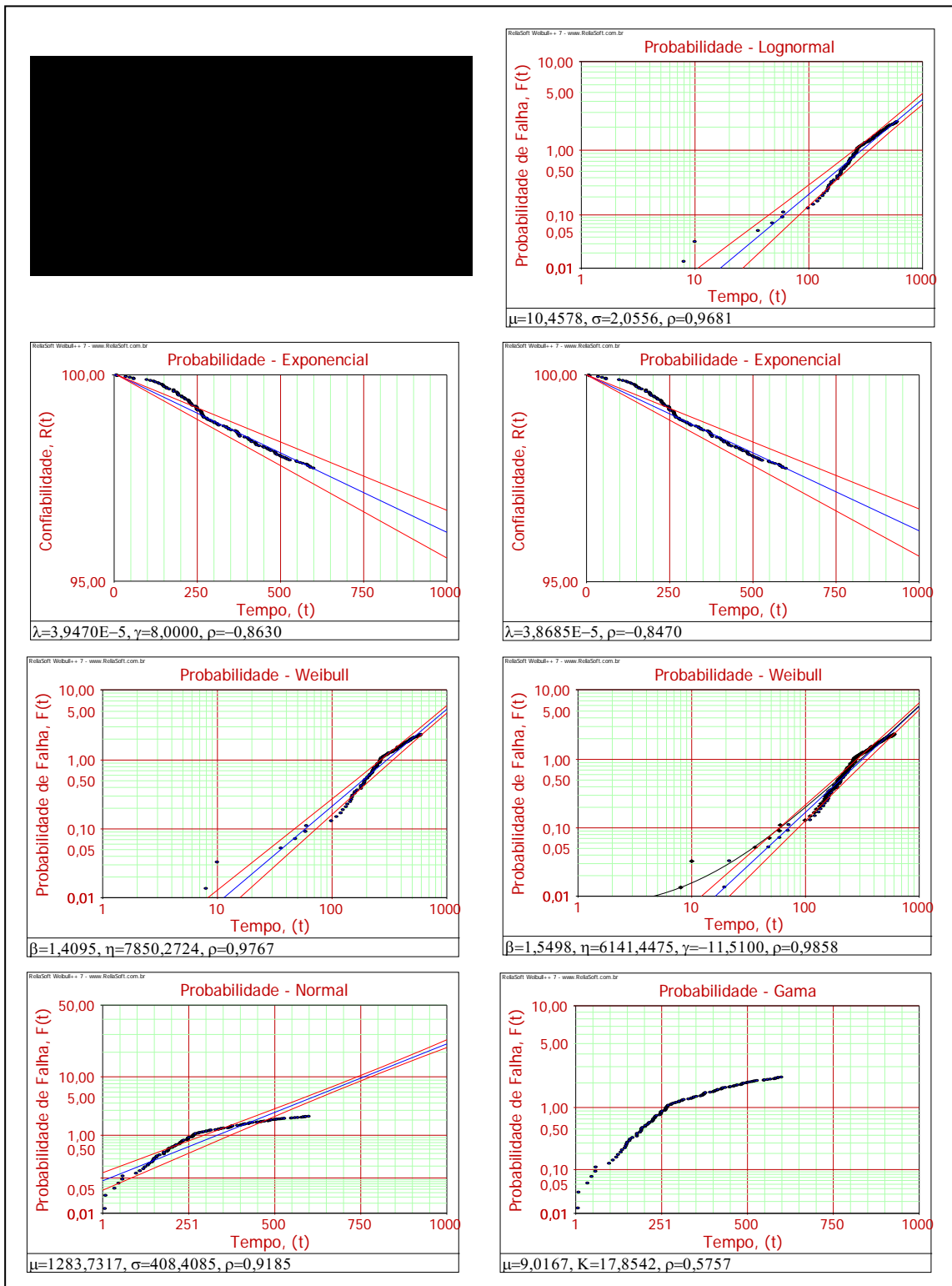
Verificação de ajuste do componente IZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



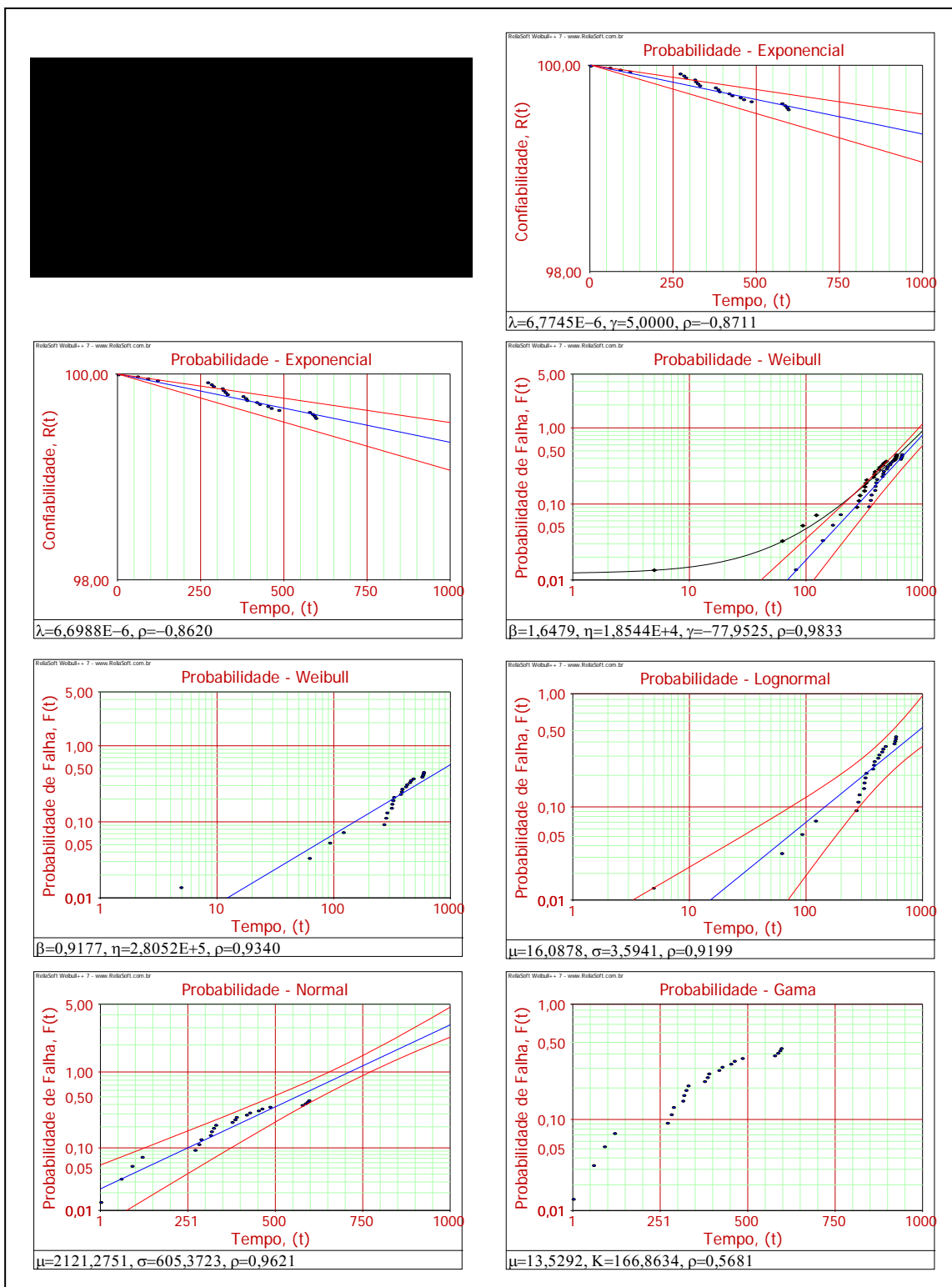
Verificação de ajuste do componente JZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



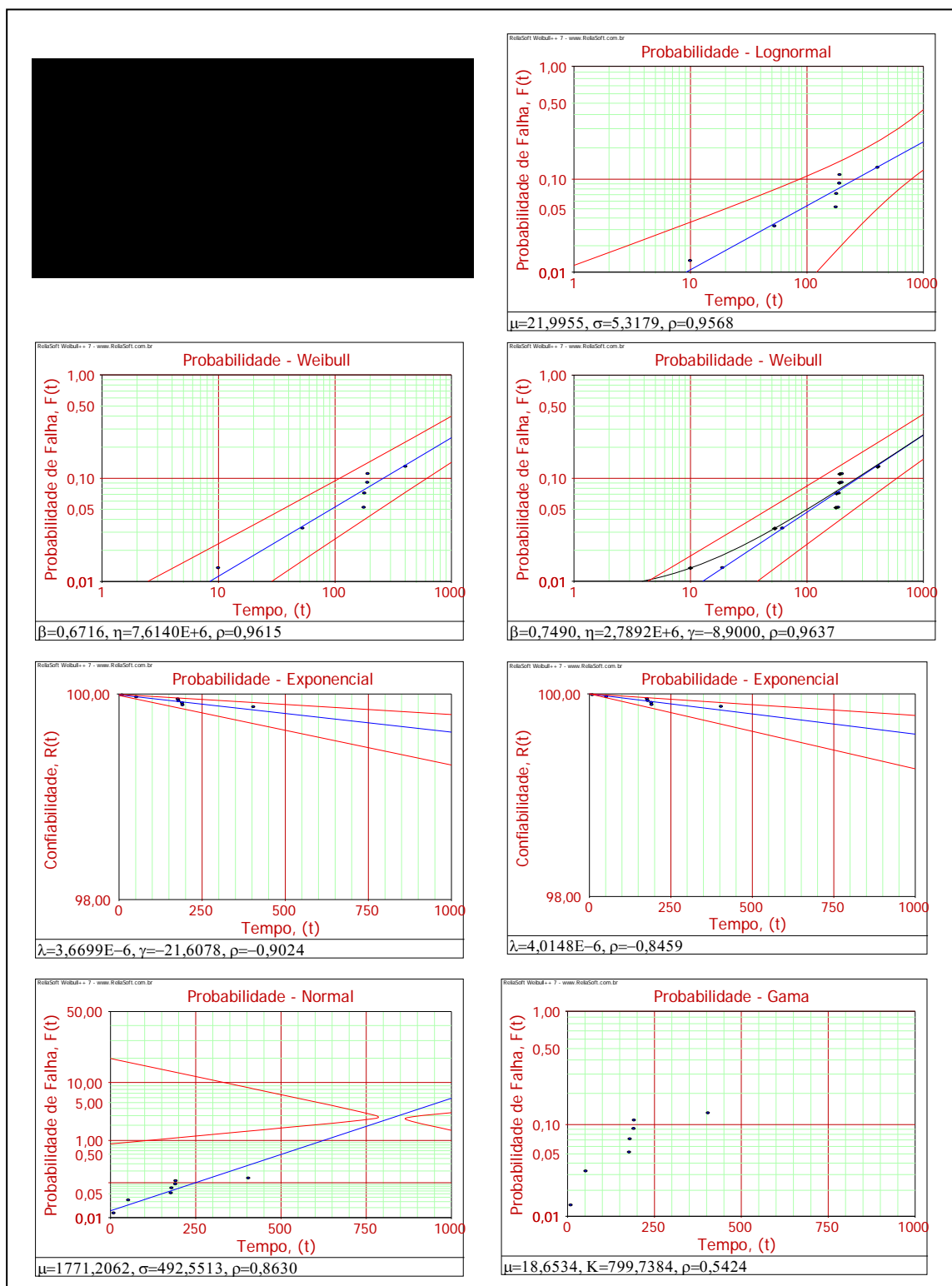
Verificação de ajuste do componente KZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



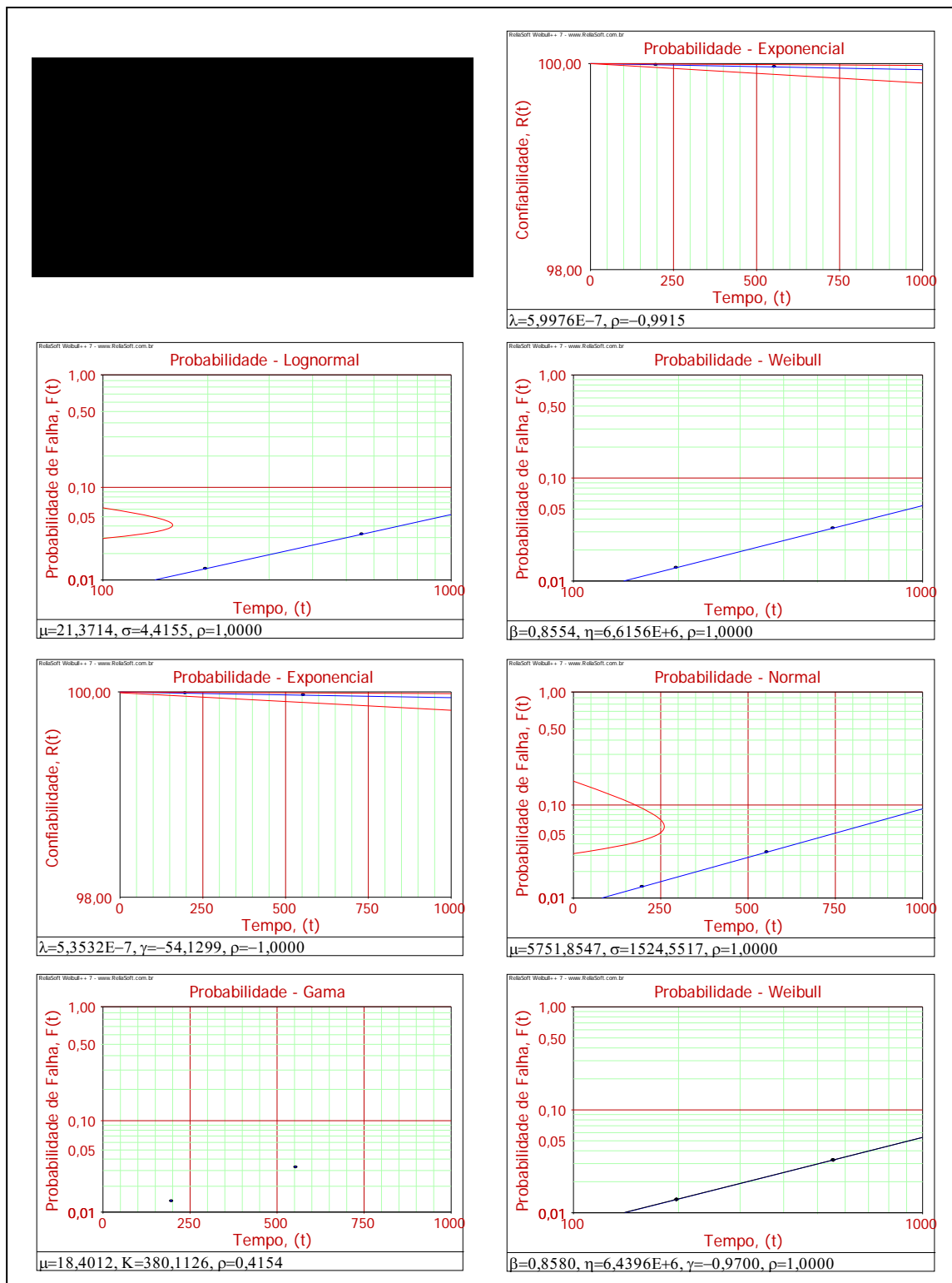
Verificação de ajuste do componente LZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



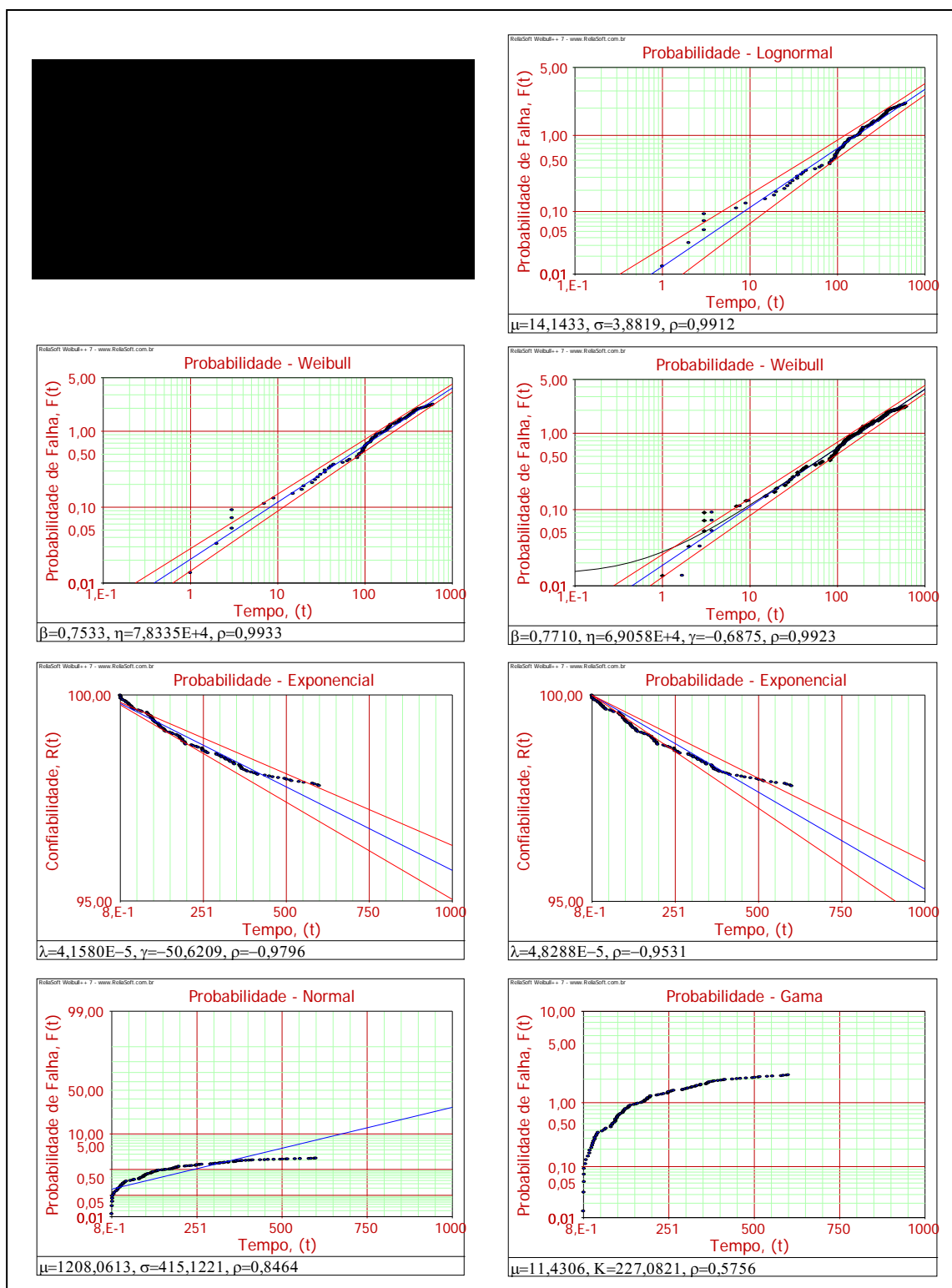
Verificação de ajuste do componente MZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes



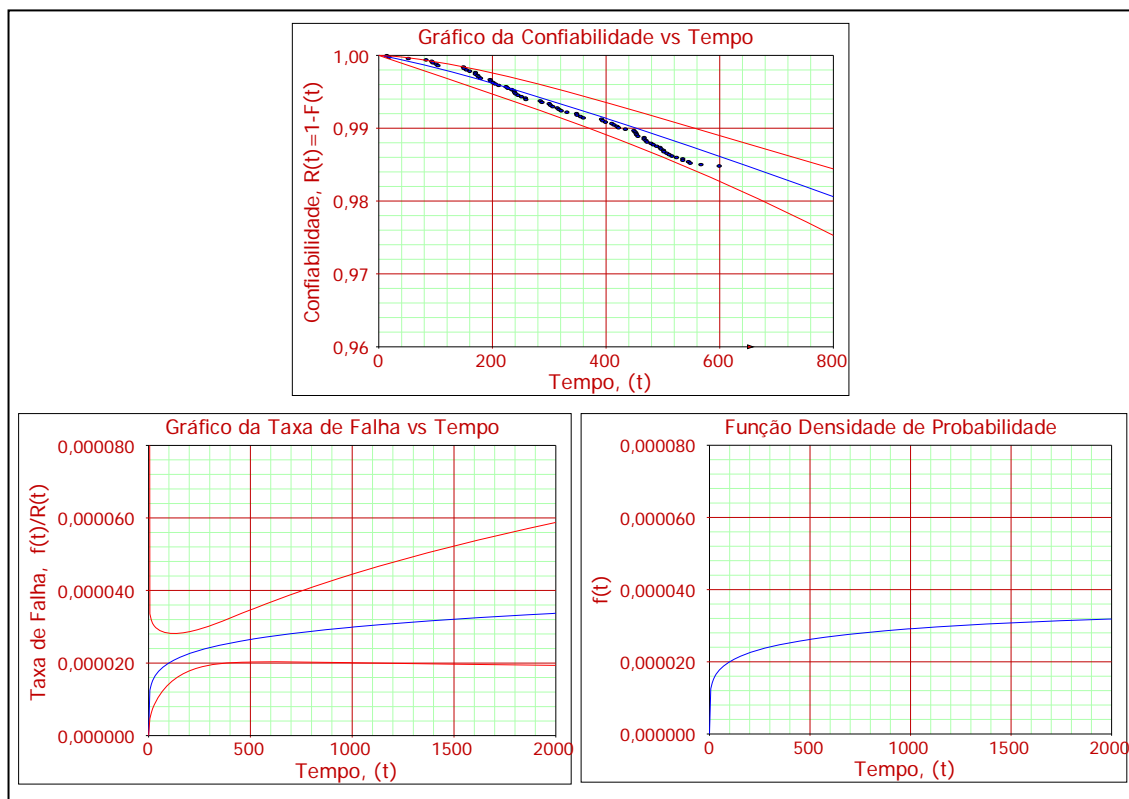
Verificação de ajuste do componente NZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE B – Verificação de ajuste dos componentes

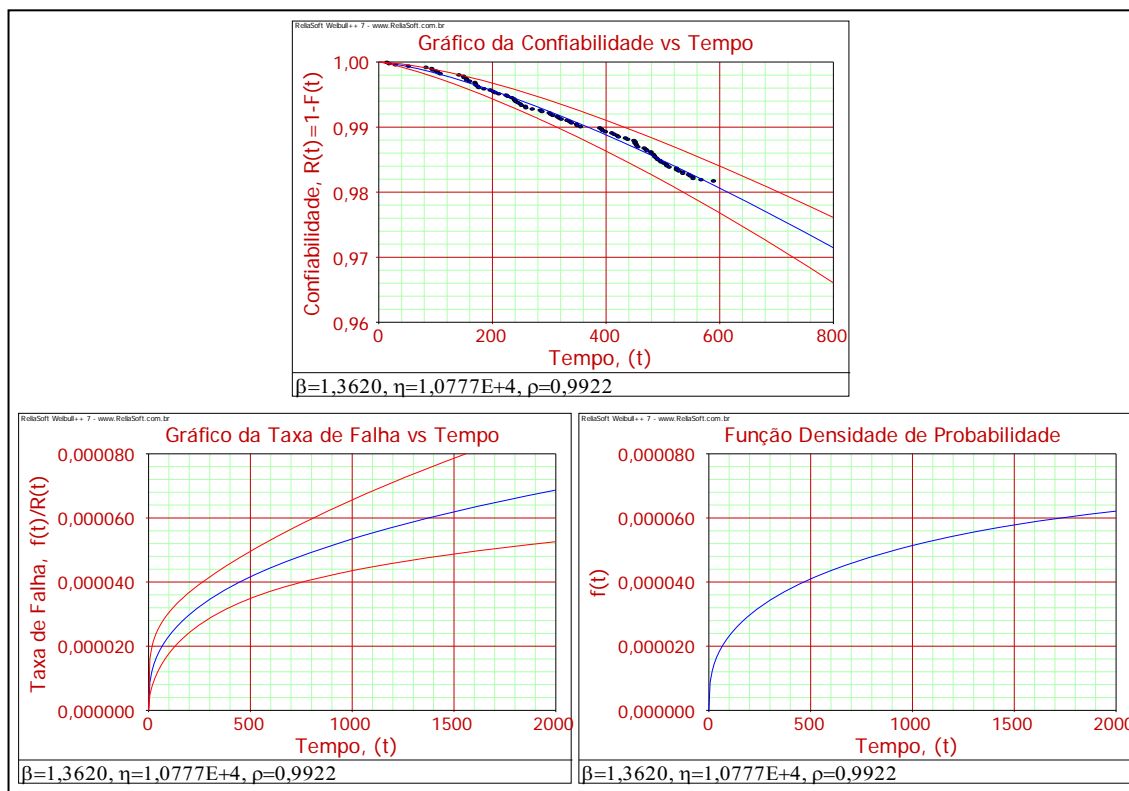


Verificação de ajuste do componente OZ para as diferentes distribuições. Teste de aderência e papéis da probabilidade.

APÊNDICE C – Gráficos das funções $R_I(t)$, $f_I(t)$ e $h_I(t)$ dos componentes

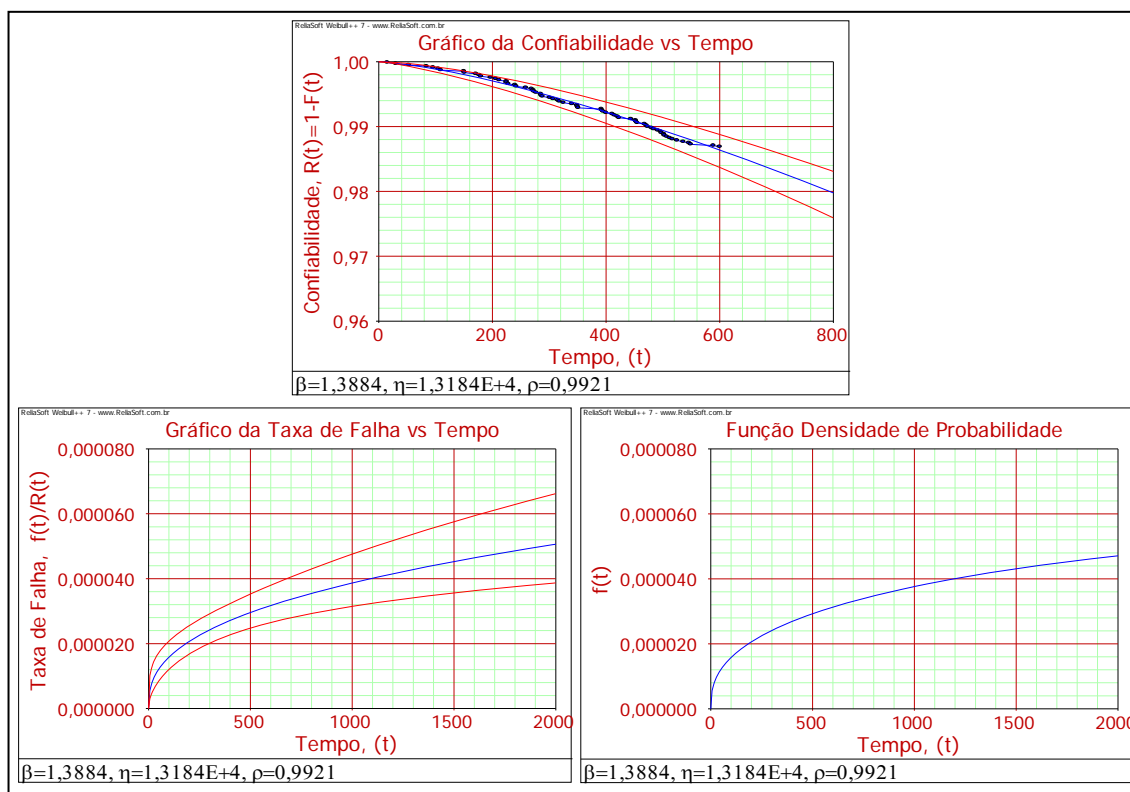


Componente AZ

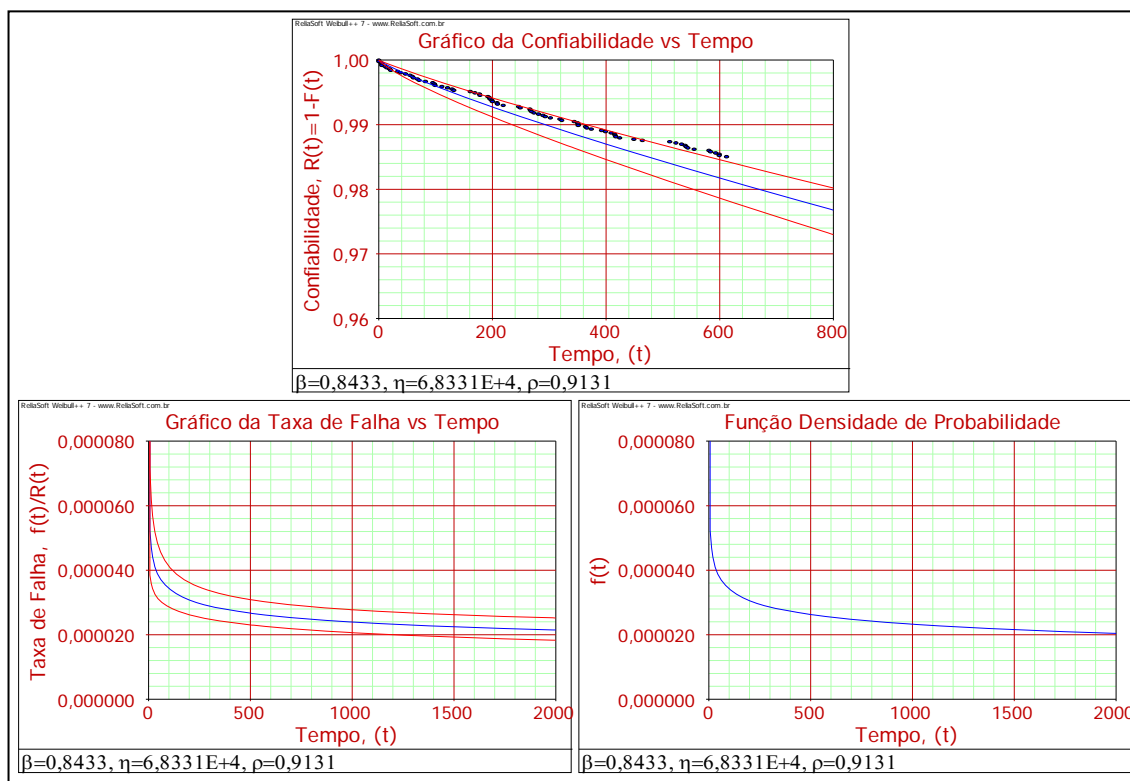


Componente BZ

APÊNDICE C – Gráficos das funções $R_I(t)$, $f_I(t)$ e $h_I(t)$ dos componentes

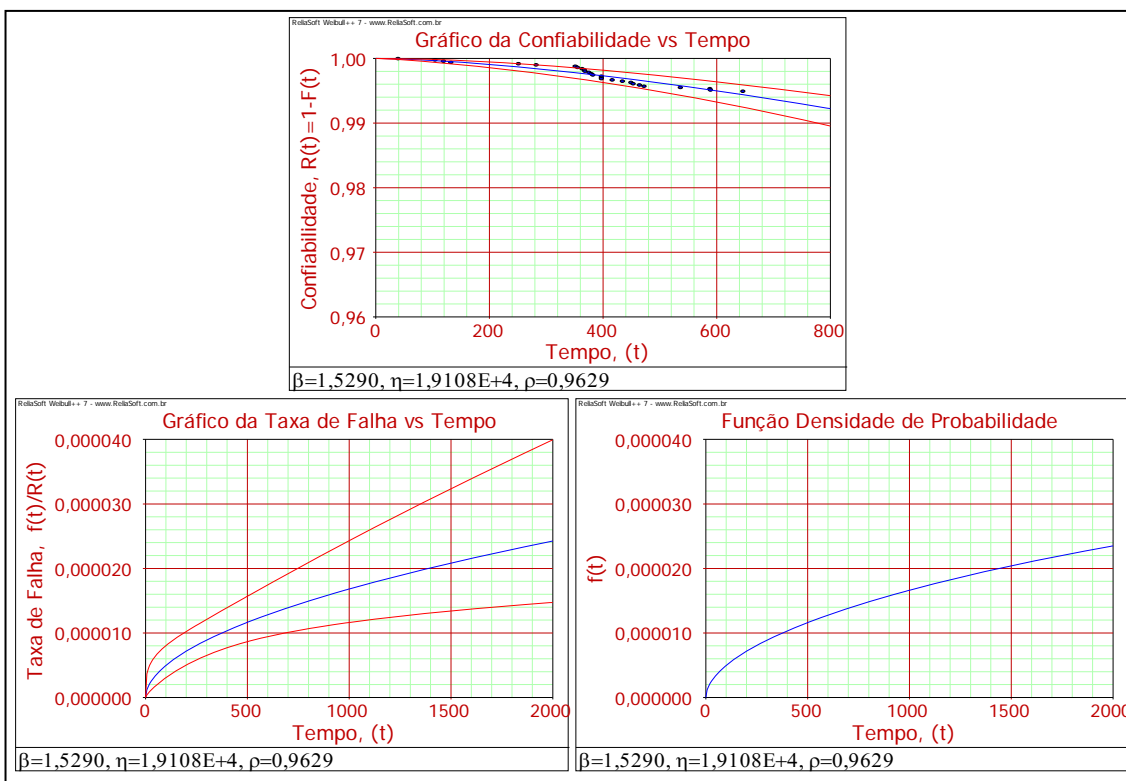


Componente CZ

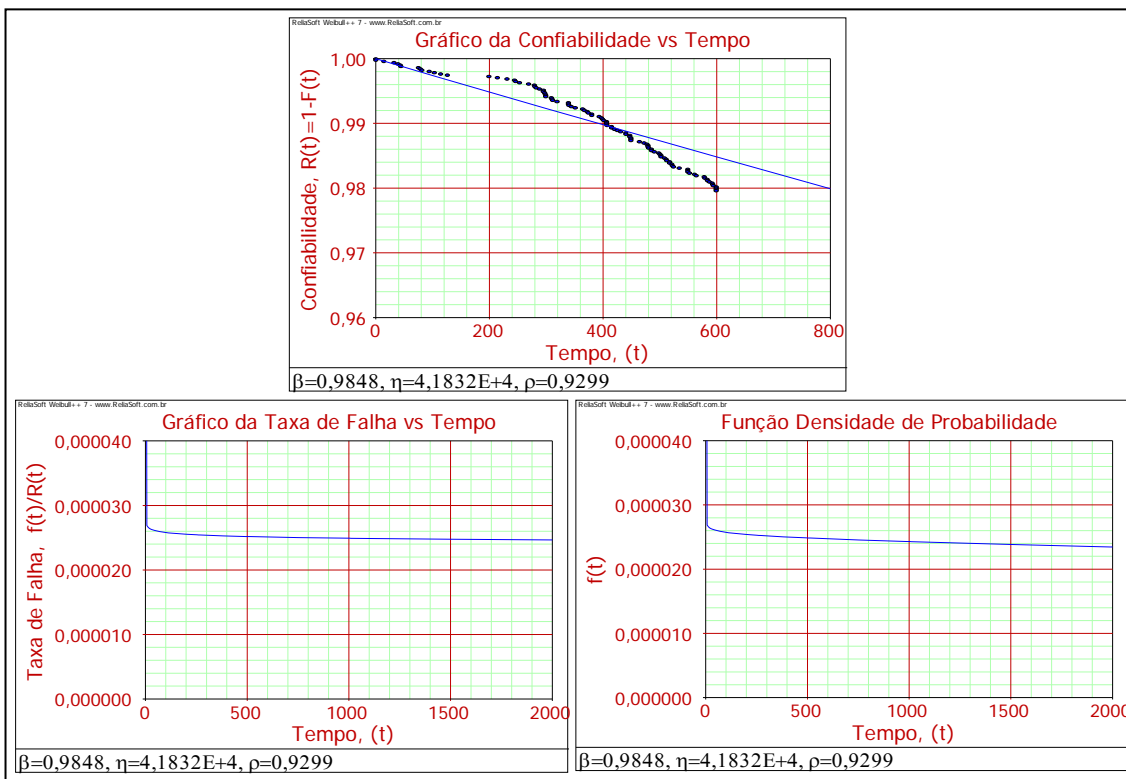


Componente DZ

APÊNDICE C – Gráficos das funções $R_I(t)$, $f_I(t)$ e $h_I(t)$ dos componentes

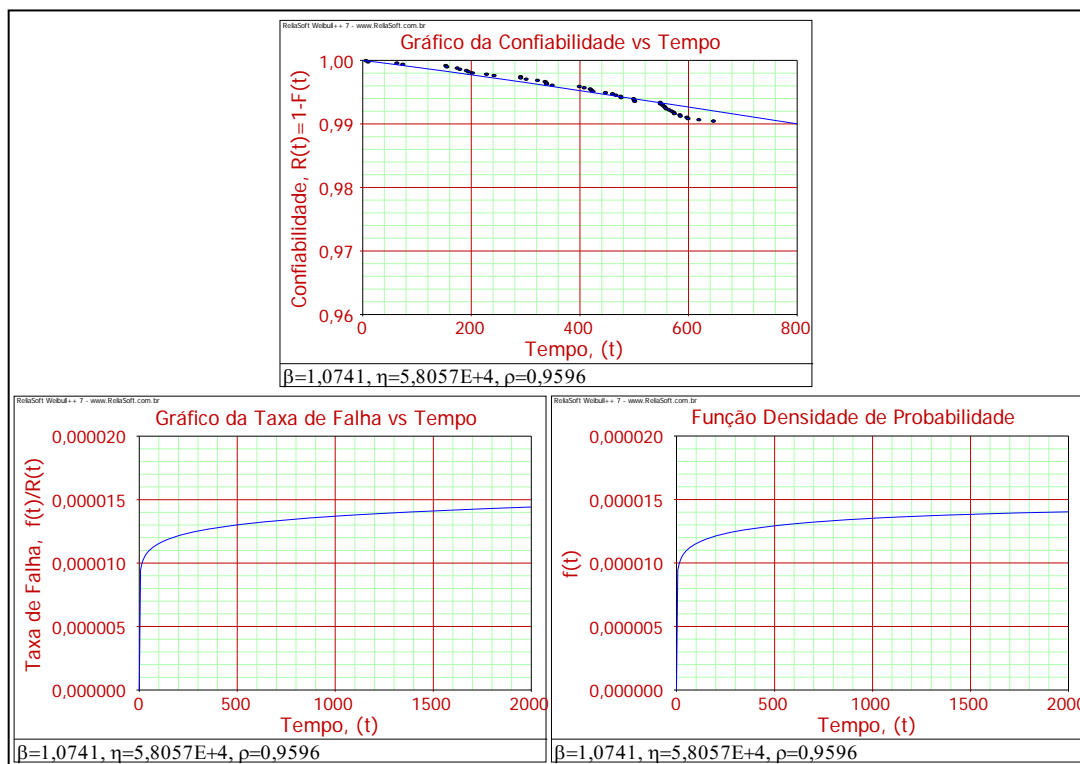


Componente EZ

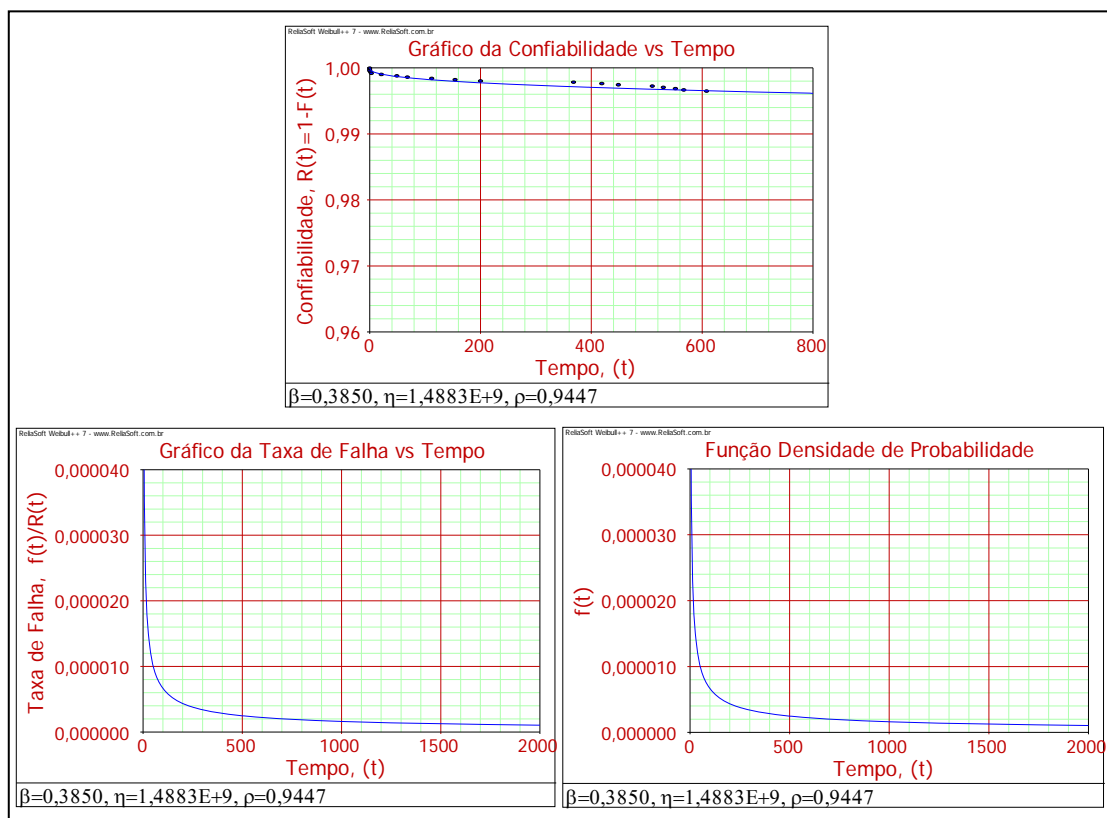


Componente FZ

APÊNDICE C – Gráficos das funções $R_I(t)$, $f_I(t)$ e $h_I(t)$ dos componentes

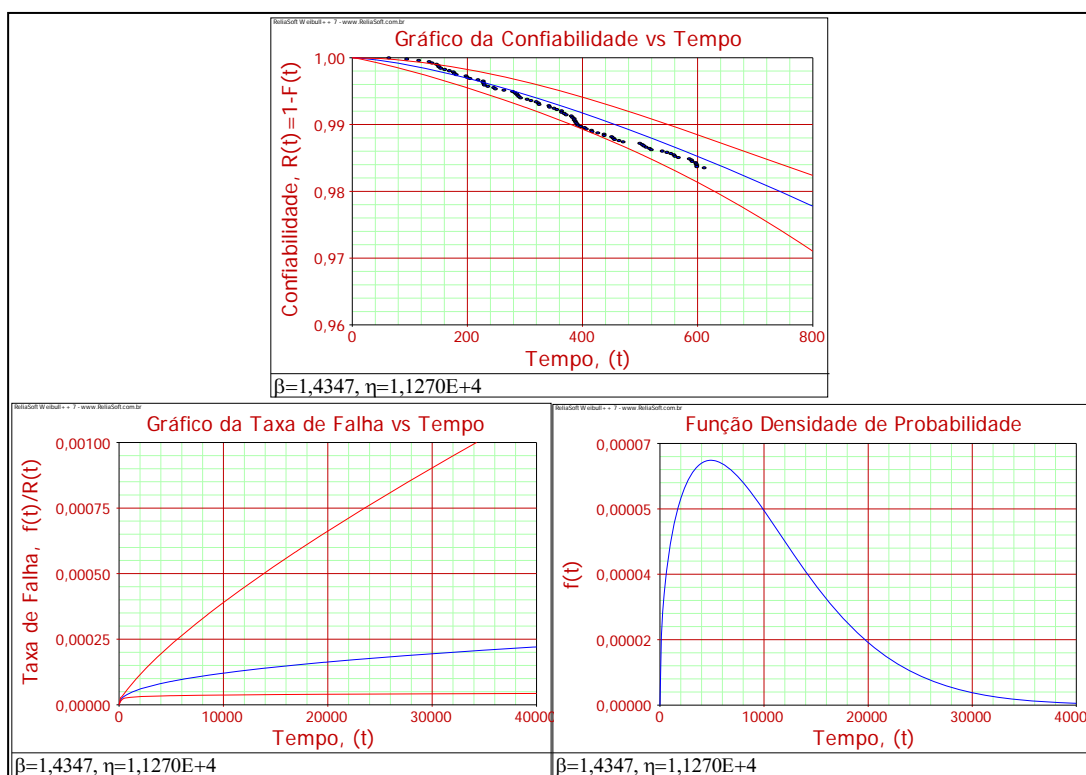


Componente GZ

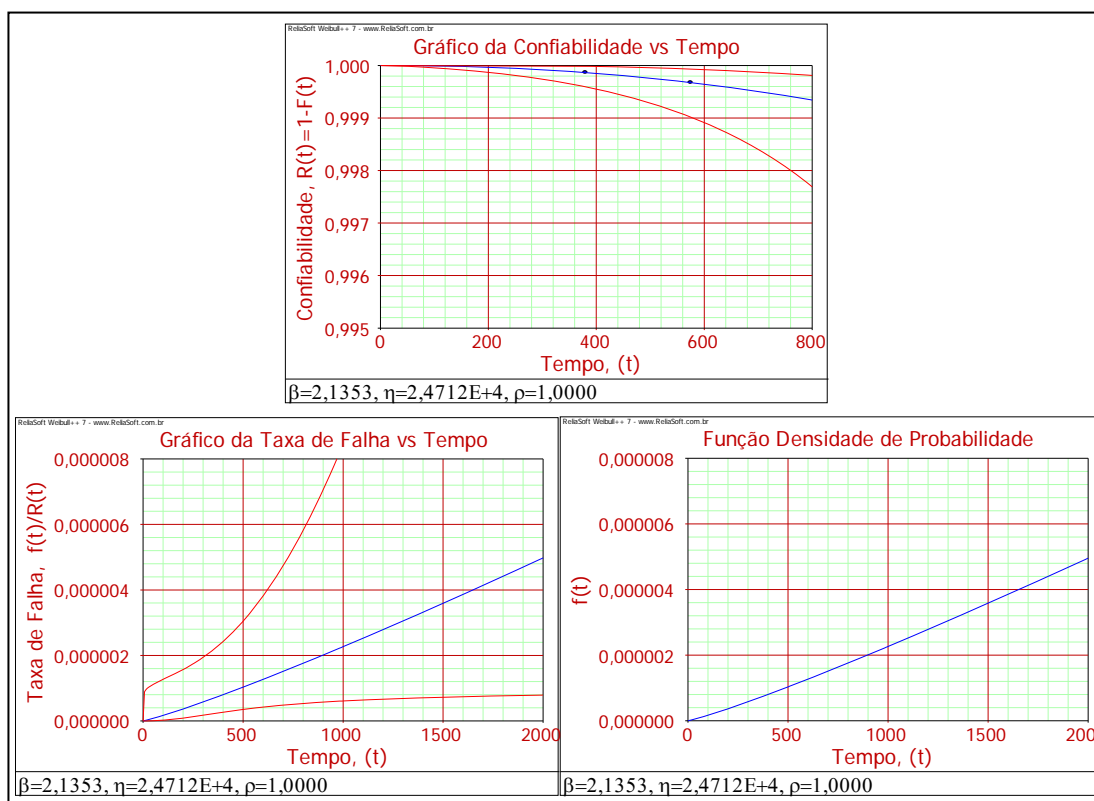


Componente HZ

APÊNDICE C – Gráficos das funções $R_I(t)$, $f_I(t)$ e $h_I(t)$ dos componentes

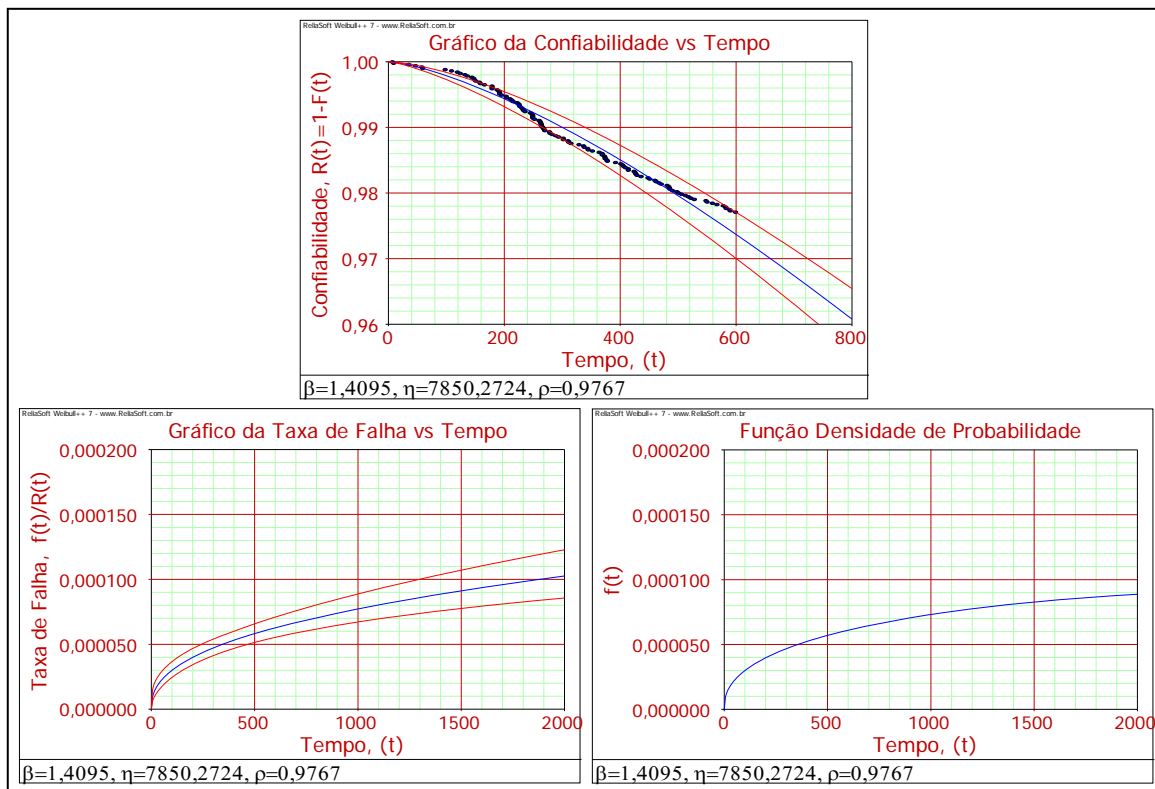


Componente IZ

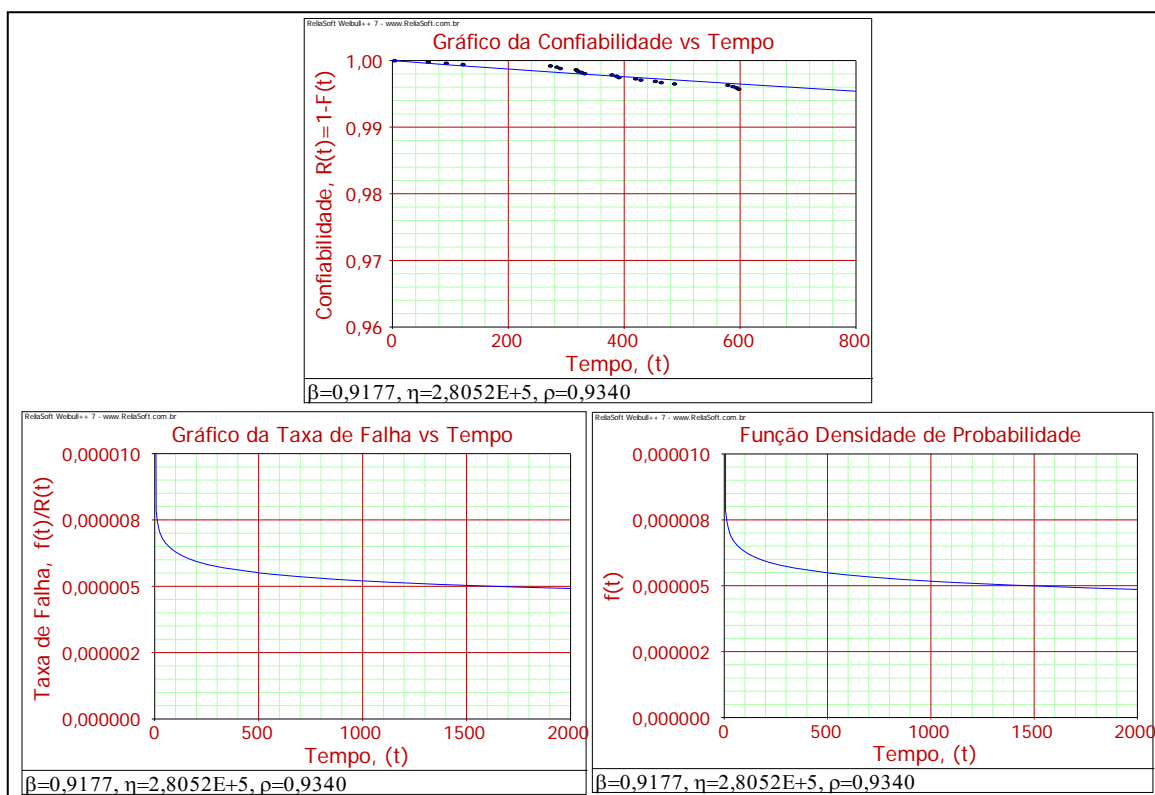


Componente JZ

APÊNDICE C – Gráficos das funções $R_I(t)$, $f_I(t)$ e $h_I(t)$ dos componentes

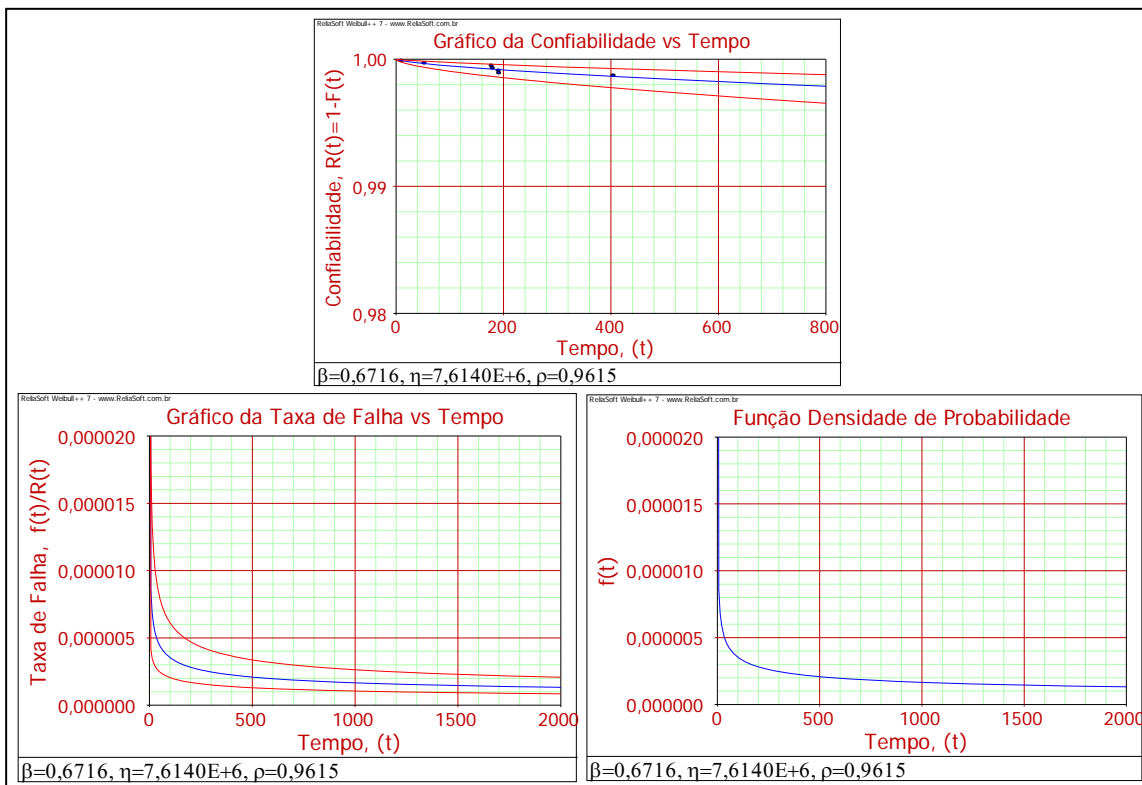


Componente KZ

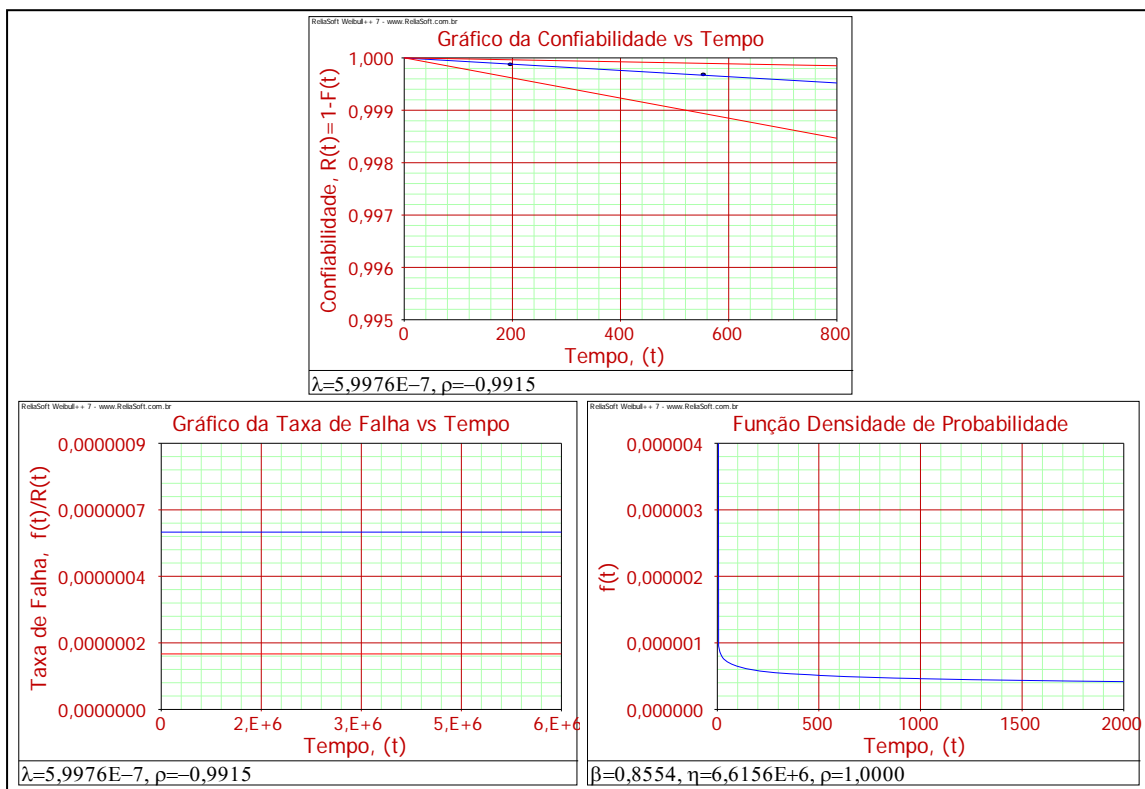


Componente LZ

APÊNDICE C – Gráficos das funções $R_I(t)$, $f_I(t)$ e $h_I(t)$ dos componentes

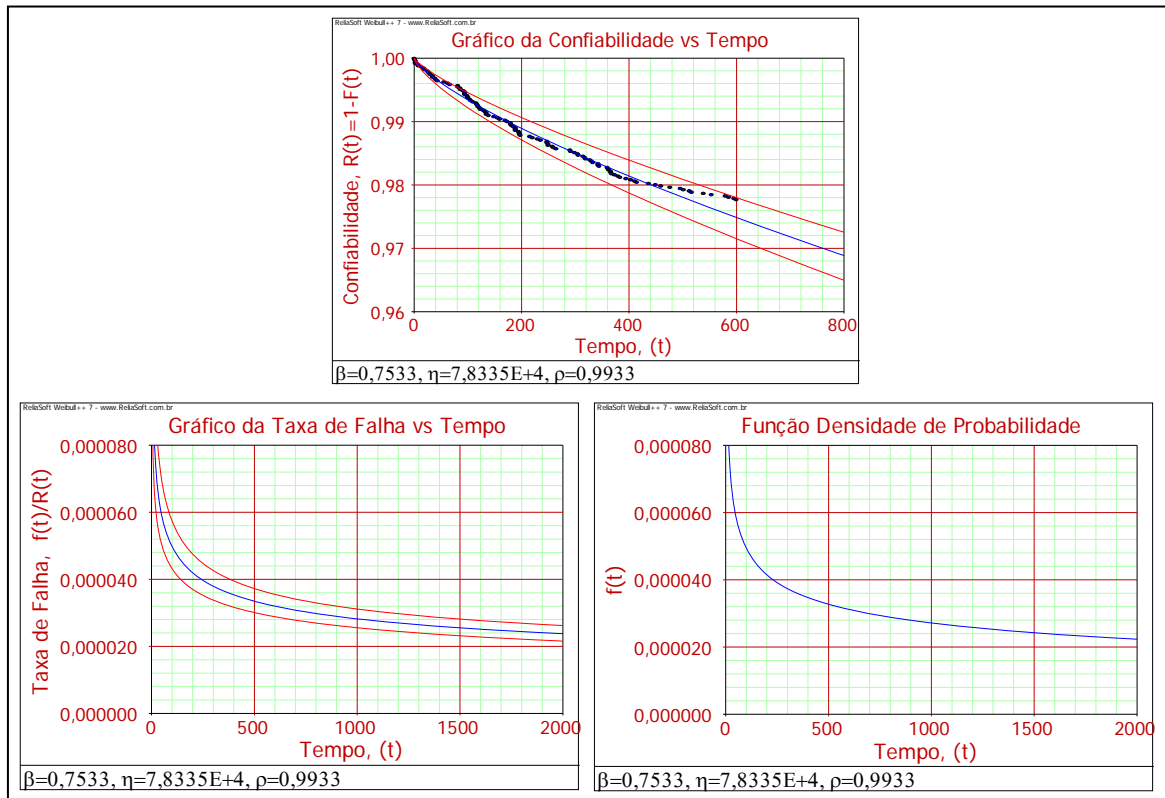


Componente MZ



Componente NZ

APÊNDICE C – Gráficos das funções $R_I(t)$, $f_I(t)$ e $h_I(t)$ dos componentes



Componente OZ

APÊNDICE D – Questionário para primeira rodada de perguntas

Exemplo de questionário utilizado para a primeira rodada de perguntas

APÊNDICE E – Questionário para segunda e terceira rodada de perguntas

Informações da Rodada 1

Sabendo que foram consultados 12 especialistas (incluindo você) na rodada anterior, e o resumo dos resultados é dado na forma das afirmações "A" e "B", para cada pergunta.

A afirmação "A" busca a idéia de divergência de opinião do grupo; e a afirmação "B" demonstra o valor mais conveniente para representar a opinião do grupo.

Para a pergunta 1:

- A) 50% das respostas dos especialistas ficaram no intervalo entre **100hs e 200hs**
 B) A mediana (ou valor central) das respostas foi de **150hs**.

Para a pergunta 2:

- A) 50% das respostas dos especialistas ficaram no intervalo entre **1000hs e 2000hs**
 B) A mediana (ou valor central) das respostas foi de **1500hs**.

Para a pergunta 3:

- A) 50% das respostas dos especialistas ficaram no intervalo entre **10000hs e 12000hs**
 B) A mediana (ou valor central) das respostas foi de **11000hs**.

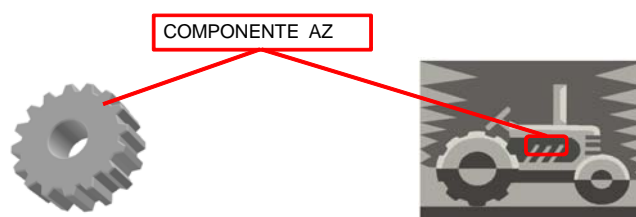
Tendo em vista as informações acima, você gostaria de alterar as respostas do seu questionário? Em caso afirmativo, quais seriam suas novas estimativas?

QUESTIONÁRIO:

Método Delphi para previsão de falhas - Rodada 2

O presente questionário tem por objetivo coletar informações sobre estimativa de falha de componentes de um produto agrícola. As informações obtidas serão utilizadas para um estudo relativo a mo-delagem de desempenho destes componentes. Agradecemos a sua colaboração.

Supondo um lote de 100 máquinas, modelo 12-ABC, cada uma funcionando rigorosamente 10hs por dia. Baseado em sua experiência e conhecimento prévio a respeito do funcionamento do componente mostrado na figura abaixo, pergunta-se sua opinião:



1- Qual o tempo estimado (em horas de máquina) que levaria para que 2 máquinas apresentas- sem falha por desgaste deste componente? (Ou seja, o tempo que levaria para ocorrer a falha em 2% das máquinas).

hs

2- Qual o tempo estimado (em horas de máquina) que ocorreria a falha por desgaste deste componente na 50ª máquina? (Ou seja, o tempo que levaria para ocorrer a falha em 50% das máquinas).

hs

3- Qual o tempo estimado (em horas de máquina) que ocorreria a falha por desgaste deste componente na 98ª máquina? (Ou seja, o tempo que levaria para ocorrer à falha em 98% das máquinas).

hs

Exemplo ilustrativo:

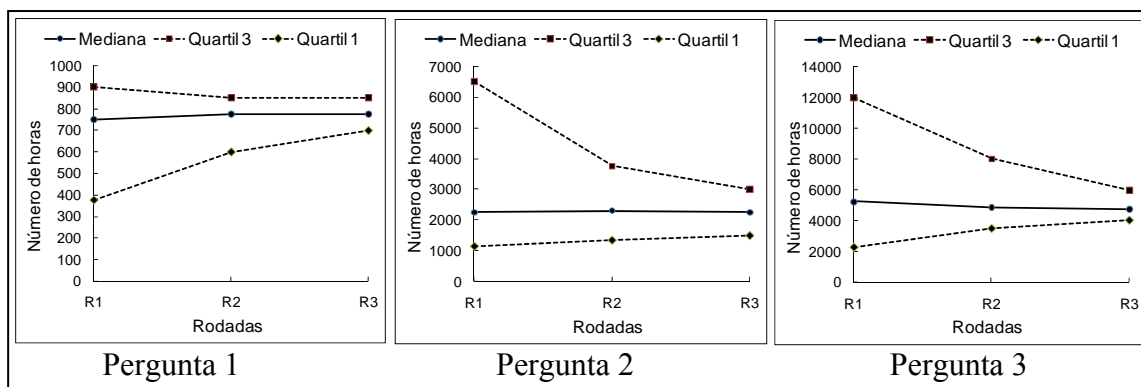
No exemplo ilustrativo, foi analisado o comportamento de falha de um componente X para uma população de 100 máquinas.

tempo	0hs	10hs	20hs	...	90hs	100hs	...	210hs	220hs	230hs	240hs	...	380hs	390hs	...	5500hs	...
máquina que apresentou falha					1ª				2ª	3ª	4ª	...	50ª	52ª	...	98ª	...
									51ª								

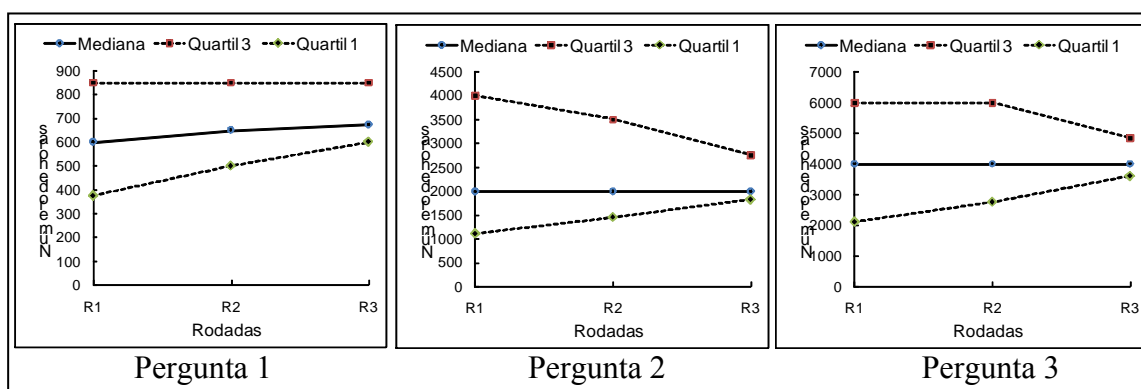
Percebe-se que a 2ª máquina falhou com 220 horas; a 50ª com 380 horas e a 98ª com 5500hs. Os valores de 220, 380 e 5500 correspondem as respostas das perguntas 1, 2 e 3 respectivamente.

Exemplo de questionário utilizado para a segunda e terceira rodada de perguntas

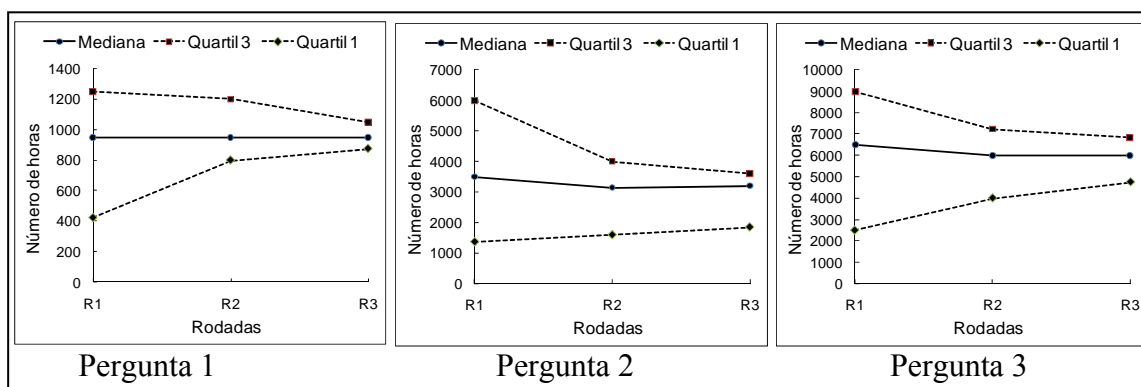
APÊNDICE F – Gráficos de evolução de consenso dos componentes



Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente AZ

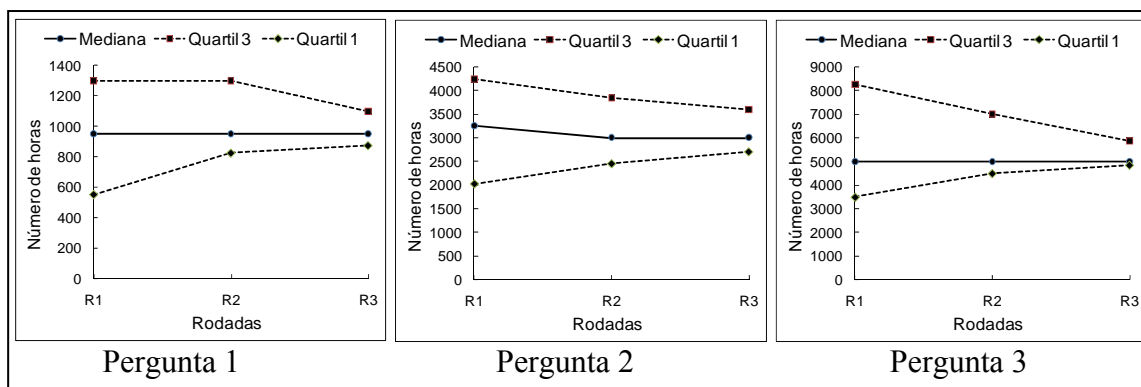


Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente BZ

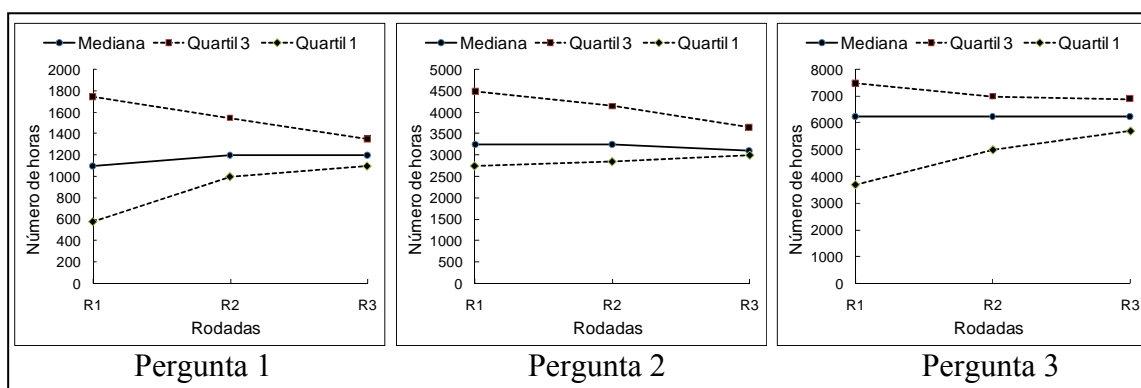


Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente CZ

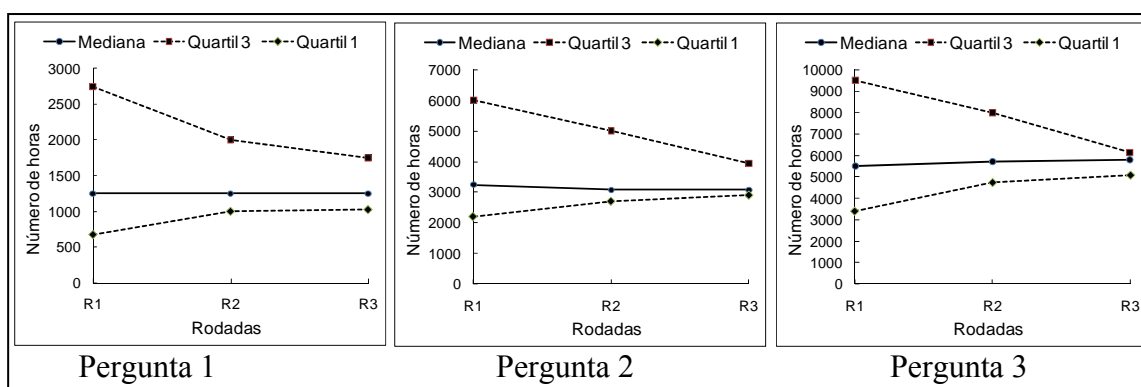
APÊNDICE F – Gráficos de evolução de consenso dos componentes



Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente DZ

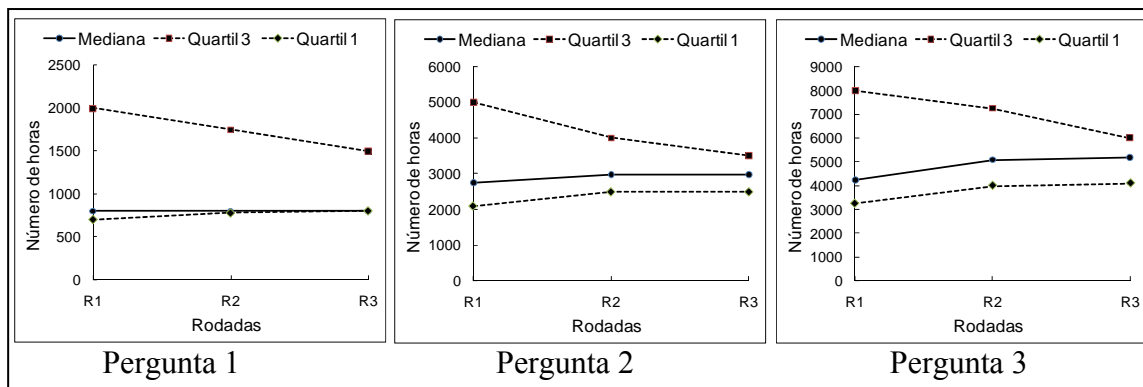


Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente EZ

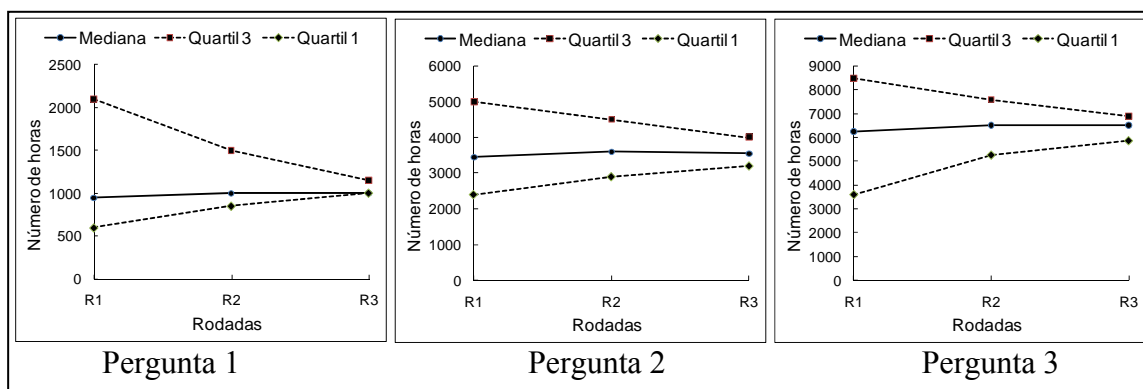


Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente FZ

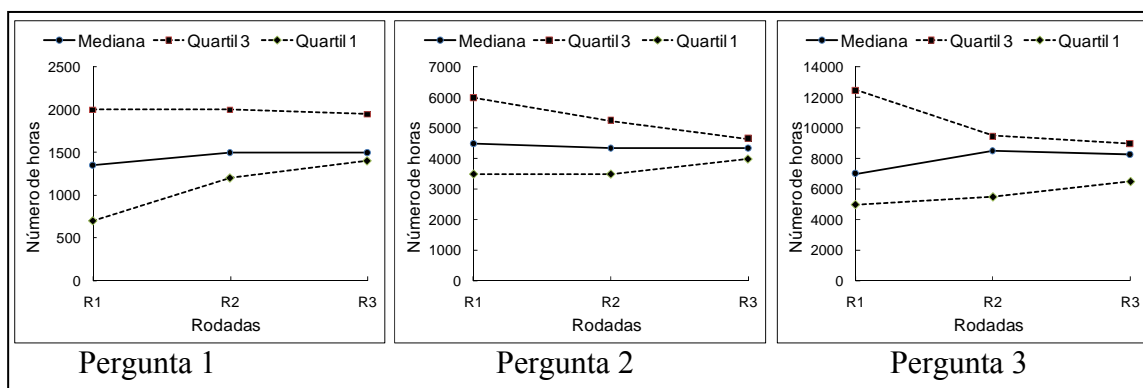
APÊNDICE F – Gráficos de evolução de consenso dos componentes



Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente GZ

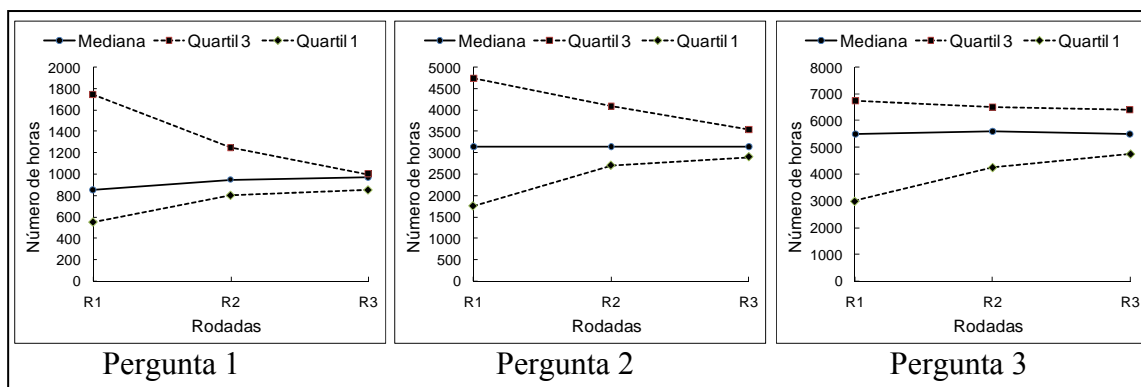


Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente HZ

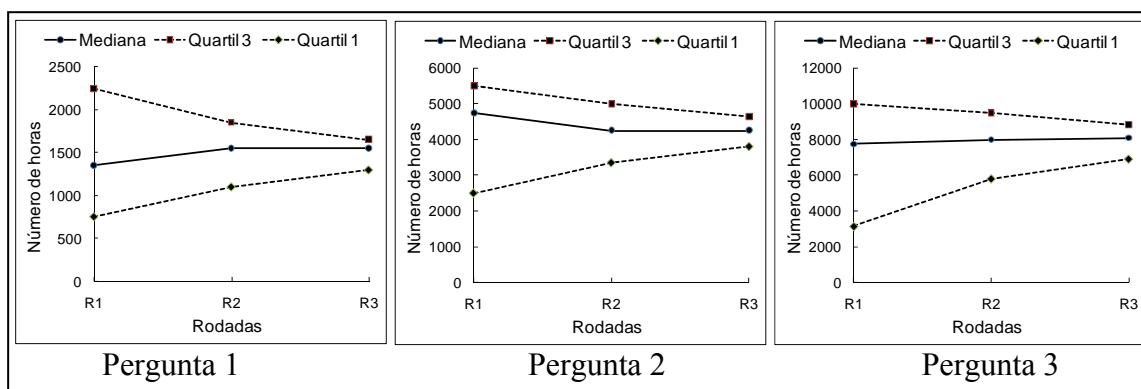


Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente IZ

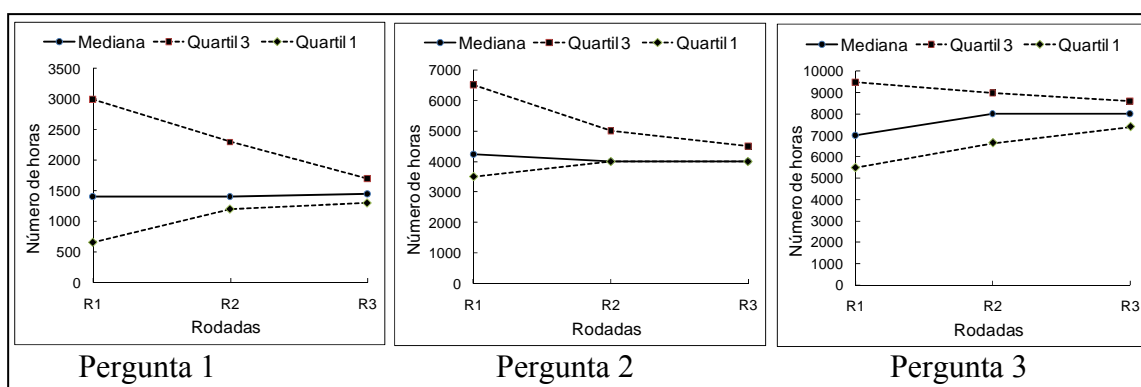
APÊNDICE F – Gráficos de evolução de consenso dos componentes



Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente JZ

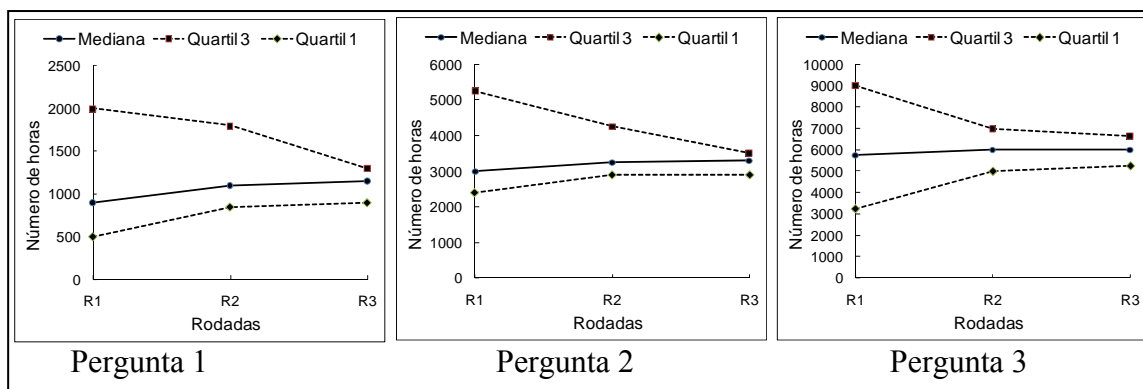


Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente KZ

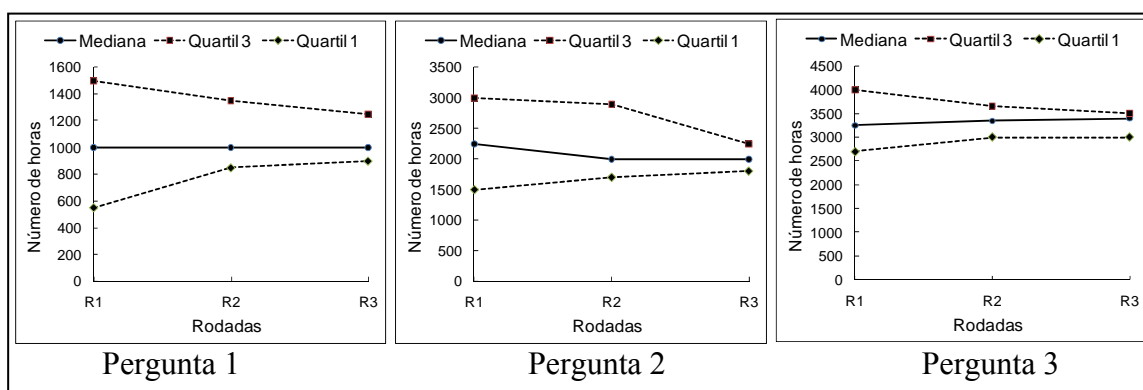


Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente LZ

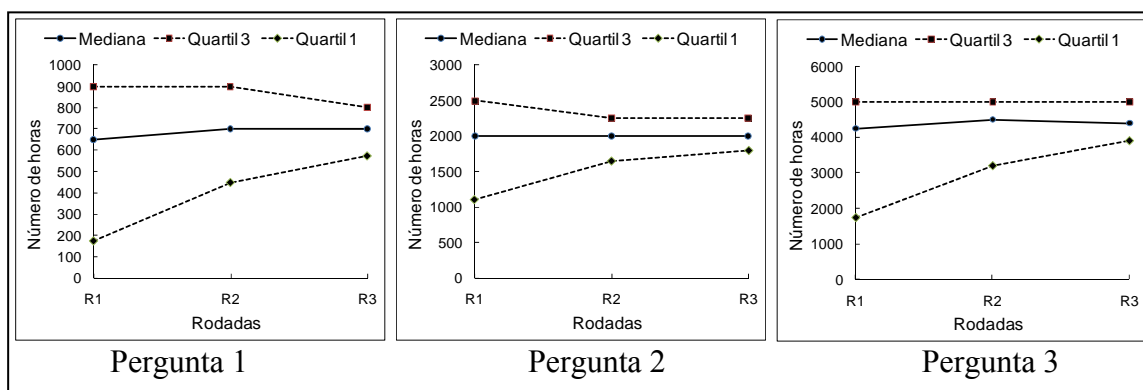
APÊNDICE F – Gráficos de evolução de consenso dos componentes



Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente MZ

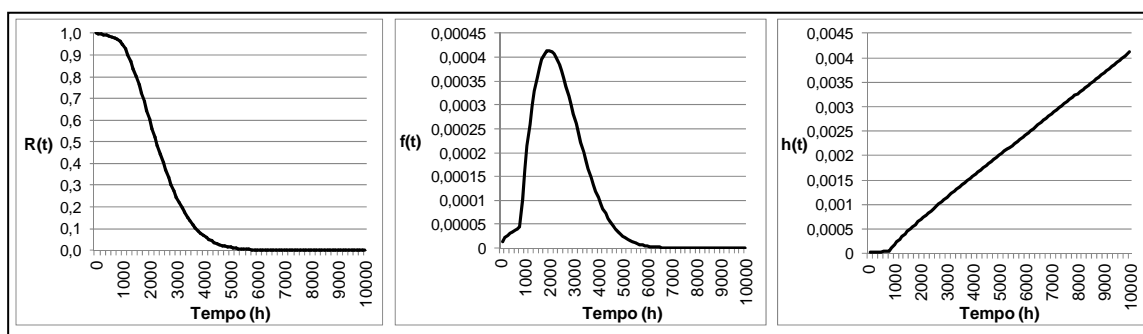


Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente NZ

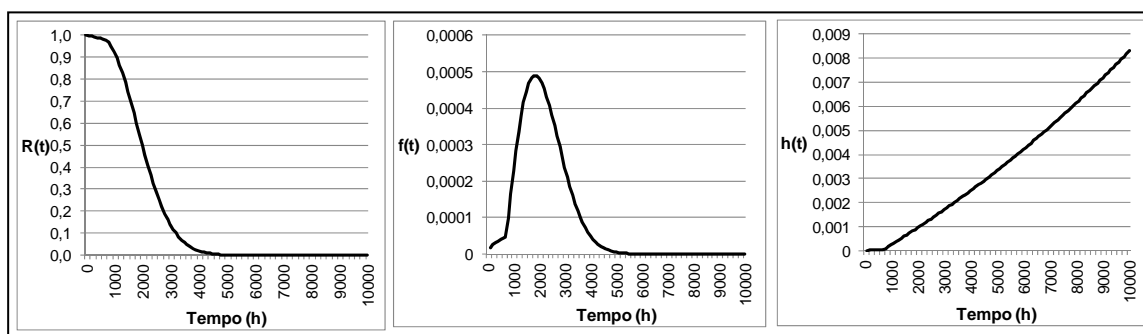


Gráficos da evolução da mediana e quartis nas 3 rodadas do componente OZ

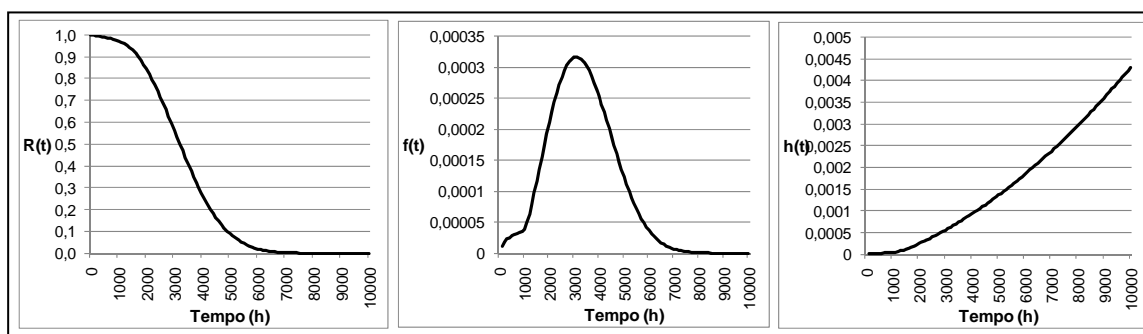
APÊNDICE G – Gráficos das funções $R(t)$, $f(t)$ e $h(t)$ dos componentes



Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente AZ

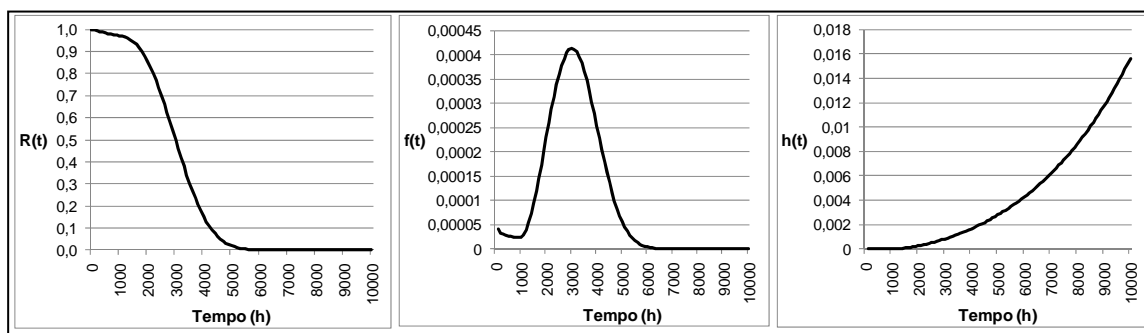


Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente BZ

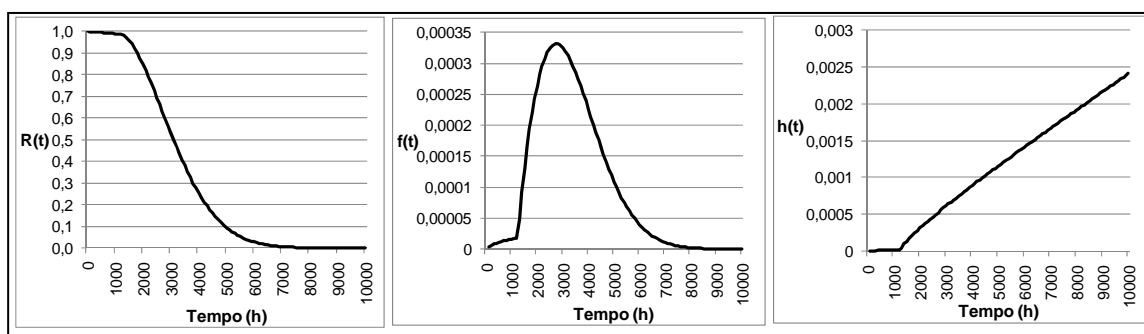


Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente CZ

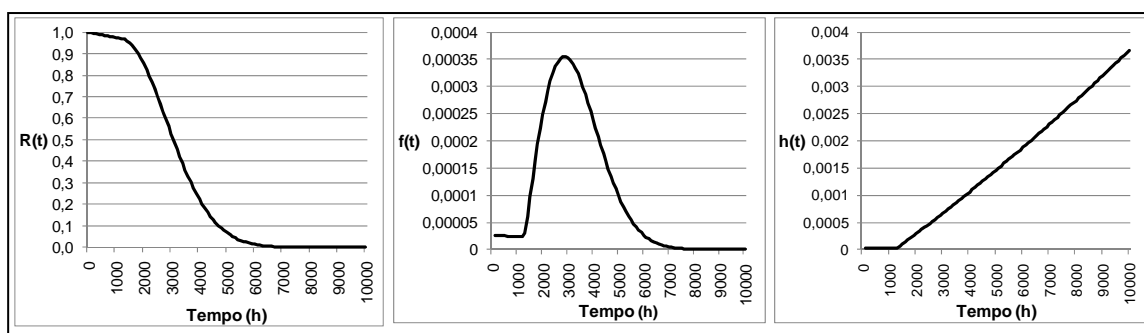
APÊNDICE G – Gráficos das funções $R(t)$, $f(t)$ e $h(t)$ dos componentes



Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente DZ

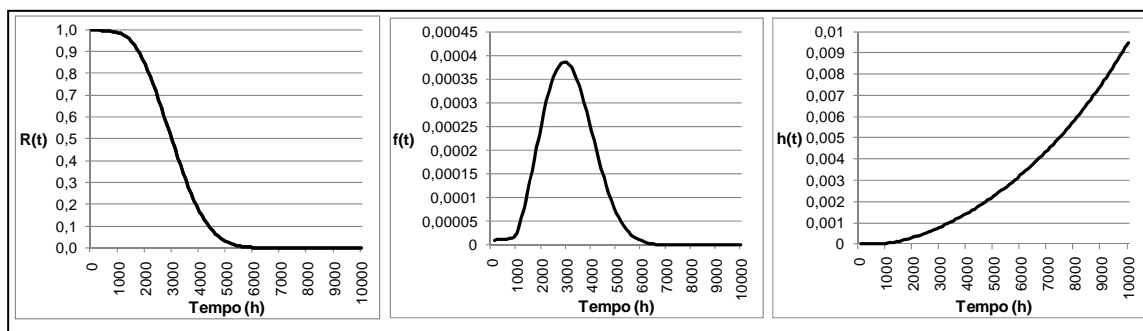


Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente EZ

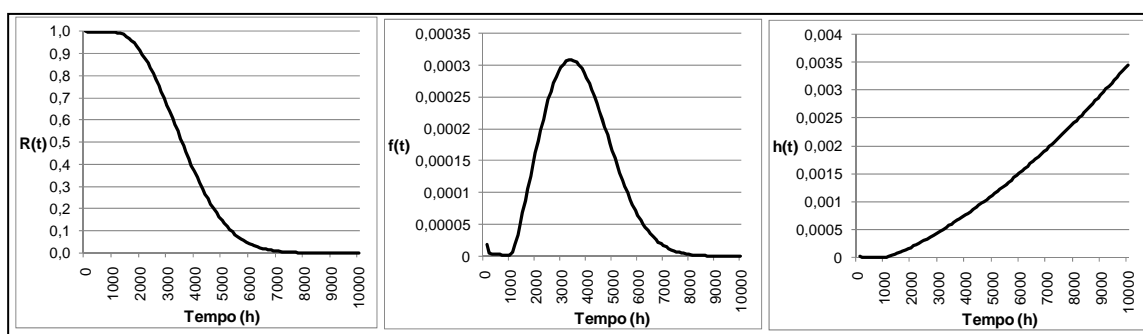


Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente FZ

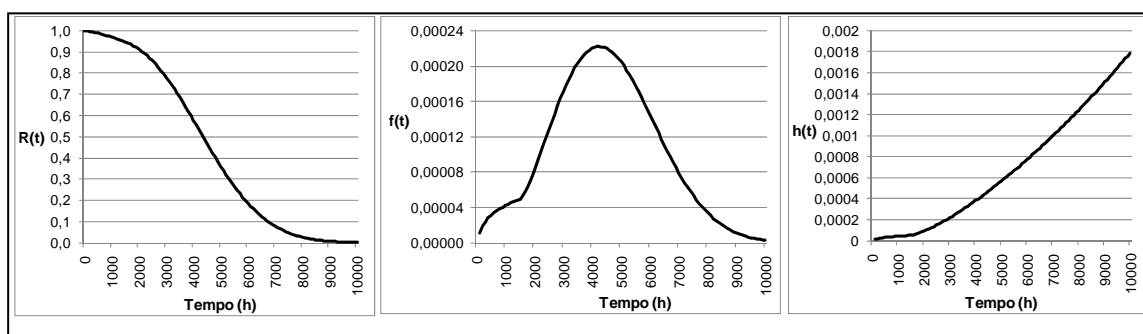
APÊNDICE G – Gráficos das funções $R(t)$, $f(t)$ e $h(t)$ dos componentes



Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente GZ

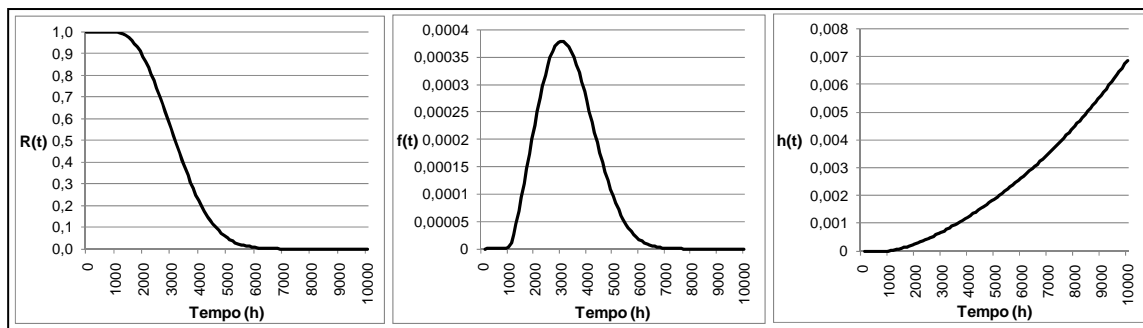


Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente HZ

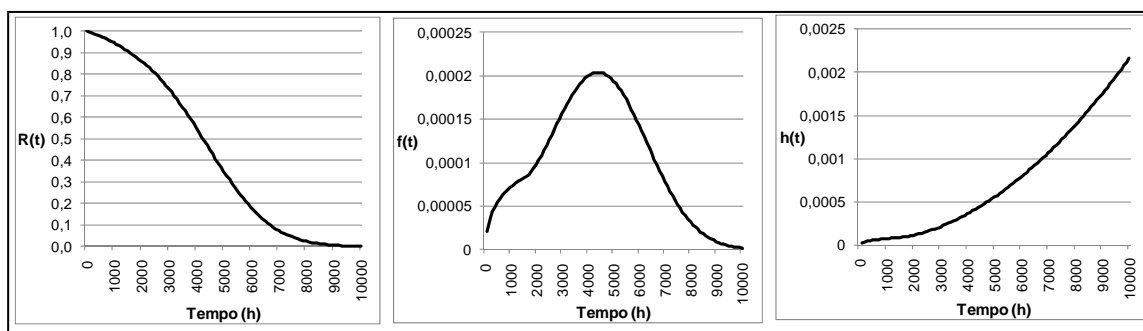


Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente IZ

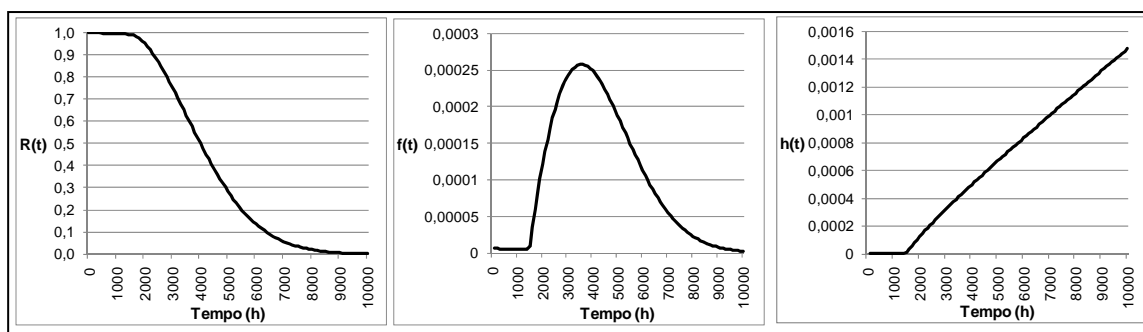
APÊNDICE G – Gráficos das funções $R(t)$, $f(t)$ e $h(t)$ dos componentes



Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente JZ

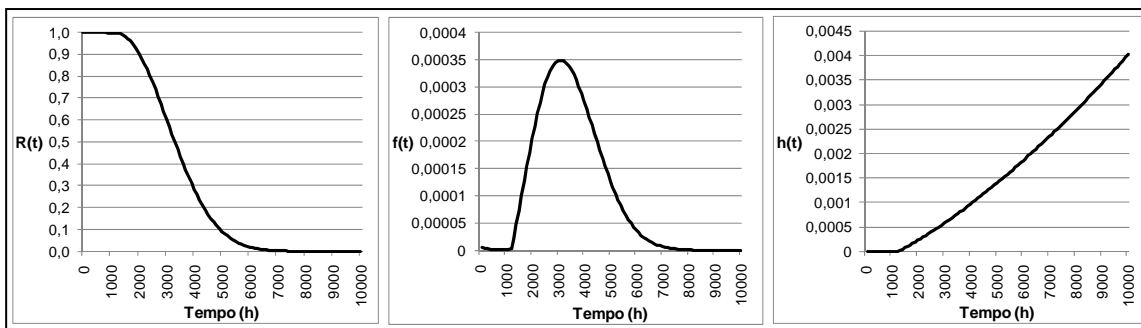


Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente KZ

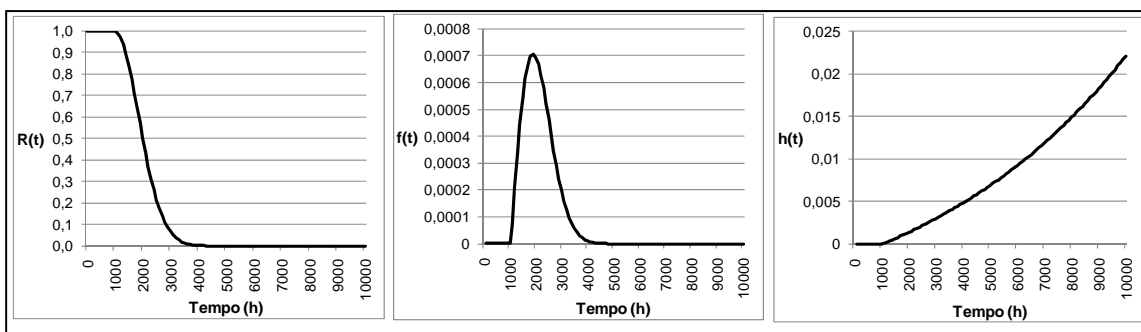


Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente LZ

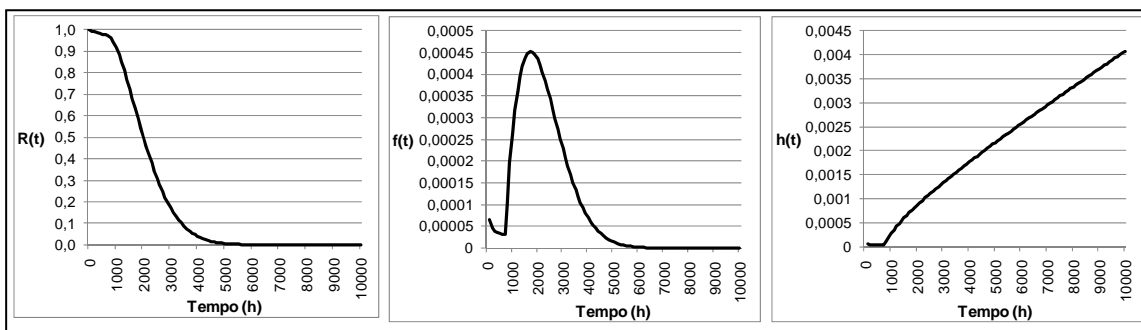
APÊNDICE G – Gráficos das funções $R(t)$, $f(t)$ e $h(t)$ dos componentes



Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente MZ



Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente NZ



Gráficos da confiabilidade, $R(t)$; densidade da probabilidade, $f(t)$ e taxa de risco, $h(t)$ do componente OZ