

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

Rodrigo K. Soeiro de Souza

PROVISÃO DE CUSTOS DE GARANTIA ANUAL
BASEADO EM ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE
MÁQUINAS AGRÍCOLAS

Porto Alegre

2009

Rodrigo K. Soeiro de Souza

Provisão de custos de garantia anual baseado em análise de confiabilidade 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 Sistemas de Qualidade.

Orientador: Professora Liane Werner, Dr.^a.

Porto Alegre

2009

Rodrigo K. Soeiro de Souza

Provisão de custos de garantia anual baseado em análise de confiabilidade de máquinas agrícolas

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Profissional 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. Liana Werner, Dr^a.

Orientador PPGEP/UFRGS

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

Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professor Flávio Sanson Fogliatto, *Ph.D.* (PPGEP/UFRGS)

Professor Eduardo Maldonado Filho, Dr. (PPGE/UFRGS)

Professor Michel Jose Anzanello, *Ph.D.* (PPGEP/UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por todos os ensinamentos de vida e por sempre incentivarem meus avanços pessoais e profissionais.

Sou grato à minha orientadora, professora Liane Werner, pelo apoio e contribuições oferecidas para elaboração e conclusão deste trabalho.

Por fim, agradeço à AGCO do Brasil por ter proporcionado a realização desta dissertação. Principalmente ao Cléber Bandeira e ao Hélio Amoretti, que sempre me disponibilizaram tempo, paciência e valiosa experiência que contribuíram de forma decisiva para o desenvolvimento desta ideia.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Comentários Iniciais.....	10
1.2. Tema e objetivos.....	12
1.3. Justificativa.....	13
1.4. Método.....	14
1.5. Delimitações do trabalho.....	15
1.6. Estrutura do trabalho.....	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1. Confiabilidade.....	18
2.1.1 Conceitos.....	18
2.1.2 Variáveis aleatórias contínuas e funções matemáticas de confiabilidade.....	20
2.1.3 Análise de dados de vida.....	22
2.1.4 Distribuições de probabilidade contínuas.....	25
2.1.5 Estimativa de parâmetros.....	29
2.1.6 Limites de confiança.....	35
2.2. Garantia.....	37
2.2.1 Conceitos.....	37
2.2.2 Métodos de previsão de retornos em garantia e a modelagem da Matriz Diagonal.....	41
3. PROPOSTA PARA PROVISIONAMENTO DE GARANTIA.....	44
3.1. Metodologia Atual.....	44
3.2. Avaliação da Modelagem da Matriz Diagonal.....	47
3.3. Metodologia Proposta.....	50
3.3.1 Passo um – Estabelecer subsistemas funcionais.....	51
3.3.2 Passo dois – Obter os dados de vendas.....	52
3.3.3 Passo três – Relacionar os dados de vendas e falhas em Matriz Diagonal.....	52
3.3.4 Passo quatro – Ajustar a distribuição de probabilidade.....	53
3.3.5 Passo cinco – Estimar os parâmetros das distribuições de probabilidade ajustadas.....	53
3.3.6 Passo seis – Obter os dados de vendas projetados para o período futuro.....	54
3.3.7 Passo sete – Calcular a previsão de falhas mês a mês do período futuro.....	54
3.3.8 Passo oito – Determinar o custo médio projetado para o ano futuro de cada um dos subsistemas.....	55

3.3.9 Passo nove – Calcular a previsão do custo mensal de falhas do período futuro de cada subsistema	55
3.3.10 Passo dez – Calcular a previsão mensal de custos com falhas do produto para o período futuro	56
4. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO PRÁTICO	57
4.1. Objeto do estudo.....	57
4.1.1 A empresa	57
4.1.2 Os produtos.....	58
4.2. Previsão de falhas de um período futuro – passos um a sete.....	59
4.2.1 Subsistemas funcionais – passo um.....	60
4.2.2 Volume de vendas histórico – passo dois.....	61
4.2.3 Dados de falhas (Matriz Diagonal) – passo três	63
4.2.4 Ajuste e estimação das distribuições de probabilidade – passos quatro e cinco	66
4.2.5 Previsão de falhas futuras baseadas na estimativa de vendas – passos seis e sete ..	76
4.3. Análise financeira – passos oito a dez	78
4.4. Resultados obtidos.....	82
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
5.1. Conclusões.....	86
5.2. Trabalhos futuros	88
REFERENCIAS	90
APÊNDICE A – GRÁFICOS DE PROBABILIDADE CALCULADOS PARA OS DADOS DE FALHA ESTUDADOS.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Uma função de densidade de probabilidade	21
Figura 2 - Gráficos hipotéticos das quatro funções básicas da confiabilidade.....	22
Figura 3 - Tipos de dados de falha: completos (a) e censurados à direita (b)	24
Figura 4 - Comparação de características dos métodos de regressão por MQO e MVE	35
Figura 5 - Intervalo de confiança bi-lateral	36
Figura 6 - Limites de confiança unilaterais: inferior (a) e superior (b).....	36
Figura 7 - Representação de uma garantia 2D.....	40
Figura 8 - Matriz diagonal de retornos em garantia de produtos vendidos entre março e agosto	42
Figura 9 - Fluxograma com os dez passos da metodologia proposta	50
Figura 10 - Características técnicas dos tratores MF250XE, MF265, MF275 e MF283	59
Figura 11 - Subsistemas funcionais a partir do parâmetro grupo do código de falhas.....	61
Figura 12 - Planilha de retornos do subsistema transmissão dos tratores MF265, no software Weibull	67
Figura 13 - Quantidade de unidades vendidas por período dos tratores MF265, no software Weibull	68
Figura 14 - Resultado do teste de aderência do sistema Weibull para os dados de falha do subsistema transmissão dos tratores MF265	68
Figura 15 - Detalhes do resultado do teste de aderência do sistema Weibull mostrado na Figura 14.....	69
Figura 16 - Parâmetros da distribuição Lognormal calculados para os dados de falha do subsistema transmissão dos tratores MF265	70
Figura 17 - Gráfico de probabilidade da distribuição Lognormal calculada para os dados de falha do subsistema transmissão dos tratores MF265	71
Figura 18 - Tela de escolha do modelo Weibull Mista com duas subpopulações.....	72
Figura 19 - Parâmetros das duas subpopulações da distribuição Weibull Mista calculados para os dados de falha do subsistema transmissão dos tratores MF265.....	73
Figura 20 - Gráfico de probabilidade da distribuição Weibull Mista de duas subpopulações calculada para os dados de falha do subsistema transmissão dos tratores MF265.....	74
Figura 21 - Previsão de falhas do subsistema transmissão calculadas no software Weibull, dos tratores MF265	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tamanho da área de cultivo pela frota de tratores - dados de 2003	11
Tabela 2 – Planilha de cálculo do provisionamento de garantia normal de um trator	45
Tabela 3 - Volume de vendas dos anos de 2003 a 2005 dos modelos de tratores estudados ...	62
Tabela 4 - Quantidade total de falhas consideradas entre 2003 e 2005, por subsistema, por modelo de trator.....	64
Tabela 5 - Matriz diagonal das falhas do subsistema hidráulico do trator MF265	65
Tabela 6 - Parâmetros das distribuições adotadas para os tratores MF265, MF275 e MF283.	75
Tabela 7 - Parâmetros das distribuições adotadas para os tratores MF250 XE.....	76
Tabela 8 - Previsão da quantidade de venda dos tratores no ano de 2006	77
Tabela 9 - Custo médio das falhas ocorridas durante o ano de 2005, por subsistema funcional	79
Tabela 10 - Custo médio de falhas projetado para o ano de 2006, por subsistema funcional..	79
Tabela 11 - Previsão do custo com falhas durante o ano de 2006 dos tratores MF250 XE	80
Tabela 12 - Previsão do custo com falhas durante o ano de 2006 dos tratores MF265	80
Tabela 13 - Previsão do custo com falhas durante o ano de 2006 dos tratores MF275	81
Tabela 14 - Previsão do custo com falhas durante o ano de 2006 dos tratores MF283	81
Tabela 15 - Comparativo dos resultados da metodologia proposta versus os dados reais de 2006	83
Tabela 16 - Comparativo dos resultados da metodologia proposta versus metodologia atual.	85

RESUMO

Um preciso planejamento financeiro das empresas fabricantes de máquinas agrícolas pode se configurar em um grande diferencial competitivo no atual cenário econômico de expansão assegurada para os próximos anos do agronegócio brasileiro. Os recursos financeiros alocados para cobrir os custos de falhas das máquinas durante seu período de garantia representam grande incerteza neste planejamento, uma vez que são expressivos e difíceis de prever com alto grau de confiança. Este trabalho propõe um método para se determinar a provisão dos custos relativos às falhas dos produtos de uma empresa fabricante de máquinas agrícolas durante o período de garantia de um ano futuro, baseado na análise de confiabilidade destas máquinas. Os resultados obtidos aplicando-se a metodologia aos dados reais de quatro diferentes modelos de tratores da empresa AGCO do Brasil se mostraram promissores com erros totais abaixo de 10%, além de efeitos que podem ser utilizados pela área de Serviço para rastrear o desempenho da confiabilidade das máquinas no campo em um espaço de tempo de apenas um mês.

ABSTRACT

A precise financial planning done by agricultural machinery manufactures can configure itself as a great competitive differential in today's Brazilian expanding agribusiness. The financial resources made available to cover machines' failures costs during their warranty period add great uncertainty to this plan, since they are significant and hard to predict with high confidence. This thesis proposes a method to determinate the failures' cost prediction of products manufactured by an agricultural machinery company during their warranty period in a future year, based on the reliability analysis of these machines. The results when applying the method to real data from four different models of tractors produced by AGCO do Brasil shown to be interesting, with overall errors bellow 10%. Also it shows benefits that can be used by Service area in order to follow up products' reliability performance in the field on a time window of only one month.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Comentários Iniciais

Na última década o Brasil está se consolidando como a superpotência agrícola mundial. Números do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2008) e da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) (2008) apontam que, entre 1998 e 2008, a produção de grãos cresceu 82%, de 76,5 milhões t, para 139,3 milhões t. A área de cultivo de grãos, no entanto, cresceu apenas 34%, denotando um incremento de produtividade de 36%. No mesmo período, a produção de cana-de-açúcar cresceu 75%.

O agronegócio brasileiro é uma atividade próspera, segura e rentável. Com um clima diversificado, chuvas regulares, energia solar abundante e 14% de toda a água doce disponível no planeta, o Brasil tem, de acordo com levantamentos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (2008), 388 milhões de hectares de terras agricultáveis férteis e de alta produtividade, dos quais 90 milhões ainda não foram explorados. Explorando este potencial de terras agricultáveis ainda não utilizadas, o Brasil pode aumentar em, no mínimo, três vezes sua atual produção de grãos, saltando dos atuais 123,2 milhões para 367,2 milhões de toneladas.

Esses fatores fazem do país um lugar de vocação natural para a agropecuária e todos os negócios relacionados a suas cadeias produtivas. Segundo Cogo (2008), o agronegócio é hoje a principal locomotiva da economia brasileira e responde por um em cada três reais gerados no país. Este setor é responsável por 33% do Produto Interno Bruto (PIB), 42% das exportações totais e 37% dos empregos brasileiros (IBGE, 2008).

O segmento de máquinas agrícolas teve papel de destaque nesta expansão. Tecnicamente, os equipamentos nacionais nada devem para aqueles produzidos nas mais adiantadas economias. Investimentos estrangeiros foram atraídos para o Brasil, configurando o país como plataforma internacional para o setor. Ainda segundo Cogo (2008), os mais elevados patamares de produção e vendas, além do maior conteúdo tecnológico dos equipamentos, fizeram desse segmento uma importante indústria no país. Têm-se assim um verdadeiro pólo de atração para os novos investimentos em escala produtiva e em tecnologia para o segmento de máquinas agrícolas automotrizes.

Contribuindo com este cenário existe o fato de que a mecanização agrícola nas propriedades rurais do Brasil ainda é inferior do que a verificada em países mais desenvolvidos. Apesar de se registrar um aumento na área cultivada no país, não se tem o mesmo aumento no volume de máquinas no campo, o que resulta em um grande potencial de crescimento. Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) (2008), em 2003 o Brasil ainda tinha, em média, uma área de 114 ha por trator no campo, o que é perto da metade da quantidade média de máquinas utilizadas em uma mesma área mundialmente, e um terço da quantidade de máquinas utilizadas nos Estados Unidos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Tamanho da área de cultivo pela frota de tratores - dados de 2003

País / Região	Área de Cultivo [mil ha]	Frota de Tratores	Número de ha por trator
MUNDO	1.381.917	26.345.272	52
ÁFRICA	174.202	567.397	307
AM. NORTE	258.701	5.835.768	44
AM. SUL	97.740	1.199.043	82
ÁSIA	499.497	6.920.648	72
EUROPA	299.760	11.421.088	26
OCEANIA	52.017	401.328	130
Brasil	51.143	450.000	114
Argentina	25.000	280.000	89
Canadá	45.360	740.000	61
EUA	175.000	4.800.000	36
França	18.288	1.312.000	14
Grã-Bretanha	6.090	500.000	12

Fonte: adaptado de ANFAVEA (2008)

Outros fatores que devem contribuir para o aumento de consumo de máquinas agrícolas são o aumento da demanda mundial de alimentos e o aumento da necessidade de utilização de fontes de energia renováveis, como o etanol e o biodiesel. Ao contrário do cenário brasileiro, a maior parte dos países do mundo já está com sua fronteira agrícola limitada ou em decadência, na contramão do aumento da necessidade por alimentos, gerada pela ascensão econômica de milhões de pessoas, principalmente no Brasil, na China, na Índia e em países do sudeste da Ásia (GONÇALVES, 2008).

Nos dias de hoje vive-se a necessidade de substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis. Essa necessidade é confirmada por diversas resoluções

governamentais que aumentam a utilização de etanol misturada à gasolina nas aplicações automotivas. O governo norte-americano tem intenção de adicionar cerca de 20% de etanol à gasolina, até 2017. No Brasil, que lidera a produção de etanol logo atrás dos Estados Unidos, o percentual de adição é de 25% (COGO, 2008).

Diante deste cenário bastante promissor, as empresas fabricantes de máquinas agrícolas devem estar devidamente preparadas para atender esta crescente demanda por produtos, com seu parque fabril corretamente dimensionado e com a capacidade produtiva adequada. Além disso, devem estar desenvolvendo novas tecnologias que propiciem o aumento da produtividade da propriedade rural em suas mais diferentes aplicações. Todas estas ações dependem de um planejamento estratégico e financeiro corretos da empresa, propiciando os recursos necessários para realizar os investimentos exigidos, maximizando suas chances de sucesso em aproveitar as tendências favoráveis do setor frente a seus competidores.

1.2. Tema e objetivos

Diante do exposto, este trabalho tem como tema a previsão de custos de garantia, baseada na análise de confiabilidade dos dados de vida dos produtos, estudados no âmbito do setor de máquinas agrícolas. Este é um tema que ganha importância quando se faz o planejamento financeiro da empresa. Uma vez que a previsão dos custos de garantia é consistente, torna-se possível provisionar corretamente os recursos financeiros necessários para cobrir estes gastos ao longo do ano. A metodologia praticada na empresa para dimensionar tais recursos não é embasada em nenhuma técnica academicamente validada, um dos motivos que geram conflitos constantes entre o setor responsável pelo planejamento e gerenciamento da garantia e o setor financeiro da empresa.

Dentro deste contexto, o objetivo principal do trabalho é determinar a provisão do custo relativo a falhas dos produtos durante o período de garantia do ano futuro, baseado na análise de confiabilidade destes equipamentos.. Os dados de vida das máquinas, que serão a base para a análise de confiabilidade, estão disponíveis em bancos de dados de garantia da empresa. Como objetivo específico do trabalho será criado um procedimento para que a metodologia possa ser repetida por outros funcionários que não sejam necessariamente especialistas com vasta experiência na área de garantia, utilizando-se de ferramentas disponíveis na empresa. Será proposta uma metodologia adaptada da modelagem da Matriz

Diagonal, apresentada por Pallerosi (2007), para se realizar o provisionamento financeiro das falhas de um produto durante sua utilização em garantia.

1.3. Justificativa

O tema proposto se justifica academicamente pelo fato de que estudos de confiabilidade associados com custos reais de falhas não são comumente encontrados na literatura. Embora estudos de confiabilidade, e mais especificamente análise de dados de falha no período de garantia, sejam cada vez mais freqüentes, poucas vezes estas análises trazem o ponto de vista econômico associado.

Já sob o ponto de vista da aplicação prática, este tema se justifica pela necessidade de modernização dos métodos utilizados para o planejamento estratégico e para a tomada de decisão das empresas de máquinas agrícolas. Se comparadas às empresas do setor automotivo as empresas do setor de maquinário agrícola ainda não estão no mesmo nível de utilização de métodos e técnicas que se provam eficientes quando bem aplicadas, quer sejam para o processo produtivo, de desenvolvimento de produto, de logística, ou mais amplamente, de gerenciamento da empresa (SCHAEDLER, 2003). Métodos matemáticos ou estatísticos que apoiem a tomada de decisão são exemplos de técnicas que podem ser usadas para diminuir esta diferença entre os setores, e ainda prepararem a empresa para o processo de modernização que o setor vem passando.

Além disto, atualmente na empresa em estudo, o cálculo do provisionamento de garantia para o ano sob planejamento é realizado com base na média dos custos do período anterior, aliado a uma previsão de vendas futuras. Como em qualquer empresa do setor, o montante financeiro provisionado para ser gasto com despesas de falhas que ocorrem no período de garantia dos produtos comercializados têm grande impacto no planejamento financeiro da empresa, representando um percentual significativo nos lucros das operações. Justifica-se então que se procure melhorar a acuracidade da previsão anual de custos de garantia da empresa, criando um método mais confiável, que busque minimizar erros no processo de tomada de decisão e planejamento estratégico da empresa.

O fato de se ter a melhor informação possível sobre a previsão dos custos de garantia de um período futuro permitirá a empresa saber qual o montante de recursos financeiros já estará comprometido com gastos de falhas se seus resultados de vendas forem de acordo com o planejado. Este é um recurso que não pode ser destinado a nenhum outro fim, e tem prioridade sobre qualquer outro plano de investimentos da empresa. Portanto ter esta

informação com o máximo de precisão permite que se realize este plano de forma mais segura, sem correr riscos de utilização de recursos prioritários.

1.4. Método

O método de trabalho será descrito observando dois aspectos: (i) o método de pesquisa científica, caracterizando o tipo de pesquisa realizada, e (ii) o método de trabalho propriamente dito, descrevendo as etapas, técnicas e ferramentas utilizadas no desenvolvimento desta dissertação.

Lakatos e Marconi (2001) definem a pesquisa científica como uma atividade voltada à busca de respostas e à solução de problemas para questões propostas, através da utilização de métodos científicos. Desta forma, para estes autores, no que tange à natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada, uma vez que utiliza dados específicos da empresa sob estudo, e espera-se que os resultados obtidos sejam aplicados no dia-a-dia, solucionando um problema real. Vergara (2000) corrobora com este posicionamento, quando define a pesquisa aplicada como sendo motivada pela necessidade de resolver problemas concretos, mais imediatos ou não.

Já quando analisada quanto a abordagem, o trabalho pode ser classificado como pesquisa quantitativa, pois se concentra na análise estatística dos dados em estudo. Mauch e Birch (1998) alegam que algumas das características mais marcantes deste estilo de pesquisa são que elas se iniciam com fenômenos específicos e tentam relacioná-los a outros, para esclarecer questões mais amplas, e, justamente, utilizam análise estatísticas para demonstrar significância.

Considerando os objetivos do trabalho, este se caracteriza por ser uma pesquisa descritiva. A partir da análise quantitativa dos dados se propõe a descrever as relações entre estes dados e se determinar um novo método de trabalho a partir dos mesmos. Mattar (1999) afirma que sua utilização deve ocorrer quando o propósito de estudo é descrever as características de grupos, estimar a proporção de elementos que tenham certas características ou comportamentos, dentro de uma população específica, e descobrir ou verificar a existência de relação entre as variáveis estudadas.

Por fim, tendo em vista o procedimento sob o qual a pesquisa foi conduzida, trata-se de uma pesquisa ação, já que o pesquisador está inserido no contexto do problema em análise, participando diretamente da proposição de solução criada. Segundo Roesch (1996), o enfoque da pesquisa ação requer que o pesquisador interprete o mundo real a partir da perspectiva dos sujeitos de sua investigação, ou ainda que esteja diretamente envolvido com ela.

Com relação às etapas do trabalho, o desenvolvimento foi realizado em quatro etapas. A primeira envolveu uma revisão da bibliografia sobre confiabilidade, garantia e métodos de provisionamento de garantia baseado em dados de vida de produtos, onde se buscaram conhecimentos referentes a definições, melhores práticas e resultados obtidos.

A segunda etapa envolveu o levantamento dos dados de garantia, contemplando o momento em que as falhas ocorrem e os custos decorrentes, associando produtos com características semelhantes em uma determinada população. Estes dados são provenientes dos registros do sistema de garantia da empresa.

A terceira etapa consistiu em aplicar um modelo de análise de retornos de garantia nos dados obtidos, gerando curvas de confiabilidade associadas aos custos de falhas. Para realizar esta análise foi utilizado um software estatístico. Ainda nesta etapa, as curvas de confiabilidade foram associadas aos custos das falhas.

Na quarta etapa definiu-se a provisão de garantia para um ano futuro. Isto foi realizado utilizando-se os dados de confiabilidade associados aos custos de falha, juntamente com as previsões de vendas de produtos para o ano futuro, para se fazer uma previsão de gastos com falhas futuras.

A última etapa consistiu em validar a provisão determinada comparando-a com dados financeiros da empresa. Além disso, todas as etapas anteriores foram consolidadas criando um procedimento que pode ser seguido na empresa para se determinar o provisionamento de garantia dos anos futuros.

1.5. Delimitações do trabalho

As delimitações do trabalho estão descritas nesta seção em duas partes. A primeira se refere ao escopo do trabalho; já a segunda, apresentada no último parágrafo, é uma limitação quanto ao processo de validação do mesmo.

Apesar de o trabalho discutir resultados de análises de confiabilidades dos produtos sob estudo ele não irá abordar hipóteses, procedimentos ou técnicas que se destinem a aumentar a confiabilidade dos mesmos.

O objetivo deste trabalho não é analisar o comportamento da garantia sob os aspectos de adequação de seu tempo às demandas de mercado. Tampouco visa abordar as implicações políticas e de satisfação dos clientes do gerenciamento da garantia no contexto em que a empresa está inserida, apesar de estes pontos serem de extrema importância para a

prosperidade do negócio. O trabalho tem a intenção apresentar uma abordagem matemática que se some ao processo de planejamento financeiro da empresa.

Os processos de garantia sob análise referem-se somente aos produtos normais de produção. Novos produtos e produtos com configuração especial não serão abordados. Estes tipos de máquinas tendem a ter comportamentos particulares e devem ser estudados separadamente.

Por fim, devido à limitação de prazo para finalização deste estudo, não será verificado na prática se o provisionamento proposto condiz com o resultado real gasto no ano futuro. Para tanto teria que se esperar o fim de um ano para que os números fossem comparados, o que não será possível. As validações dos modelos propostos serão realizadas utilizando-se dados históricos da empresa.

1.6. Estrutura do trabalho

Este trabalho está apresentado em cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema, justificando a importância de um provisionamento correto dos custos de garantia, visando um bom planejamento econômico das empresas de máquinas agrícolas que vivem um momento de grandes oportunidades de crescimento no cenário atual do agronegócio no Brasil. Este capítulo também apresenta os objetivos, método, delimitações e estrutura do estudo.

O segundo capítulo traz uma revisão bibliográfica contemplando: (i) conceitos de confiabilidade e um apanhado sobre análise de dados de vida; (ii) conceitos de garantia e seu impacto no planejamento econômico das empresas; e (iii) métodos de provisionamento de garantia baseados em análise de confiabilidade, contemplando análises de retornos de garantia, modelos de provisionamento de garantia e resultados obtidos com este tipo de abordagem.

O terceiro capítulo aborda o modelo conceitual proposto. Neste capítulo são descritos os métodos de análise de confiabilidade utilizados, a análise dos retornos de garantia, os custos envolvidos e o modelo de provisionamento adotado.

No quarto capítulo a metodologia apresentada no capítulo três é aplicada aos dados levantados da empresa. Os resultados obtidos são discutidos e validados contra os dados financeiros reais. Neste capítulo também são descritas as atividades da empresa e a metodologia atualmente utilizada para previsão e provisionamento de custos de garantia.

O quinto capítulo apresenta as conclusões do trabalho desenvolvido. Também são propostas sugestões de trabalhos futuros que possam complementar esta pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O objetivo deste capítulo é apresentar conceitos básicos para o entendimento da dissertação. Trabalhos já realizados que contribuem para o desenvolvimento do objetivo proposto são revisados com suas referências citadas, de forma que maiores informações sobre cada assunto possam ser obtidas. São abordados os assuntos confiabilidade e garantia.

2.1. Confiabilidade

Nesta seção são apresentados os conceitos básicos do estudo da confiabilidade. Pretende-se expor a definição de confiabilidade, seus objetivos e as funções matemáticas básicas que permitem este estudo.

Após é apresentado um resumo com a metodologia básica para se analisar os dados de vida de componentes, produtos, equipamentos ou sistemas. São discutidas questões relativas às fontes dos dados, classificação dos dados, as principais distribuições estatísticas que descrevem o comportamento dos dados, métodos de estimativa de parâmetros para estas distribuições e, por fim, quais os limites de confiança das projeções.

2.1.1 Conceitos

Confiabilidade é usualmente definida como a probabilidade de um item desempenhar sua função requerida, quando utilizado em condições pré-estabelecidas, durante um período de tempo. Sendo mais amplo, confiabilidade é um aspecto da engenharia que estuda as falhas durante a vida de um produto (O'CONNOR, 2002).

Pallerosi (2006, p. 1) defende que a confiabilidade é uma dimensão da qualidade, “é a qualidade em função da durabilidade, expressa por uma probabilidade, em função de uma variável temporal (tempo de uso, quilometragem, ciclos, etc.)”. O autor aponta ainda que mesmo que não se tenha o conhecimento exato de sua definição, a noção de confiabilidade está presente no cotidiano de cada pessoa, associada aos aspectos de manutenibilidade e disponibilidade dos produtos.

Dentro deste mesmo conceito, associando confiabilidade à qualidade, Vassiliou (2007) afirma que a confiabilidade é uma das mais importantes características de qualidade dos componentes, produtos ou sistemas. Completa classificando o estudo da confiabilidade como

uma combinação de conhecimentos de física, estatística e engenharia em uma única disciplina.

Kececioglu (1991) é mais específico quanto ao que o estudo das falhas se refere. Para o autor a engenharia da confiabilidade proporciona as ferramentas teóricas e práticas através da probabilidade e capacidade das peças, componentes e equipamentos, produtos e sistemas para realizar suas funções por determinados períodos de tempo desejados sem falhas, em ambientes específicos e com a confiança desejada, podendo esta ser especificada, projetada, prevista, testada e demonstrada.

Por fim, Murthy e Wilson (2006) aprofundam esta definição dividindo a teoria da confiabilidade em quatro aspectos distintos que lidam com diferentes problemas, sendo: (i) ciência da confiabilidade, que visa entender os efeitos da degradação dos componentes que levam às falhas; (ii) engenharia da confiabilidade, destinada a projetar e fabricar produtos confiáveis; (iii) gerenciamento da confiabilidade, que gerencia as atividades durante o projeto e produção dos produtos; e, por fim, (iv) modelagem da confiabilidade, que se ocupa de criar modelos para obter soluções para problemas de previsão, estimação e otimização do desempenho dos produtos não-confiáveis, o impacto da não-confiabilidade e as ações para diminuir este impacto.

Assim, segundo Vassiliou (2007), o estudo da confiabilidade pode responder a questões cada vez mais relevantes para as empresas nos dias de hoje, como: Qual a vida esperada do produto? Quantas falhas são esperadas no próximo período? Quanto estas falhas custarão para a empresa? É possível tornar este negócio mais rentável?

O'Connor (2002) explica que, no passado, os projetos de produtos eram conduzidos apoiando-se na experiência dos desenvolvedores e na manutenção da alta qualidade de produção com relativo sucesso. Porém o aumento da competição, da pressão com calendários e datas limites, custos de falhas, a rápida evolução de novos materiais, métodos e sistemas complexos, além da necessidade de redução de custos e a consideração de questões legais e de segurança aumentaram em muito o risco de desenvolvimento de novos produtos utilizando técnicas tradicionais.

A tendência crescente da exigência de contratos com garantia de qualidade do produto exige o fornecimento de parâmetros que caracterizem a confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade destes produtos (PALLEROSI, 2007). Ainda segundo o autor, o movimento mundial focado no negócio de se vender o “serviço” do produto, aliada à necessidade de se garantir a imagem dos produtos na forma de redução das falhas e dos custos com

procedimentos de reparos levam as empresas modernas a adotar novos métodos de desenvolvimento e gerenciamento baseados em confiabilidade.

Sendo assim, para que uma empresa seja bem sucedida no ambiente complexo e altamente competitivo e tecnológico de hoje, é fundamental que ela conheça a confiabilidade de seu produto e que seja capaz de controlá-la de modo a produzir produtos em um ótimo nível de confiabilidade. Isso rende um custo de ciclo de vida mínimo ao usuário e minimiza os custos do fabricante de tal produto sem comprometer a confiabilidade do produto (RELIASOFT, 2005).

A seguir são apresentados conceitos estatísticos básicos para o estudo da confiabilidade, bem como as suas principais funções matemáticas.

2.1.2 Variáveis aleatórias contínuas e funções matemáticas de confiabilidade

Uma variável aleatória contínua pode assumir qualquer valor dentro de um intervalo definido $[A,B]$. No estudo da confiabilidade a variável aleatória de interesse é o tempo até falha de um produto ou componente e, em geral, pode acontecer em um intervalo de zero a infinito (unidades de tempo), já que não se sabe quando ocorrerá (WERNER, 1996; RELIASOFT, 2005).

Sendo X uma variável aleatória contínua, a função $f(x)$ é uma função densidade de probabilidade (*fdp*), se satisfaz as seguintes condições (WERNER, 1996):

$$f(x) \geq 0 \forall x \in \mathfrak{R}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$$

$$P(x \in A) = \int_A f(x)dx, A \subset \mathfrak{R}$$

A probabilidade de X ser exatamente igual a certo valor especificado será igual a zero, isto é, $P(X=x) = 0$. A Figura 1 demonstra a função densidade de probabilidade (*fdp*) de uma variável aleatória contínua, indicando a probabilidade de x assumir um valor entre a e b como sendo a área preenchida do gráfico.

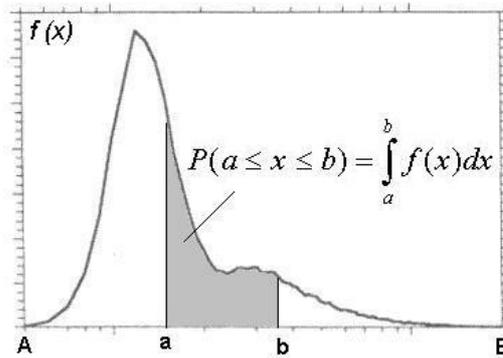


Figura 1 - Uma função de densidade de probabilidade

Fonte: elaborado pelo autor

A função de distribuição acumulada (*cdf*), se X é uma variável aleatória contínua com *fdp* dada pela $f(x)$, é expressa pela equação (1).

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{0, -\infty}^x f(s) ds, \forall x \in \mathfrak{R} \quad (1)$$

A função confiabilidade, $R(t)$, é a probabilidade de não haver falha no intervalo $(0, t]$, ou ainda, a probabilidade de sucesso além da idade t . Ela é dada pela equação (2).

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2)$$

A taxa de falha é a função que permite a determinação do número de falhas ocorrendo por unidade de tempo. Matematicamente é dada conforme a equação (3).

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3)$$

A Figura 2 exemplifica graficamente as quatro funções básicas da confiabilidade. Outra medida importante é a da confiabilidade condicional, muito utilizada quando se analisam dados de garantia dos produtos. A confiabilidade condicional calcula qual a probabilidade de sucesso de uma unidade completar uma missão t , dado que já se sabe que esta mesma unidade completou com sucesso uma missão de duração T , sendo dada pela equação (4).

$$R(t|T) = \frac{R(t+T)}{R(T)} \quad (4)$$

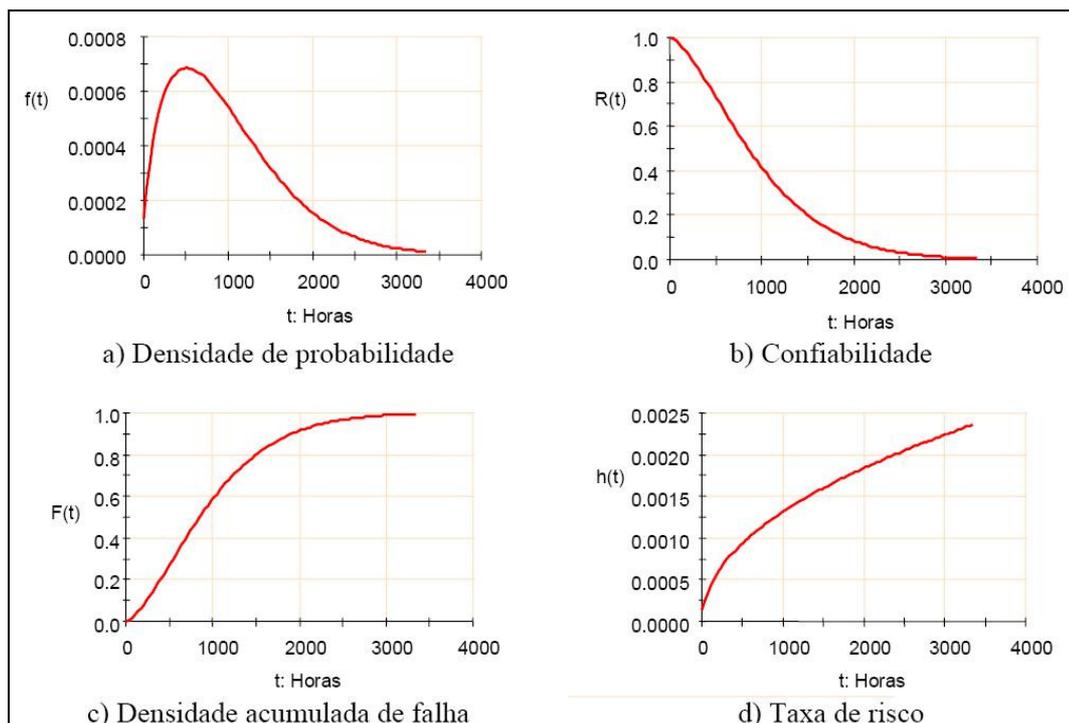


Figura 2 - Gráficos hipotéticos das quatro funções básicas da confiabilidade

Fonte: Dillenburg (2005)

Por fim, as últimas medidas de confiabilidade que se tem interesse são: (i) a vida média, denotada por μ , ou MTTF (do inglês *mean time to failure*), que dá a medida do tempo médio com que as falhas ocorrem numa determinada população; e (ii) a vida mediana, \bar{T} , que representa o valor onde a variável aleatória tem exatamente metade da área da função densidade de probabilidade à sua direita e metade à sua esquerda. Suas equações são dadas conforme expresso em (5).

$$\mu = MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$$

$$\int_{-\infty}^{\bar{T}} f(t) dt = 0,5$$
(5)

2.1.3 Análise de dados de vida

Segundo Vassiliou (2007), a análise dos dados de vida de um produto pode quantificar a vida deste produto, ou ainda, entender o comportamento de sua taxa de falha ao longo do tempo. Através do uso da análise de dados da vida do produto pode-se determinar a probabilidade e a capacidade das peças, componentes e sistemas para executar suas funções por determinados períodos de tempo desejados sem falhar, em ambientes específicos. Wilkins

(2002) descreve como os dados de vida podem representar todo o comportamento durante a vida útil de uma população de produtos, utilizando a chamada curva da banheira. O autor ainda demonstra como cada período deste tempo de vida pode ser analisado gerando interpretações bem específicas das falhas utilizando-se métodos estatísticos de confiabilidade.

Os dados sobre a vida de um produto podem incluir o tempo de vida de um produto no mercado (cliente), como o tempo em que o produto operou satisfatoriamente ou o tempo de operação do produto antes de falhar. Esse tempo pode ser medido em horas, quilômetros, ciclos até a falha, ciclos de pressão ou qualquer outra métrica com a qual a vida ou a exposição de um produto pode ser medida (RELIASOFT, 2005).

Estes dados que servirão para análise da confiabilidade do produto podem ser provenientes de diversas fontes. Dillenburg (2005) divide estas fontes em: (i) tabelas de dados de vida de partes ou componentes do produto, utilizadas para componentes amplamente conhecidos e aplicados na indústria; (ii) testes de vida, que consistem em dados resultantes de testes de laboratório específicos para cada componente, simulando a condição desejada de uso; e (iii) análise dos dados de falha no campo, que consiste em recolher os dados sobre as condições de falha dos produtos em funcionamento no campo, principalmente no período de garantia.

Lawless et al. (1995) e Coit e Dey (1999) consideram que os dados gerados pela operação dos produtos no campo pelos usuários finais são os mais desejáveis, visto que representam o uso normal dos itens submetidos a todas as solicitações do ambiente em que operam. No campo, estas solicitações são aplicadas simultaneamente interagindo entre si de muitas maneiras que são impossíveis de se reproduzir em laboratório.

Além disso, os custos para se conduzir experimentos até que se tenha uma quantidade significativa de amostras falhadas é muito alto ou até inviável. Mais um motivo pelo qual os dados de campo são a principal fonte de informação para estudos de confiabilidade, já que são coletados de forma econômica e eficiente através das redes de distribuição dos produtos (KARIM e SUZUKI, 2005).

Por outro lado, apesar das vantagens de se utilizar os dados de campo, Coit e Dey (1999) apontam os eventuais problemas de imprecisão no sistema de comunicação das falhas como uma desvantagem deste método. Lawless et al. (1995) complementam esta ideia alertando que esta imprecisão aumenta quando o produto em questão tem garantia bi-dimensional. Mais detalhes sobre garantia bi-dimensional são abordados na seção 2.2.

Já para Pallerosi (2007), as principais dificuldades para obtenção de valores precisos sobre as durações de uso, quando se usam dados de campo, são: (i) a defasagem do tempo

entre a venda e o início de utilização do produto pelo consumidor; e, (ii) a informação sobre a frequência de uso, se é contínua, periódica ou aleatória.

Uma vez que os dados de vida são analisados, há a possibilidade de se ter que considerar amostras em que nem todos os itens tenham falhado. Uma parcela de itens pode ter sobrevivido ao fim do teste, ou, ainda não ter falhado no campo ao final do período analisado. Este tipo de dado é denominado censurado (O'CONNOR, 2002). Quando os dados de falha de toda a população são conhecidos diz-se que estes dados são completos (MURTHY et al., 2004). A Figura 3 (a) apresenta uma representação de dados completos.

Murthy et al. (2004) afirmam que existem diferentes tipos de censura: à direita, à esquerda, em intervalo; simples ou múltipla; tipo I e tipo II. Coit e Dey (1999) ainda se referem à censura aleatória, e definem a censura do tipo I e tipo II. A censura de tipo I é aquela em que se tem um período pré-determinado de análise. Falhas que ocorrem após este período são censuradas. Já a censura de tipo II é aquela em que se tem um número de falhas pré-determinadas e quando se chega a este número, a coleta de dados é interrompida ou truncada.

O caso mais comum de censura refere-se aos dados censurados à direita ou dados suspensos (RELIASOFT, 2005a). No caso dos dados da vida do produto, esses conjuntos de dados são compostos por unidades que não falharam. Por exemplo, se testadas cinco unidades e somente três falharem até o final do teste, tem-se dados suspensos para as duas unidades que não apresentaram falhas. Pelo termo “censurado à direita” entende-se que o evento de interesse está à direita do ponto de dados. Em outras palavras, se as unidades continuassem operando, a falha ocorreria em algum momento após o ponto de dados, ou à direita da escala de tempo. Este tipo de censura é ilustrado na Figura 3 (b).

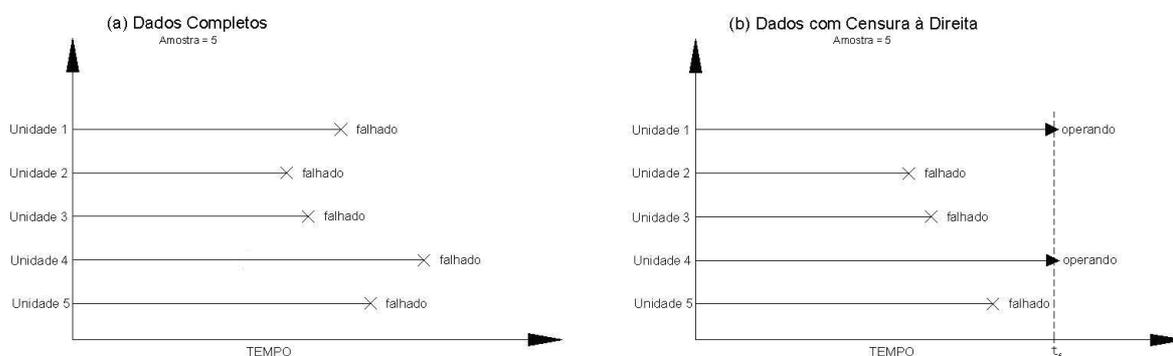


Figura 3 - Tipos de dados de falha: completos (a) e censurados à direita (b)

Fonte: elaborado pelo autor

O segundo tipo de censura é comumente chamado de dado censurado em intervalo. Os dados censurados em intervalo refletem incertezas sobre o tempo exato em que as unidades falharam dentro de um intervalo de tempo. Esse tipo de dado freqüentemente vem de testes ou situações onde os objetos de interesse não são monitorados constantemente.

Por fim, o terceiro tipo de censura é similar à censura de intervalo e é chamado de dado censurado à esquerda. Nos dados censurados à esquerda, apenas é possível saber que o tempo da falha ocorreu antes de um determinado momento.

Uma vez que todos os dados são colhidos e devidamente classificados parte-se então para aplicação de um modelo estatístico determinado, a fim de se ter a análise de confiabilidade da população sob estudo. É necessário que todos os dados, completos e censurados, sejam considerados para que a análise seja correta, ou seja, represente o comportamento da população em questão. Aldrige (2005) salienta que a não utilização dos dados censurados pode ter um grande efeito na precisão da análise de uma população, impactando diretamente na vida característica desta população quando, por exemplo, for aplicada uma distribuição Weibull. Segundo o autor, quanto mais completo forem os dados maior será a confiança depositada na análise.

De acordo com Murty et al. (2004) e Murthy e Wilson (2006) existem duas formas de se determinar o melhor modelo matemático para representar a população de falhas sob análise, sendo eles: (i) modelagem teórica, modelo físico, ou caixa-branca, onde o modelo é criado a partir de teorias já estabelecidas sobre falhas de componentes, ou quando considerando o comportamento de cada componente para se modelar o comportamento de falhas de todo o sistema; e (ii) modelagem empírica ou caixa-preta, onde o modelo se baseia exclusivamente nas informações das falhas e censuras da população. A modelagem caixa-preta é normalmente utilizada quando se trata de um sistema complexo e se tem pouco conhecimento dos fatores que levam às falhas.

Os passos a serem seguidos na modelagem caixa-preta são: (i) selecionar o modelo matemático; (ii) estimar os parâmetros do modelo; e (iii) validar o modelo. A seguir são apresentados os principais modelos estatísticos utilizados em confiabilidade e métodos de estimativa de parâmetros.

2.1.4 Distribuições de probabilidade contínuas

Modelos matemáticos pré-definidos para descrever a função confiabilidade podem ser ajustados aos dados de tempo até falha, permitindo sua descrição concisa, uma vez que

passam a ser descritos por um pequeno conjunto de parâmetros que caracterizam a distribuição adotada. A utilização destes modelos permite que se extrapolem os cálculos da probabilidade de falhas para tempos além dos conhecidos, fazendo-se estimativas de como se comportam os produtos quando submetidos a diferentes jornadas de trabalho (MEEKER e ESCOBAR, 2006; LAWLESS et al., 1995). Modelos não-paramétricos ou semi-paramétricos são mais difíceis de empregar dada a complicação nos cálculos matemáticos (LAWLESS et al., 1995).

As principais distribuições de probabilidade contínuas aplicadas ao estudo da confiabilidade são apresentadas a seguir, juntamente com a descrição de suas principais características.

A **distribuição de Weibull** é a mais geral, precisa e prática dentre todas as outras possíveis distribuições utilizadas (PALLEROSI, 2006). Ela pode englobar, com suficiente precisão, a maioria dos casos práticos. Isto é possível devido à influência do parâmetro de forma (β). Esta distribuição possui três parâmetros, mas em casos particulares pode ser descrita com dois parâmetros.

A **distribuição exponencial** é um caso particular da distribuição de Weibull, onde o parâmetro de forma $\beta=1$. Sua grande aplicação prática ocorre nos sistemas com significativa quantidade de componentes em série, caso típico de equipamentos eletrônicos ou equipamentos que não se degradam ao longo do tempo, onde a taxa de falha do sistema é constante, ou seja, não varia ao longo do tempo. Esta distribuição pode se apresentar com um ou dois parâmetros.

A **distribuição lognormal** é aplicada principalmente quando ocorre uma significativa quantidade de falhas no início da vida do produto e poucas falhas no fim da vida, apresentando assimetria em relação ao valor médio. Comumente usada para descrever o comportamento de itens que falham por fadiga, normalmente sistemas mecânicos. É descrita por dois parâmetros.

Por fim, a **distribuição normal**, ou distribuição de Gauss, é aplicada principalmente quando ocorrem poucas falhas no início e no fim da vida do produto, concentrando-se em torno de um valor médio. Esta distribuição aproxima-se bastante da distribuição de Weibull para parâmetros de forma $\beta>3,4$, e é caracterizada por uma perfeita simetria em relação ao valor médio. É uma distribuição descrita por dois parâmetros e bastante utilizada para representar o comportamento de itens de consumo, como por exemplo, cartuchos de impressora.

Outras distribuições podem ser descritas, tais como: a distribuição Gama e a distribuição gama generalizada, consideradas também como principais para Pallerosi (2006). Estas distribuições são atualmente as mais completas para a análise de confiabilidade, já que conseguem simular praticamente todas as outras variando seus parâmetros. Entretanto, suas aplicações apresentam restrições pela sua complexidade matemática e por exigir amostras relativamente grandes. Na maioria das vezes podem ser substituídas pela distribuição de Weibull.

As funções matemáticas aplicadas ao estudo da confiabilidade destas quatro principais distribuições são apresentadas a seguir, conforme descrito em O'Connor (2002).

Distribuição de Weibull

Nas equações (6), (7), (8) e (9) são apresentadas, respectivamente, a função densidade de probabilidade, a função de confiabilidade, a função de taxa de falha e a função de confiabilidade condicional.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (6)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (7)$$

$$h(t) = \frac{\beta(t - \gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta} \quad (8)$$

$$R(t, T) = \exp\left[-\left(\left(\frac{T + t - \gamma}{\eta}\right)^\beta - \left(\frac{T - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right)\right] \quad (9)$$

onde tem-se os parâmetros: β (forma), η (vida característica ou escala) e γ (vida mínima).

A distribuição de Weibull com dois parâmetros é obtida fazendo o parâmetro de vida mínima $\gamma=0$.

Distribuição exponencial

A forma mais utilizada da distribuição exponencial é com apenas um parâmetro, fazendo-se o parâmetro de vida mínima $\gamma=0$. As equações (10), (11), (12), (13) e (14)

apresentam, respectivamente, a taxa de falha, a função densidade de probabilidade, a função de confiabilidade, a função de taxa de falha e a função de confiabilidade condicional

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (10)$$

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (11)$$

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (12)$$

$$h(t) = \lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (13)$$

$$R(t, T) = \exp(-\lambda t) \quad (14)$$

onde tem-se os parâmetros: λ (taxa de falha constante) e γ (vida mínima).

Distribuição lognormal

As equações (15), (16), (17) e (18) apresentam, respectivamente, a função densidade de probabilidade, a função de confiabilidade, a função de taxa de falha e a função de confiabilidade condicional

$$f(t) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp\left[-\frac{\ln(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (15)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (16)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (17)$$

$$R(t, T) = \frac{R(t+T)}{R(T)} \quad (18)$$

onde têm-se os parâmetros: μ (média) e σ (desvio padrão).

Distribuição normal

As equações (19), (20), (21), (22) e (23) apresentam, respectivamente, a função densidade de probabilidade, a função de confiabilidade, a função de taxa de falha, a função de confiabilidade condicional e o tempo médio entre falhas

$$f(t) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (19)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (20)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (21)$$

$$R(t, T) = \frac{R(t+T)}{R(T)} \quad (22)$$

$$MTBF = \mu \quad (23)$$

onde têm-se os parâmetros: μ (média) e σ (desvio padrão).

2.1.5 Estimativa de parâmetros

Uma vez selecionada a distribuição de probabilidade, os seus parâmetros devem ser estimados. A precisão de qualquer previsão estatística depende fundamentalmente da qualidade e da quantidade dos dados obtidos. Bons dados irão permitir que boas estimativas sejam obtidas. Obviamente, dados tendenciosos, mesmo com os melhores procedimentos estatísticos, implicam em previsões erradas (PALLEROSI, 2006).

Existem muitos métodos disponíveis para a estimativa de parâmetros. Esta seção apresenta um resumo de alguns destes métodos, começando com a mais simples, baseados em **gráficos de probabilidade**, e continuando com as técnicas mais sofisticadas, de **mínimos quadrados** e **máxima verossimilhança**. O'Connor (2002) dedica um capítulo inteiro detalhando a técnica de gráficos de probabilidade, enquanto Pallerosi (2006) aplica, com todas as suas particularidades, os métodos de regressão linear por mínimos quadrados e

máxima verossimilhança para cada uma das principais distribuições estatísticas utilizadas em confiabilidade.

Adicionalmente, existem outros métodos computacionais especificamente desenvolvidos para obter estas estimativas, que permitem a inclusão de grande número de suspensões, intervalos e dados agrupados, como os métodos adotados no programa Weibull++ (PALLEROSI, 2006). Entretanto, a facilidade de acesso a estes programas pode permitir que desavisados façam análises impróprias. Assim, sua utilização deve sempre ser acompanhada de um bom entendimento das técnicas conhecidas (O'CONNOR, 2002).

2.1.5.1 Gráficos de probabilidade

O método consiste em fisicamente desenhar os gráficos de probabilidade em papéis especiais de confiabilidade. É facilmente implementado à mão, desde que se obtenha o papel adequado para a distribuição a ser utilizada.

A técnica tem o objetivo de linearizar a função de probabilidade acumulada (*cdf*) da distribuição desenhando os pontos dos dados de falha nestes papéis especiais. Por exemplo, no caso de uma distribuição de Weibull com dois parâmetros, $F(T)$, é dada pela equação (24) (O'CONNOR, 2002):

$$F(T) = Q(T) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (24)$$

Esta função pode ser linearizada, ou seja, colocada na forma $y = a + bx$, como segue:

$$\begin{aligned} Q(T) &= 1 - \exp\left[-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta\right] \\ \ln(1 - Q(T)) &= \ln\left(\exp\left[-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta\right]\right) \\ \ln(1 - Q(T)) &= -\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta \\ \ln(-\ln(1 - Q(T))) &= \beta \cdot \ln\left(\frac{T}{\eta}\right) \\ \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - Q(T)}\right)\right) &= \beta \cdot \ln(T) - \beta \cdot \ln(\eta) \end{aligned}$$

Fazendo:

$$y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-Q(T)}\right)\right) \quad (25)$$

$$x = \ln(T)$$

A equação pode ser reescrita como,

$$y = \beta x - \beta \ln(\eta) \quad (26)$$

A próxima tarefa é construir um papel com os eixos y e x apropriados. O cálculo para o eixo x é simples já que é uma simples aplicação do logaritmo natural. Já o cálculo do eixo y deve representar toda equação (25). Estes papéis são produzidos por diferentes fornecedores e são os chamados papéis especiais de confiabilidade.

Para as outras distribuições estatísticas a metodologia é a mesma, consistindo em linearizar as funções, obtendo-se novas equações para os eixos y e x . O eixo y representará a probabilidade acumulada e o eixo x representa o tempo.

Sabendo-se as coordenadas cartesianas de dois pontos é possível desenhar a reta no papel especial. A partir de então se pode facilmente determinar sua inclinação e o ponto de intersecção com o eixo y , determinando-se os parâmetros da distribuição.

Além da desvantagem deste método, que é o grande trabalho requerido, o desenho manual de gráficos de probabilidade não é sempre consistente nos seus resultados. Duas pessoas desenhando linhas através de um grupo de pontos não farão esta tarefa da mesma maneira, e terão resultados ligeiramente divergentes. Este método era utilizado antes computadores pudessem simplificar os cálculos dos métodos de estimativa de parâmetros mais sofisticados (RELIASOFT, 2005).

2.1.5.2 Análise de regressão pelo método de mínimos quadrados ordinários – MQO

Utilizando a ideia dos gráficos de probabilidade, a análise de regressão ajusta matematicamente a melhor linha reta através de um grupo de pontos, na tentativa de se estimar seus parâmetros. O método consiste em que ajustar uma reta a um grupo de pontos de forma que a soma do quadrado das distâncias dos pontos à reta seja minimizada. Esta minimização pode ser realizada na direção vertical ou horizontal.

Suponha que um grupo de pontos $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ são conhecidos e estão grafados, e que os valores em x são conhecidos com precisão. Então, de acordo com a teoria dos mínimos quadrados ordinários, a linha reta que minimiza as distâncias verticais (regressão em Y) entre os pontos e a linha é $y = \hat{a} + \hat{b}x$ (onde o símbolo $\hat{}$ (chapéu) indica que estes valores são estimados), da forma expressa pela equação (27).

$$\sum_{i=1}^n (\hat{a} + \hat{b}x_i - y_i)^2 = \min(a,b) \sum_{i=1}^n (a + bx_i - y_i)^2 \quad (27)$$

E onde \hat{a} e \hat{b} são os mínimos quadrados estimados de a e b , e n é o número de pontos de dados. Esta equação é minimizada com estimativas de \hat{a} e \hat{b} conforme descrito pelas equações (28).

$$\begin{aligned} \hat{a} &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{N} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \\ \hat{b} &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}} \end{aligned} \quad (28)$$

A regressão em X é realizada com a mesma metodologia, minimizando as distâncias horizontais dos pontos à reta, gerando a linha $x = \hat{a} + \hat{b}y$.

A estimativa por mínimos quadrados ordinários é muito boa para funções que podem ser linearizadas. Para estas distribuições, os cálculos são relativamente simples, sem necessidade de utilização maciça de técnicas numéricas ou tabelas. Além do mais, esta técnica possibilita o conhecimento de uma medida de quão adequados os parâmetros de distribuição estão com relação aos dados, através do coeficiente de determinação.

O coeficiente de determinação é a medida da qualidade do ajuste da regressão linear aos dados, e é usualmente denotado por ρ^2 . O coeficiente de determinação é o quadrado do coeficiente de correlação da população, sendo este definido conforme a equação (29).

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (29)$$

onde σ_{xy} é a covariância de x e y , σ_x é o desvio padrão de x , e σ_y é o desvio padrão de y .

O coeficiente de determinação ρ^2 é uma medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra. Ou seja, é uma medida da proporção em que a reta de ajuste linear varia em função da distribuição escolhida. O coeficiente de determinação pode assumir valores de 0 a 1. Se $\rho^2=0$ então não há nenhuma correlação entre a reta de ajuste linear e a distribuição escolhida. Se $\rho^2=1$ então 100% da variação da reta de

ajuste linear é devido às variações da distribuição escolhida, representando uma perfeita correlação (EVERITT, 2002).

O método dos mínimos quadrados é geralmente empregado com melhores resultados com grupos de dados completos, ou seja, dados consistindo unicamente de tempos até falha, sem dados censurados ou em intervalos.

2.1.5.3 Máxima verossimilhança – MVE

Sob o ponto de vista da estatística, o método de estimação pela máxima verossimilhança (MVE) é, com algumas exceções, considerado a mais robusta das técnicas aqui apresentadas. Ele pode ser aplicado considerando dados completos, bem como censurados ou dados em intervalos.

A ideia base do MVE é obter os valores mais prováveis dos parâmetros de uma dada distribuição que melhor descreva o grupo de dados. É matematicamente formulado como expresso pela equação (31).

Se x é uma variável aleatória contínua com fdp :

$$f(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (31)$$

onde $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ são k parâmetros desconhecidos que devem ser estimados a partir de n observações independentes, x_1, x_2, \dots, x_R , que correspondem, no caso da análise dos dados de vida, a tempos de falha. A função de verossimilhança é expressa conforme a equação (32).

$$L(\theta_1, \dots, \theta_k | T_1, \dots, T_R, S_1, \dots, S_M, I_1, \dots, I_P) = L$$

$$L = \prod_{i=1}^R f(T_i; \theta_1, \dots, \theta_k) \cdot \prod_{j=1}^M [1 - F(S_j; \theta_1, \dots, \theta_k)] \cdot \prod_{l=1}^P \{F(I_{l_U}; \theta_1, \dots, \theta_k) - F(I_{l_L}; \theta_1, \dots, \theta_k)\} \quad (32)$$

Onde,

R é o número de unidades com tempo de falha conhecido;

M é o número de unidades suspensas;

P é o número de unidades censuradas à esquerda ou em intervalo;

$$n = R + M + P$$

T_i é o tempo de falha da i -ésima amostra;

S_j é o tempo de suspensão da j -ésima amostra;

I_{l_U} é o tempo do final do intervalo do l -ésimo grupo de dados;

I_{l_L} é o tempo de início do intervalo do l -ésimo grupo de dados.

Considerando uma população apenas com dados completos, o logaritmo da função de verossimilhança é dado pela equação (33).

$$\Lambda = \ln L = \sum f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (33)$$

Os valores dos parâmetros $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ são obtidos maximizando L ou Λ . Como maximizar Λ costuma ser mais simples do que L , a estimativa de máxima verossimilhança de $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ são as soluções simultâneas de k equações, com:

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \theta_j} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (34)$$

A metodologia MVE tem diversas características que a torna atrativa para o uso quando aplicada a grandes populações de dados. Quanto maior o tamanho da amostra de dados, as estimativas convergem para os valores corretos com uma maior precisão. A distribuição de probabilidade dos estimadores é assintoticamente normal, o que é base para a utilização do método da Matriz de Fisher para determinação dos limites de confiança, a ser tratado posteriormente (RELIASOFT, 2005).

Porém, para amostras pequenas, inferiores a 30 dados de falha, o método pode trazer erros consideráveis. Sabe-se, por exemplo, que as estimativas MVE para o parâmetro de forma da distribuição de Weibull não tem bons resultados para amostras pequenas, e pode ter estes efeitos piorados dependendo da quantidade de dados censurados. Além disso, na mesma distribuição de Weibull, para algumas combinações dos valores dos parâmetros (β, η, γ) a MVE poderá não apresentar solução (PALLEROSI, 2006).

Contudo, é consenso entre os autores pesquisados que o método MVE lida melhor com dados suspensos e em intervalos do que a regressão linear, particularmente quando se tratam de muitos dados censurados e poucos tempos exatos até falha, ou quando as censuras são distribuídas desigualmente ao longo do tempo (LAWLESS et al., 1995; COYT e DEY, 1999; MURTHY et al., 2004; MURTHY e WILSON, 2006). Também é possível utilizá-lo para estimar parâmetros com apenas uma ou nenhuma falha observada, tendo informação dos dados censurados, o que a regressão linear não é capaz de fazer. A Figura 4 apresenta um quadro comparativo das principais características dos dois métodos matemáticos apresentados – regressão por mínimos quadrados ordinários (MQO) e MVE.

Característica	Mínimos Quadrados	MVE
Tipos de dados	Completos	Completos ou Censurados
Fator de correlação	Sim	Não
Complexidade matemática	Menor Simples para funções que podem ser linearizadas	Maior Geralmente emprega métodos numéricos
Tamanho da amostra	Qualquer	Se ajusta melhor a amostras maiores, em geral com mais de 30 eventos

Figura 4 - Comparação de características dos métodos de regressão por MQO e MVE

Fonte: elaborado pelo autor

2.1.6 Limites de confiança

Um dos conceitos mais importante em confiabilidade é estimar a precisão de uma estimativa e, para tanto, utilizam-se os limites (ou intervalos) de confiança. Nesta seção serão apresentados os conceitos gerais sobre intervalos de confiança, mas não serão abordados os métodos de cálculo. Maiores detalhes sobre as metodologias, incluindo os procedimentos matemáticos de cálculo, podem ser obtidos em Pallerosi (2006).

De forma geral o propósito do estudo de confiabilidade é determinar a não-probabilidade de falhas, ou confiabilidade, de uma população de itens em estudo. Todavia nunca se saberá com certeza qual o valor exato da confiabilidade a menos que se analisem cada uma das unidades da população em estudo. Já que esta não é uma situação realista, a tarefa é estimar a confiabilidade baseado em uma amostra desta população. Se for feita uma análise de dez amostras diferentes da mesma população se terá parâmetros ligeiramente diferentes em cada análise, e resultados de confiabilidades também ligeiramente diferentes. Entretanto, se forem aplicados limites de confiança se obterá um intervalo de valores onde estes resultados de confiabilidade devem ocorrer em certo percentual de vezes. Isto ajudará a medir a utilidade dos dados coletados e a acuracidade dos resultados estimados.

Os intervalos de confiança são descritos como sendo unilaterais ou bilaterais. Quando se utilizam limites de confiança bilaterais, têm-se um intervalo fechado onde certo percentual da população deve estar contido. Por exemplo, quando se diz que o intervalo de confiança bilateral é de 90% entre (X,Y) valores de confiabilidade, isto indica que, com 90% de confiança, o valor verdadeiro da população está entre X e Y, com 5% dos valores abaixo de X

e 5% acima de Y. A Figura 5 apresenta graficamente a ideia de intervalo de confiança bilateral.

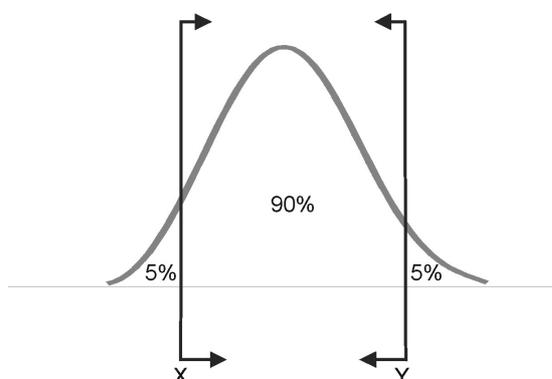


Figura 5 - Intervalo de confiança bi-lateral

Fonte: adaptado de Reliasoft (2005a)

Intervalos de confiança unilaterais consistem de uma versão com intervalo aberto dos limites bi-laterais. O limite unilateral define um ponto onde certo percentual da população está ou acima ou abaixo do valor definido pelo ponto. Por exemplo, se Y é um limite de confiança unilateral superior de 95%, isto quer dizer que, com 95% de confiança, o valor verdadeiro da população está abaixo do valor de Y. Se X é um limite de confiança unilateral inferior de 95%, então com 95% de confiança o valor verdadeiro da população está acima do valor de X. A Figura 6 apresenta os dois tipos de intervalos unilaterais, inferior (a) e superior (b).

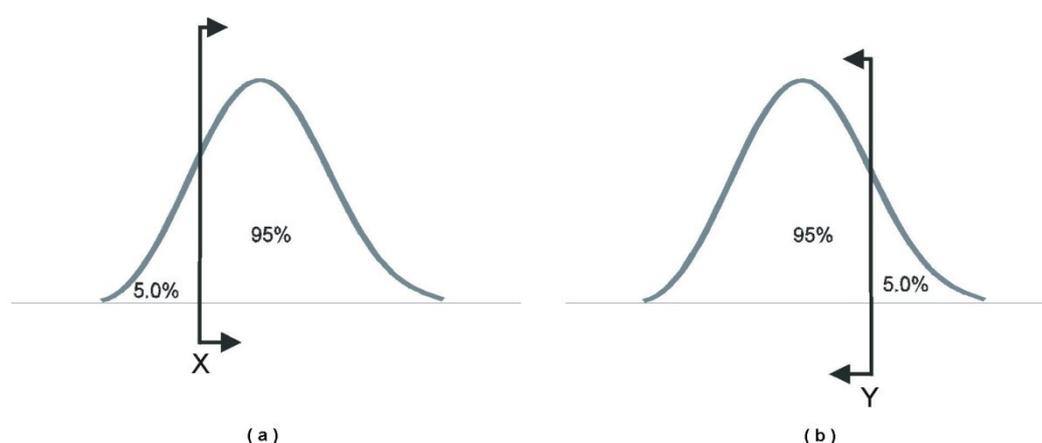


Figura 6 - Limites de confiança unilaterais: inferior (a) e superior (b)

Fonte: adaptado de Reliasoft (2005a)

Alguns dos métodos para cálculo dos intervalos de confiança são: (i) matriz de Fisher; utilizado principalmente em populações de dados com grande número de suspensões, tem a tendência de gerar intervalos mais otimistas que os métodos não-paramétricos, o que pode ser um problema quando se lida com amostras pequenas; (ii) beta-binomial; método não-paramétrico, que se vale de uma técnica similar à de regressão linear, utilizado principalmente quando a população possui um comportamento misto, que necessita de mais que uma distribuição estatística para descrevê-la; (iii) razão de verossimilhança; utilizado quando se trata de populações pequenas, é uma metodologia mais simples que a matriz de Fisher que também maximiza funções de verossimilhança para obter os limites de confiança; e (iv) modelo Bayesiano, que consiste de uma outra corrente de análise estatística, onde informações prévias são combinadas com os dados amostrados, interferindo nos parâmetros dos modelos e em suas funções.

2.2. Garantia

Nesta seção são apresentados os conceitos sobre o que é a garantia de um produto, qual o seu aspecto legal, e sua importância para a empresa e consumidores. São abordadas algumas classificações acerca da garantia e discussões sobre qual sua duração esperada.

Após é apresentado uma discussão sobre como se realizam previsões das falhas que ocorrem durante o período de garantia. Métodos estatísticos, baseados em confiabilidade, que permitem realizar essas previsões são apresentados em resumo.

2.2.1 Conceitos

De forma genérica pode-se dizer que a garantia, ou garantia do produto, é um comprometimento do fabricante para com o consumidor de que o produto ou serviço comprado deve funcionar conforme declarado durante um período de tempo especificado. O contrato de garantia especifica que o fabricante concorda em reparar ou substituir o produto, no caso de uma eventual falha, sem custos adicionais ao consumidor (YUN, 1997; KIM et al., 2003; MURTHY, 2006).

Loomba (1998) complementa dizendo que a garantia é um atestado sobre a qualidade do produto. Já Karim e Suzuki (2005) afirmam que a garantia é, na verdade, uma prova do

fabricante de que o produto é confiável, se utilizado em condições normais, pelo menos até o final do período de garantia.

O item é dito falhado quando está inapto a desenvolver sua função declarada satisfatoriamente, quando operado corretamente (MURTHY, 2006). Os reparos que o fabricante pode realizar durante o período de garantia caso a falha ocorra são classificados por Murthy e Wilson (2006) como: (i) reparo mínimo, que restaura o item às condições imediatamente anteriores à falha; (ii) reparo perfeito, que torna o item igual a um item novo; e (iii) reparo imperfeito, que resulta em um item com condições melhores do que a anterior ao reparo, mas não tão boas quanto um item novo.

Loomba (1998) apresenta uma detalhada revisão de como a garantia se desenvolveu ao longo da história, o que, segundo o autor, é fundamental para poder avaliar as melhores práticas adotadas atualmente. Segundo ele, a garantia como se conhece hoje é uma prática relativamente recente, criada a partir da necessidade gerada a partir dos anos 1950 quando a percepção de qualidade dos consumidores se alterou mais drasticamente, assim como as relações entre fabricantes e compradores. Kim et al. (2003) trazem uma revisão da literatura sobre os diferentes aspectos da garantia do produto.

Pode-se dizer que a garantia tem relevância para os fabricantes devido a três fatores básicos: (i) aspectos legais; (ii) considerações econômicas; e (iii) elementos de estratégia competitiva (LIMA, 2007).

Para Manna et al. (2004) o principal objetivo dos fabricantes ao gerir a garantia é reduzir seus custos, porém ela pode ser tratada como uma estratégia de marketing que cria aumento da satisfação dos clientes, que finalmente traz um aumento na participação de mercado. Os custos de garantia são aqueles associados ao custo das peças defeituosas, mão de obra para sua substituição, deslocamento para se efetuar o reparo, e até, em casos particulares, custos decorrentes de prejuízos devido à perda ou parada do equipamento em questão. Partilham desta opinião Gutiérrez-Pulido et al. (2006) e Murthy (2006), para quem a garantia pode ser um diferencial competitivo, aumentando a penetração de produtos no mercado, principalmente quando se tratam de novos produtos. Karim e Suzuki (2005) destacam o aspecto de que a garantia pode ser uma ferramenta de propaganda, enquanto Teng et al. (2005) defendem que prover bons serviços de garantia é uma forma das empresas demonstrarem comprometimento com seus produtos, de forma a manterem relações de lealdade com seus clientes.

Sobre o aspecto legal, no Brasil, o Código de Defesa do Consumidor (CDC), previsto na Lei 8078 / 90, em vigor desde março de 1991, prevê dois tipos básicos de garantia para

produtos e serviços: (i) garantia legal, que é obrigatória, independente da vontade das partes, e que pode ter prazo de 30 ou 90 dias; e (ii) garantia contratual, que é uma concessão adicional do fornecedor em benefício do consumidor, podendo ser livremente fixada quanto a seus prazos e condições, que devem ser claramente expressas no contrato, e que em hipótese alguma pode substituir a garantia legal (PALLEROSI, 2007).

Ainda assim a política da garantia contratual pode variar de muitas formas diferentes. Manna et al. (2004) e Murthy (2006) alegam que as políticas de garantia, embora diferentes, são todas governadas segundo dois aspectos: (i) a forma de compensação, que é a forma como o cliente será ressarcido na eventualidade de uma falha, podendo ser a devolução do dinheiro, troca do item por um novo, sem ou com custo proporcional, ou o comprometimento do fabricante em realizar reparos no produto sem custos para o cliente; e (ii) o limite da garantia, que especifica a duração do tempo, desde que o produto é adquirido, durante o qual a garantia é dada pelo fabricante.

O limite da garantia pode ser unidimensional (1D) ou bi-dimensional (2D). A política 1D é sempre baseada em apenas uma variável, idade ou uma medida de utilização do produto, enquanto a política 2D utiliza ambos os aspectos. As garantias podem ser ainda renováveis ou não.

A Figura 7 apresenta um esquema da relação entre as duas dimensões da garantia do tipo 2D. No gráfico, o período de garantia pode acabar quando alcançar a utilização K (caso 1) ou no tempo de uso T (caso 2). O período de garantia pode então ser representado pela área delimitada por K e T .

Murthy e Wilson (2006) afirmam que há diversos estudos considerando políticas de garantia 1D, mas muito poucos considerando a política 2D, que é amplamente utilizada na indústria automotiva (tempo de posse em anos, ou utilização, kilometragem do carro). Os autores apresentam uma metodologia de como se criar um modelo que descreva o comportamento das falhas neste tipo de garantia. Esta mesma preocupação é partilhada por Lawless et al. (1995) e Aldrige (2005), para quem é de extrema importância se considerar os dois aspectos quando se analisam os dados, e ambos os trabalhos se dedicam a criar métodos para modelagem dos dados de falha na indústria automotiva considerando a idade dos veículos no momento da falha, bem como sua utilização.

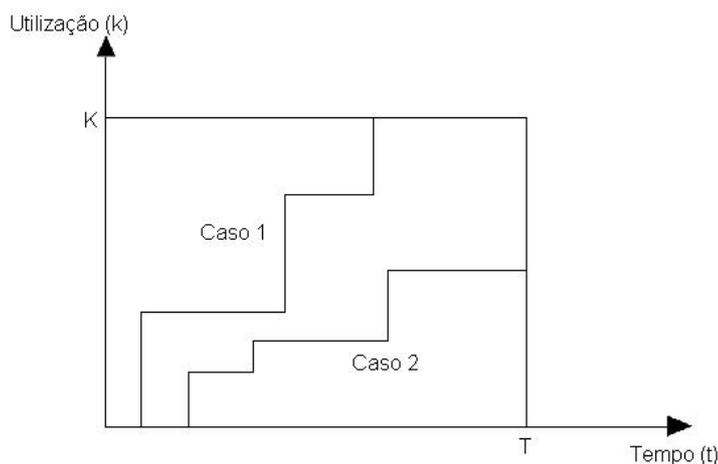


Figura 7 - Representação de uma garantia 2D

Fonte: adaptado de Yun (1997)

Nota-se na pesquisa realizada que o tempo de duração da garantia é de grande interesse, tanto para os fabricantes quanto para os consumidores. Gutiérrez-Pulido et al. (2006) trazem uma revisão bibliográfica da literatura sobre este aspecto, e alegam que o período de duração da garantia é o aspecto que tem maior exposição para os clientes, e que sob este ponto de vista, quanto maior, mais favorável ao marketing da empresa. Se for muito curto trará efeito negativo na apreciação dos clientes pelo produto.

Kim et al. (2003) afirmam que o período de garantia vem aumentando ao longo dos últimos anos, especialmente devido a estas imposições de mercado. Contudo, aumentar o tempo de garantia traz mais custos para as empresas, apesar de provavelmente aumentar sua participação em vendas (YUN, 1997).

Para Murthy (2006) os fabricantes, de forma geral, optam por tempos de garantia indevidos. Ou estabelecem períodos de garantia muito abaixo do tempo de vida esperado para seus produtos, ou aumentam muito os custos de garantia para cobrir riscos não claramente determinados. Ambas as escolhas são impróprias dentro do contexto de mercado altamente competitivo de hoje. Empresas que falham em reduzir os custos com garantia tendem a estar cada vez mais fora do negócio.

Kim et al. (2003) e Manna et al. (2004) complementam dizendo que as variações de qualidade do produto ao longo do tempo trazem grandes riscos quando se deseja fazer previsões sobre o comportamento da garantia. Por todos estes motivos é indicado, e necessário, que se utilizem ferramentas de confiabilidade, bem estruturadas, para realizar estas análises e previsões, que por fim determinarão a melhor política de garantia (LIMA, 2007).

2.2.2 Métodos de previsão de retornos em garantia e a modelagem da Matriz Diagonal

Segundo Gutiérrez-Pulido et al. (2006) a estratégia mais direta para se determinar o período de garantia para um dado produto é primeiramente escolher qual será o tipo de garantia e sua duração (baseado no comportamento do mercado, competidores, área de atuação, tipo de produto, expectativa de clientes), e então estimar quanto será gasto em garantia com este produto. Este item deverá ter um custo que garanta os fundos necessários para cobrir os gastos previstos com garantia. Porém, para se prever os custos de garantia é necessário prever qual será o comportamento das falhas dos produtos durante este período, o que não é uma tarefa trivial.

Há muitos estudos que relacionam a previsão de retornos de produtos falhados em garantia com a teoria da confiabilidade. Para citar alguns, Lawless et al. (1995) abordam qual a relação entre o tempo e a utilização de automóveis para então aplicar modelos estatísticos de confiabilidade para prever as falhas em garantia. Manna et al. (2004) desenvolvem um estudo de estimativa de custos de garantia em produtos complexos, compostos de diversos módulos de componentes e sistemas. Murthy (2006) relaciona garantia e confiabilidade em diferentes aspectos, desde o gerenciamento da garantia baseado em confiabilidade, sistemas de controle de dados, até chegar às estimativas de falhas e de custos com os produtos em garantia. Por fim, Gutiérrez-Pulido et al. (2006) propõe uma abordagem Bayesiana para se fazer as previsões de garantia.

Em todos os casos, o objetivo principal é a obtenção da distribuição estatística mais adequada das falhas, e como elas se apresentam ao longo do período de uso do produto. As falhas previstas para os períodos subsequentes aos períodos de falhas observadas (período de garantia) são obtidas baseadas na teoria de **confiabilidade condicional**.

A seguir é detalhado um procedimento de análise e previsão de retornos de garantia pela matriz diagonal, que permite a determinação das quantidades de falhas em função das vendas (ou produção), para os posteriores períodos de uso. Esta abordagem simplifica, racionaliza e automatiza a entrada dos dados, quantidades e períodos de análise, correspondendo aos seguintes passos básicos (PALLEROSI, 2007):

O **primeiro passo** é a organização dos dados de entrada. Nesta etapa devem-se relacionar as quantidades e períodos de vendas (ou produção) realizadas, correspondentes às entradas em serviço do produto. Depois se relacionam as quantidades de produtos retornados

com falhas nos períodos indicados. Estas informações são agrupadas em uma matriz diagonal, como apresentado na Figura 8, onde são alinhadas verticalmente as quantidades vendidas (ou produzidas) e horizontalmente as quantidades que retornam devido à falhas ocorridas em um dado período. As diagonais desta matriz representam as quantidades de falhas no período. Na construção da matriz diagonal pode-se ou não considerar falhas no período de venda, no caso do exemplo da Figura 8, considera-se que as amostras não podem falhar no mesmo período que foram vendidas.

Mês (j)	Quant. de vendas (Q_j)	Quantidades mensais retornadas com falhas (i)						
		1	2	3	4	5	6	
		Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	
1	Março	100	1	3	0	1	1	0
2	Abril	150		2	4	2	3	1
3	Maio	230			0	3	2	1
4	Junho	200				1	0	3
5	Julho	150					1	2
6	Agosto	200						1

Figura 8 - Matriz diagonal de retornos em garantia de produtos vendidos entre março e agosto

Fonte: adaptado de Pallerosi (2007).

Uma vez que os dados estão organizados nesta matriz é possível determinar quais são as quantidades totais de falhas e suspensões para cada i -ésimo período de uso e j -ésimo período de venda (ou produção). Os resultados são as quantidades totais de falhas (q_n), referidas a um total de n meses de uso, e as quantidades totais de suspensões (s_m) nos m períodos de meses subsequentes de vendas.

O **segundo passo** consiste em se determinar qual a melhor distribuição de confiabilidade que descreve o comportamento dos dados de falhas relacionados. Nesta etapa se aplicam os conceitos descritos na seção 2.1, escolhendo-se uma distribuição e determinando seus parâmetros através de uma técnica adequada.

No **terceiro passo** relacionam-se as quantidades e períodos de venda (ou produção) futuros. Estes dados são provenientes dos dados de marketing e produção da empresa, e do período futuro até o qual se deseja fazer a previsão.

O **quarto passo** consiste em realizar a previsão de futuros retornos dos produtos com falhas, baseada na confiabilidade condicional, das quantidades e períodos informados no passo anterior. A confiabilidade condicional, agora referida a cada i -ésimo período de uso (T_i) e j -ésimo período de venda, pode ser descrita na forma da equação (35), quando são considerados eventos independentes.

$$R_j(T_{i+1} | T_i) = \frac{R_j(T_{i+1})}{R_j(T_i)} \quad (35)$$

Com a confiabilidade (R) referida a uma dada distribuição (Weibull, exponencial, normal, etc.).

Para cada período adicional resulta,

$$\begin{aligned} T_{i+1} &= 1 + \sum t_i \\ R_j(T_{i+1}) &= R_j(1 + \sum t_i) \end{aligned} \quad (36)$$

com as correspondentes não-confiabilidades condicionais dadas pela equação (37).

$$F_j(T_i | T_{i+1}) = 1 - R_j(T_i | T_{i+1}) \quad (37)$$

Em função das quantidades de itens remanescentes correspondentes às suspensões (s_m) e das probabilidades condicionais de falha $F(T_i | T_{i+1})$ resultam as quantidades de falhas previstas no período ($i+1$), dadas conforme a expressão (38).

$$r_j(i+1) = \sum_{i=1}^n r_j(i | i+1) = \sum s_i F_j(i | i+1) \quad (38)$$

onde $F_j(i | i+1)$ é dado pela equação (37).

Por fim, o **quinto passo** consiste em analisar os resultados obtidos. Devem-se gerar gráficos da confiabilidade, densidade de probabilidade de falha, taxa de falha, etc. que possam auxiliar em uma análise completa das ocorrências das falhas no período de garantia, e em períodos futuros. Outra análise possível é a de se verificar a evolução das falhas nos períodos de uso futuros e compará-las com padrões adequados, para alerta contra quantidade de falhas superiores aos limites desejados para a imagem do produto ou segurança.

3. PROPOSTA PARA PROVISIONAMENTO DE GARANTIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia proposta para estabelecer os custos no período de garantia. A empresa sob estudo utiliza uma metodologia própria para estimar este gasto futuro, baseado em uma análise do comportamento médio das falhas de seus produtos no campo. Posto isto, primeiramente será descrita a metodologia atualmente utilizada e depois uma nova será proposta, utilizando dados de projeções de vendas futuras e também dados históricos das falhas durante o período de garantia.

Apesar de desenvolvida a partir de uma aplicação específica, a metodologia será descrita de forma genérica. Com algumas pequenas adaptações ela pode ser aplicada a outros produtos com características semelhantes. O requisito que deve ser observado, no entanto é a necessidade de possuir um histórico numeroso dos dados de falha durante o período de garantia, com informações apuradas sobre os tempos até falha e custos envolvidos, e ter posse, ou maneiras de determinar, a projeção de vendas do período que se deseja realizar a provisão.

3.1. Metodologia Atual

Atualmente na empresa em estudo, o cálculo do provisionamento de garantia para o ano sob planejamento é realizado com base na média dos custos do período anterior, aliado a uma previsão de vendas futuras. Esta metodologia em uso não é embasada em nenhuma técnica academicamente validada. Para fins de comparações ela é descrita a seguir.

Para se efetuar o cálculo da provisão de garantia, é utilizado o gasto de garantia por modelo e a quantidade de máquinas que estão no período de garantia em um intervalo de 24 meses. O cálculo abrange os gastos com garantia fora do prazo normal, também chamada de *goodwill*, e garantia normal, que ocorre dentro do período normal estabelecido de garantia do produto, de acordo com a data de entrega registrada no Certificado de Entrega Técnica. A empresa define garantia *goodwill* como uma garantia tecnicamente procedente fora do período normal, cuja falha é devida a problemas de manufatura (mão-de-obra, material, montagem ou processo não conforme) ou deficiência de projeto ou de suprimentos, podendo a mesma se manifestar em qualquer momento da vida do produto.

O departamento de Controladoria informa através de uma planilha o volume de máquinas faturadas por modelo mês a mês. Extrai-se do sistema de gerenciamento de garantia os valores gastos com garantia normal e os valores gastos com garantia *goodwill* de cada modelo para o qual o cálculo da provisão será realizado. Este cálculo é feito em duas partes, uma para a garantia normal e outra para a garantia *goodwill*. A Tabela 2, mostra a planilha de cálculo do provisionamento de garantia normal de um trator qualquer utilizando a metodologia atual, onde o \$ representa uma unidade monetária.

Tabela 2 – Planilha de cálculo do provisionamento de garantia normal de um trator

	Qtd Máquinas Faturadas (A)	Qtd. Máqs. em Garantia (B)	Custos Totais c/ Garantia Normal 12 meses (C)	Provisão por Máquina (D = C / B)	Proj. Máqs. em Garantia no Período Futuro (E)	Provisão de Garantia Normal (F = D * E)	Preço Médio de Venda (G)	% Garantia Normal (H = D / G)
Jan	1	208	\$ 14.671,76	\$ 70,54	221	\$ 15.588,75	\$ 42.300,07	0,17%
Fev	10	201	\$ 6.302,03	\$ 31,35	229	\$ 7.179,92	\$ 57.426,86	0,05%
Mar	31	198	\$ 22.130,18	\$ 111,77	222	\$ 24.812,63	\$ 59.111,34	0,19%
Abr	23	220	\$ 17.490,09	\$ 79,50	248	\$ 19.716,10	\$ 55.557,81	0,14%
Mai	31	230	\$ 21.293,57	\$ 92,58	270	\$ 24.996,80	\$ 55.043,75	0,17%
Jun	28	251	\$ 24.106,29	\$ 96,04	280	\$ 26.891,48	\$ 56.604,03	0,17%
Jul	25	260	\$ 19.132,50	\$ 73,59	293	\$ 21.560,86	\$ 56.139,21	0,13%
Ago	17	239	\$ 24.471,96	\$ 102,39	311	\$ 31.844,27	\$ 58.076,50	0,18%
Set	15	233	\$ 18.903,09	\$ 81,13	311	\$ 25.231,16	\$ 51.415,56	0,16%
Out	17	237	\$ 27.569,24	\$ 116,33	337	\$ 39.201,83	\$ 57.261,08	0,20%
Nov	19	239	\$ 27.819,50	\$ 116,40	353	\$ 41.089,05	\$ 58.187,04	0,20%
Dez	3	241	\$ 33.924,99	\$ 140,77	363	\$ 51.098,64	\$ 54.612,00	0,26%
TOTAL	220	-	\$257.815,20	\$ 1.112,38	-	\$ 329.211,48	\$ 55.144,60	2,02%

Para o cálculo do provisionamento da garantia normal listam-se os custos totais de garantia com cada um dos modelos de produtos sob análise, mês a mês, para o período retroativo ao mês em que o cálculo está sendo realizado (coluna C da Tabela 2). Para cada um dos meses listados calcula-se também a quantidade de máquinas ainda no período de garantia do modelo em questão (coluna B da Tabela 2). Este cálculo é baseado no volume de máquinas faturadas mês a mês informado previamente.

O resultado da divisão do somatório dos custos de garantia pelo somatório das máquinas em garantia é igual ao valor de provisão para uma máquina por mês (coluna D da Tabela 2). Este valor é então multiplicado pela projeção de máquinas em garantia mês a mês de um período futuro (coluna E da Tabela 2), baseado no planejamento de vendas da empresa, totalizando a provisão de garantia normal para cada modelo (coluna F da Tabela 2).

O cálculo do provisionamento da garantia *goodwill* se dá da mesma forma, porém alterando-se o período considerado. A garantia *goodwill* é a que acontece fora do prazo

normal até 24 meses após a entrega da máquina. Assim, para o cálculo, são considerados os gastos com falhas retroativamente do último mês do período normal de garantia até se completar 24 meses. Ou seja, se o produto tem garantia de 12 meses, deve-se considerar os gastos com falhas do 13º mês retroativo ao momento do cálculo até o 24º mês.

No entanto, o número total de máquinas em garantia não é alterado, sendo o mesmo do que o calculado para a garantia normal. O resultado da divisão do somatório dos custos de garantia *goodwill* pelo somatório das máquinas em garantia é igual ao valor mensal de provisão de garantia *goodwill* para uma máquina.

Para totalizar o provisionamento da garantia *goodwill* de um período futuro, multiplica-se o valor calculado pela projeção das máquinas que estarão no campo por um tempo maior do que o período de garantia até os 24 meses subsequentes, porém tendo o mês final do período de cálculo como ponto de corte. Utilizando-se o mesmo exemplo de uma máquina com período de garantia normal de 12 meses, se estiver sendo calculado o provisionamento com garantia para o ano de 2008, as máquinas produzidas a partir de janeiro de 2008 não terão garantia *goodwill*, somente normal. O cálculo do provisionamento de garantia *goodwill* irá considerar as quantidades de máquinas que foram produzidas durante os anos de 2006 e 2007.

O valor total a ser provisionado é a soma dos valores encontrados para a garantia normal e *goodwill*. Este valor, se dividido pelo total de máquinas em garantia e novamente dividido pelo preço bruto médio de cada modelo, indicará o percentual de garantia daquele modelo. Este é um indicador que monitora o desempenho dos produtos ao longo do tempo considerando-se o aspecto financeiro. Ele mostra se o produto está tendo mais ou menos gastos com garantia do que o esperado, e, em última análise, se os custos com garantia estão afetando positiva ou negativamente a margem de lucro da empresa. Na Tabela 2 é mostrado o cálculo do percentual de garantia normal para o trator usado como exemplo.

No entanto, por este indicador ser monitorado constantemente na empresa, que refaz este procedimento de cálculo mês a mês, ele não fornece dados precisos do ponto de vista do desempenho de qualidade ou projeto dos produtos, já que é calculado pela média das falhas. Se o percentual de garantia ao longo do tempo está aumentando, somente olhando este indicador é impossível saber quais as causas deste mau desempenho do produto. Esta metodologia considera que todas as falhas têm o mesmo comportamento, sejam elas falhas prematuras ou de desgaste, do sistema elétrico da máquina ou do sistema de transmissão.

Outra fragilidade da metodologia é que ela considera que todas as máquinas produzidas em diferentes momentos no tempo têm o mesmo comportamento, a mesma

confiabilidade. Isso porque o valor básico de cálculo que é o custo de garantia de uma máquina por mês é feito somando-se todos os gastos em garantia e dividindo-se pela soma da quantidade total de máquinas em garantia no período. Exemplificando, supõe-se que máquinas produzidas em janeiro têm o mesmo desempenho no campo das máquinas produzidas em outubro do mesmo ano. Esta não é uma verdade absoluta, pois quando melhorias de qualidade são implementadas espera-se que haja uma evolução dos produtos ao longo do tempo, aumentando sua confiabilidade.

Este problema é agravado pelo fato de que na metodologia atualmente empregada, o passado de falhas considerado é de apenas um período de garantia anterior. Assim, tendências de mais longo prazo não são consideradas, o que pode prejudicar a previsão futura. Por exemplo, se no período de análise ocorreram falhas específicas de um dado lote de produção, ou mesmo um problema que foi corrigido ao longo do período, e estes eventos tiveram custos associados significativos, estes custos irão onerar a previsão do próximo período, já que eles aumentaram o custo médio considerado. Se dados de mais longo prazo fossem utilizados estes pontos de falha possivelmente estariam fora da curva de tendência, e certamente teriam um impacto menor no cálculo do provisionamento futuro.

3.2. Avaliação da Modelagem da Matriz Diagonal

Nesta seção são revisados e discutidos os principais conceitos de confiabilidade aplicados à tarefa de se fazer previsões do comportamento de falhas durante o período de garantia, que já foram detalhados no capítulo 2. A partir desta discussão pretende-se propor uma nova metodologia para o provisionamento de garantia de um período futuro.

A organização dos dados conforme a modelagem da Matriz Diagonal, descrita no capítulo 2, imediatamente permite visualizar o comportamento dos diferentes lotes de produção ao longo do tempo. Cada uma das linhas da matriz diagonal representa o desempenho geral das máquinas produzidas naquele período. Assim, se necessário, uma análise mais profunda sobre a confiabilidade de determinada população pode ser facilitada com a utilização da matriz.

Outra vantagem em se organizar os dados desta forma é que se pode automatizar facilmente o cálculo das unidades em suspensão, utilizando-se as equações da seção 2.2.2. Na verdade todos os aspectos do cálculo de confiabilidade podem ser automatizados em uma planilha eletrônica, ou utilizando-se um software dedicado a cálculos estatísticos.

Para que a metodologia seja aplicada com bons resultados, o segundo passo é de extrema importância. Selecionar corretamente a distribuição, juntamente com seus parâmetros, que descrevem com acuracidade o comportamento dos dados é a principal etapa do processo.

Conforme abordado no capítulo 2, existem basicamente duas formas de se determinar a distribuição estatística que melhor representa a população sob análise: a modelagem teórica, onde se analisa cada componente do sistema para se determinar o comportamento do sistema como um todo, e a modelagem caixa-preta, baseada exclusivamente nos dados de falhas e suspensões da população, e normalmente aplicada a sistemas mais complexos.

Como a empresa não possui informações detalhadas relativas à confiabilidade de cada um dos componentes que compõem seus produtos, e considerando que as informações disponíveis são justamente as de falhas e suspensões dos produtos atuando no campo, estas últimas em um histórico abundante, a melhor opção é seguir a modelagem caixa-preta. Os passos a serem seguidos neste tipo de modelagem são: (i) selecionar o modelo matemático; (ii) estimar os parâmetros do modelo; e (iii) validar o modelo.

Selecionar o modelo matemático a ser utilizado é uma tarefa que requer algumas considerações. Escolher uma única distribuição que represente o comportamento de todas as falhas que o produto possa apresentar no período de garantia dificilmente será uma escolha correta. Máquinas complexas, com muitos componentes, terão uma variedade de tipos de falha com diferentes comportamentos.

Dessa forma, separar a máquina em subsistemas, onde os componentes que compõem cada subsistema tenham características de utilização e desempenho semelhantes, é uma escolha mais acertada. A partir de então, para cada subsistema é necessário determinar uma distribuição estatística que o represente.

Durante o período de garantia, as máquinas estão em sua fase inicial de utilização, no início de sua vida-útil. Neste período inicial espera-se uma taxa de falha decrescente até certo tempo e depois uma estabilização desta taxa de falha. Isto devido ao comportamento das falhas prematuras que devem diminuir desde o início da utilização da máquina até cessarem, quando então a máquina deverá ter uma taxa de falhas constante. Resta avaliar se o período de garantia do produto em questão cobre todo este comportamento, ou se seu desempenho é inferior ao esperado, ocorrendo somente falhas prematuras.

A escolha da distribuição Weibull, por se adaptar facilmente a diferentes populações, pode ser uma decisão acertada. Porém, se o comportamento das falhas se alterar ao longo do tempo, por exemplo, com a taxa de falha estabilizando após os primeiros meses de aplicação,

nem mesmo a distribuição Weibull será fiel ao comportamento da população. Dados com estas características, ou dados de falha que são provenientes de populações distintas, apresentam histogramas de frequência ditos multi-modais, só podendo ser modelados propriamente por mais de uma distribuição de probabilidade (FALCETTA, 2000).

A estimativa de parâmetros para estes casos tem um equacionamento matemático muito mais complexo, devido à quantidade de parâmetros a serem estimados. Hoje em dia ferramentas computacionais dedicadas podem realizar estes cálculos de forma bastante simples para o usuário, e em geral chamam esta distribuição de Weibull Mista, considerando de duas até quatro populações diferentes na mesma amostra. Falcetta (2000) descreve uma heurística para análise de dados de tempo-até-falha modelados por distribuições de probabilidade bi-modais, juntamente com um procedimento para normalização das distribuições misturadas.

Depois de realizada a escolha da distribuição deve-se utilizar um método para se estimar os parâmetros desta distribuição de probabilidade. Como apresentado no capítulo 2, os mais usuais são as técnicas de regressão por mínimos quadrados ordinários (MQO) e máxima verossimilhança (MVE), além da comparação gráfica.

Na análise de dados de garantia está envolvida uma grande quantidade de dados suspensos. Este é o motivo principal pelo qual se deve optar pela estimativa de parâmetros utilizando MVE, uma vez que o método de regressão por MQO é geralmente empregado com melhores resultados com grupos de dados completos, ou seja, dados consistindo unicamente de tempos até falha, sem dados censurados ou em intervalos. Porém esta escolha implica a utilização de métodos numéricos para a resolução matemática, onde a utilização de programas computacionais pode auxiliar na solução deste problema. Outra vantagem em se utilizar softwares para determinação da melhor distribuição estatística é a facilidade com que os gráficos de probabilidade de falhas são gerados, podendo ser comparadas diversas distribuições com seus parâmetros já estimados, e verificando visualmente qual se aproxima mais dos dados de falha levantados.

A validação do modelo escolhido se dará juntamente com a análise dos resultados da provisão gerada pela metodologia da matriz diagonal. Nesta etapa os custos das falhas devem ser relacionados com a quantidade de falhas previstas para o futuro, chegando-se ao objetivo do planejamento financeiro do período vindouro. A validação do modelo pode ser feita utilizando-se dados do passado que já foram realizados financeiramente, conferindo a assertividade da projeção com o que foi efetivamente gasto no período. Quando implementada, os resultados da projeção deverão ser constantemente monitorados,

comparando-se as previsões mensais com o realizado, e ajustando-se as distribuições se grandes divergências forem encontradas.

3.3. Metodologia Proposta

A seguir é proposta uma metodologia, dividida em dez passos adaptados da modelagem da Matriz Diagonal, para se realizar o provisionamento financeiro de falhas de um produto durante sua utilização em um período de garantia futuro. A Figura 9 apresenta o fluxograma com os passos a serem seguidos.

A metodologia parte do princípio que o histórico dos dados de falha deste produto está disponível, com registros claros de seus tempo-até-falha e custos de garantia associados. Também tem como premissa que a empresa possa estimar seu volume de unidades a serem vendidas (ou produzidas) no futuro, distribuídas mês a mês.

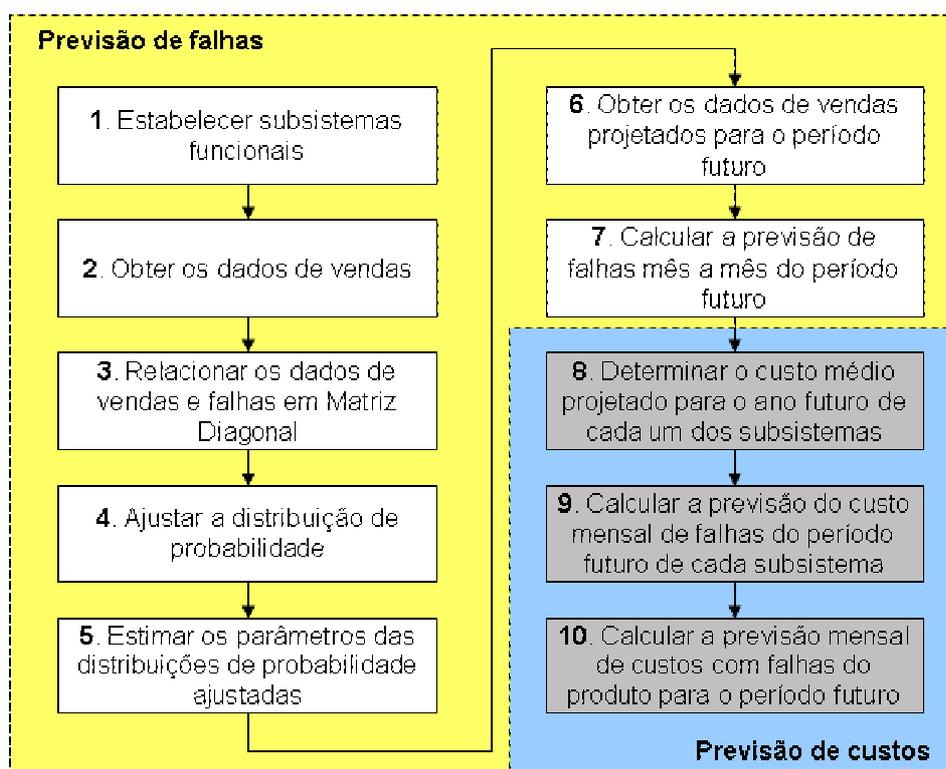


Figura 9 - Fluxograma com os dez passos da metodologia proposta

Fonte: elaborado pelo autor

Como mostra a Figura 9, os primeiros sete passos da metodologia resultam em uma previsão das quantidades de falha do produto, em um período de garantia futuro. No primeiro

passo deve-se dividir o produto a ser analisado em subsistemas funcionais. No passo dois se obtêm os volumes de venda histórica do produto em análise, distribuídos mês a mês. No terceiro passo devem-se obter os dados de falhas históricas do produto e relacioná-los com os dados de venda em uma Matriz Diagonal. No quarto passo deve-se ajustar uma distribuição de probabilidade para cada um dos subsistemas funcionais escolhidos. No passo cinco estimam-se os parâmetros destas distribuições de probabilidade ajustadas para cada um dos subsistemas. No sexto passo devem-se levantar os dados de projeção do volume de vendas do produto em análise para o próximo período de garantia futuro, distribuídos mês a mês. Por fim, no passo sete, calculam-se, para cada um dos subsistemas, baseado nas teorias de confiabilidade condicional, a previsão de falhas de cada um dos meses do período de garantia futuro.

Tendo a previsão da quantidade de falhas do período de garantia futuro, os passos oito, nove e dez da metodologia proposta indicam o procedimento para se fazer a previsão dos custos associados a estas falhas. No passo oito deve-se determinar o custo médio das falhas de cada um dos subsistemas escolhidos. No nono passo, utilizando-se o custo médio, se calculam os custos mensais das falhas previstas para o período de garantia futuro de cada um dos subsistemas funcionais. Finalmente, no décimo e último passo, as informações das previsões de custos com as falhas de cada subsistema são consolidadas calculando-se a provisão mensal de gastos de garantia para o produto no período futuro. Cada passo da metodologia proposta é detalhado a seguir.

3.3.1 Passo um – Estabelecer subsistemas funcionais

Neste primeiro passo o produto a ser analisado necessita ser dividido em subsistemas funcionais. De forma a ser mais específico com relação ao comportamento das falhas, é preciso dividir o equipamento sob análise em subsistema que tenham seus componentes com características de função e utilização similares. Espera-se que, ao se ajustar distribuições estatísticas nos passos posteriores, que estas descrevam mais fielmente o comportamento de cada subsistema, eliminando uma característica de aleatoriedade que pode estar presente se a máquina for analisada como um todo. Em um veículo automotor, exemplos de subsistemas seriam o motor, a transmissão, os equipamentos elétricos, a lataria. Quanto mais específicos estes subsistemas forem, por exemplo, descendo até um nível de componentes individuais, como rolamentos, maior a chance de se ajustar uma distribuição de probabilidade que descreva exatamente o comportamento desses componentes, com um grande fator de correlação, porém maior será a complexidade do procedimento. Da mesma forma, quanto

maior for a quantidade de subsistemas, menor será o número de falhas atribuídas a cada um deles individualmente, o que pode prejudicar a análise de confiabilidade, e, portanto um equilíbrio deve ser buscado. É comum que as empresas possuam em seus sistemas de gerenciamento de garantia uma classificação para as falhas que são registradas, indicando o grupo funcional da máquina a qual pertencem, o número da peça ligado a um conjunto de montagem, ou controle similar. Com esta informação e tendo os subsistemas definidos se torna relativamente simples separar os dados de falha por subsistema. O que a metodologia proposta recomenda é que dentro desta lógica se separe o produto em não mais do que dez subsistemas funcionais, para que o procedimento não seja muito complexo, e que estes subsistemas sejam agrupados de forma que cada um deles tenha um número de falhas significativo ao longo do período de análise.

3.3.2 Passo dois – Obter os dados de vendas

O segundo passo consiste em levantar os volumes de venda do produto em análise dos períodos passados (histórico), distribuídos mês a mês. Para tanto, é necessário conhecer a quantidade que foi vendida de cada produto, mês a mês, nos períodos de garantia passados. Estas informações estarão na primeira coluna da matriz diagonal. Quanto mais períodos passados forem analisados, maior será a quantidade de dados levantados e menor será a incerteza envolvida na projeção de futuro. Porém se o produto tem mudanças significativas de projeto ou de construção em períodos curtos, considerar muitos períodos retroativos pode implicar no erro de estar analisando em conjunto dados com características diferentes. Sugere-se que sejam analisados blocos de três períodos anteriores de garantia. Por exemplo, se o produto tem garantia de 12 meses e se quer fazer a projeção de gastos para o ano de 2009, deve-se considerar o número de unidades vendidas mês a mês nos anos de 2006, 2007 e 2008.

3.3.3 Passo três – Relacionar os dados de vendas e falhas em Matriz Diagonal

Uma vez estabelecidos os subsistemas e as quantidades vendidas do produto, deve-se levantar os dados de falha dos mesmos períodos passados e relacioná-los com o momento de venda das máquinas que falharam, organizando os dados em uma Matriz Diagonal. Este passo deve ser realizado para cada um dos diferentes subsistemas que foram determinados no passo um. Assim, se, por exemplo, de um determinado produto forem vendidas 100 unidades no mês de janeiro de 2006, e se deseja fazer a previsão de falhas do ano de 2008, deve-se relacionar todas as falhas que ocorreram, mês a mês, desde janeiro de 2006 até dezembro de 2007, daquelas 100 unidades específicas, para cada um dos subsistemas em que o produto foi

dividido. Os números totais de falhas em cada mês, quando organizados na Matriz Diagonal, irão formar a linha “janeiro 2006” da tabela, como mostrado na Figura 8. Para esta operação é necessário que as informações de venda contenham os números de série, lote ou qualquer outra informação dos produtos vendidos, e que estas informações possam ser cruzadas com os registros de garantia. Outra forma de se relacionar estes dados é se assegurando que no próprio registro de falha no sistema de gerenciamento garantia se tenha a data em que o produto foi vendido ou entregue ao cliente.

3.3.4 Passo quatro – Ajustar a distribuição de probabilidade

Como descrito anteriormente este é um passo crítico para o sucesso da metodologia. Em um primeiro momento opta-se por ajustar a distribuição de Weibull. Esta distribuição apresenta-se como uma boa escolha devido às suas propriedades de poder imitar as características de uma distribuição normal, lognormal ou exponencial. Outro recurso, se disponível, é se utilizar de métodos computacionais para testar diferentes distribuições, escolhendo aquela que apresentar o melhor ajuste aos dados. Estes programas em geral utilizam testes Qui-Quadrado ou Kolmogorov-Smirnov para verificar este ajuste com os dados (PALLEROSI, 2006; FALCETTA, 2000). De qualquer forma, a distribuição escolhida pode ser validada utilizando a comparação visual com papéis de confiabilidade. Também é possível fazer esta verificação através do coeficiente de determinação, que normalmente é dado pelos programas computacionais juntamente com a indicação das melhores distribuições a serem escolhidas.

3.3.5 Passo cinco – Estimar os parâmetros das distribuições de probabilidade ajustadas

Estimar os parâmetros da distribuição de probabilidade ajustada para cada um dos subsistemas utilizando-se o método da MVE. Apesar do equacionamento deste método estar descrito no capítulo 2, aqui também a preferência é por se utilizar de algum recurso computacional para realizar as estimativas. Uma vez que os parâmetros estejam calculados, elabora-se um gráfico com os dados de falha analisados e a distribuição calculada, verificando se não há existência de divergências entre a representação da distribuição de probabilidade e a representação dos dados de falha de forma geral. Em caso de divergência significativa uma nova distribuição deve ser escolhida e novos parâmetros devem ser calculados. Ao final deste passo deve-se ter um modelo matemático que descreva o comportamento de falhas no período

de garantia de cada um dos subsistemas em que o produto foi dividido. Estes modelos permitirão a obtenção das previsões de ocorrência de falhas no período futuro.

3.3.6 Passo seis – Obter os dados de vendas projetados para o período futuro

Este passo contempla levantar os dados de projeção do volume de vendas do produto em análise para o próximo período de garantia futuro, distribuídos mês a mês. Estes dados podem ser fornecidos pelo próprio departamento de vendas da empresa, baseado na projeção do resultado futuro, ou ainda pelo departamento de planejamento financeiro, onde os volumes pretendidos também são base para todo o plano da empresa do período futuro. Quanto mais próxima esta previsão for do resultado de fato realizado melhores serão os resultados de assertividade do provisionamento de garantia. Dessa forma estes números não devem ser exatamente as metas de venda, mas de fato o que se espera vender, o que em algumas empresas podem não ser a mesma coisa. Estes dados completam a primeira coluna da matriz diagonal, preenchendo as linhas do período futuro, e são iguais para todos os subsistemas do produto.

3.3.7 Passo sete – Calcular a previsão de falhas mês a mês do período futuro

Calcular para cada um dos subsistemas, baseado nas teorias de confiabilidade condicional, a previsão de falhas de cada um dos meses do período futuro, distribuídas mês a mês na matriz diagonal. Tendo os modelos probabilísticos estimados, utilizam-se as equações da teoria de confiabilidade condicional descrita no capítulo 2 para automatizar a planilha de cálculo. Nesta planilha os campos da matriz diagonal são preenchidos com o total de falhas esperado a cada mês, para cada conjunto de máquinas a serem produzidas em cada mês do período futuro. A soma das linhas representará o total de falhas relativas àquele lote de máquinas vendidas (em maio de 2008, por exemplo). Já a soma das colunas irá representar o total de falhas que ocorrerão no mês do calendário, ou seja, o total de falhas que ocorrerão em junho de 2008, por exemplo, provenientes de máquinas vendidas nos meses anteriores deste ano (2008), e talvez ainda de máquinas produzidas nos anos anteriores de 2007 e 2006. O somatório das colunas é o resultado de interesse para realizar a provisão de garantia. Ao final deste passo, toda a análise confiabilidade e projeção de falhas deverão estar completas para todos os subsistemas, restando apenas agregar o aspecto custo.

3.3.8 Passo oito – Determinar o custo médio projetado para o ano futuro de cada um dos subsistemas

Uma vez estabelecida a confiabilidade dos subsistemas, passa-se a determinar o custo médio das falhas de cada um dos subsistemas escolhidos. Os dados de falha devem trazer além das informações dos tempos-até-falha e indicação do subsistema a qual pertencem, um custo da falha. A razão do somatório destes custos, relativos a um determinado subsistema, e do somatório de falhas atribuídas a componentes do mesmo subsistema é o custo médio de falhas do subsistema. A divisão do produto em diversos sistemas menores, além de reduzir eventuais problemas que aleatoriamente ocorrem sob o ponto de vista de confiabilidade, também deve fazer com que a média dos custos de cada subsistema seja mais representativa de suas falhas do que um custo médio geral de todas as falhas do produto. Neste momento, ao invés de continuar considerando todos os dados históricos dos três períodos anteriores de garantia é melhor que o custo médio seja baseado somente nas informações do último período. Isto para que eventuais variações financeiras devido a variações do comportamento macroeconômico sejam minimizadas. Ainda assim, eventuais projeções de variações de custo para o futuro, se existirem, possam ser consideradas para ajustar os valores calculados para o próximo período. Dessa forma, se a empresa já projeta um aumento no custo de suas peças na ordem de 5% para o próximo período, por exemplo, o custo médio dos sistemas pode ser ajustado por este fator para que o provisionamento seja mais correto.

3.3.9 Passo nove – Calcular a previsão do custo mensal de falhas do período futuro de cada subsistema

Uma vez que o custo projetado de cada subsistema foi obtido, o próximo passo é determinar o custo mensal projetado para cada subsistema. Este cálculo é realizado multiplicando o custo médio calculado de dado sistema (passo oito) pelo total de falhas esperadas a cada mês para este mesmo sistema. O total de falhas esperadas é justamente o somatório das colunas apontado anteriormente no passo sete. A soma dos totais encontrados por mês representa o total de gastos a ser provisionado para falhas daquele subsistema para o período de garantia futuro.

3.3.10 Passo dez – Calcular a previsão mensal de custos com falhas do produto para o período futuro

Como último passo da metodologia é preciso consolidar as projeções de gastos de todos os subsistemas gerando o provisionamento do produto em estudo. O somatório dos resultados dos meses será o valor total a ser provisionado pelo departamento financeiro para cobrir os gastos relativos às falhas do produto, quando operado pelos clientes no campo, durante o período de garantia.

A metodologia proposta aqui pode trabalhar de forma única com as projeções de garantia normal e garantia *goodwill*, conforme foi descrito nos dez passos. Porém, se a empresa tiver a necessidade de separar estas projeções, para fins de controle, deve-se seguir a metodologia tal qual descrito para se ajustar as distribuições de probabilidade a serem utilizadas e para se determinar o custo médio dos subsistemas.

Porém, no momento de calcular os custos mensais projetados deve-se considerar apenas as falhas provenientes de produtos ainda no período de garantia normal para o cálculo da garantia normal. Em outras palavras, não será o somatório de toda a coluna a ser considerado, mas do número de linhas, de baixo para cima, que totaliza o período normal de garantia. As outras linhas superiores representarão as falhas de garantia *goodwill* e a soma de suas quantidades multiplicada pelo custo médio resultará no valor a ser provisionado com garantia *goodwill* naquele mês.

4. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO PRÁTICO

Neste capítulo será apresentada a aplicação da metodologia proposta com dados reais de produtos de uma empresa fabricante de máquinas agrícolas. Primeiramente o objeto do estudo será definido, descrevendo a empresa em questão e os produtos escolhidos para o estudo de caso. A seguir será apresentada a aplicação prática dos passos descritos no capítulo anterior, detalhando como foi feita a obtenção e organização dos dados; escolha dos modelos estatísticos; geração da previsão das falhas futuras, e por fim o impacto financeiro destas falhas em um período de garantia futuro, que é resultado esperado do trabalho.

4.1. Objeto do estudo

A metodologia proposta no capítulo três foi aplicada aos dados de garantia de quatro modelos de tratores agrícolas da marca Massey Ferguson produzidos pela empresa AGCO do Brasil. A empresa e os produtos considerados são brevemente apresentados a seguir.

4.1.1 A empresa

A AGCO Corporation é uma companhia global de fabricação e distribuição de equipamentos agrícolas e peças de reposição. A companhia oferece uma linha completa de produtos sob múltiplas marcas através de uma das maiores redes de distribuição global da indústria, incluindo aproximadamente 2.800 concessionários independentes e distribuidores em mais de 140 países. Desde 1990, a companhia cresceu de US\$200 milhões em vendas líquidas para um resultado de vendas de US\$8.4 bilhões em 2008. Com acionistas em todo o mundo, as ações da AGCO são negociadas na Bolsa de Valores de Nova York pelo símbolo “AG” (AGCO, 2009).

A AGCO possui algumas das marcas mais reconhecidas e respeitadas da indústria de equipamentos agrícolas no mundo. A força e eficiência destas marcas fazem a AGCO líder de mercado em muitas regiões do globo. As principais são: Massey Ferguson, líder consolidado em número de tratores vendidos em todo o mundo; Fendt, líder global em desenvolvimento de tecnologia; Valtra, líder de mercado na região Nórdica da Europa e grande participação no

mercado brasileiro; e Challenger, marca de grande expressão nos mercados Norte Americano e do leste Europeu, vendida através da rede de concessionários Caterpillar (NISKANEN, 2008).

Sediada em Duluth, Geórgia, Estado Unidos, a AGCO possui 13 unidades fabris na América do Norte, América do Sul e Europa, além de outras unidades de distribuição de peças e escritórios de vendas, empregando mais 15 mil funcionários no total. No Brasil, sede das operações na América do Sul, representando 18% do faturamento da empresa, estão localizadas quatro destas fábricas (AGCO, 2009).

Em Santa Rosa, RS, são fabricadas as colheitadeiras das marcas Massey Ferguson e Valtra. Estas são máquinas de grande complexidade e valor agregado, destinadas à produção agrícola. Em Canoas, RS, são fabricados os tratores, tanto para o setor agrícola (marca Massey Ferguson) quanto para o setor industrial (marca MF Industrial). A fábrica de Mogi das Cruzes, SP, também fabrica tratores para o setor agrícola e florestal, da marca Valtra, além de ter uma unidade produtora de motores da marca AGCO Sisu Power, também pertencente à AGCO. Por fim, em Ibirubá, RS, são fabricados implementos agrícolas para as marcas Sfil, Massey Ferguson e Valtra.

4.1.2 Os produtos

O estudo de caso foi realizado com quatro modelos de tratores Massey Ferguson da série 200 Advanced. A família de máquinas desta série compreende mais de 500 versões diferentes entre os onze modelos com potências de 50 a 130 cv. Esse grande número de versões atende um amplo espectro de aplicações agrícolas, das operações mais comuns às especiais e, portanto, esses produtos têm grande representatividade em seu segmento de vendas (MASSEY FERGUNSON, 2009).

Os modelos de tratores escolhidos foram o MF250XE (50cv), MF265 (65cv), MF275 (75cv) e MF283 (85cv), e suas principais características técnicas podem ser vistas na Figura 10. Esses modelos de tratores estão entre os mais tradicionais do mercado brasileiro, sendo o MF275 historicamente o mais vendido no Brasil, e têm grande importância no desempenho financeiro da empresa.

	<p>MF250XE</p> <p>Motor: 3 cilindros aspirado Marca: Simpson Potência: 50 cv @ 2250 Transmissão: Deslizante – 8x2 Levante hidráulico: Mecânico – 2100 kgf Vazão do controle remoto: 17 l/min Tanque de combustível: 57 l Versões: 4x2 e 4x4</p>	
	<p>MF265</p> <p>Motor: 4 cilindros aspirado Marca: MWM International Potência: 65 cv @ 2200 Transmissão: Deslizante – 8x2 Engrenamento constante – 12x4 Sincronizada – 12x4 Sincronizada – 8x8 Levante hidráulico: Mecânico – 2100 kgf ou 2500 kgf Vazão do controle remoto: 59 l/min (Opcional: 69 l/min) Tanque de combustível: 75 l Versões: 4x2 e 4x4</p>	
	<p>MF275</p> <p>Motor: 4 cilindros aspirado Marca: MWM International Potência: 75 cv @ 2200 Transmissão: Deslizante – 8x2 Engrenamento constante – 12x4 Sincronizada – 12x4 Sincronizada – 8x8 Levante hidráulico: Mecânico – 2500 kgf ou 2100 kgf Vazão do controle remoto: 59 l/min (Opcional: 69 l/min) Tanque de combustível: 100 l ou 75 l Versões: 4x2 e 4x4</p>	
	<p>MF283</p> <p>Motor: 4 cilindros aspirado Marca: MWM International Potência: 85 cv @ 2200 Transmissão: Deslizante – 8x2 Engrenamento constante – 12x4 Sincronizada – 8x8 Levante hidráulico: Mecânico – 2500 kgf ou 2100 kgf Vazão do controle remoto: 59 l/min (Opcional: 69 l/min) Tanque de combustível: 100 l ou 75 l Versões: 4x2 e 4x4</p>	

Figura 10 - Características técnicas dos tratores MF250XE, MF265, MF275 e MF283

Fonte: adaptado de Massey Ferguson, 2009

4.2. Previsão de falhas de um período futuro – passos um a sete

Nesta seção será apresentada a primeira etapa da metodologia, como mostra a Figura 9, contemplando os passos um a sete. A metodologia foi aplicada aos dados reais da empresa em estudo, gerando a previsão de falhas em garantia de um período futuro para cada um dos modelos de tratores escolhidos, a partir de dados históricos das falhas.

4.2.1 Subsistemas funcionais – passo um

O primeiro passo consiste em se dividir o objeto de estudo em subsistemas funcionais, de forma a se especificar da melhor forma possível o comportamento das falhas. No caso dos tratores considerados o sistema de garantia da empresa divide as máquinas em uma estrutura chamada de código de falhas, e este foi o ponto de partida para a divisão dos subsistemas.

O código de falhas é uma estrutura de classificação e codificação das falhas em três níveis: grupo, subgrupo e falha. Dessa forma, cada componente individual do trator tem um código de falha associado a ele, permitindo os mais diversos tipos de controle e rastreamento das falhas, sejam da máquina como um todo, sistemas específicos, ou mesmo de uma determinada peça. Exemplificando, uma falha na tampa do radiador de água é codificada como 50 02 01, sendo 50 o código do grupo motor, 02 o código do subgrupo sistema de arrefecimento, e por fim, 01 o código da falha tampa do radiador de água.

Como descrito anteriormente a determinação dos subsistemas funcionais deve ser tal que cada um deles tenha um número de falhas representativo para que o modelo de confiabilidade escolhido seja confiável, ao mesmo tempo em que as falhas individuais desse sistema sigam o padrão do modelo. Dessa forma, vê-se que por mais específico que o código de falha possa ser, não é viável criar um modelo de confiabilidade para cada item, pois além de ter-se possivelmente um número muito pequeno de falhas em cada um deles teria-se algo em torno de 3.000 modelos a serem trabalhados.

Foi considerada então a criação dos subsistemas a partir dos grupos do código de falhas, já que cada grupo é composto por um conjunto de peças que trabalham em funções complementares do ponto de vista funcional e, portanto, submetidas ao mesmo tipo de condições. Porém, mesmo se trabalhando com os grupos do código de falha ainda seriam 23 modelos diferentes, fazendo com que o procedimento ainda fosse bastante complexo de ser executado. Como solução os grupos foram mais uma vez agrupados em seis sistemas funcionais um pouco mais genéricos, aplicados igualmente para cada um dos quatro modelos de tratores escolhidos, conforme mostrado na Figura 11.

Os subsistemas funcionais finais são: (i) acessórios, compreendendo os itens que não fazem parte da configuração padrão das máquinas, mais a instalação da barra de tração e do sistema de levante, além da estrutura anti-capotamento; (ii) elétrico, com todos os itens do sistema elétrico, incluindo faróis, chicotes, chaves, sensores, mais os itens do painel de

instrumentos e do sistema de ar condicionado; (iii) hidráulico, que são todas as tubulações, mangueiras, atuadores e bombas dos sistemas hidráulicos, além do sistema da direção hidráulica; (iv) lataria, incluindo as latarias de fechamento dos tratores e pára-lamas; (v) motor, com todos os componentes da instalação do motor e seus sistemas periféricos, mais o sistema de embreagem; e (vi) transmissão, compreendendo todos os sistemas de transmissão de força e movimento do trator, desde a caixa de transmissão às rodas.

Grupo do Código de Falhas	Subsistema Funcional
Acessórios Barra de tração Sistema de levante de 3 pontos Estrutura de segurança	Acessórios
Sistema Elétrico Instrumentos Ar Condicionado	Elétrico
Direção Equipamento Hidráulico Sistema Hidrotronic Tampa do levante hidráulico	Hidráulico
Lataria	Lataria
Embreagem Motor	Motor
Eixo dianteiro e rodas Transmissão Transmissão ZF Eixo de tração e rodas Freios Carcaça central Tomada de potência Eixo carda lateral Eixo carda central	Transmissão

Figura 11 - Subsistemas funcionais a partir do parâmetro grupo do código de falhas

Fonte: elaborado pelo autor

4.2.2 Volume de vendas histórico – passo dois

O segundo passo da metodologia é levantar o volume de vendas histórico dos produtos analisados distribuídos mês a mês. Para que houvesse uma forma de verificar os resultados da nova metodologia optou-se por estimar as falhas de um ano que já passou, para poder comparar as previsões com os dados reais. Assim, se escolheu fazer a previsão de falhas do ano de 2006. Para tanto os dados históricos considerados foram os dos três anos anteriores, 2003, 2004 e 2005.

A AGCO mantém um controle apurado dos volumes mensais de venda por produto. Assim, o levantamento dos dados históricos de vendas foi bastante simples de ser realizado, e os resultados para cada modelo de trator são apresentados na Tabela 3. Os volumes apresentados na Tabela 3 são das máquinas de fato entregues aos clientes em cada mês. Dessa forma, sabe-se que o tempo entre as máquinas serem vendidas pela fábrica e de fato serem entregues aos clientes é igual a zero.

Tabela 3 - Volume de vendas dos anos de 2003 a 2005 dos modelos de tratores estudados

MF250XE	2003	2004	2005	MF265	2003	2004	2005
Jan	12	6	2	Jan	57	36	28
Fev	10	9	8	Fev	43	45	51
Mar	6	6	6	Mar	60	43	65
Abr	8	6	10	Abr	82	45	88
Mai	16	6	13	Mai	55	80	129
Jun	23	6	10	Jun	80	64	106
Jul	18	15	9	Jul	57	78	79
Ago	8	19	13	Ago	67	61	80
Set	3	7	4	Set	73	53	66
Out	8	11	4	Out	97	85	50
Nov	4	18	19	Nov	65	80	43
Dez	12	15	12	Dez	53	62	48
MF275	2003	2004	2005	MF283	2003	2004	2005
Jan	147	85	110	Jan	94	77	92
Fev	143	119	125	Fev	99	108	99
Mar	154	186	132	Mar	95	239	98
Abr	164	148	172	Abr	110	154	125
Mai	173	171	165	Mai	120	156	139
Jun	188	246	191	Jun	142	198	117
Jul	187	181	211	Jul	133	195	120
Ago	199	223	169	Ago	143	188	151
Set	221	216	159	Set	173	220	133
Out	254	175	158	Out	171	223	116
Nov	146	198	149	Nov	117	172	124
Dez	138	168	121	Dez	97	155	74

Fonte: elaborado pelo autor

É possível verificar que os modelos de tratores apresentam diferenças substanciais na quantidade de unidades vendidas ao longo do tempo. O MF250XE é um produto com uma quantidade de vendas consideravelmente inferior ao MF275, que entre os quatro foi o trator mais vendido nesse período entre os anos de 2003 e 2005.

Essa diferença no desempenho de vendas entre os modelos de tratores também se reflete nos custos totais de garantia por ano de cada produto. Como há muito mais tratores MF275 no campo do que MF250XE, há mais falhas no período de garantia associadas ao

MF275 fazendo com que relevância do planejamento de seus custos de garantia seja também muito maior.

4.2.3 Dados de falhas (Matriz Diagonal) – passo três

Realizados os dois primeiros passos, seguindo a metodologia proposta, o terceiro passo consiste em se levantar os dados de falha dos subsistemas identificados, para cada modelo de trator sob estudo, e organizá-los em uma matriz diagonal. Na matriz diagonal as quantidades de falhas são associadas à população de máquinas vendidas, distribuídas por mês em que as falhas ocorreram.

Utilizando o sistema de controle de garantia da empresa se filtraram as falhas dos grupos de falha desejados, mostrados na Figura 11, para os seis subsistemas determinados dos modelos de tratores em questão. Com o sistema de garantia é possível exportar essas informações para uma planilha Excel, onde os dados brutos foram organizados na matriz diagonal empregando um conjunto de fórmulas e planilhas dinâmicas.

Antes, porém de se criar a matriz diagonal, um ajuste foi feito nos dados originais. Os registros de campanhas de campo, também popularmente conhecidas como “*recall*”, foram retirados da amostragem. As campanhas de campo são alterações ou correções que a empresa fabricante promove em 100% de uma população de máquinas consideradas sob risco inaceitável de acontecer uma determinada falha. Do ponto de vista estatístico esse fato insere uma taxa de falhas igual a 100%, em determinado período de tempo, para estes itens abordados em campanhas de campo. Se estes dados forem mantidos as curvas de confiabilidade para as falhas normais serão distorcidas. No caso da AGCO, as intervenções de campanhas de campo ocorridas no período de garantia, são claramente identificadas no sistema, sem dificuldades para serem excluídas neste estudo. A Tabela 4 mostra o total de falhas consideradas para cada subsistema funcional e modelo de trator. Estes dados são os dados originais acrescidos de um fator k , diferente para cada subsistema, de forma a preservar a confidencialidade das informações da empresa.

Tabela 4 - Quantidade total de falhas consideradas entre 2003 e 2005, por subsistema, por modelo de trator

	MF250XE	MF265	MF275	MF283
Acessório	20	93	179	147
Elétrico	50	488	1357	1128
Hidráulico	8	176	548	479
Lataria	2	10	27	32
Motor	32	428	1229	916
Transmissão	90	797	2283	2020

Fonte: elaborado pelo autor

Como se esperava os modelos de tratores que têm mais unidades vendidas ao longo do tempo têm também um número mais elevado de falhas durante o período de garantia. Outra observação é de que alguns subsistemas são muito mais representativos em termos de volume de dados do que outros. Os subsistemas transmissão, motor e elétrico são os que apresentam maior quantidade de falhas, e são, de fato, as partes principais de um trator. Por outro lado os grupos de acessórios e lataria possuem menos falhas, já que são constituídos de um menor número de componentes, que de forma geral são satélites ao trabalho principal exercido pelas máquinas.

A Tabela 5 mostra um exemplo de como os dados finais foram organizados em matrizes diagonais. No caso, o exemplo se refere às falhas do subsistema hidráulico dos tratores modelo MF265, o período mostrado na figura de exemplo é dos anos 2003 e 2004.

Como descrito anteriormente a matriz diagonal organiza os dados relacionando a data de venda com a data das falhas. Na Tabela 5, na coluna mais à esquerda estão listados os períodos de vendas. As demais colunas apresentam cada um dos períodos de falha, listando a quantidade de falhas que ocorreram neste período, dentre a população de máquinas vendidas em cada uma das linhas. De forma prática, o número 5, destacado no centro da figura, representa que cinco dos 73 tratores MF265 vendidos em setembro de 2003 (Tabela 1), apresentaram falha em um componente do subsistema hidráulico, durante o mês de janeiro de 2004.

Tabela 5 - Matriz diagonal das falhas do subsistema hidráulico do trator MF265

Período Venda	Período Falha														
	jan/03	fev/03	mar/03	abr/03	mai/03	jun/03	jul/03	ago/03	set/03	out/03	nov/03	dez/03	jan/04	fev/04	mar/04
jan/03			1	3		1	3	2							
fev/03					3	1	2	1		1					
mar/03				1						1	1				
abr/03					3	2		2	1	1		1			
mai/03						1		1		1	1				
jun/03								1			1				
jul/03									1						1
ago/03											2			1	1
set/03											3	5		1	
out/03											2	1	1		2
nov/03															1
dez/03													1		1
jan/04															
fev/04															
mar/04															2

Fonte: elaborado pelo autor

A área de dados de cor branca na Tabela 5 representa o período de garantia de 12 meses a partir da data de venda de cada máquina. A área cinza se refere ao período após a garantia contratual ter terminado. Se houvesse falhas na área cinza elas representariam um pagamento de garantia tipo *goodwill*, ou seja, fora do contratual. Por fim, a área de cor preta são períodos anteriores ao período de venda, e, portanto não pode haver falhas registradas ali. Qualquer número que surgisse na área preta seria resultado de algum erro no sistema de registro de garantia da empresa.

Para se realizar as análises de confiabilidade dos dados coletados, a partir das quais a previsão dos custos de garantia foi determinada, utilizou-se o software Weibull ++7 da empresa Reliasoft. Este programa é dedicado para diversos tipos de análises estatísticas com foco em confiabilidade, e é uma ferramenta que a empresa AGCO utiliza globalmente, principalmente com o intuito de avaliar a previsibilidade de falhas específicas.

De acordo com o manual de utilização do software Weibull ++7, Reliasoft (2005b), para análise de dados de garantia existe uma planilha modelo específica com uma configuração similar a da matriz diagonal. Os dados extraídos do sistema de garantia da empresa foram organizados como uma matriz diagonal em uma planilha Excel e após transportados para a planilha de análise do Weibull ++7, como exemplificado na Figura 12.

Os dados mostrados na Figura 12 são referentes às falhas do subsistema transmissão dos tratores MF265. Assim como na matriz diagonal, os períodos descritos nas linhas da tabela são os períodos de vendas, e nas colunas são os períodos onde as falhas ocorreram. Foram consideradas as falhas ocorridas até dezembro de 2005 em máquinas vendidas de janeiro de 2003 a dezembro de 2005.

Este mesmo processo de obtenção dos dados do sistema de garantia, organização em uma matriz diagonal em planilha Excel, e transporte dos dados para o sistema Weibull foi repetido para cada subsistema e modelo de trator selecionado.

4.2.4 Ajuste e estimação das distribuições de probabilidade – passos quatro e cinco

Os próximos passos da metodologia proposta, quatro e cinco, consistem em se determinar qual o melhor modelo de distribuição estatística que descreve o comportamento das falhas de cada subsistema, e depois estimar seus parâmetros para que as projeções de falhas futuras sejam feitas.

O software Weibull ++7 possui os recursos computacionais para realizar estas tarefas. Para tanto, no modelo específico para análise de dados de garantia do sistema é necessário que se informe os volumes de venda em cada período considerado. Estes dados são os mesmos coletados no segundo passo, e mostrados na Tabela 1. Eles são necessários para que o sistema possa calcular a quantidade de dados suspensos em cada período, e após calcule corretamente os parâmetros da distribuição estatística considerada. Um exemplo dos dados de venda por período no sistema Weibull são mostrados na Figura 13.

Com estes dados inseridos no sistema, mais os dados de falha, é possível executar um teste de aderência que indica qual é a melhor distribuição a ser adotada para os dados apresentados. O software utiliza os testes Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov, e utilizando seus resultados individuais ponderados cria um “rank” para uma lista de distribuições escolhidas pelo usuário. O menor “rank” do teste indica qual a distribuição tem mais aderência aos dados que estão sendo analisados. A Figura 14 mostra a tela do sistema com o teste de aderência concluído para os dados de falha do subsistema transmissão dos tratores MF265. Se o usuário desejar verificar os resultados dos testes de aderência em detalhes o sistema fornece um relatório mais completo, como mostrado na Figura 15.

No exemplo considerado o sistema indica que o modelo estatístico que melhor descreve os dados de falha é uma distribuição Lognormal. E, ao se clicar o botão “Implementar” o sistema automaticamente calcula os parâmetros desta distribuição, utilizando o método da máxima verossimilhança (MVE), indicado na parte mais inferior da Figura 14 como MLE (do inglês).

	jan 03	fev 03	mar 03	abr 03	mai 03	jun 03	jul 03	ago 03	set 03	out 03	nov 03	dez 03	jan 04	fev 04
jan 03		0	1	1	1	1	5	3	13	1	1	0	0	0
fev 03			0	0	3	3	1	4	2	5	4	0	0	0
mar 03				2	1	5	3	5	4	6	3	0	0	0
abr 03					2	3	2	5	6	1	2	11	2	1
mai 03						0	1	2	4	7	4	7	3	4
jun 03							5	5	3	3	2	4	4	2
jul 03								0	0	1	0	1	1	5
ago 03									0	3	4	1	2	3
set 03										1	6	4	2	7
out 03											4	2	2	5
nov 03												0	1	0
dez 03													1	1
jan 04														0
fev 04														
mar 04														
abr 04														
mai 04														
jun 04														
jul 04														
ago 04														
set 04														
out 04														
nov 04														
dez 04														
jan 05														
fev 05														
mar 05														
abr 05														
mai 05														
jun 05														
jul 05														
ago 05														
set 05														
out 05														
nov 05														
dez 05														

	nov 04	dez 04	jan 05	fev 05	mar 05	abr 05	mai 05	jun 05	jul 05	ago 05	set 05	out 05	nov 05	dez 05
jan 03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fev 03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
mar 03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
abr 03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
mai 03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
jun 03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
jul 03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ago 03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
set 03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
out 03	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
nov 03	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dez 03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
jan 04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fev 04	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
mar 04	2	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
abr 04	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
mai 04	7	1	7	3	1	0	0	0	1	0	0	0	0	3
jun 04	2	4	7	3	8	0	1	0	0	0	0	0	0	1
jul 04	5	0	4	4	7	4	1	0	1	0	0	0	0	0
ago 04	1	4	4	0	3	7	3	2	0	0	0	1	0	0
set 04	0	5	0	0	5	9	6	5	0	0	0	0	0	0
out 04	6	3	0	3	6	1	1	21	2	4	0	0	1	1
nov 04		1	0	1	3	1	4	4	4	0	0	1	0	0
dez 04			0	0	0	0	3	4	3	9	0	0	0	0
jan 05				0	1	0	1	1	2	2	0	0	0	0
fev 05					1	0	1	1	1	2	0	2	0	1
mar 05							3	1	3	2	4	1	3	3
abr 05								2	4	7	5	2	6	1
mai 05									5	3	2	0	3	1
jun 05										2	5	0	7	7
jul 05											3	3	3	5
ago 05												2	6	2
set 05													2	0
out 05														3
nov 05														1
dez 05														

Figura 12 - Planilha de retornos do subsistema transmissão dos tratores MF265, no software Weibull

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 15 é possível verificar os valores calculados dos índices de verossimilhança, que depois foram classificados pelo software, criando o “rank”. Nesta etapa do trabalho se

optou por aceitar a indicação do programa Weibull++7 quanto à escolha da melhor distribuição, e depois verificar seus resultados graficamente.

Período	Quantidade In-Serviço
out 03	97
nov 03	65
dez 03	53
jan 04	36
fev 04	45
mar 04	43
abr 04	45
mai 04	80
jun 04	64
jul 04	78
ago 04	61
set 04	53
out 04	85
nov 04	80
dez 04	62
jan 05	28
fev 05	51
mar 05	65
abr 05	88
mai 05	129
jun 05	106
jul 05	79
ago 05	80
set 05	66
out 05	50
nov 05	43
dez 05	48

Figura 13 - Quantidade de unidades vendidas por período dos tratores MF265, no software Weibull

Fonte: elaborado pelo autor

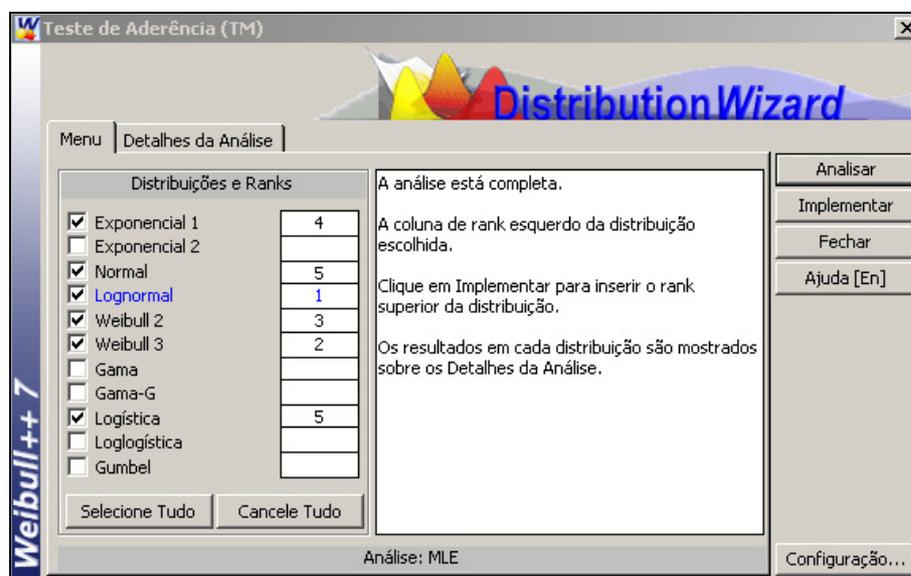


Figura 14 - Resultado do teste de aderência do sistema Weibull para os dados de falha do subsistema transmissão dos tratores MF265

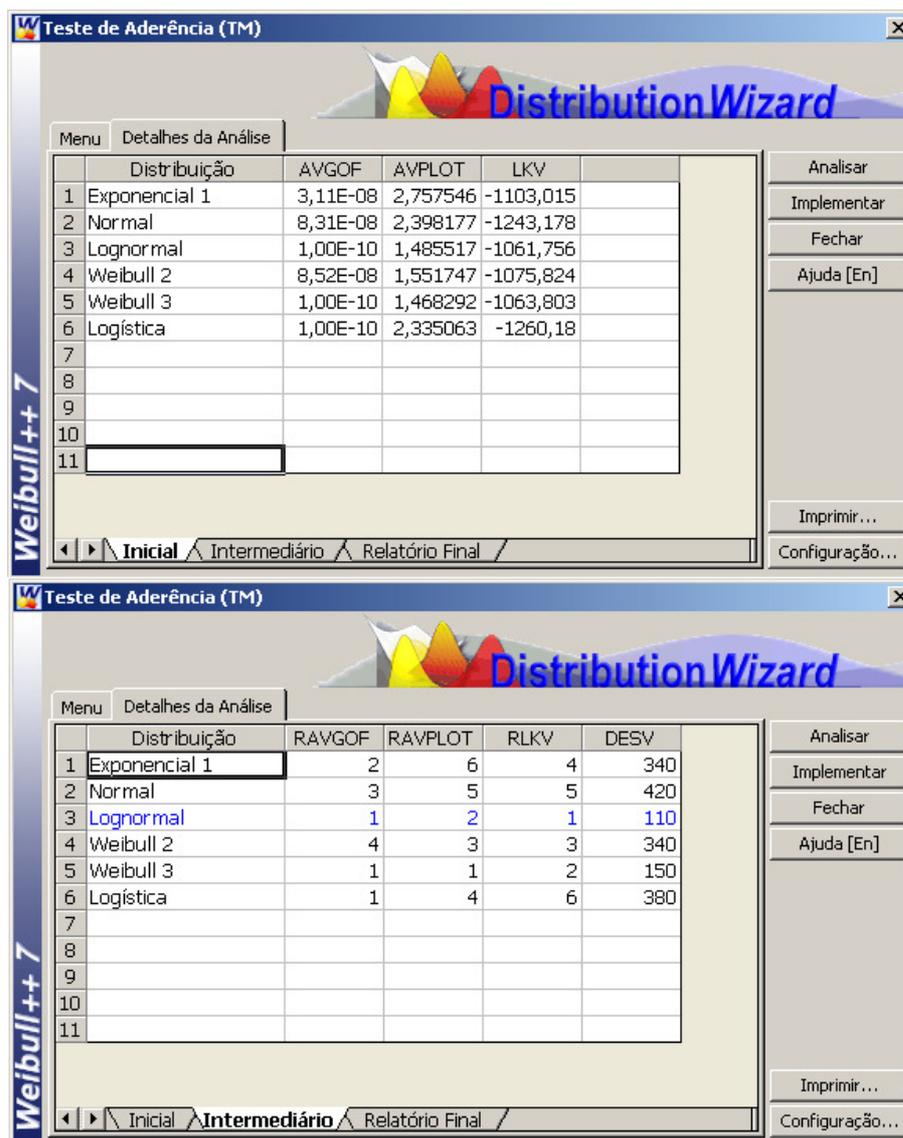


Figura 15 - Detalhes do resultado do teste de aderência do sistema Weibull mostrado na Figura 14

Fonte: elaborado pelo autor

Depois de calculados, o sistema apresenta os parâmetros da distribuição escolhida para apreciação do usuário. No exemplo em questão eles são vistos na Figura 16, onde a média (μ) é 3,3150 meses e o desvio padrão (σ) é 1,6269 meses. O sistema ainda indica que o número de falhas consideradas é igual a 777 e o número de suspensões é igual a 1529 ($F=777/S=1529$).

Principal | Análises | SPC | Outros

Utilizar Subconjuntos

<Todos os Dados>

Distribuição

Lognormal

Parâmetros/Tipo

1 2 3

Mista

Média 3,3150

Std 1,6269

Valor do LK -3479,2428

Configurações

MLE	SRM
FM	MED

Calculado

F=777/S=1529

Resumo das Análises

T(i)=... ...

Figura 16 - Parâmetros da distribuição Lognormal calculados para os dados de falha do subsistema transmissão dos tratores MF265

Fonte: elaborado pelo autor

Uma vez que a distribuição é escolhida e seus parâmetros calculados o software permite ainda que seja elaborado um gráfico para análise visual da aderência da distribuição aos dados, conforme pede a metodologia. Seguindo o exemplo dos dados de falha de transmissão dos tratores modelo MF265, a Figura 17 apresenta o gráfico de probabilidade da distribuição Lognormal para estas falhas.

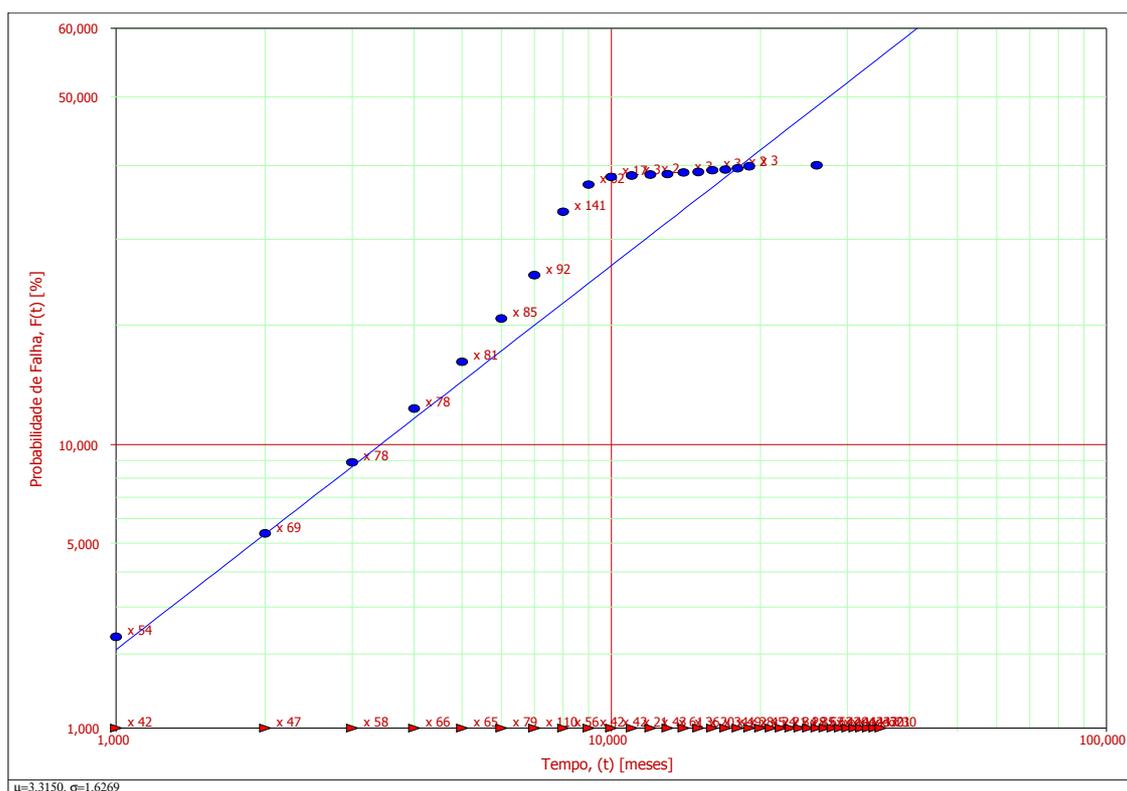


Figura 17 - Gráfico de probabilidade da distribuição Lognormal calculada para os dados de falha do subsistema transmissão dos tratores MF265

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 17 os círculos representam as falhas distribuídas no tempo de forma discreta, e a linha é a distribuição Lognormal ($\mu=3,3150$; $\sigma=1,6269$) que descreve o comportamento destas falhas de forma contínua. Nota-se visualmente que a linha não acompanha o posicionamento das falhas a partir do tempo $t=7$ meses. Isso quer dizer que se esta distribuição for considerada para se fazer projeções de falhas ao longo do período de garantia futuro, há a possibilidade de divergência para máquinas com mais de 7 meses de funcionamento, o que não é aceitável, uma vez que o período de garantia contratual das máquinas sob análise é de 12 meses.

Ainda de forma visual é possível especular que as falhas apresentam um mesmo comportamento até o tempo $t=8$ meses, com a probabilidade de falha crescendo com comportamento Lognormal. Após este período, a probabilidade de falhas parece quase constante no valor de 40%. Se isto for verdade, se tem um comportamento multimodal, onde poderia se dizer que no primeiro período a melhor distribuição é uma Lognormal, e no segundo período de tempo a melhor distribuição seria uma Exponencial. Este comportamento é o esperado para máquinas no início de sua vida útil, conforme o desenho da curva da banheira (WILKINS, 2002).

O software Weibull ++7 não permite que se escolham duas distribuições diferentes ao mesmo tempo para uma mesma população de dados, da forma descrita acima. Porém, é possível fazer com que o sistema calcule uma função Weibull Mista, considerando de duas até quatro subpopulações diferentes. No caso do exemplo sob estudo se optou por uma Weibull Mista de duas subpopulações, como visto na Figura 18.



Figura 18 - Tela de escolha do modelo Weibull Mista com duas subpopulações

Fonte: elaborado pelo autor

Novamente, através de métodos numéricos e MVE o sistema calcula os parâmetros destas duas novas funções, e o melhor período de corte entre elas. A Figura 19 mostra os parâmetros calculados para as duas subpopulações, e a parcela de períodos a que cada uma se refere. À esquerda estão os parâmetros da primeira subpopulação, com $\beta_1=2,2998$ (parâmetro de forma) e $\eta_1=6,6632$ (parâmetro de vida característica). Na figura ainda está descrito que a “parcela” é igual a 0,3873. Isso quer dizer que o modelo da distribuição da primeira subpopulação considerada descreve o comportamento de 38,73% do período de todas as falhas. Neste subsistema que está sendo analisado, a última falha ocorre no período 26, então a subpopulação 1 descreve o comportamento das falhas que ocorrem entre um e dez meses.

No quadro à direita da Figura 19 estão os parâmetros da subpopulação 2, com $\beta_2=0,9106$ e $\eta_2=1284,4335$, e “parcela” igual a 0,6127. Portanto esta segunda população, com estes parâmetros, descreve os dados de falha que ocorrem entre 11 e 26 meses de utilização.

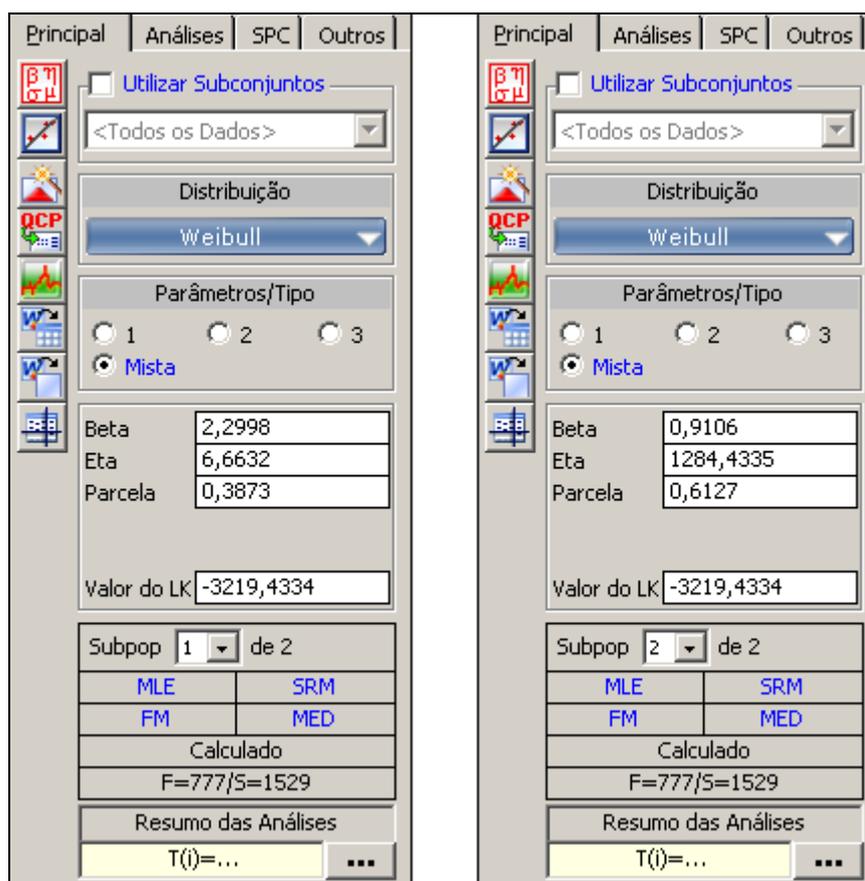


Figura 19 - Parâmetros das duas subpopulações da distribuição Weibull Mista calculados para os dados de falha do subsistema transmissão dos tratores MF265

Fonte: elaborado pelo autor

Mais uma vez é necessário fazer a verificação visual de aderência do modelo calculado aos dados de falha, gerando-se o gráfico de probabilidade no software, o resultado é apresentado na Figura 20.

Claramente, a nova distribuição, composta de duas subpopulações, tem uma melhor relação com os dados de falha ao longo de todo o período, corrigindo as discrepâncias observadas a partir de sete meses no modelo Lognormal. Também, como se esperava, a primeira subpopulação tem um comportamento similar a distribuição Lognormal, confirmado pelo parâmetro $\beta_1=2,2998$, até o tempo $t=10$ meses.

A partir deste período o comportamento das falhas é similar a de uma distribuição Exponencial, como esperado, descrito por uma Weibull com parâmetros $\beta_2=0,9106$, próximo a 1, e $\eta_2=1284,4335$, que quer dizer que 63,2% das falhas desta subpopulação só irão ocorrer com 1284 meses, que neste caso é o mesmo que dizer que a vida característica tende ao infinito, ou ainda, que as falhas no final do período de garantia tem um caráter de aleatoriedade.

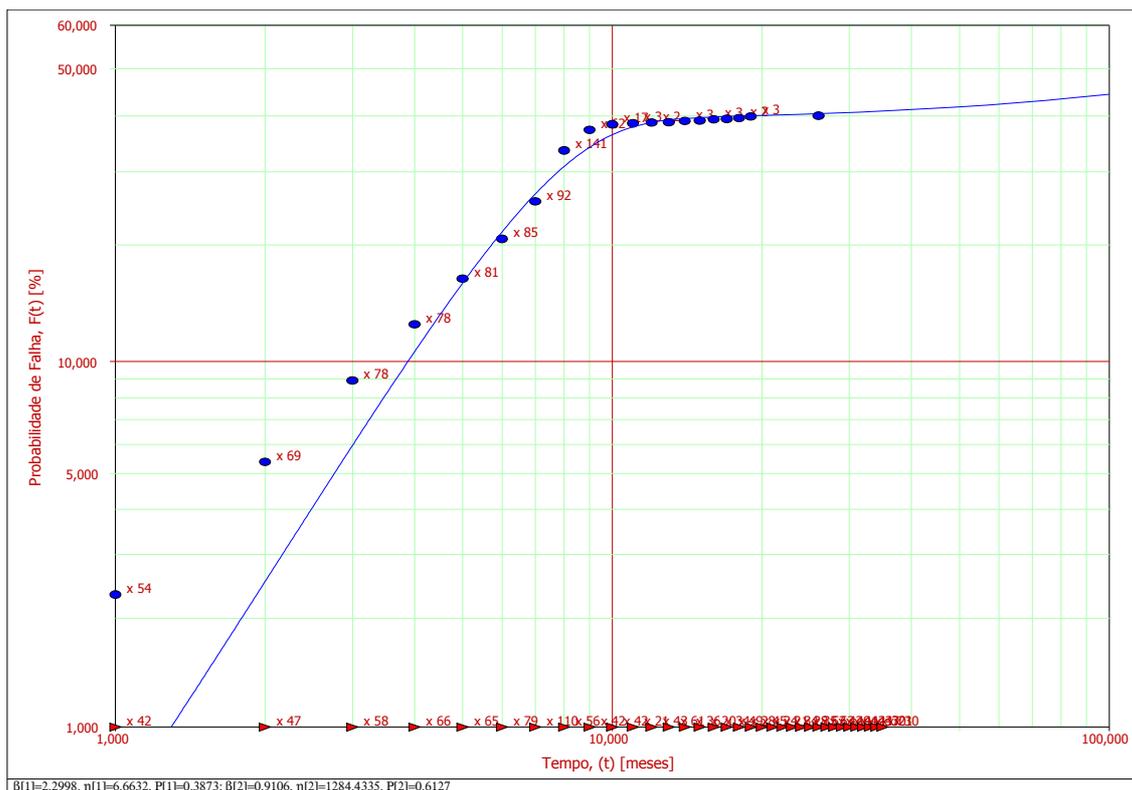


Figura 20 - Gráfico de probabilidade da distribuição Weibull Mista de duas subpopulações calculada para os dados de falha do subsistema transmissão dos tratores MF265

Fonte: elaborado pelo autor

Diz-se aqui que a vida característica tende ao infinito, pois 1284 meses de utilização é um período de 107 anos, consideravelmente maior do que a vida útil esperada para este tipo de equipamento. Um trator agrícola trabalhando em uma empresa rural bem administrada é substituído a cada 10 anos, que é seu tempo de depreciação. Mesmo em propriedades rurais mais modestas, com menor poder de compra, não se espera que um trator agrícola funcione sem falhas tendo mais de 10 anos de trabalho. Dessa forma, qualquer projeção que se faça que considere tempos maiores do que 120 meses podem ser considerados tempos infinitos na prática.

Esta avaliação comparativa entre o modelo sugerido pelo teste de aderência do sistema, dentre os escolhidos, e a eventual adoção de uma distribuição multimodal, foi feita para cada um dos subsistemas funcionais de cada trator estudado, que se encontram no apêndice A. De forma genérica observou-se que os sistemas com um maior número de dados de falhas podem ser descritos por distribuições do tipo Weibull Mista de duas subpopulações. Já nos sistemas funcionais com menor incidência de falhas, caso dos grupos de acessórios e lataria de todos os tratores, e elétrico e hidráulico dos tratores MF250 XE, a indicação do teste de aderência do software se mostrou mais indicada. As Tabelas 6 e 7 apresentam as

distribuições que foram escolhidas em cada caso, juntamente com os parâmetros calculados pelo sistema Weibull ++7. O parâmetro P mostrado nos casos de distribuição Weibull Mista se refere aos tempos t onde há a transição da subpopulação 1 para a subpopulação 2.

Tabela 6 - Parâmetros das distribuições adotadas para os tratores MF265, MF275 e MF283

Subsistema Distribuição Parâmetros	Acessório Weibull			Elétrico Weibull Mista					Hidráulico Weibull Mista				
	β	η	γ	β_1	η_1	β_2	η_2	P	β_1	η_1	β_2	η_2	P
MF265	0,633	2537,470	0,158	2,341	6,098	2,982	259,246	5,302	1,382	5,885	8,420	1,83E+04	1,414
MF275	0,590	6212,048	0,538	2,078	6,071	0,892	2,49E+38	4,310	1,712	5,358	2,412	497,006	2,480
MF283	0,644	3824,324	0,450	2,099	6,034	4,788	132,157	6,385	1,852	5,887	1,350	2556,048	2,354
Subsistema Distribuição Parâmetros	Lataria Weibull			Motor Weibull Mista					Transmissão Weibull Mista				
	β	η	γ	β_1	η_1	β_2	η_2	P	β_1	η_1	β_2	η_2	P
MF265	0,424	5,20E+06	0,950	2,029	6,383	1,472	2138,706	4,442	2,300	6,663	0,911	1284,434	10,070
MF275	0,722	2,91E+04	0,490	2,037	6,210	1,049	6269,367	4,414	2,082	6,495	1,298	485,283	11,594
MF283	0,772	1,23E+04	-1,233	2,018	6,154	3,519	177,339	5,782	2,076	6,572	1,279	317,302	14,374

Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 6 mostra as distribuições que descrevem os comportamentos de falhas dos modelos de tratores MF265, MF275 e MF283. Vê-se que estas máquinas possuem comportamento semelhante, sendo cada um de seus subsistemas funcionais representados pelo mesmo tipo de distribuição estatística, com os parâmetros de forma das primeiras subpopulações próximos, e os parâmetros de vida característica também tendendo ao infinito de forma similar. Nota-se uma divergência maior nos parâmetros de forma das segundas subpopulações, quando existentes, porém este parâmetro apenas realiza o ajuste no momento de transição das duas curvas de probabilidade, alterando na prática somente o tempo em que ocorre a estabilização da taxa de falhas, junto com o parâmetro P . Esta semelhança verificada se deve ao fato de que estes modelos utilizam realmente muitos componentes comuns, sendo sua principal diferença a potência de cada motor, e conseqüentemente suas aplicações no campo.

A utilização de mesmos conjuntos em diferentes modelos de tratores fica clara ao ser analisado o subsistema transmissão, cujo comportamento de falhas se mostrou com divergências mínimas entre cada uma das três máquinas. Os sistemas de tração dos tratores sob estudo são dimensionados para máquinas de até 120 cv de potência, e, portanto a diferença dos motores de 65 cv a 85 cv têm pouca influência no desgaste destes itens, e no momento em que falham. Mesmo assim é possível notar que o parâmetro de vida característica (η_2), ainda que tendendo ao infinito, diminui a medida que a potência das

máquinas aumenta, denotando um maior desgaste da mesma transmissão se ligada a um motor de maior potência, com o trator sendo submetido ao um esforço maior.

Tabela 7 - Parâmetros das distribuições adotadas para os tratores MF250 XE

Subsistema Distribuição Parâmetros	Acessório Weibull			Elétrico Lognormal		Motor Weibull Mista				
	β	η	γ	μ	σ	β_1	η_1	β_2	η_2	P
MF250 XE	0,922	270,931	0,683	5,456	2,538	1,576	6,176	1,139	1515,404	1,992
Subsistema Distribuição Parâmetros	Hidráulico Weibull			Lataria Lognormal		Transmissão Weibull Mista				
	β	η	γ	μ	σ	β_1	η_1	β_2	η_2	P
MF250 XE	0,387	3,42E+05	0,965	5,003	0,728	3,401	2,783	0,688	105,526	0,728

Fonte: elaborado pelo autor

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros das distribuições adotadas na análise do trator MF250 XE. Esta é uma máquina com maior número de diferenças construtivas em relação às outras três, menor e mais simples, e, inclusive com um motor de três cilindros, ao invés de quatro, fornecido por um fabricante exclusivo. Além das diferenças de peças, estas máquinas possuem também aplicações distintas, sendo o MF250 XE um trator que, de forma geral, realiza trabalhos mais leves no campo.

4.2.5 Previsão de falhas futuras baseadas na estimativa de vendas – passos seis e sete

No passo seis da metodologia proposta devem-se levantar os dados de projeção de vendas para o período futuro, distribuídos mês a mês. Na AGCO estas projeções são realizadas durante o planejamento financeiro e de produção do ano seguinte, e são dados acessíveis pelo departamento de Garantia. No estudo que está sendo descrito, deseja-se o planejamento de vendas do ano de 2006 de cada um dos modelos de tratores, e os resultados deste levantamento são mostrados na Tabela 8. Mais uma vez, para se eliminar um eventual erro de previsão de vendas, influenciável por variações mercadológicas, e para facilitar a validação da metodologia, os dados de vendas utilizados foram os dados reais de máquinas entregues em cada período.

Tabela 8 - Previsão da quantidade de venda dos tratores no ano de 2006

Projeção de Vendas 2006	MF250 XE	MF265	MF275	MF283
Janeiro	9	29	85	72
Fevereiro	16	51	126	71
Março	21	52	137	98
Abril	22	64	142	96
Mai	31	60	168	97
Junho	29	52	155	92
Julho	39	35	122	109
Agosto	38	55	161	134
Setembro	31	37	144	132
Outubro	27	61	200	171
Novembro	30	44	177	175
Dezembro	29	31	121	132

Fonte: elaborado pelo autor

Esses dados foram então transportados para o software Weibull ++7, completando a tabela mostrada na Figura 13 nos períodos de janeiro de 2006 a dezembro de 2006, para cada modelo de trator, repetindo este processo para todos os seus subsistemas.

Estas informações são utilizadas pelo sistema para realização dos cálculos de confiabilidade condicional em cada período, aplicados às distribuições determinadas previamente. Assim, executando o passo sete da metodologia, para cada subsistema funcional em estudo é gerada uma previsão mês a mês, do ano de 2006, da quantidade de falhas, completando o passo sete da metodologia proposta. Na Figura 21 é possível visualizar como o software apresenta estes dados projetados, sendo estes referentes ao subsistema transmissão dos tratores MF265.

A previsão considera as falhas que devem ocorrer nas máquinas produzidas desde janeiro de 2005, já que estas ainda estarão no período de garantia em janeiro de 2006, que é o primeiro período a ser estimado. O programa vai completando a matriz diagonal de retornos, para os períodos futuros desejados, e o somatório destas colunas é o resultado esperado desta etapa, destacado na última linha da Figura 21. O sistema calcula as previsões com precisão de até dez casas decimais, mas as apresenta como números arredondados, de acordo com a vontade do usuário.

B49	36											
LC-S/2S/95,00	jan 06	fev 06	mar 06	abr 06	mai 06	jun 06	jul 06	ago 06	set 06	out 06	nov 06	dez 06
jan 05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fev 05	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
mar 05	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
abr 05	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
mai 05	7	5	4	3	2	1	1	0	0	0	0	0
jun 05	6	5	4	3	2	1	1	0	0	0	0	0
jul 05	5	4	4	3	2	1	1	1	0	0	0	0
ago 05	4	4	4	3	3	2	1	1	0	0	0	0
set 05	3	4	4	3	3	2	2	1	1	0	0	0
out 05	2	2	3	3	3	2	2	1	1	1	0	0
nov 05	1	2	2	2	3	2	2	2	1	1	0	0
dez 05	0	1	2	2	3	3	3	2	2	1	1	1
jan 06		0	1	1	1	2	2	2	1	1	1	0
fev 06			0	1	2	3	3	3	3	2	2	1
mar 06				0	1	2	3	3	3	3	2	2
abr 06					0	1	2	3	4	4	4	3
mai 06						0	1	2	3	3	4	3
jun 06							0	1	2	3	3	3
jul 06								0	1	1	2	2
ago 06									0	1	2	3
set 06										0	1	1
out 06											0	1
nov 06												0
dez 06												
Total	36	34	31	28	26	25	25	25	25	25	25	24

Figura 21 - Previsão de falhas do subsistema transmissão calculadas no software Weibull, dos tratores MF265

Fonte: elaborado pelo autor

4.3. Análise financeira – passos oito a dez

Uma vez obtidas as previsões de falhas é necessário valorizar estes dados de forma a determinar o provisionamento de garantia do próximo ano. Os passos oito a dez da metodologia proposta detalham o procedimento para a realização desta tarefa.

Seguindo a metodologia, deve-se, primeiro, levantar qual o custo médio das falhas do último período que se tem registro, no caso do estudo o ano de 2005. O sistema de garantia da AGCO registra, além do tipo de falha e o momento em que ela ocorreu, também o seu custo total. Este custo é o somatório dos gastos com peças, mão-de-obra, e a locomoção para realizar o reparo no campo. Da mesma forma como as quantidades de falhas foram extraídas do sistema, seus custos médios também foram agrupados por subsistemas, conforme mostrado na Tabela 9. Para preservar a confidencialidade dos dados da empresa, os valores apresentados na Tabela 9 são na verdade os custos reais multiplicados por um fator f , e o \$ representa determinada unidade monetária.

Tabela 9 - Custo médio das falhas ocorridas durante o ano de 2005, por subsistema funcional

Subsistemas	Custo Médio 2005			
	MF250 XE	MF265	MF275	MF283
Acessórios	\$ 183,32	\$ 366,68	\$ 182,22	\$ 158,49
Elétrico	\$ 97,18	\$ 103,20	\$ 112,83	\$ 115,63
Hidráulico	\$ 281,84	\$ 253,58	\$ 293,92	\$ 263,71
Lataria	\$ 1.004,42	\$ 409,82	\$ 215,30	\$ 309,33
Motor	\$ 1.141,37	\$ 191,05	\$ 202,78	\$ 208,92
Transmissão	\$ 467,96	\$ 292,25	\$ 319,48	\$ 377,60

Fonte: elaborado pelo autor

Visando utilizar de forma adequada as estimativas de falhas para o ano de 2006, o custo médio do ano anterior (2005) precisa ser ajustado de acordo com a variação econômica que a empresa compõe. Na AGCO, durante o planejamento financeiro e produtivo, vários fatores são considerados: inflação projetada, comportamento do câmbio, variação do custo de matéria-prima, variações de contratos com fornecedores, entre outros, formando um índice de reajuste. Este índice é base para a composição de custos e preços dos produtos que a empresa comercializa. Este índice de reajuste em 2005, projetado para 2006, era igual a 13,58%.

Como a maior parcela do custo das falhas é proveniente do custo das peças que são substituídas, se utilizou este índice de reajuste sobre os custos médios de 2005 para se calcular o custo médio projetado de 2006 das falhas dos subsistemas funcionais dos tratores sob estudo. O resultado é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Custo médio de falhas projetado para o ano de 2006, por subsistema funcional

Subsistemas	Custo Médio Projetado 2006			
	MF250 XE	MF265	MF275	MF283
Acessórios	\$ 208,21	\$ 416,45	\$ 206,96	\$ 180,00
Elétrico	\$ 110,37	\$ 117,21	\$ 128,15	\$ 131,32
Hidráulico	\$ 320,10	\$ 288,00	\$ 333,83	\$ 299,50
Lataria	\$ 1.140,77	\$ 465,46	\$ 244,53	\$ 351,32
Motor	\$ 1.296,31	\$ 216,99	\$ 230,31	\$ 237,28
Transmissão	\$ 531,48	\$ 331,92	\$ 362,85	\$ 428,86

Fonte: elaborado pelo autor

Os passos nove e dez da metodologia são contemplados a fim de finalizar a análise financeira. Os totais de falhas estimadas em cada mês devem ser multiplicados pelos custos projetados associados àquela população. As Tabelas 11, 12, 13 e 14 detalham todos os custos estimados para o ano de 2006 mês a mês, de cada um dos subsistemas funcionais de cada modelo de trator estudado.

Na Tabela 11 as colunas apresentam a quantidade de falhas previstas para cada subsistema funcional, que quando multiplicadas pelo custo médio projetado, descrito na segunda linha, resulta no custo total estimado com falhas nestes subsistemas. A última coluna da tabela indica o custo total previsto em cada mês, enquanto que as duas últimas linhas indicam o total de falhas esperadas por subsistema, e o custo total destas falhas, respectivamente. O valor mostrado mais a direita da última linha é o gasto total esperado com falhas em garantia para o modelo MF250 XE. As Tabelas 12, 13 e 14 apresentam os dados da mesma forma para os modelos MF265, MF275 e MF283, respectivamente.

Tabela 11 - Previsão do custo com falhas durante o ano de 2006 dos tratores MF250 XE

MF250 XE	Acessórios	Elétrico	Hidráulico	Latária	Motor	Transmissão	Custo Total
Custo Médio Proj.	\$ 208,21	\$ 110,37	\$ 320,10	\$ 1.140,77	\$ 1.296,31	\$ 531,48	-
jan/06	1	1	1	0	2	2	\$ 4.294,27
fev/06	1	1	1	0	2	3	\$ 4.825,75
mar/06	1	2	1	0	2	3	\$ 4.936,12
abr/06	1	2	1	0	2	3	\$ 4.936,12
mai/06	1	2	1	0	2	4	\$ 5.467,61
jun/06	1	3	1	0	3	4	\$ 6.874,29
jul/06	1	3	1	0	3	5	\$ 7.405,77
ago/06	1	3	1	0	4	6	\$ 9.233,57
set/06	2	4	2	0	4	7	\$ 10.403,73
out/06	2	4	2	0	5	7	\$ 11.700,04
nov/06	2	4	1	0	5	7	\$ 11.379,94
dez/06	2	4	1	0	5	7	\$ 11.379,94
TOTAL FALHAS	16	33	14	0	39	58	-
CUSTO TOTAL	\$ 3.331,38	\$ 3.642,13	\$ 4.481,36	\$ -	\$ 50.556,26	\$ 30.826,03	\$ 92.837,16

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 12 - Previsão do custo com falhas durante o ano de 2006 dos tratores MF265

MF265	Acessórios	Elétrico	Hidráulico	Latária	Motor	Transmissão	Custo Total
Custo Médio Proj.	\$ 416,45	\$ 117,21	\$ 288,00	\$ 465,46	\$ 216,99	\$ 331,92	-
jan/06	4	23	7	0	16	36	\$ 21.798,78
fev/06	4	21	7	0	15	34	\$ 20.683,52
mar/06	4	20	6	0	14	31	\$ 19.065,55
abr/06	4	19	6	0	13	28	\$ 17.735,58
mai/06	4	18	6	0	12	26	\$ 16.737,53
jun/06	4	18	6	0	11	25	\$ 16.188,62
jul/06	4	19	6	0	11	25	\$ 16.305,83
ago/06	4	20	5	0	11	25	\$ 16.135,04
set/06	4	22	5	0	11	25	\$ 16.369,47
out/06	4	23	5	0	11	25	\$ 16.486,68
nov/06	5	25	5	0	11	25	\$ 17.137,56
dez/06	5	27	5	0	11	24	\$ 17.040,07
TOTAL FALHAS	50	255	69	0	147	329	-
CUSTO TOTAL	\$ 20.822,73	\$ 29.889,42	\$ 19.872,04	\$ -	\$ 31.897,68	\$ 109.202,36	\$ 211.684,23

: elaborado pelo autor

Observando-se as Tabelas 11 e 12, os subsistemas “Acessórios” e “Latária” têm menor ou pouco impacto sobre o custo de falha total esperado para cada trator, devido principalmente as baixas incidências de falhas. Por outro, lado os gastos com falhas relacionadas ao subsistema “Transmissão” representam aproximadamente 50% do total

projetado para cada modelo de trator. Além do custo médio previsto com estas falhas ter alto valor relativo, este é o sistema que apresenta maior incidência de falhas, uma vez que abrange uma grande quantidade de itens que desempenham o papel fundamental da aplicação destas máquinas, gerando força de tração.

Tabela 13 - Previsão do custo com falhas durante o ano de 2006 dos tratores MF275

MF275	Acessórios	Elétrico	Hidráulico	Latária	Motor	Transmissão	Custo Total
Custo Médio Proj.	\$ 206,96	\$ 128,15	\$ 333,83	\$ 244,53	\$ 230,31	\$ 362,85	-
jan/06	6	44	20	1	43	75	\$ 50.918,16
fev/06	6	43	19	1	42	73	\$ 49.500,19
mar/06	6	41	19	1	40	70	\$ 47.694,73
abr/06	6	39	18	1	38	67	\$ 45.555,45
mai/06	7	37	18	1	37	64	\$ 44.187,25
jun/06	7	37	19	1	36	63	\$ 43.927,92
jul/06	7	37	19	1	36	62	\$ 43.565,07
ago/06	7	37	20	1	36	63	\$ 44.261,75
set/06	7	38	21	1	36	63	\$ 44.723,72
out/06	7	38	22	1	37	64	\$ 45.650,70
nov/06	7	39	24	1	38	66	\$ 47.402,50
dez/06	7	41	26	1	39	68	\$ 49.282,46
TOTAL FALHAS	80	471	245	12	458	798	-
CUSTO TOTAL	\$ 16.556,40	\$ 60.359,61	\$ 81.787,18	\$ 2.934,38	\$ 105.480,20	\$ 289.552,13	\$ 556.669,90

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 14 - Previsão do custo com falhas durante o ano de 2006 dos tratores MF283

MF283	Acessórios	Elétrico	Hidráulico	Latária	Motor	Transmissão	Custo Total
Custo Médio Proj.	\$ 180,00	\$ 131,32	\$ 299,50	\$ 351,32	\$ 237,28	\$ 428,86	-
jan/06	5	30	16	1	29	52	\$ 39.165,15
fev/06	5	29	16	1	29	51	\$ 38.604,97
mar/06	5	28	15	1	28	50	\$ 37.507,99
abr/06	5	27	14	1	27	48	\$ 35.982,16
mai/06	5	25	14	1	27	46	\$ 34.861,79
jun/06	5	25	13	1	27	45	\$ 34.133,42
jul/06	5	24	13	1	27	44	\$ 33.573,24
ago/06	5	24	13	1	27	43	\$ 33.144,37
set/06	6	24	13	1	29	44	\$ 34.227,81
out/06	6	25	14	1	31	45	\$ 35.562,06
nov/06	6	27	15	1	34	47	\$ 37.693,79
dez/06	6	29	16	1	38	51	\$ 40.920,52
TOTAL FALHAS	64	317	172	12	353	566	-
CUSTO TOTAL	\$ 11.520,29	\$ 41.629,04	\$ 51.514,72	\$ 4.215,84	\$ 83.760,87	\$ 242.736,51	\$ 435.377,27

Fonte: elaborado pelo autor

Da mesma forma, os modelos de tratores com maior quantidade de unidades vendidas, MF275 e MF283, têm maior peso sobre o total previsto de gastos (Tabelas 13 e 14). Com um maior número de máquinas no campo a tendência é que se tenha um maior número de falhas, uma vez que os projetos de todos os tratores estudados são muito similares.

Se estes quatro modelos de máquinas fossem todo o portfólio de produtos da empresa, o somatório dos custos totais de falha previsto seria o valor a ser provisionado na conta de garantia para o ano de 2006, no caso **\$1.296.568,56**.

4.4. Resultados obtidos

Como sinalizado anteriormente, para validar os resultados obtidos com a metodologia proposta, optou-se por realizar as previsões de um ano que já aconteceu, podendo assim comparar diretamente os dados projetados com os dados reais. As comparações foram feitas considerando tanto as estimativas de quantidade de falhas, como os custos envolvidos, para cada um dos subsistemas funcionais, de cada um dos modelos de tratores. Fez-se também a comparação dos dados consolidados, somando as projeções individuais de cada modelo. Os resultados são apresentados na Tabela 15.

Para a AGCO, no momento que se faz uma previsão de custos ou investimentos com projetos, se aceita durante seu desenvolvimento variações na ordem de até 10%, se devidamente justificadas. Analisando as diferenças encontradas na previsão das quantidades de falhas, observa-se que no modelo de trator MF250 XE, individualmente, cada subsistema apresentou erros significativos. O subsistema “Motor” foi o único que apresentou diferença negativa (-33,3%), indicando que a previsão da quantidade de falhas foi inferior ao verificado na prática. Os índices de erros absolutos mais baixos foram justamente nas populações com maior número de dados para análise, “Elétrico” e “Transmissão”. Por outro lado, a previsão de variação de custos para as falhas destes tratores se mostrou acima do realizado. O motivo é que a base de custos de 2005 foi muito superior ao ocorrido em 2006, principalmente os subsistemas “Motor” e “Transmissão”, justamente os que causam maior impacto no total.

As diferenças observadas na previsão das quantidades de falhas do modelo MF265, de forma geral, se apresentaram mais próximas ao patamar de 10% de erro, sendo a quantidade de falhas do sistema “Hidráulico” a que mostrou maior divergência. Sob o ponto de vista de custo, as falhas do subsistema “Motor” se mostraram mais dispendiosas do que o previsto, enquanto que os custos com falhas relacionadas ao grupo “Transmissão” foram menores do que o previsto.

Tabela 15 - Comparativo dos resultados da metodologia proposta versus os dados reais de 2006

MF250 XE	Previsão 2006		Real 2006		Diferença %	
	Qtd. Falhas	Custo Total	Qtd. Falhas	Custo Total	Qtd. Falhas	Custo Total
Acessórios	16	\$ 3.331,38	10	\$ 2.224,81	37,5%	33,2%
Elétrico	33	\$ 3.642,13	31	\$ 4.289,82	6,1%	-17,8%
Hidráulico	14	\$ 4.481,36	11	\$ 2.455,82	21,4%	45,2%
Lataria	0	\$ -	1	\$ 10,39	-	-
Motor	39	\$ 50.556,26	52	\$ 25.634,04	-33,3%	49,3%
Transmissão	58	\$ 30.826,03	49	\$ 17.817,30	15,5%	42,2%
TOTAL	160	\$ 92.837,16	154	\$ 52.432,18	3,8%	43,5%

MF265	Previsão 2006		Real 2006		Diferença %	
	Qtd. Falhas	Custo Total	Qtd. Falhas	Custo Total	Qtd. Falhas	Custo Total
Acessórios	50	\$ 20.822,73	56	\$ 30.491,68	-12,0%	-46,4%
Elétrico	255	\$ 29.889,42	244	\$ 27.920,00	4,3%	6,6%
Hidráulico	69	\$ 19.872,04	59	\$ 17.769,00	14,5%	10,6%
Lataria	0	\$ -	1	\$ 354,50	-	-
Motor	147	\$ 31.897,68	167	\$ 40.760,28	-13,6%	-27,8%
Transmissão	329	\$ 109.202,36	312	\$ 85.566,25	5,2%	21,6%
TOTAL	850	\$ 211.684,23	839	\$ 202.861,71	1,3%	4,2%

MF275	Previsão 2006		Real 2006		Diferença %	
	Qtd. Falhas	Custo Total	Qtd. Falhas	Custo Total	Qtd. Falhas	Custo Total
Acessórios	80	\$ 16.556,40	74	\$ 32.948,87	7,5%	-99,0%
Elétrico	471	\$ 60.359,61	437	\$ 57.527,36	7,2%	4,7%
Hidráulico	245	\$ 81.787,18	199	\$ 57.299,99	18,8%	29,9%
Lataria	12	\$ 2.934,38	8	\$ 1.735,54	33,3%	40,9%
Motor	458	\$ 105.480,20	475	\$ 137.834,36	-3,7%	-30,7%
Transmissão	798	\$ 289.552,13	737	\$ 238.027,19	7,6%	17,8%
TOTAL	2064	\$ 556.669,90	1930	\$ 525.373,30	6,5%	5,6%

MF283	Previsão 2006		Real 2006		Diferença %	
	Qtd. Falhas	Custo Total	Qtd. Falhas	Custo Total	Qtd. Falhas	Custo Total
Acessórios	64	\$ 11.520,29	43	\$ 18.897,20	32,8%	-64,0%
Elétrico	317	\$ 41.629,04	335	\$ 39.880,98	-5,7%	4,2%
Hidráulico	172	\$ 51.514,72	150	\$ 52.113,76	12,8%	-1,2%
Lataria	12	\$ 4.215,84	12	\$ 3.798,76	0,0%	9,9%
Motor	353	\$ 83.760,87	325	\$ 112.953,67	7,9%	-34,9%
Transmissão	566	\$ 242.736,51	526	\$ 228.402,10	7,1%	5,9%
TOTAL	1484	\$ 435.377,27	1391	\$ 456.046,48	6,3%	-4,7%

Consolidado	Previsão 2006		Real 2006		Diferença %	
	Qtd. Falhas	Custo Total	Qtd. Falhas	Custo Total	Qtd. Falhas	Custo Total
Acessórios	210	\$ 52.230,80	183	\$ 84.562,56	12,9%	-61,9%
Elétrico	1076	\$ 135.520,21	1047	\$ 129.618,16	2,7%	4,4%
Hidráulico	500	\$ 157.655,29	419	\$ 129.638,57	16,2%	17,8%
Lataria	24	\$ 7.150,22	22	\$ 5.899,19	8,3%	17,5%
Motor	997	\$ 271.695,01	1019	\$ 317.182,35	-2,2%	-16,7%
Transmissão	1751	\$ 672.317,03	1624	\$ 569.812,83	7,3%	15,2%
TOTAL	4558	\$ 1.296.568,56	4314	\$ 1.236.713,67	5,4%	4,6%

Fonte: elaborado pelo autor

Já os modelos de tratores MF275 e MF283 apresentaram resultados mais consistentes, mais próximos ao índice de erro de 10%, no que se refere a previsão da quantidade de falhas. Estas máquinas são as que possuem um maior número de dados disponíveis, devido ao seu grande número de unidades vendidas ao longo do tempo, e este fato impacta diretamente na

assertividade associada às suas distribuições de probabilidade ajustadas previamente. De forma geral apenas os resultados obtidos para os subsistemas “Latária”, que tem baixo índice de falhas, e, portanto, baixo impacto no total, e “Hidráulico” se mostraram com divergências mais significativas. Já sob o ponto de vista de custos novamente os índices de erros foram maiores, indicando alguma falha no método de estimativa dos custos médios. As divergências mais significativas são evidenciadas nos subsistemas “Latária” e “Motor”, sendo ambos inferiores ao previsto.

Quando os dados são consolidados, ou seja, as previsões de cada modelo de trator são somadas gerando o resultado final, e comparados com os dados reais observa-se que os únicos subsistemas que apresentaram erro maior do que 10% em termos de quantidade de falhas foram “Acessórios” e “Hidráulico”. Os erros cometidos no subsistema “Acessórios” têm pouca consequência no resultado total, uma vez que o número de falhas deste tipo de subsistema representa apenas 4% do volume de falhas total. Já a divergência nas estimativas para as falhas relacionadas ao sistema “Hidráulico” tem consequência mais relevante e deve ser investigada mais profundamente quando se recalcularem as distribuições para novas previsões de períodos posteriores. Um motivo que pode ser especulado para o maior erro das previsões seria uma evolução de projeto, ou de processos de fabricação, que melhoraram o desempenho dos componentes envolvidos neste subsistema, aumentando sua confiabilidade geral.

Os subsistemas “Transmissão”, “Motor” e “Elétrico”, que juntos representam mais de 80% do total de falhas, tiveram comportamento bastante preciso, com erro máximo na ordem de 8%. O subsistema “Latária” apesar de possuir baixa incidência de falhas, que é um fator que dificulta a realização de previsões baseadas em distribuições estatísticas, na análise consolidada também apresentou erro menor do que 10%.

Todos os grupos de falhas, exceto o subsistema “Motor” tiveram como resultado previsões de falhas com quantidade superior ao realizado na prática. O fato do subsistema “Motor” ter apresentado na prática mais falhas do que foi previsto pode indicar que as máquinas vendidas durante o ano de 2006 tiveram algum componente, ou conjunto de componentes, que apresentou problemas de campo que não ocorreram nos anos anteriores, fazendo com que o sistema tivesse desempenho menos confiável do que o esperado.

Este é um efeito interessante e desejável da metodologia proposta. O fato de se ter previsões de falha mês a mês de cada conjunto funcional das máquinas é uma informação valiosa para o acompanhamento de desempenho dos produtos no campo. Monitorando estes números ao longo do ano é possível verificar, dentro de um período de meses, se há algo fora

do esperado com as máquinas sendo produzidas. Por exemplo, se está previsto que ao longo do ano acontecerão na ordem de 30 falhas por mês no subsistema “Elétrico” de determinado modelo de trator, e o sistema de garantia registra 50 falhas em dois meses consecutivos, a área de Garantia pode sinalizar rapidamente para as áreas técnicas da empresa essa divergência, iniciando um processo de investigação que resultará em algum tipo de correção.

Por fim, se fez um comparativo dos resultados gerais obtidos com a metodologia proposta e com a metodologia atualmente utilizada para a previsão de gastos com falhas dentro do período de garantia normal. Para que as comparações fossem realizadas na mesma base de dados, se utilizou na metodologia atual os mesmos números de quantidade de máquinas entregues ao longo do ano de 2006, e não a previsão de vendas da época. Os resultados podem ser vistos na Tabela 16.

Tabela 16 - Comparativo dos resultados da metodologia proposta versus metodologia atual

2006	Qtd. Entregues	Metodologia Proposta	Metodologia Atual	Real	Dif. Met. Proposta	Dif. Met. Atual
MF250 XE	322	\$ 92.837,16	\$ 75.371,02	\$ 52.432,18	43,5%	30,4%
MF265	571	\$ 211.684,23	\$ 120.909,54	\$ 202.861,71	4,2%	-67,8%
MF275	1738	\$ 556.669,90	\$ 416.814,11	\$ 525.373,30	5,6%	-26,0%
MF283	1379	\$ 435.377,27	\$ 455.614,71	\$ 456.046,48	-4,7%	-0,1%
TOTAL	4010	\$ 1.296.568,56	\$ 1.068.709,38	\$ 1.236.713,67	4,6%	-15,7%

Fonte: elaborado pelo autor

Vê-se que as estimativas realizadas pela metodologia corrente tendem a indicar um custo total inferior ao real. Isso devido ao fato de que neste método não se trabalha com nenhum índice de reajuste dos custos médios históricos, e também porque faz uma média do total de falhas ao longo de todo o período, sem considerar que a taxa de falhas cresce ao longo do período de garantia, com comportamento diferente ao de uma distribuição Normal, com média centrada.

A metodologia proposta resultou em um erro três vezes menor do que a metodologia atual. Tendendo a um provisionamento de recursos ligeiramente superior aos de fato realizados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Esta dissertação apresenta uma nova metodologia para se realizar a previsão dos custos com falhas em garantia de máquinas agrícolas, baseado nos dados de confiabilidade destas máquinas. O trabalho foi realizado com dados reais de quatro diferentes modelos de tratores agrícolas produzidos pela empresa AGCO do Brasil. A metodologia descrita em dez passos foi proposta pelo autor desta dissertação, adaptando a modelagem da Matriz Diagonal apresentado por Pallerosi (2007). De posse dos dados de custos das falhas foi possível verificar qual o impacto financeiro que a aplicação dos conceitos de engenharia da confiabilidade tem quando utilizados para se prever acontecimentos de falhas no período de garantia.

A utilização da metodologia proposta disponibiliza à empresa uma ferramenta mais robusta, apoiada em fundamentos estatísticos, para determinar com segurança o provisionamento dos recursos financeiros corretos para pagamento das falhas durante o período de garantia de seus produtos, e ao mesmo tempo, lhe dá maior certeza no momento do planejamento estratégico sobre quais recursos estarão disponíveis para investimentos, que são sempre necessários.

Quando a metodologia foi aplicada a dados reais da AGCO, se verificou que a utilização de um software dedicado a aplicação de conceitos de confiabilidade torna o procedimento bastante simples, mas não elimina a necessidade de que seja operado por alguém conhecedor dos conceitos nos quais a metodologia se baseia (O'CONNOR, 2002).

Observou-se, quando testando diferentes distribuições estatísticas aos dados de falha sob estudo, que as populações com maior número de dados se adaptaram melhor a distribuição multimodal, no caso a Weibull Mista de duas subpopulações. No caso dos sistemas com menor incidência de falhas, as distribuições utilizadas foram aquelas sugeridas pelo próprio software utilizado – Weibull++ 7. Estes sistemas com menor número de falhas são, de fato, menos complexos e menos sujeitos a falhas durante a aplicação das máquinas no campo.

As análises de previsão de quantidade de falhas para os tratores MF250 XE e MF265 apresentaram maior diferença quando comparadas aos dados reais, em alguns casos com erros

superando os 30%. De forma geral pode-se dizer que a quantidade de dados de falha é determinante para a acuracidade da previsão. Estes modelos de tratores são os que possuem um menor volume de dados e, portanto tiveram resultados menos consistentes, especialmente quando analisados os subsistemas de menor impacto no todo, com ainda menor número de dados.

Este impacto também foi observado nos modelos de tratores MF275 e MF283, que possuem maior número de dados de falha. Estes apresentaram resultados mais consistentes, próximos ao índice de erro de 10%, quando analisado o aspecto da previsão da quantidade de falhas. Mesmo assim os resultados obtidos para os subsistemas “Latária”, que tem baixo índice de falhas, se mostraram com divergências mais significativas.

Ainda analisando especificamente os resultados obtidos comparando as previsões com os resultados reais, pode-se concluir que a divisão dos subsistemas funcionais deve ser tal que todos eles tenham dados suficientes para que as análises não sejam prejudicadas, evitando os problemas verificados nos subsistemas “Acessórios” e “Latária”. Já a divergência nas estimativas para as falhas relacionadas ao sistema “Hidráulico” pode estar associada a algum tipo de evolução de projeto, ou de processos de fabricação, que melhoraram o desempenho dos componentes envolvidos neste subsistema, aumentando sua confiabilidade geral, tendo um comportamento futuro diferente de seu histórico, sendo o último aquele que serviu de modelo para as previsões.

Sob outro aspecto, observou-se que a maioria dos subsistemas teve uma previsão da quantidade de falhas superior ao de fato realizado. Um motivo seria uma evolução de projeto, ou processos de fabricação, que melhoram a confiabilidade das máquinas. Alterações deste tipo não são simples de serem previstas, no entanto, se as análises de confiabilidade forem realizadas sistematicamente ao longo do tempo, pode se tentar calcular um índice de evolução média dos produtos ano a ano, e considerar esta informação nas projeções de garantia.

De forma geral, viu-se que os modelos estatísticos adotados, sejam eles considerando apenas uma distribuição estatística para a população de dados, ou multimodais, apresentaram divergências, de maior ou menor intensidade, em alguma parte do período de garantia, como pode ser verificado nos gráficos do apêndice A. Estas divergências resultaram nos erros observados e discutidos anteriormente. A problemática de riscos concorrentes em análise de dados de garantia não foi abordada no referencial teórico deste trabalho, mas pode explicar esses resultados. Nesta abordagem considera-se que existem mais de um comportamento de falhas atuando ao mesmo tempo no produto analisado, e, portanto o equacionamento matemático para análise estatística se torna mais complexo. Santos et al. (2008) tratam desta

dificuldade em análise de dados de garantia e propõe um modelo de confiabilidade para riscos concorrentes em dados de garantia oriundos de duas fases do ciclo de vida de um equipamento: a fase de vida operacional e a fase de envelhecimento.

Viu-se também que a aplicação da metodologia permite que se acompanhe o desempenho de confiabilidade dos produtos no campo mês a mês, comparando as falhas reais com as previsões de falhas, dando à área de Serviço da empresa poder de reação frente a um problema não esperado, em um curto espaço de tempo.

Por fim, conclui-se também que a estimativa dos custos médios é essencial para o sucesso das previsões financeiras, e deve ser elaborada também utilizando-se um método consistente. Nos dados obtidos durante o estudo verificou-se claramente que os erros associados às previsões de custos foram significativamente superiores aos erros na previsão de quantidade de falhas. Pode-se especular que a utilização de apenas um período passado para se determinar os custos médios das falhas não seja uma decisão acertada. Desta forma se naquele período específico os custos de falhas foram divergentes de uma média histórica esse erro estará necessariamente associado às previsões do período futuro. Ainda nesta linha de pensamento, é necessário verificar se o método de composição do índice de reajuste financeiro da empresa para o período futuro condiz com o de fato realizado. Obviamente que variações macroeconômicas bruscas são difíceis de serem consideradas, apesar de afetarem diretamente este tipo de previsão.

5.2. Trabalhos futuros

A partir das limitações citadas no capítulo inicial podem ser estabelecidas sugestões para novos trabalhos. A primeira e mais direta é a aplicação e validação da metodologia proposta no processo normal de definição da provisão de garantia da empresa durante o planejamento de um ano futuro. Verificando qual é o ganho na dinâmica de trabalho entre as diversas áreas envolvidas e os resultados quantitativos provenientes dos diversos modelos de tratores agrícolas, mas também de outras linhas de produtos como colheitadeiras e plantadeiras, ou mesmo de tratores de maior potência, com características de aplicação diferenciadas. A aplicação da metodologia deveria abordar ainda a existência de riscos concorrentes nos dados utilizados, adaptando o modelo de Santos et al. (2008) aos dados de garantia da empresa.

Uma segunda sugestão é a utilização destes mesmos dados históricos em técnicas que se destinem a aumentar a confiabilidade dos produtos, gerando menos falhas e

conseqüentemente menos custos de garantia para a empresa. Shaedler (2003) detalha um processo de desenvolvimento de produto, em uma empresa de máquinas agrícolas, utilizando técnicas de aumento da confiabilidade do projeto que podem ser adaptadas para este fim.

A última sugestão é a realização de uma pesquisa mercadológica que avalie o impacto do tempo e condições de garantia oferecidas na satisfação dos clientes da empresa e em sua capacidade de reter estes mesmos e conquistar outros. De posse dos modelos de confiabilidade gerados é possível estimar os custos associados a diferentes períodos de garantia para os produtos, sejam menores ou maiores do que o período de 12 meses atual. Estes dados cruzados com informações de mercado podem determinar se há vantagem financeira com a possível alteração do período de garantia contratual oferecida.

REFERENCIAS

- AGCO. **AGCO Corporation Your Agriculture Company: 2008 Annual Report**. 2009. Disponível em: http://www.agcocorp.com/company/annual_reports.aspx. Acesso em: Julho, 2009.
- ALDRIDGE, D.S. Analysis of automotive warranty data in the mileage domain. **Reliability Edge**, V.7, n.2, 2005.
- ANFAVEA. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores: **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**, edição 2008. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/anuario.html>. Acesso em: Julho, 2008.
- COGO, C. **Etanol – Aumento de consumo nos EUA elevará exportação no Brasil**. Disponível em: <http://www.carloscogo.com.br>. Acesso em: Janeiro, 2008.
- COIT, D.W.; DEY, K.A. Analysis of grouped data from field-failure reporting systems. **Reliability Engineering and System Safety**, n.65, p. 95-101, 1999.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento: **Séries históricas das safras**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/index.php?PAG=131>. Acesso em: Julho, 2008.
- DILLENBURG, M.R. **Estimativas de confiabilidade de produto a partir das contagens mensais de vendas e falhas ao longo do período de garantia**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS. Porto Alegre, 2005.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária: **Assessoria de Gestão Estratégica – Sistema de Gestão Territorial da Agricultura**. Disponível em: http://www.cnpm.embrapa.br/_website/sgeab/. Acesso em: Julho, 2008.
- EVERITT, Brian. **The Cambridge Dictionary of Statistics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- FALCETTA, Eduardo F. **Análise de confiabilidade de produtos baseada em dados de utilização da garantia**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS. Porto Alegre, 2000.
- GONÇALVES, J.B. **Mercosul é a última fronteira agrícola do mundo**. Disponível em: <http://www.carloscogo.com.br>. Acesso em: Janeiro, 2008.
- GUTIERREZ-PULIDO, H.; AGUIRRE-TORRES, V.; CHRISTEN, J.A. A bayesian approach for the determination of warranty length. **Journal of Quality Technology**, V.38, n.2, p. 180-189, 2006.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>.

Acesso em: Julho, 2008.

KARIM, R.; SUZUKI, K. Analysis of warranty claim data: a literature review. **International Journal of Quality & Reliability Management**, V.22, n.7, p. 667-686, 2005.

KECECIOGLU, D. Reliability engineering handbook. New Jersey: Prentice Hall, V.1, 1991.

KIM, C.S.; DJAMALUDIN, I.; MURTHY, D.N.P. Warranty and discrete preventive maintenance. **Reliability Engineering and System Safety**, n.84, p. 301-309, 2004.

LAWLESS, J.; HU, J.; CAO, J. Methods for the estimation of failure distributions and rates from automobile warranty data. **Lifetime Data Analysis**, n.1, p. 227-240, 1995.

LIMA, Gabriel A.C. **Modelagem de risco financeiro na escolha do período de garantia de produtos**. Belo Horizonte: 5º Simpósio Internacional de Confiabilidade, 2007.

LOOMBA, Arvinder P.S. Evolution of product warranty: a chronological study. **Journal of Management History**, V.4, n.2, p. 124-136, 1998.

MANNA, D.K.; PAL, S.; KULANDAIYAN, A. Warranty cost estimation of a multi-module product. **International Journal of Quality & Reliability Management**, V.21, n.1, p. 102-117, 2004.

MASSEY FERGUSON. **Especificações técnicas de produtos**. Disponível em: <http://www.massey.com.br>. Acesso em: Fevereiro, 2009.

MATTAR, F.N. **Pesquisa de Marketing: metodologia, planejamento**. 5.ed. São Paulo: Atlas, V.1, 1999.

MAUCH, J.E.; BIRCH, J.W. **Guide to the successful thesis and dissertation: a handbook for students and faculty**. 4.ed. New York: Marcel Dekker, 1998.

MEEKER, W.Q.; ESCOBAR, L.A. **Location-Scale-Based Parametric Distributions**. Class notes. Department of Statistics, Iowa State University, 2006. Disponível em: http://www.public.iastate.edu/%7Ewqmeeker/stat533stuff/psnups/chapter04_psnup.pdf.

Acesso em: Julho, 2009.

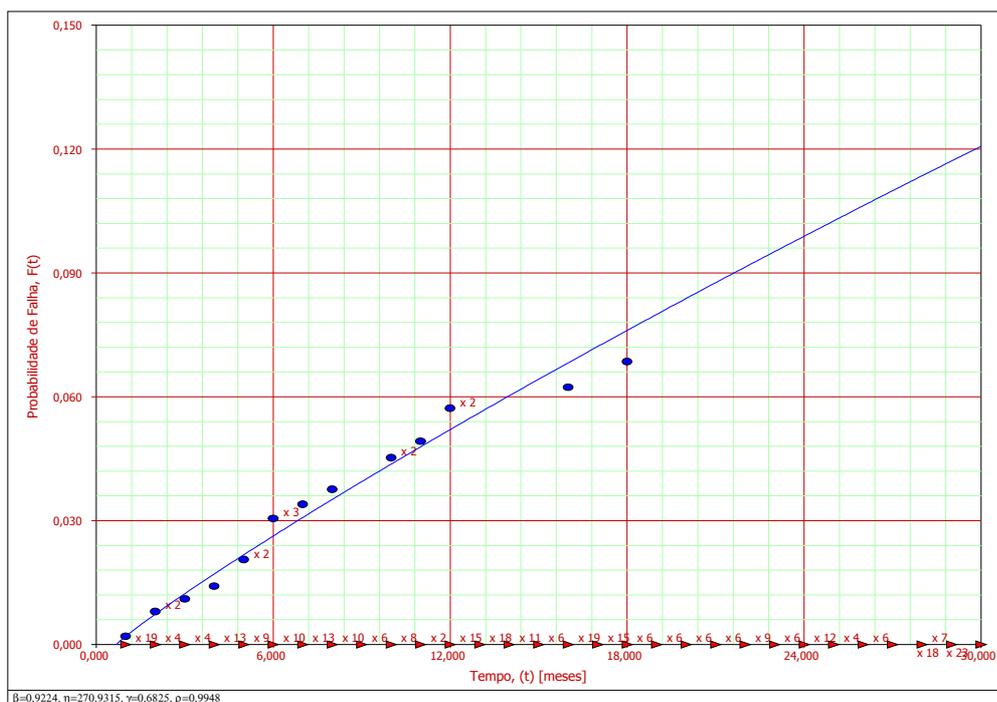
MURTHY, D.N.P. Product warranty and reliability. **Operations Research**, n.143, p. 133-146, 2006.

MURTHY, D.N.P.; BULMER, Michael; ECCLESTON, J.A. Weibull model selection for reliability modeling. **Reliability Engineering and System Safety**, n.86, p. 257-267, 2004.

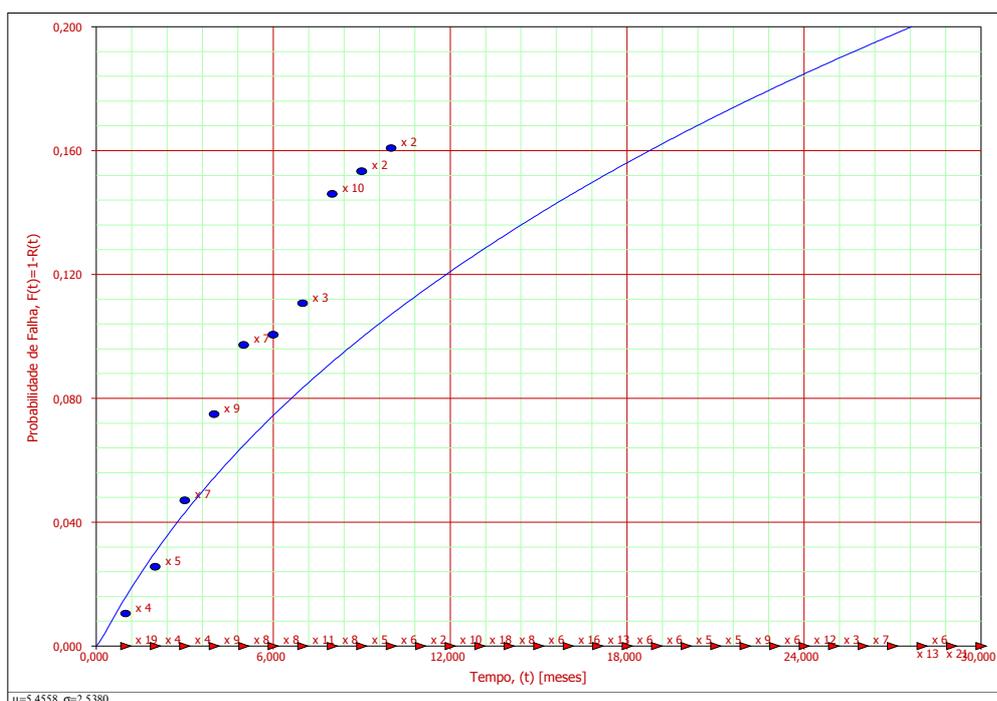
- MURTHY, D.N.P.; WILSON, R.J. Two-dimensional failure modeling. **Handbook of Engineering Statistics**, London: Springer, p. 97-111, 2006.
- NISKANEN, H. **The proud history of AGCO**. Finland: Gummerus Printing, 2008.
- O'CONNOR, P.D.T. **Practical reliability engineering**. England: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- PALLEROSI, C.A. **Confiabilidade – A quarta dimensão da qualidade. Conceitos básicos e métodos de cálculo**. 1.ed. São Paulo: Reliasoft Brasil, V.1, 2006.
- PALLEROSI, C.A. **Confiabilidade – A quarta dimensão da qualidade. Garantia em uso e após a venda**. 1.ed. São Paulo: Reliasoft Brasil, V.1, 2007.
- RELIASOFT. **Life data analysis reference**. Reliasoft Corporation, 2005.
- RELIASOFT. **Weibull++7 User's Guide**. Reliasoft Corporation, 2005.
- SANTOS, G. T.; FOGLIATTO, F.S.; RIBEIRO, J.L.D.; RAUSAND, M. Aplicação de um modelo de riscos concorrentes na análise de confiabilidade de dados de garantia. **Produto & Produção**, V.9, n.3, p. 55-65, 2008.
- SCHAEDLER, I.L. **Gerenciamento do crescimento da confiabilidade: um estudo aplicado no setor de máquinas agrícolas**. Dissertação de Mestrado Profissionalizante, Escola de Engenharia, UFRGS. Porto Alegre, 2003.
- TENG, S.G.; HO, S.M.; SHUMAR, D. Enhancing supply chain operations through effective classification of warranty returns. **International Journal of Quality & Reliability Management**, V.22, n.2, p. 137-148, 2005.
- VASSILIOU, Pantelis. **Reliability engineering: Management overview & vision**. Belo Horizonte: 5º Simpósio Internacional de Confiabilidade, 2007.
- VERGARA, S.C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 3.ed. São Paulo: Atlas, 2000.
- WERNER, Liane. **Modelagem dos tempos de falhas ao longo do calendário**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS. Porto Alegre, 1996.
- WILKINS, D.J. The bathtub curve and product failure behavior. Part one – The bathtub curve, infant mortality and burn-in. **Reliability HotWire**, n.21, 2002.
- YUN, W.Y. Expected value and variance of warranty cost of repairable product with two types of warranty. **International Journal of Quality & Reliability Management**, V.14, n.7, p. 661-668, 1997.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DE PROBABILIDADE CALCULADOS PARA OS DADOS DE FALHA ESTUDADOS

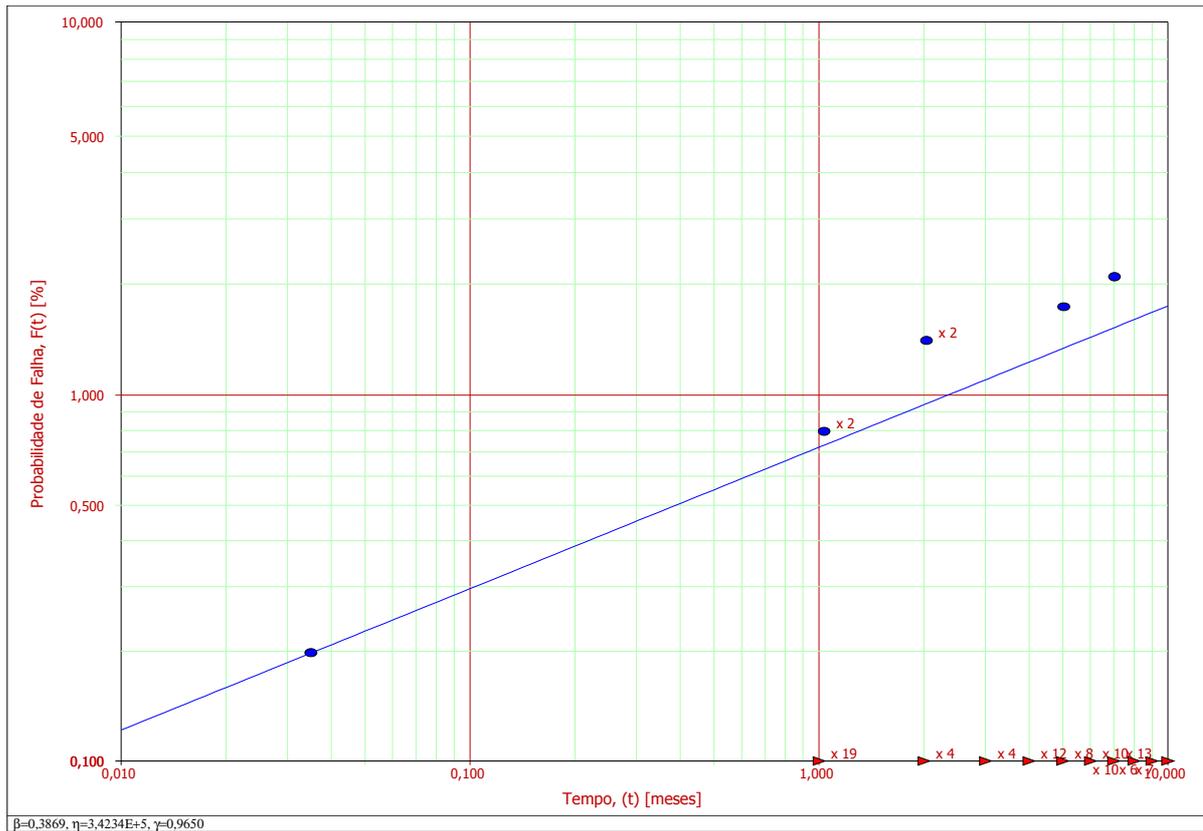
MF250 XE



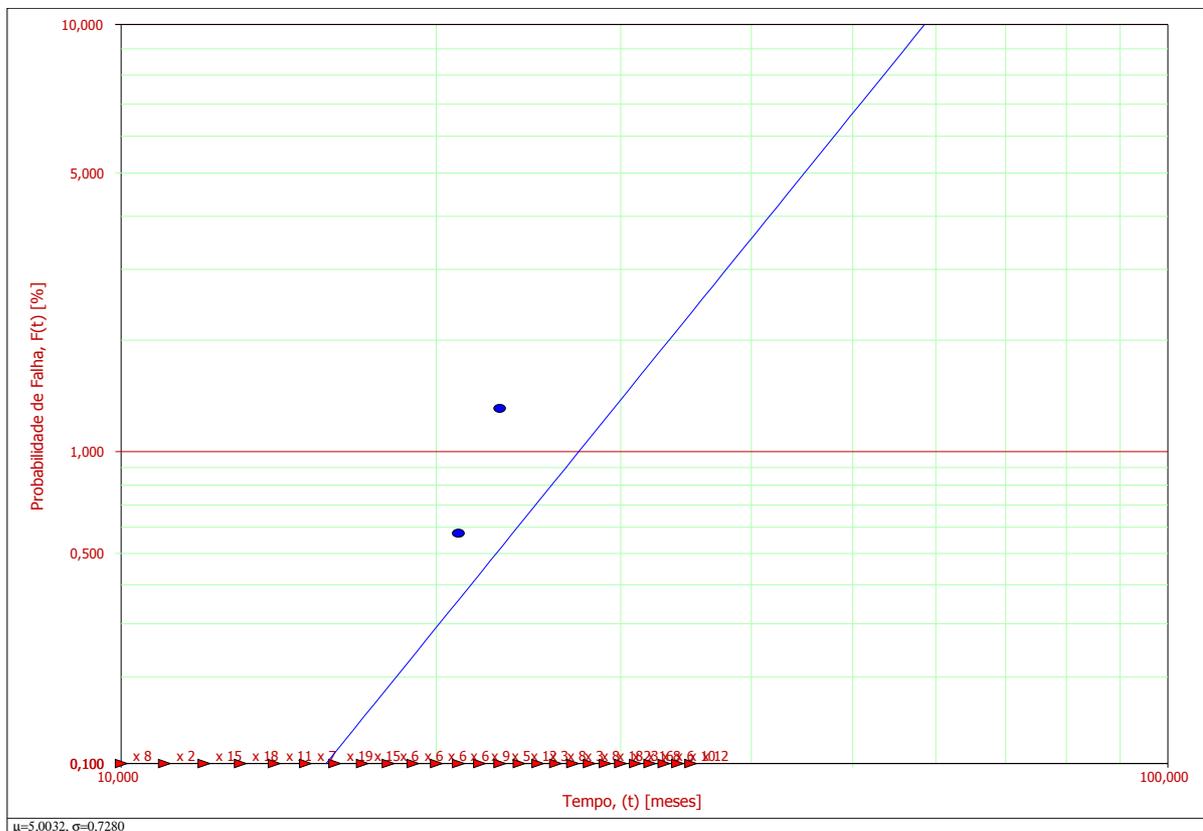
Subsistema Acessório – distribuição Weibull



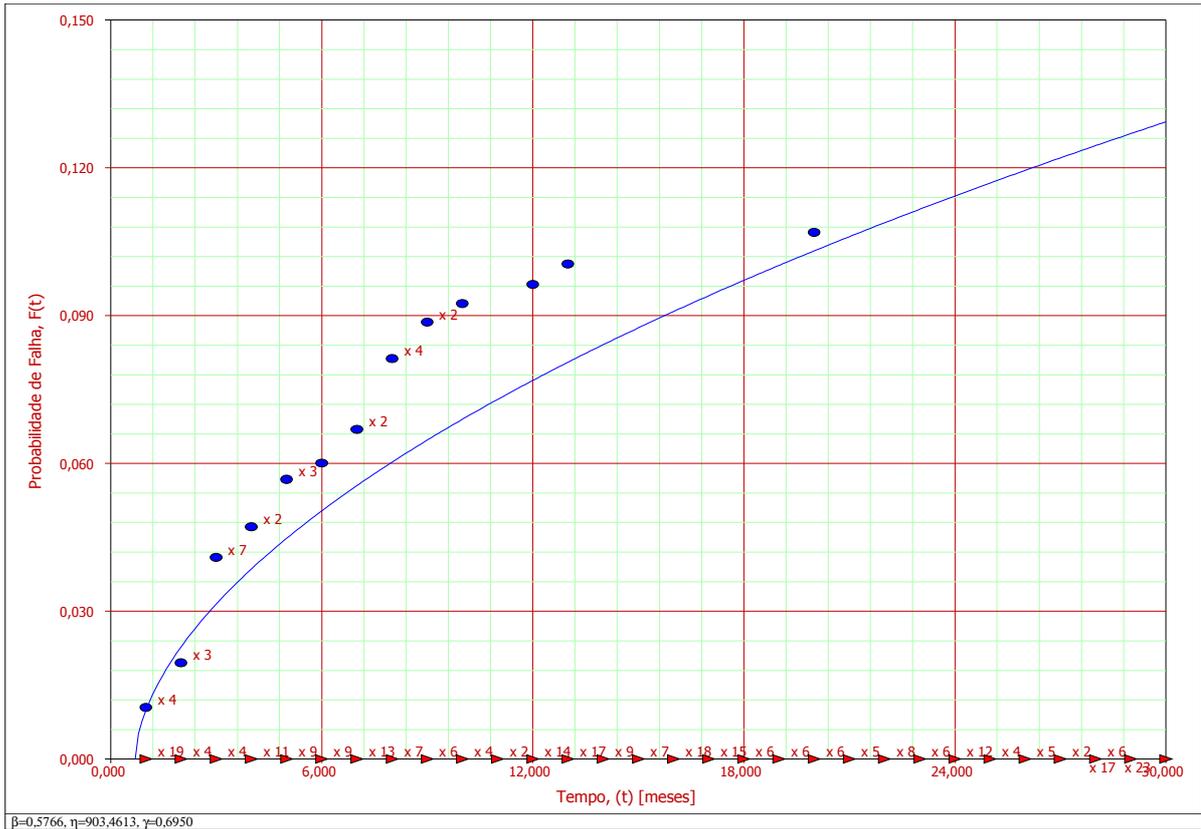
Subsistema Elétrico – distribuição Lognormal



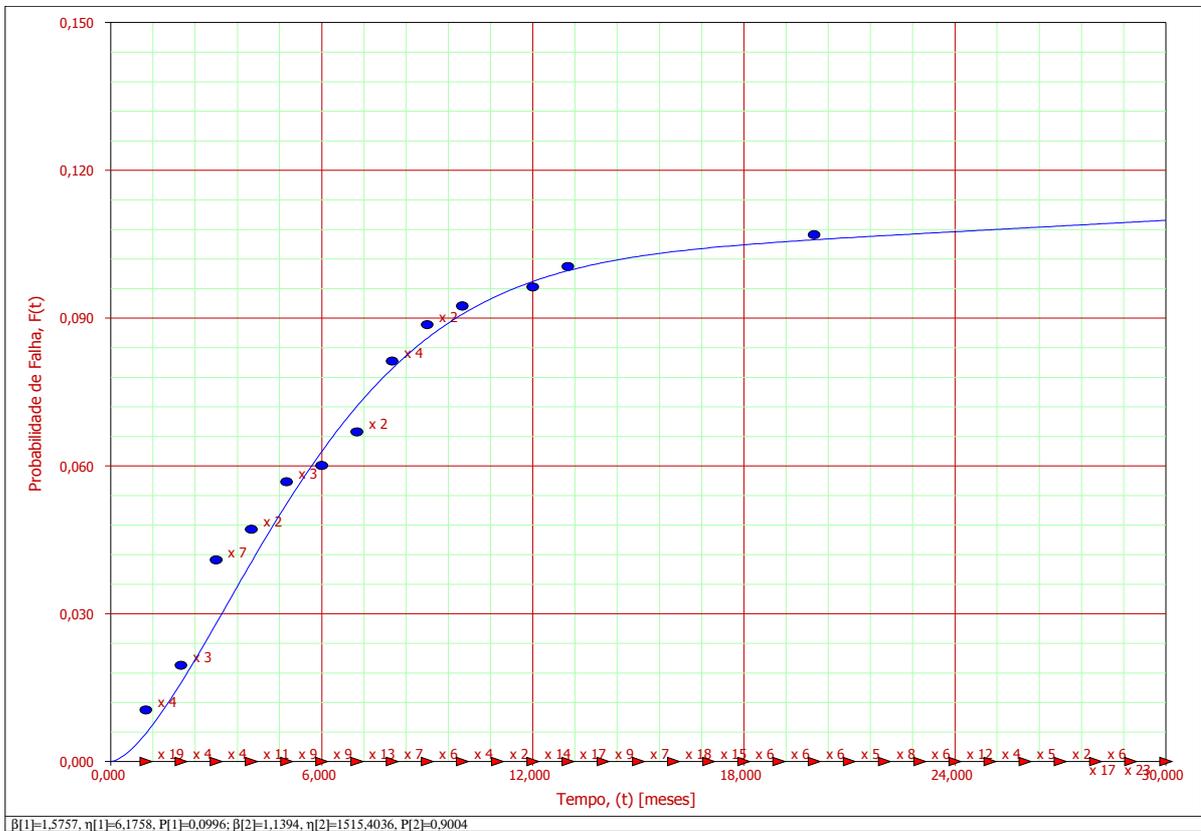
Subsistema Hidráulico – distribuição Weibull



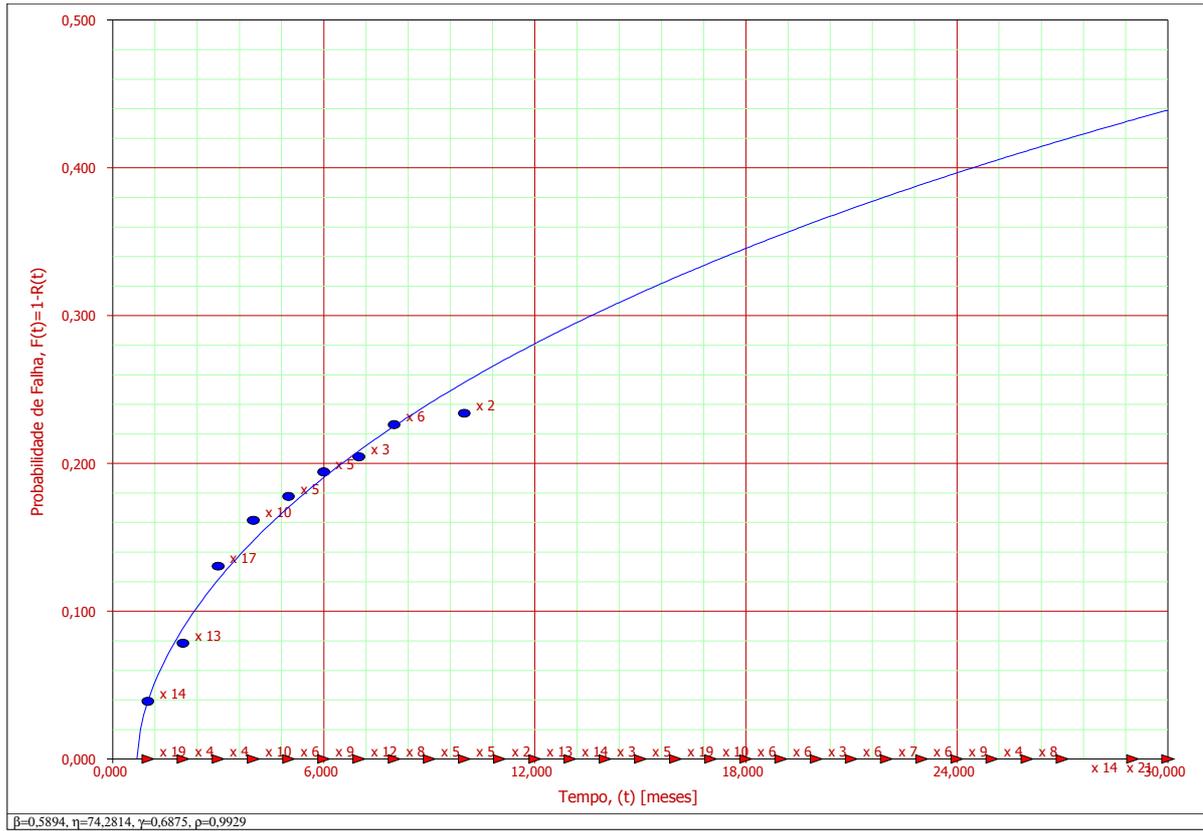
Subsistema Lateria – distribuição Lognormal



Subsistema Motor – distribuição Weibull (modelo indicado pelo software)



Subsistema Motor – distribuição Weibull Mista (modelo adotado)

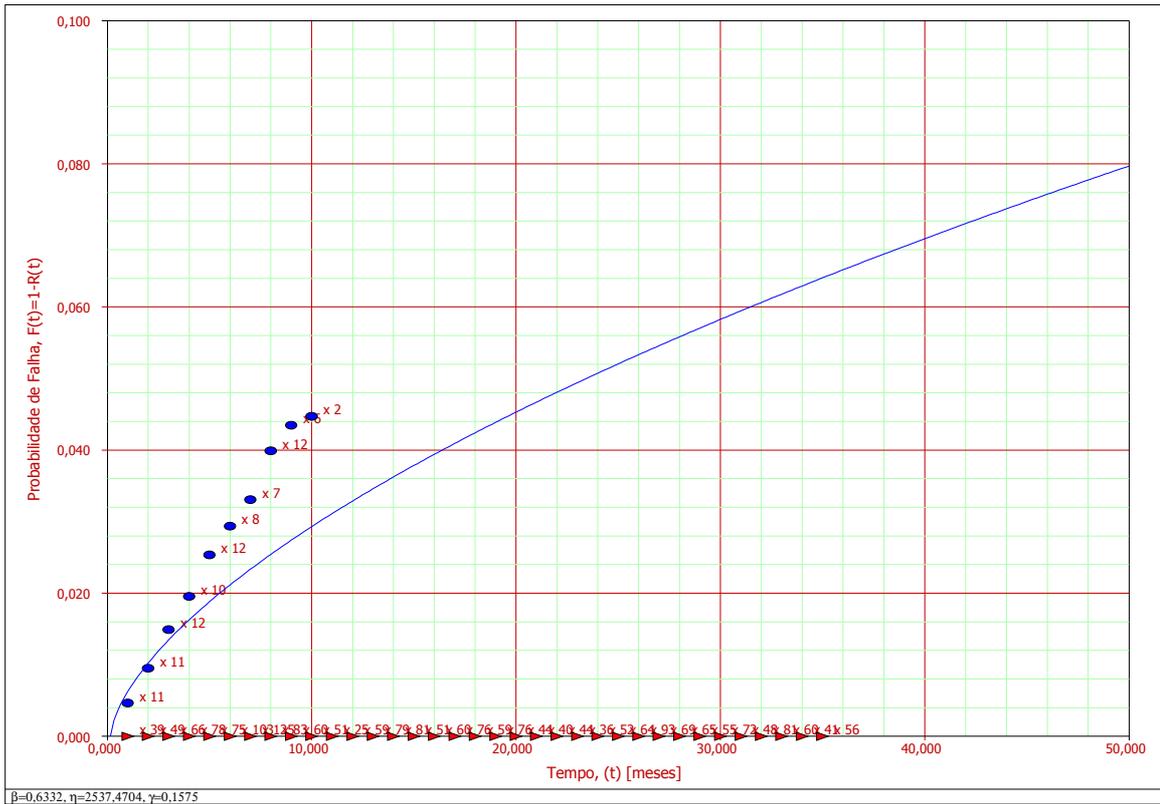


Subsistema Transmissão – distribuição Weibull (modelo indicado pelo software)

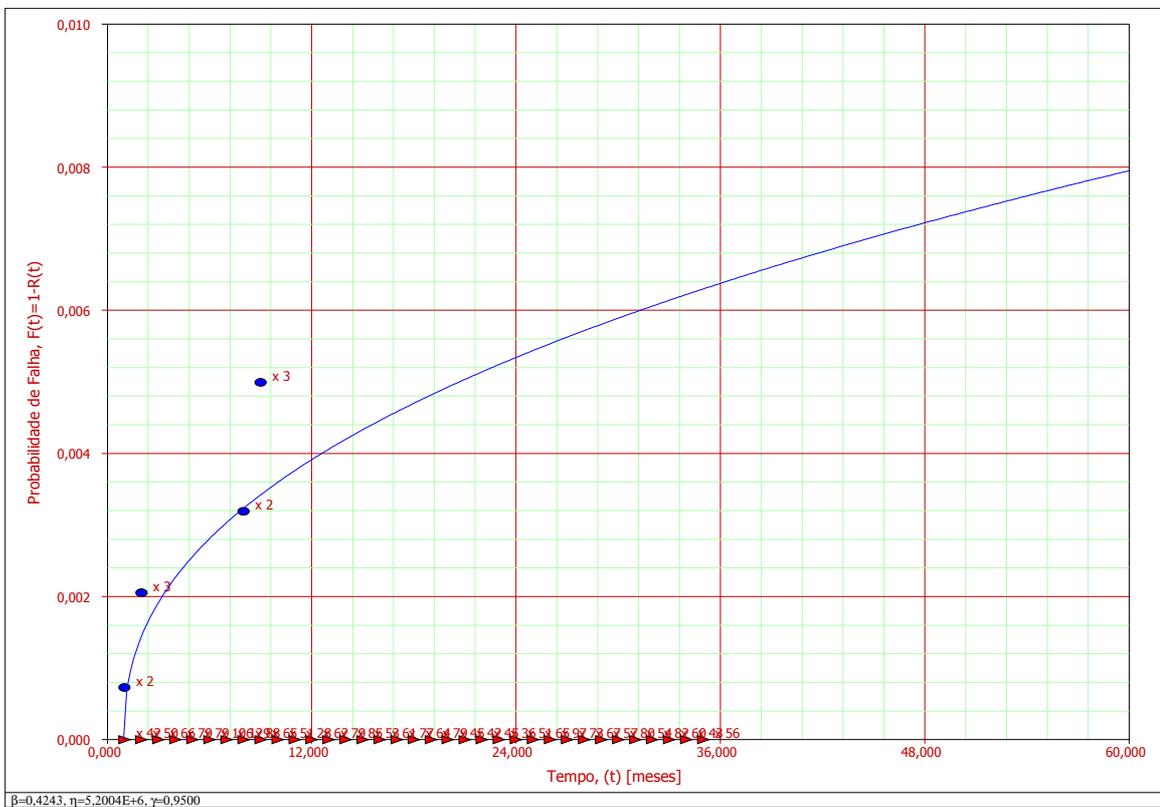


Subsistema Transmissão – distribuição Weibull Mista (modelo adotado)

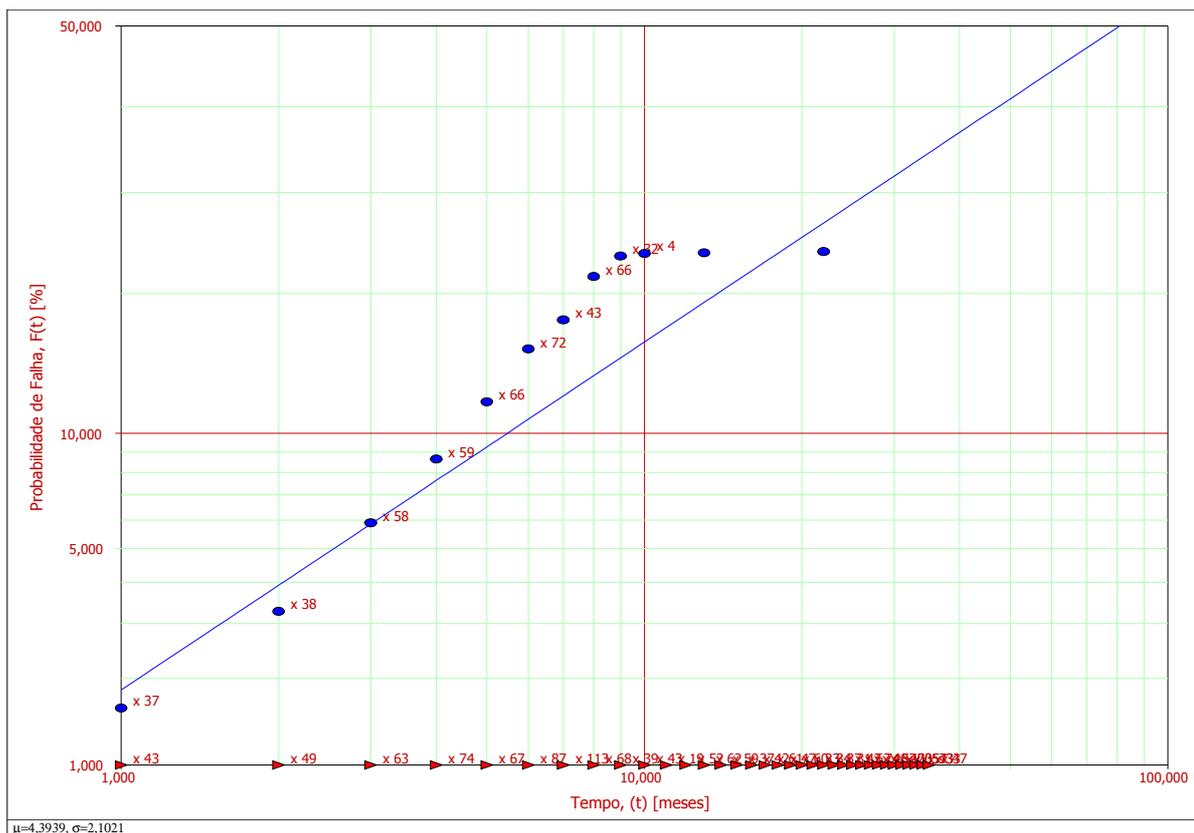
MF265



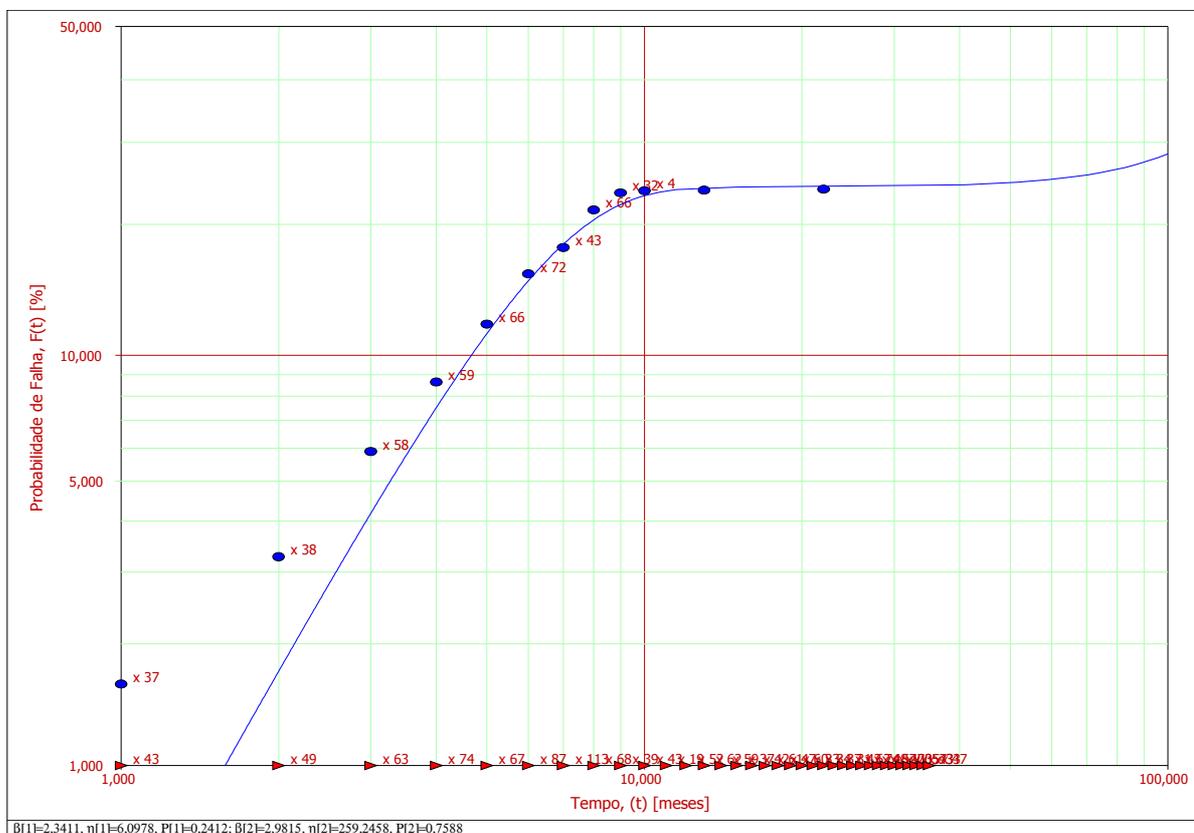
Subsistema Acessório – distribuição Weibull



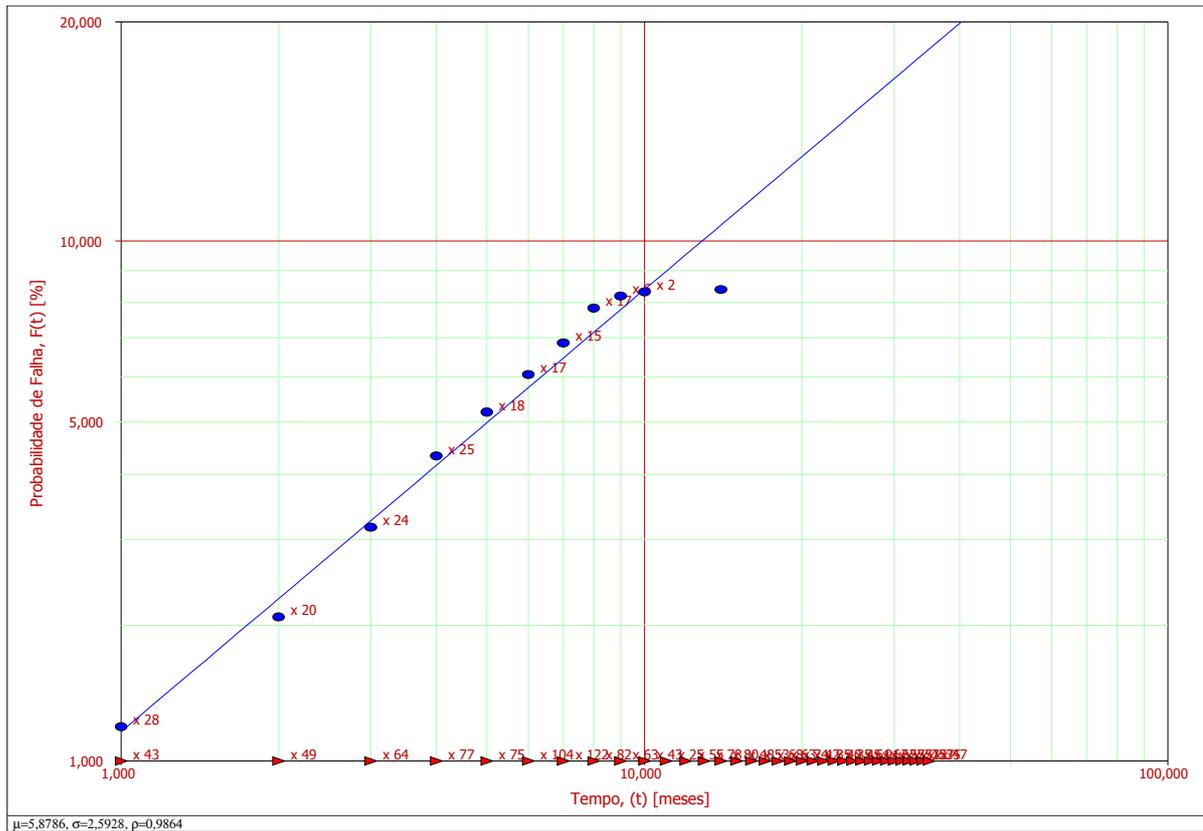
Subsistema Lataria – distribuição Weibull



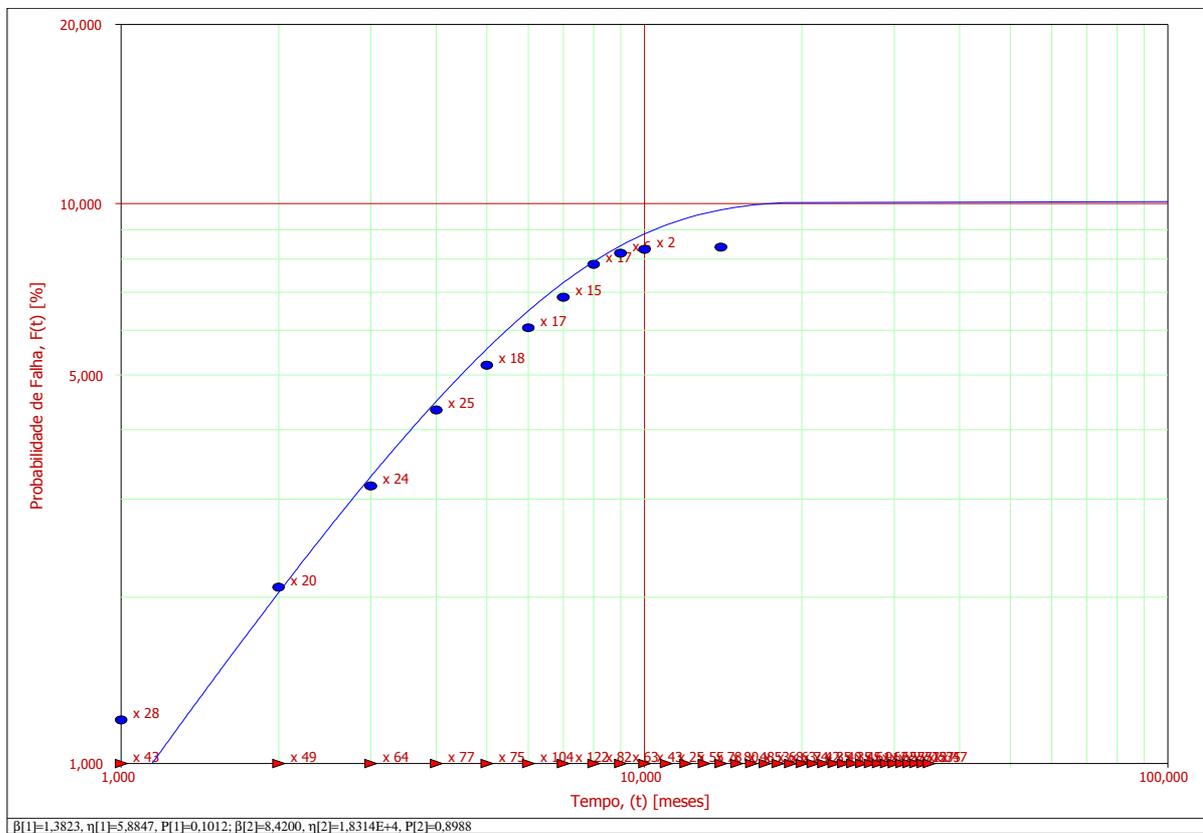
Subsistema Elétrico – distribuição Lognormal (modelo indicado pelo software)



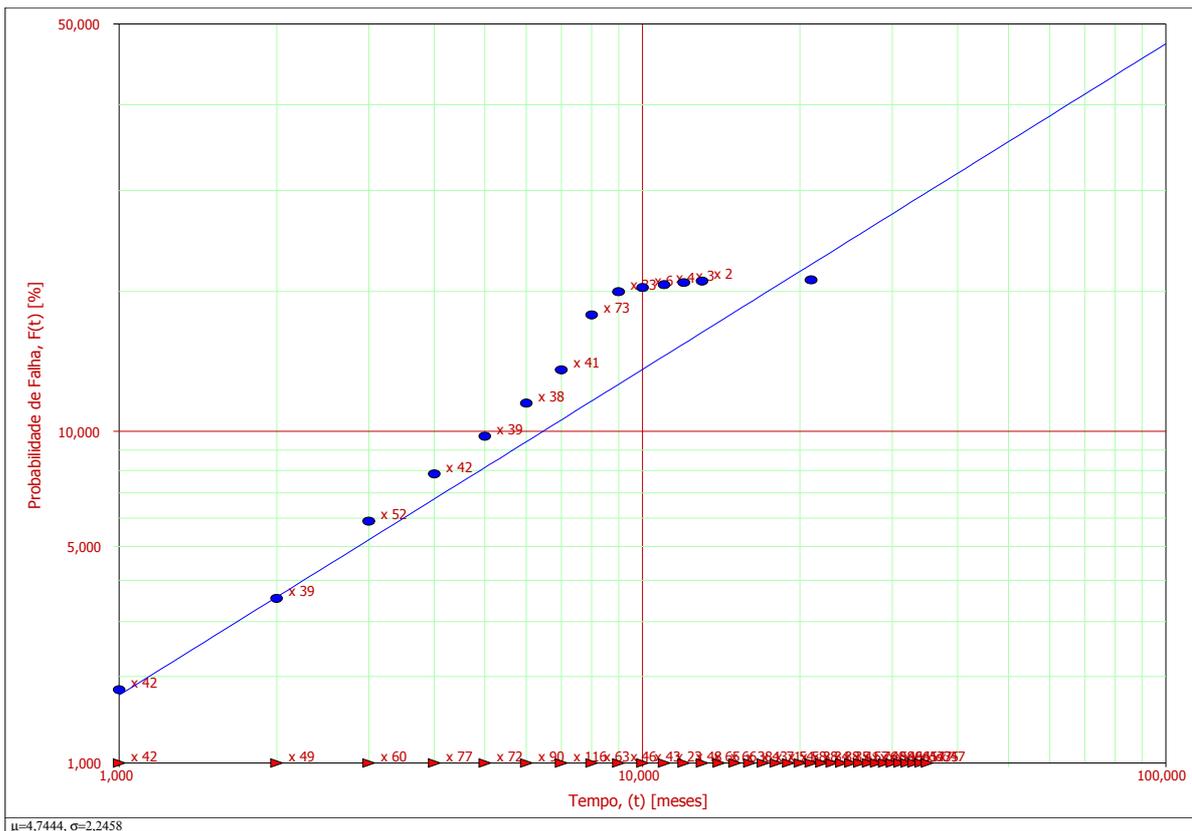
Subsistema Elétrico – distribuição Weibull Mista (modelo adotado)



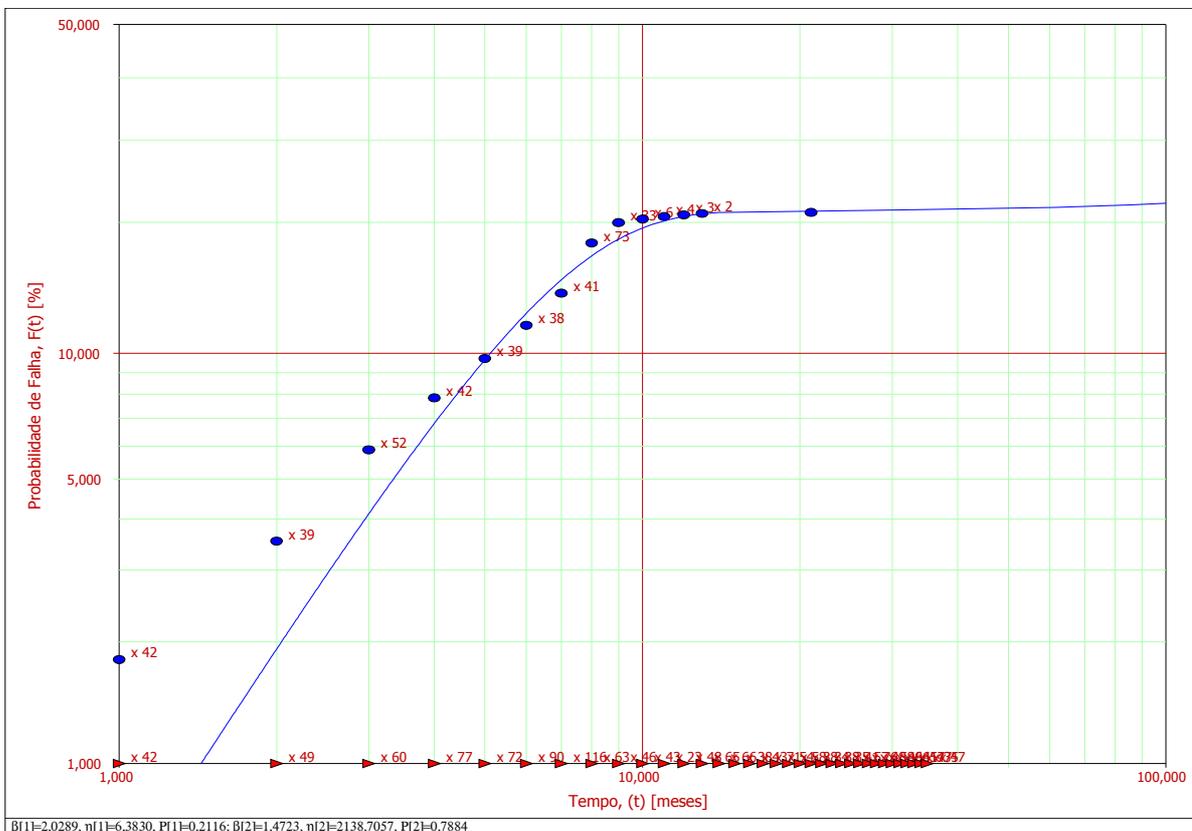
Subsistema Hidráulico – distribuição Lognormal (modelo indicado pelo software)



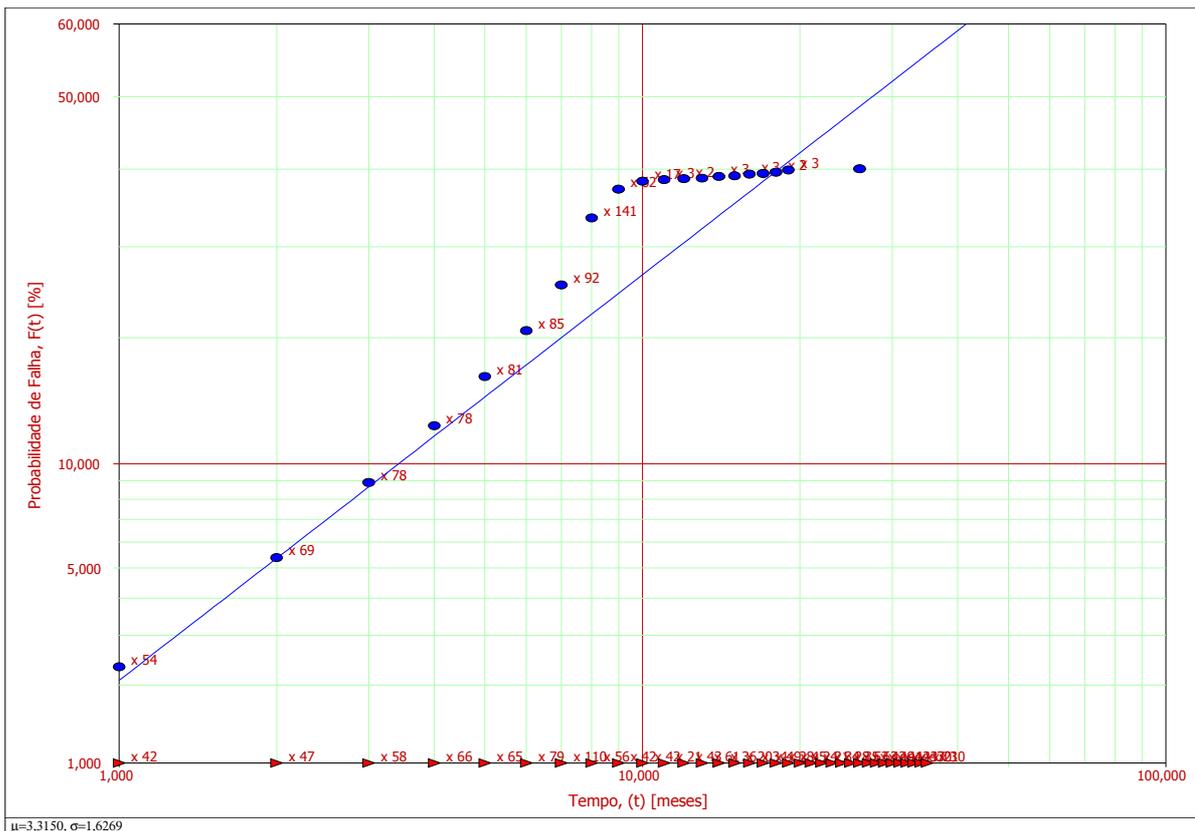
Subsistema Hidráulico – distribuição Weibull Mista (modelo adotado)



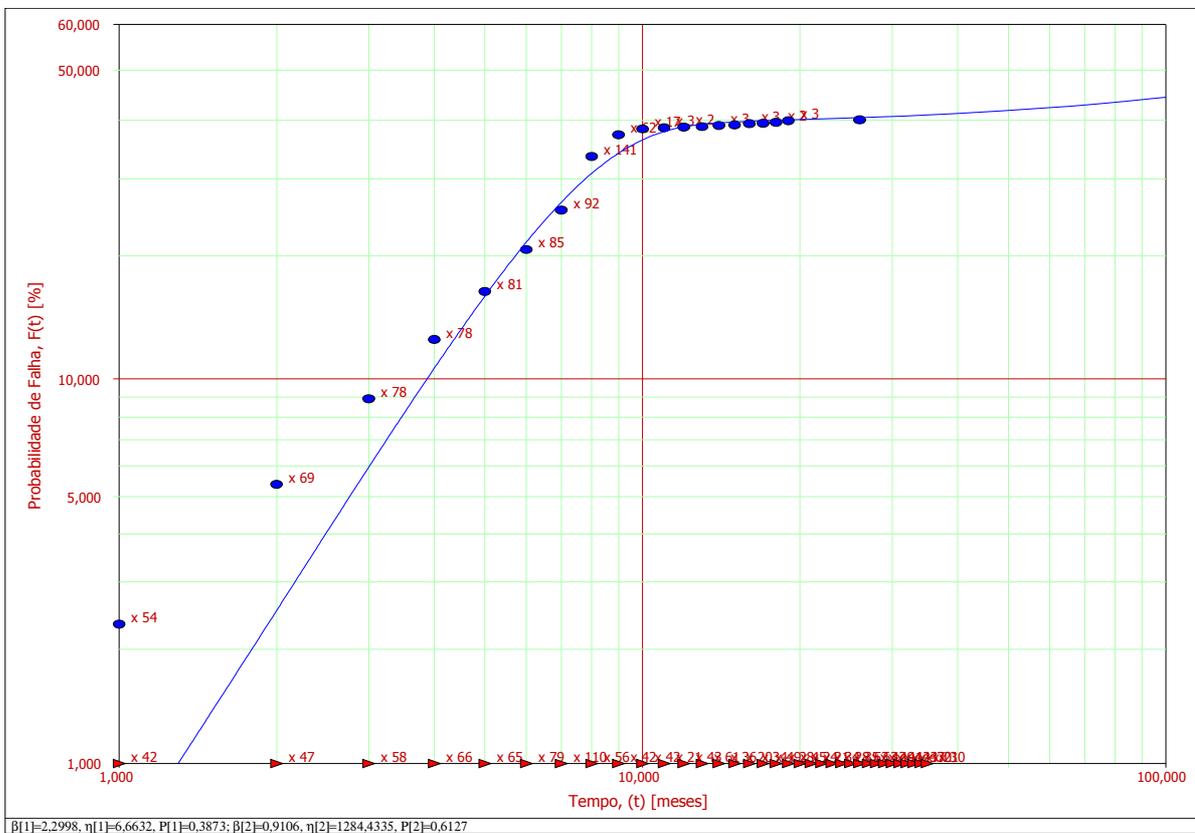
Subsistema Motor – distribuição Lognormal (modelo indicado pelo software)



Subsistema Motor – distribuição Weibull Mista (modelo adotado)

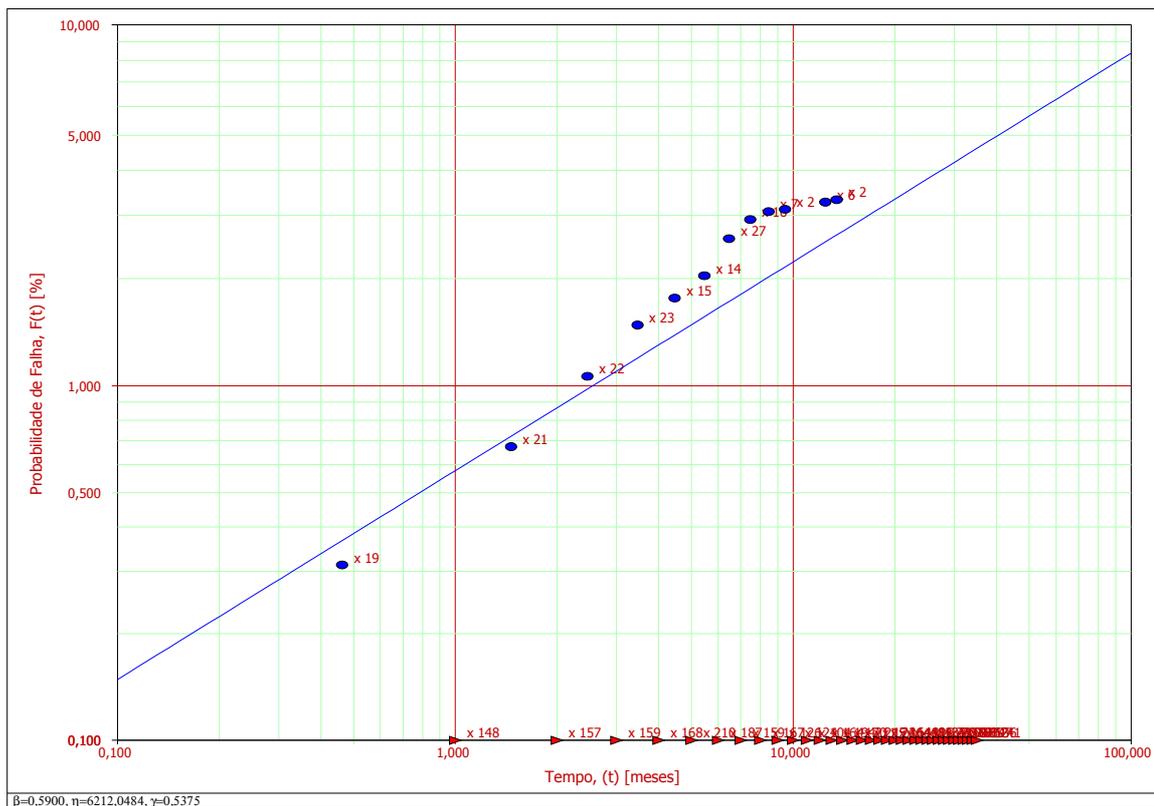


Subsistema Transmissão – distribuição Lognormal (modelo indicado pelo software)

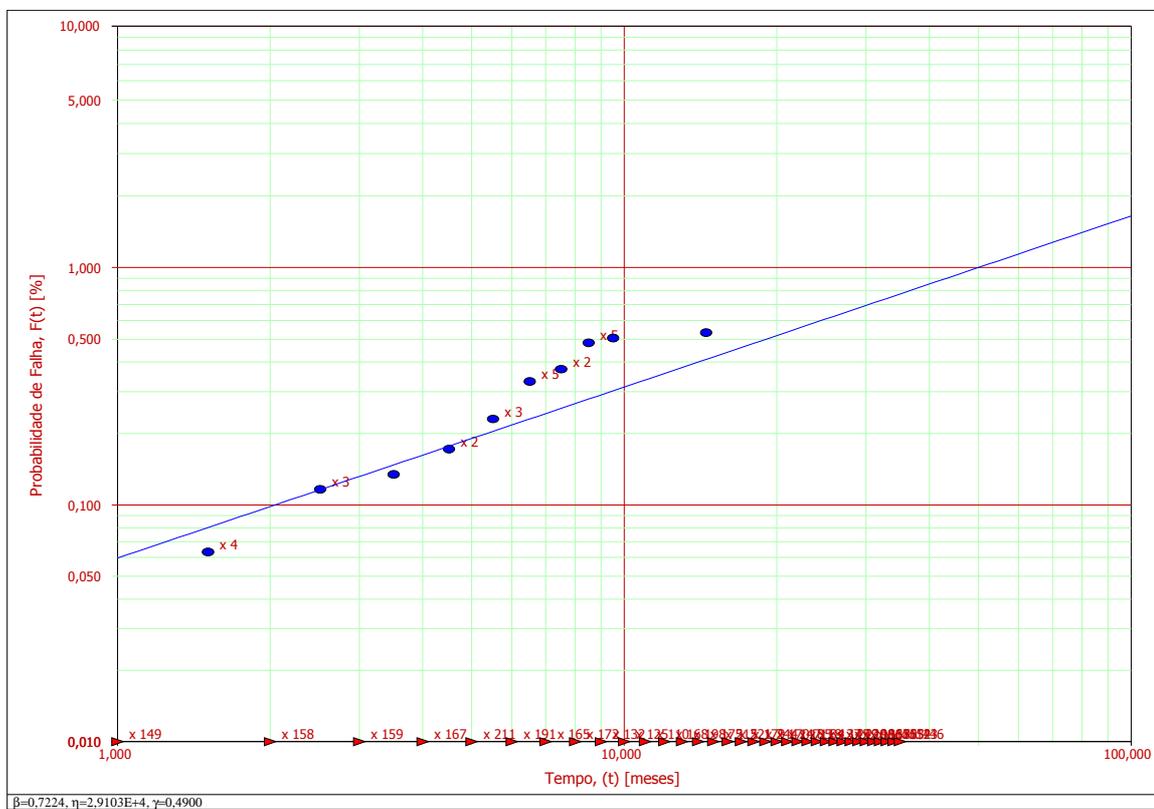


Subsistema Transmissão – distribuição Weibull Mista (modelo adotado)

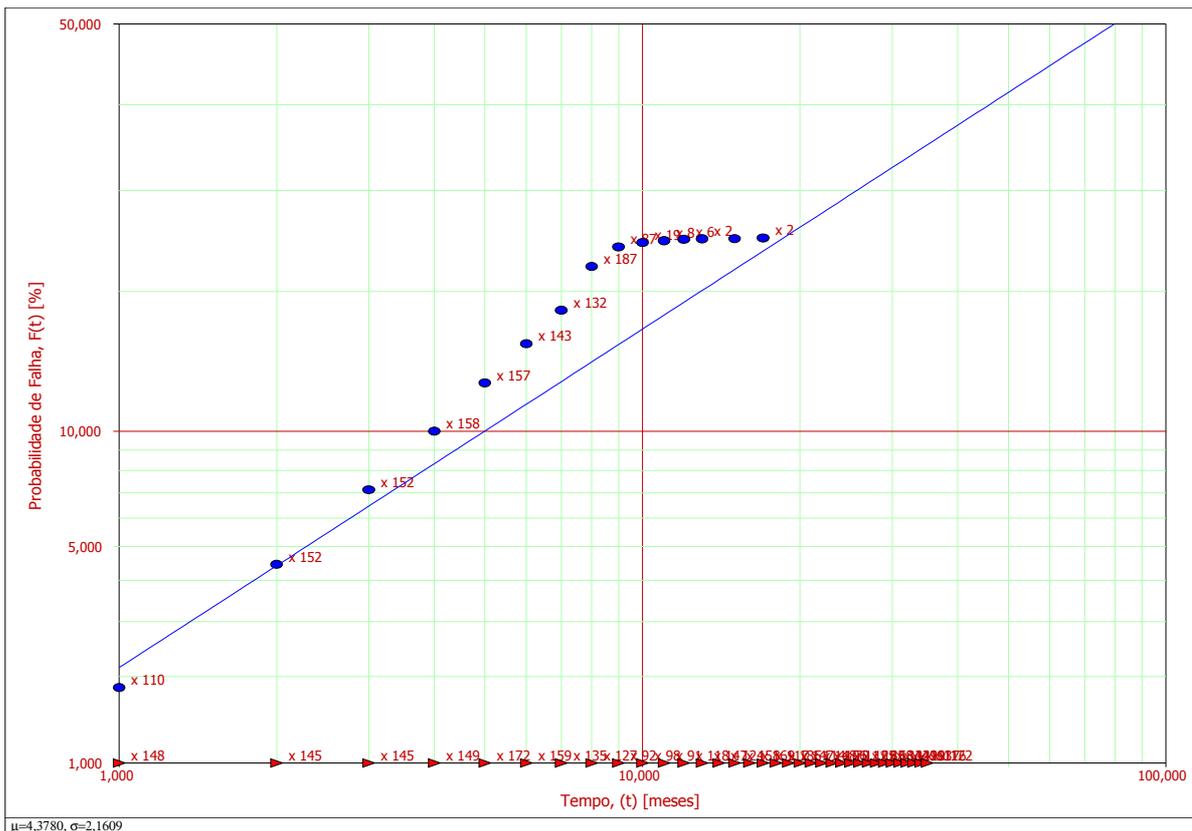
MF275



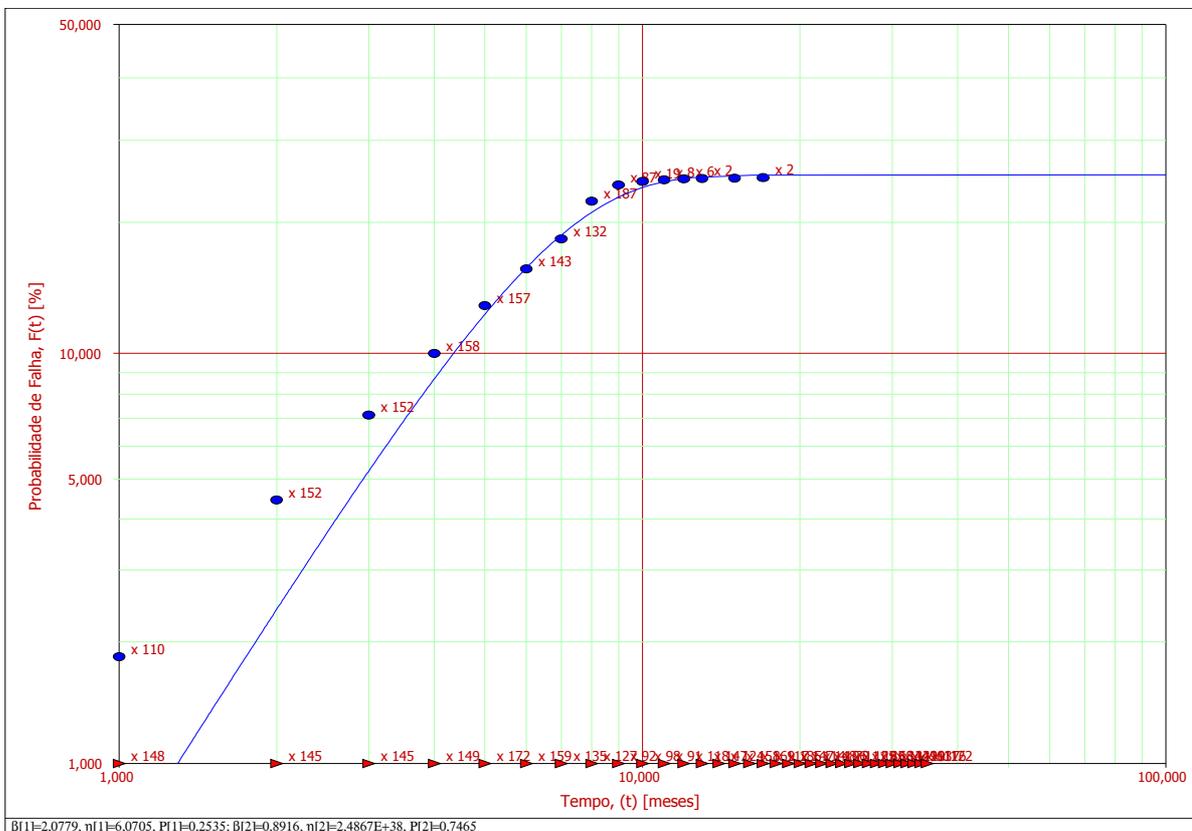
Subsistema Acessório – distribuição Weibull



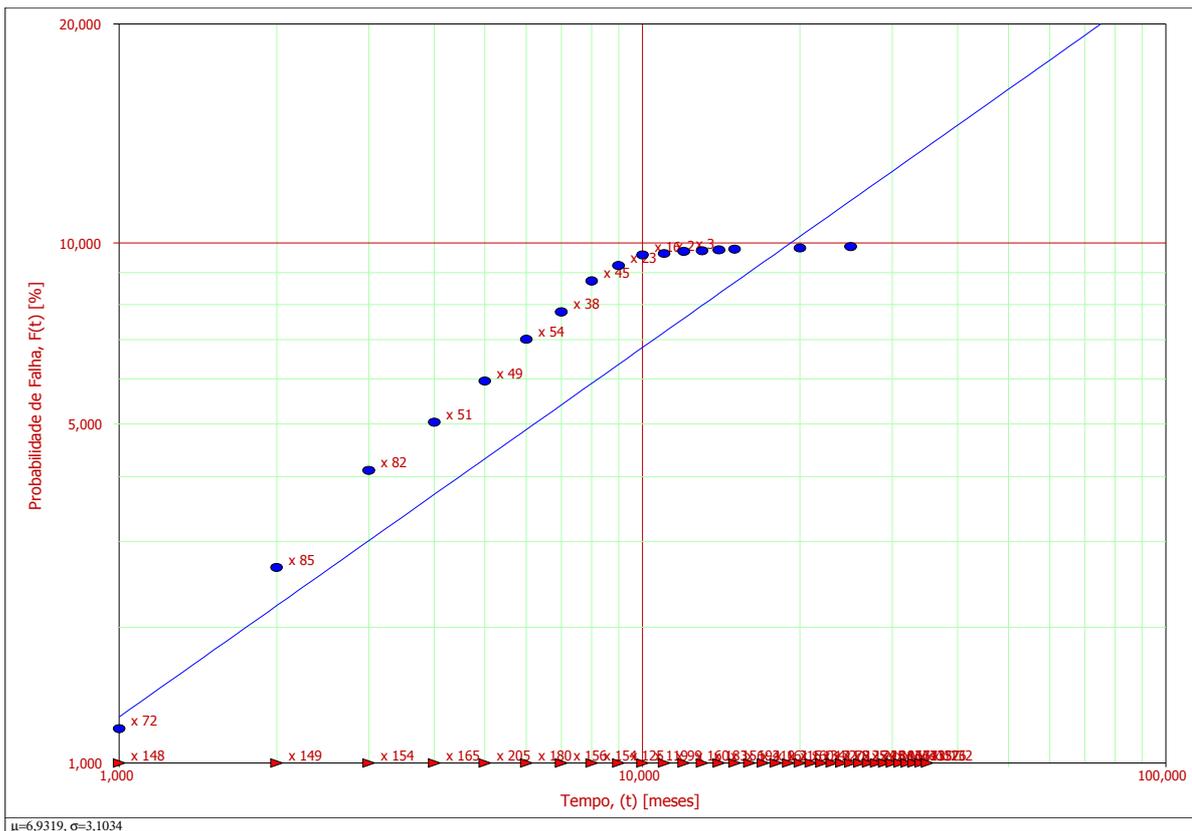
Subsistema Lateria – distribuição Weibull



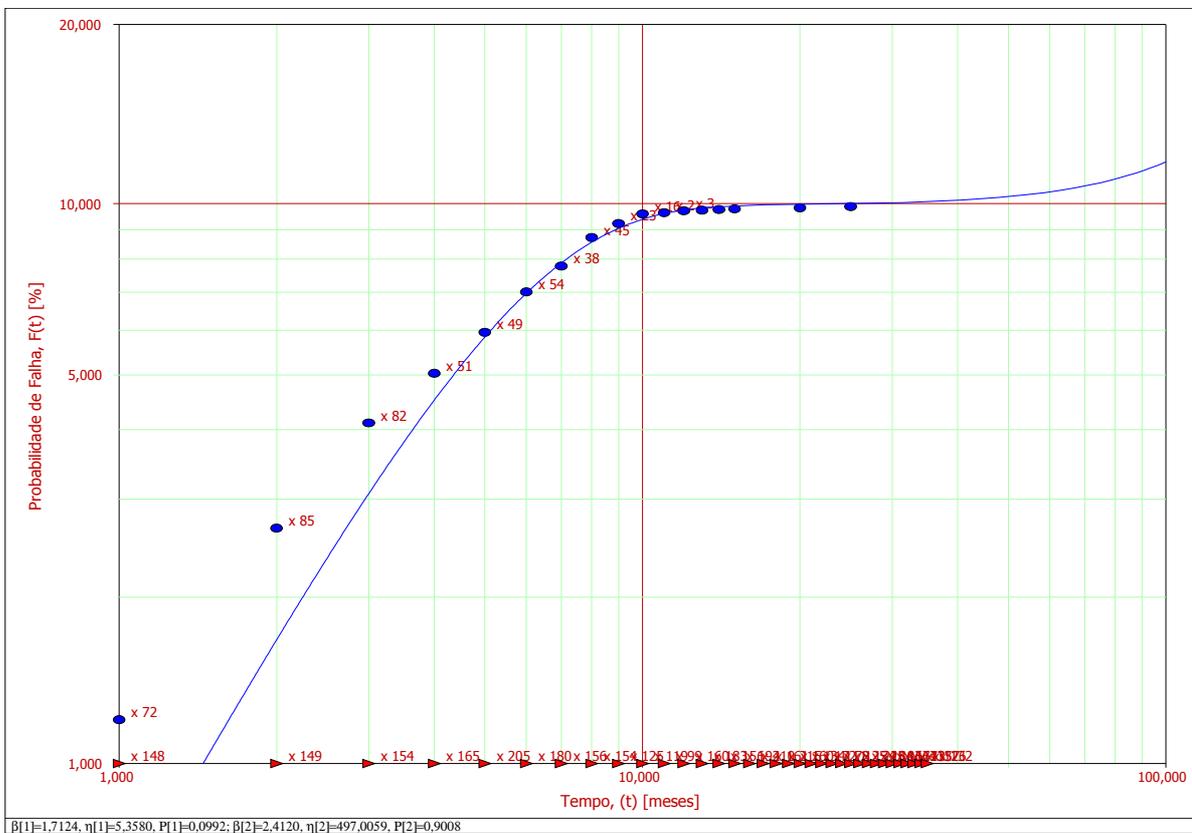
Subsistema Elétrico – distribuição Lognormal (modelo indicado pelo software)



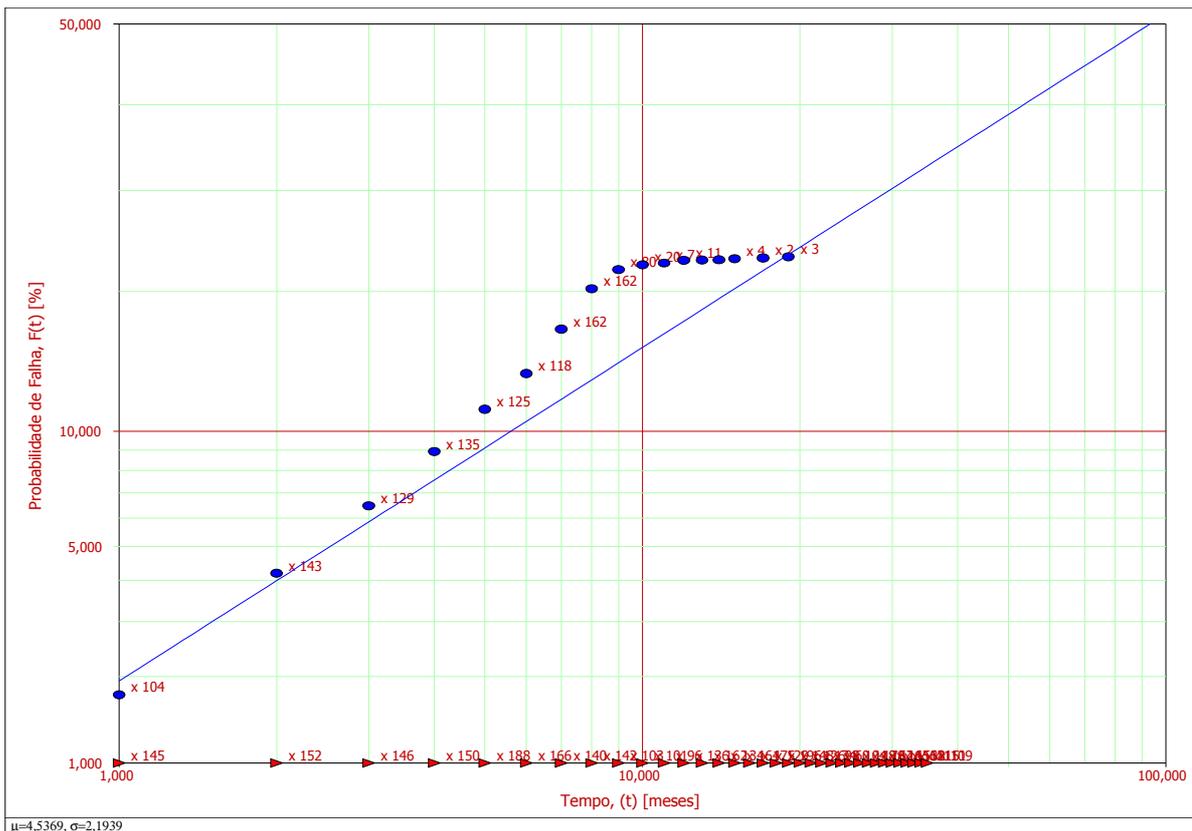
Subsistema Elétrico – distribuição Weibull Mista (modelo adotado)



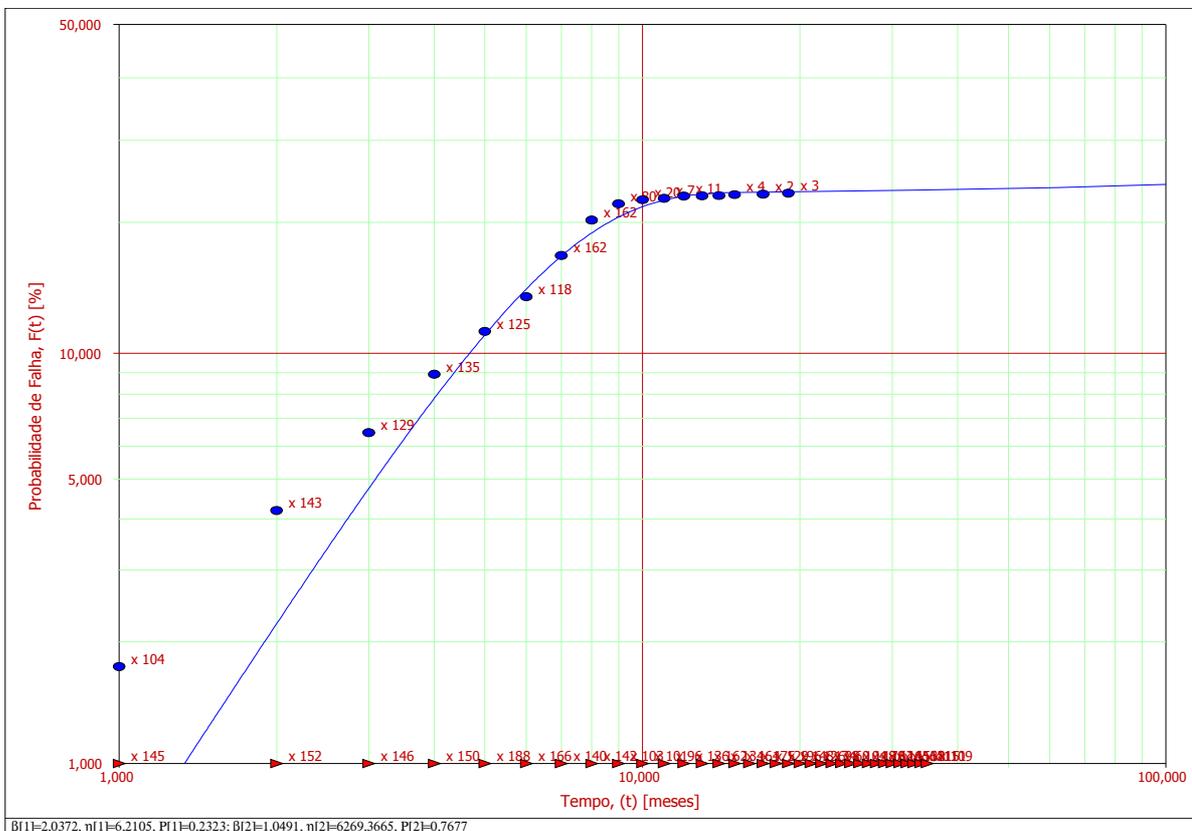
Subsistema Hidráulico – distribuição Lognormal (modelo indicado pelo software)



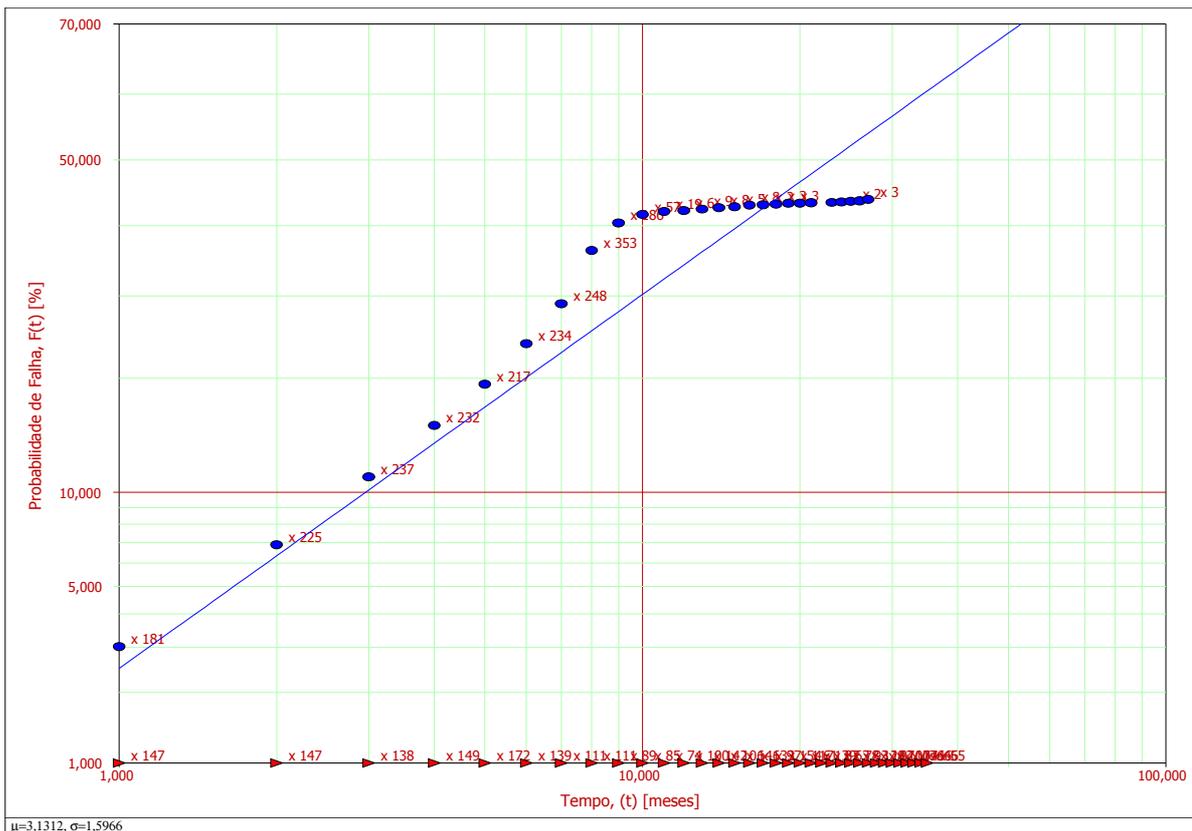
Subsistema Hidráulico – distribuição Weibull Mista (modelo adotado)



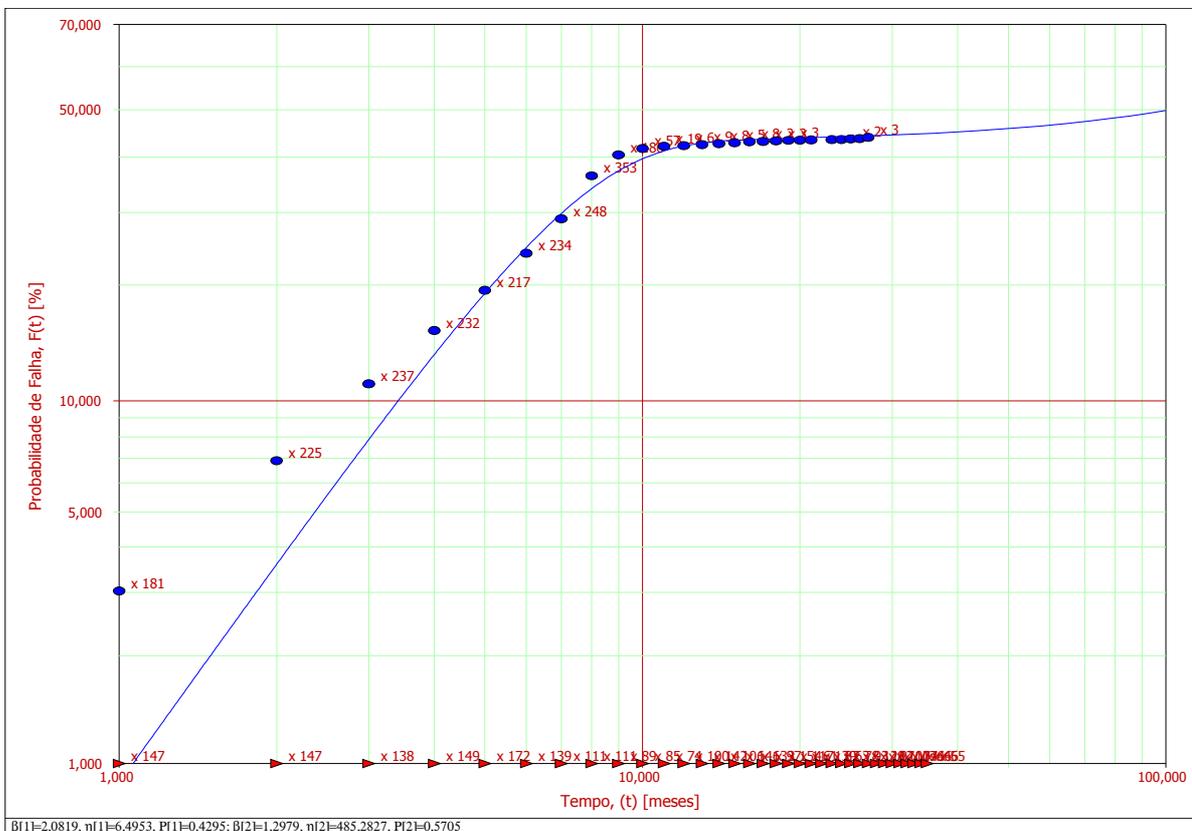
Subsistema Motor – distribuição Lognormal (modelo indicado pelo software)



Subsistema Motor – distribuição Lognormal (modelo adotado)

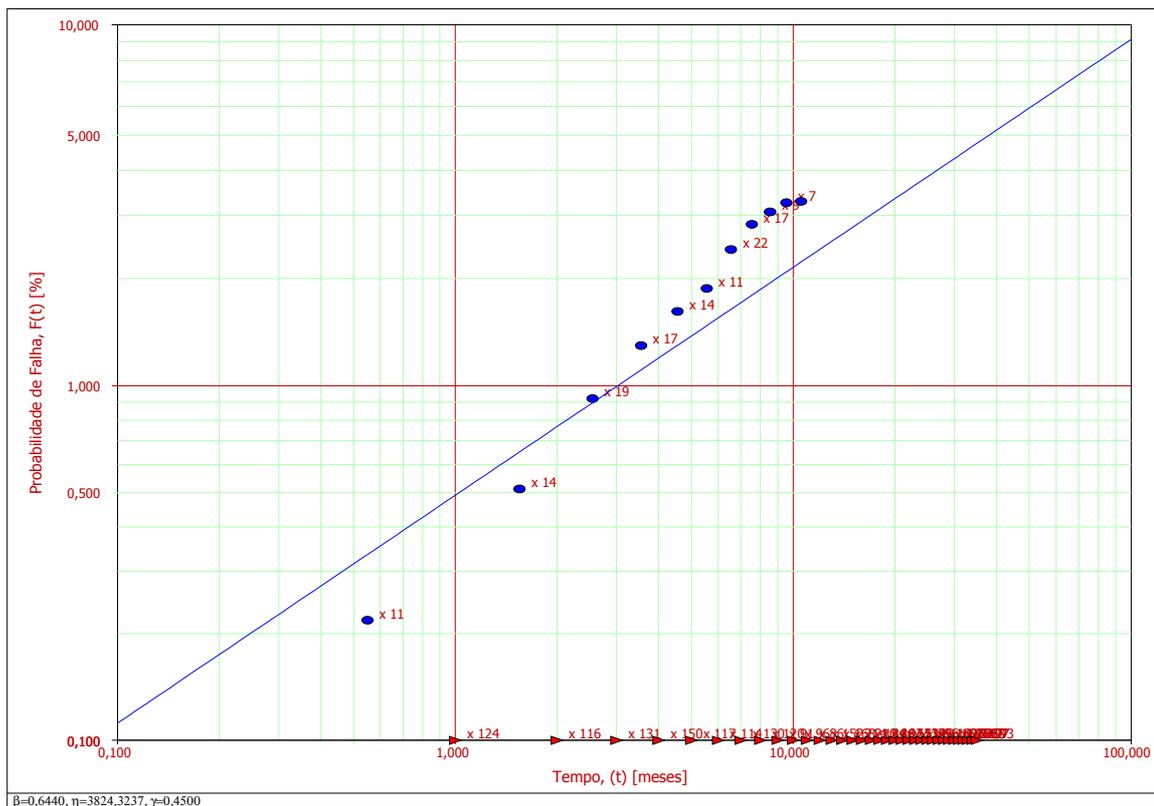


Subsistema Transmissão – distribuição Lognormal (modelo indicado pelo software)

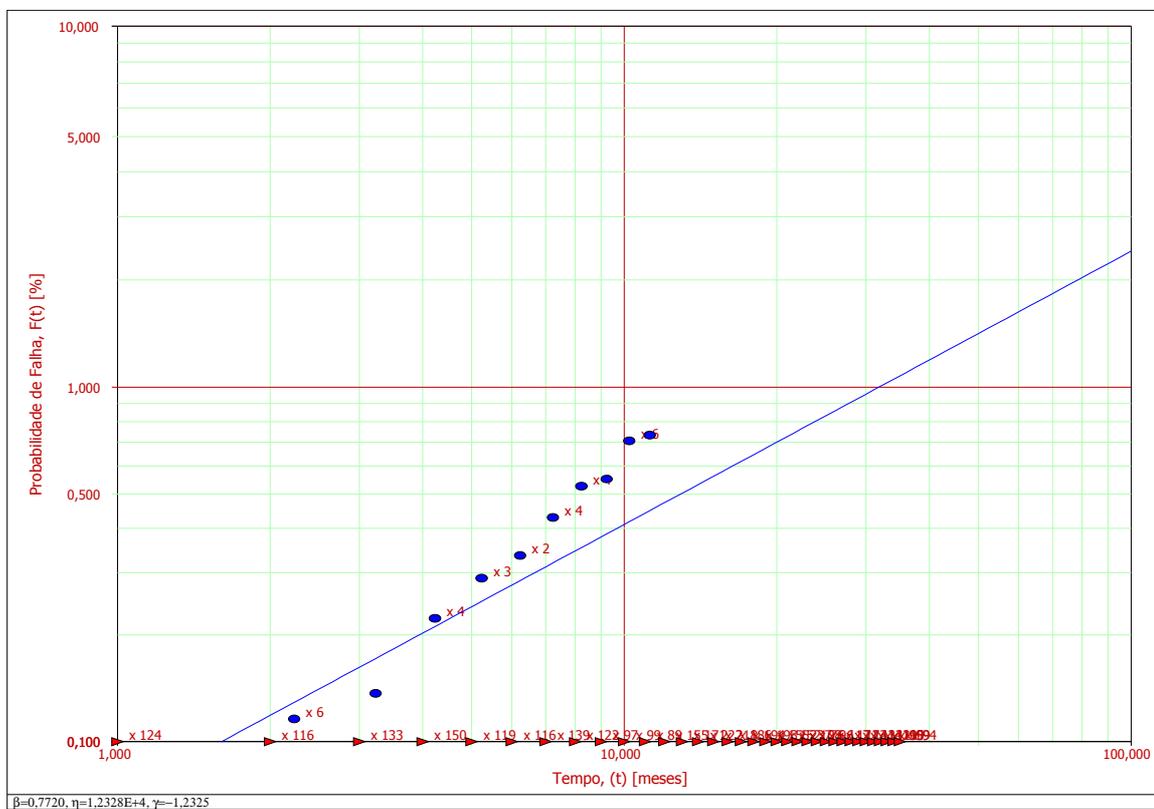


Subsistema Transmissão – distribuição Weibull Mista (modelo adotado)

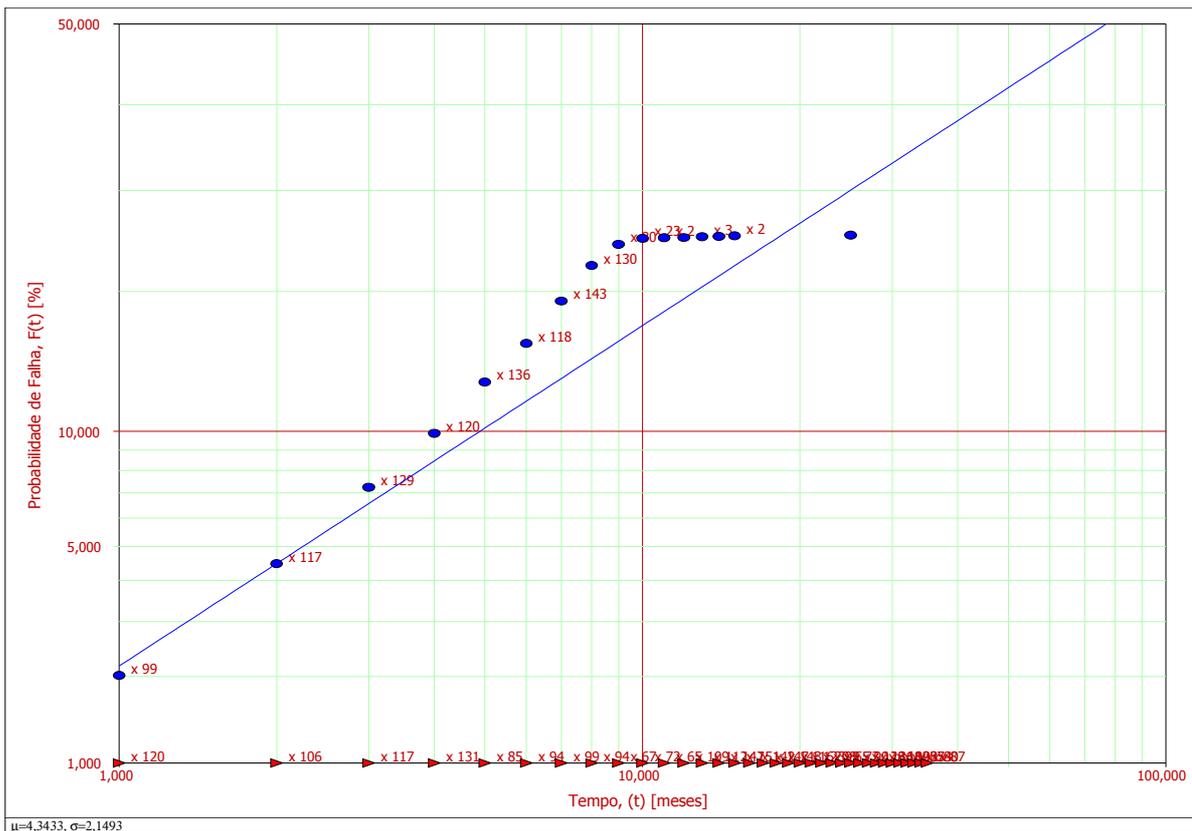
MF283



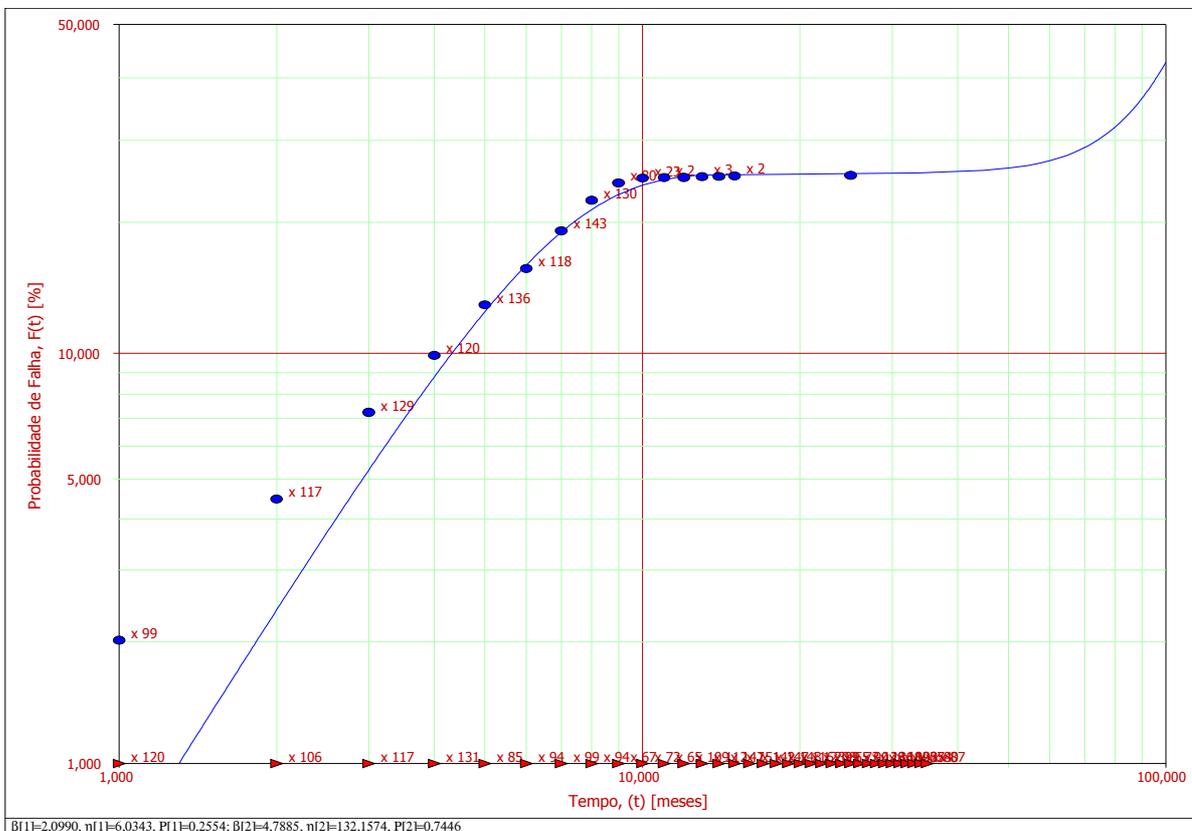
Subsistema Acessório – distribuição Weibull



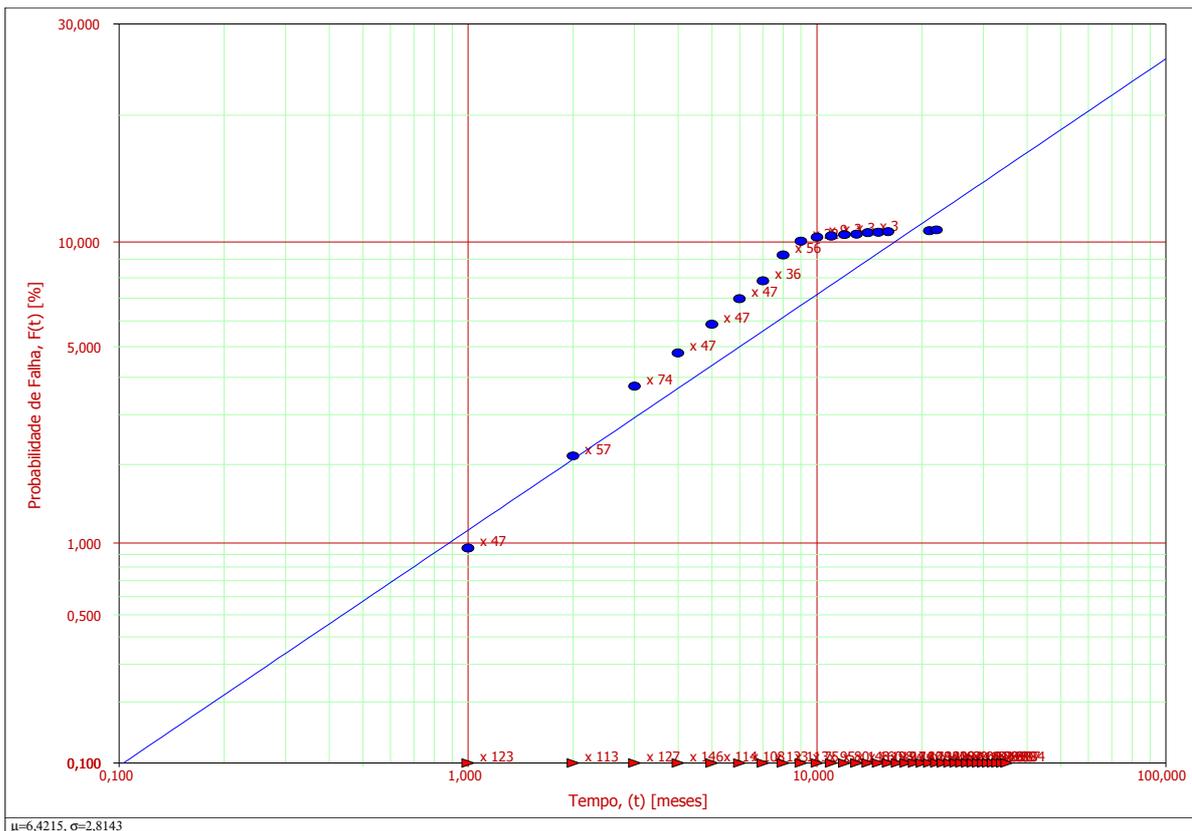
Subsistema Lateria – distribuição Weibull



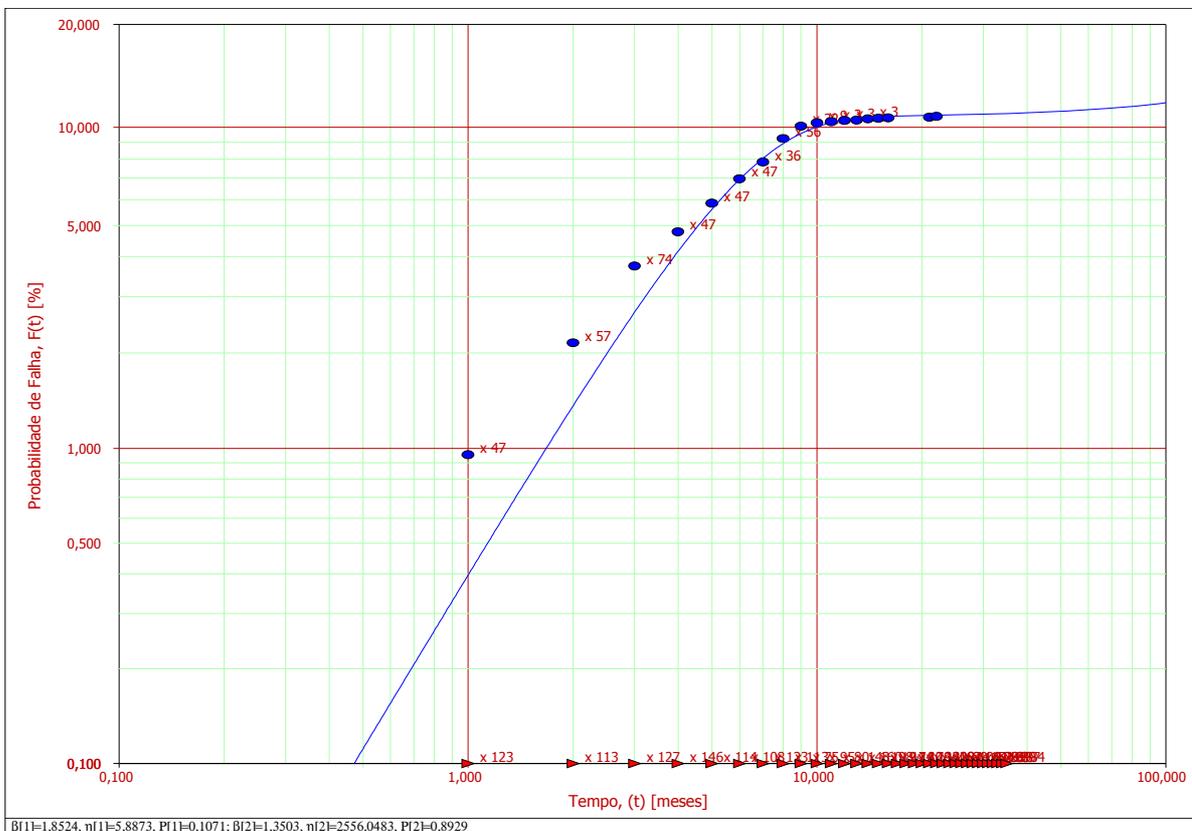
Subsistema Elétrico – distribuição Lognormal (modelo indicado pelo software)



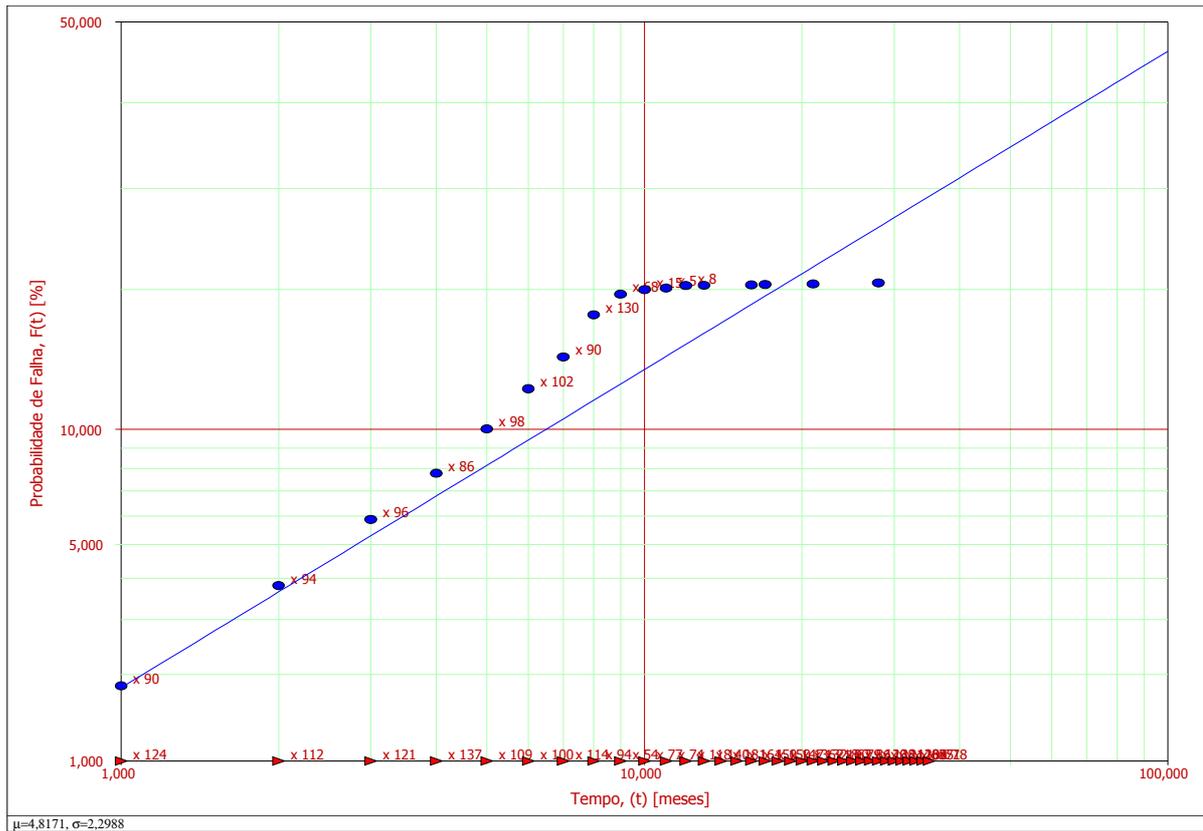
Subsistema Elétrico – distribuição Weibull Mista (modelo adotado)



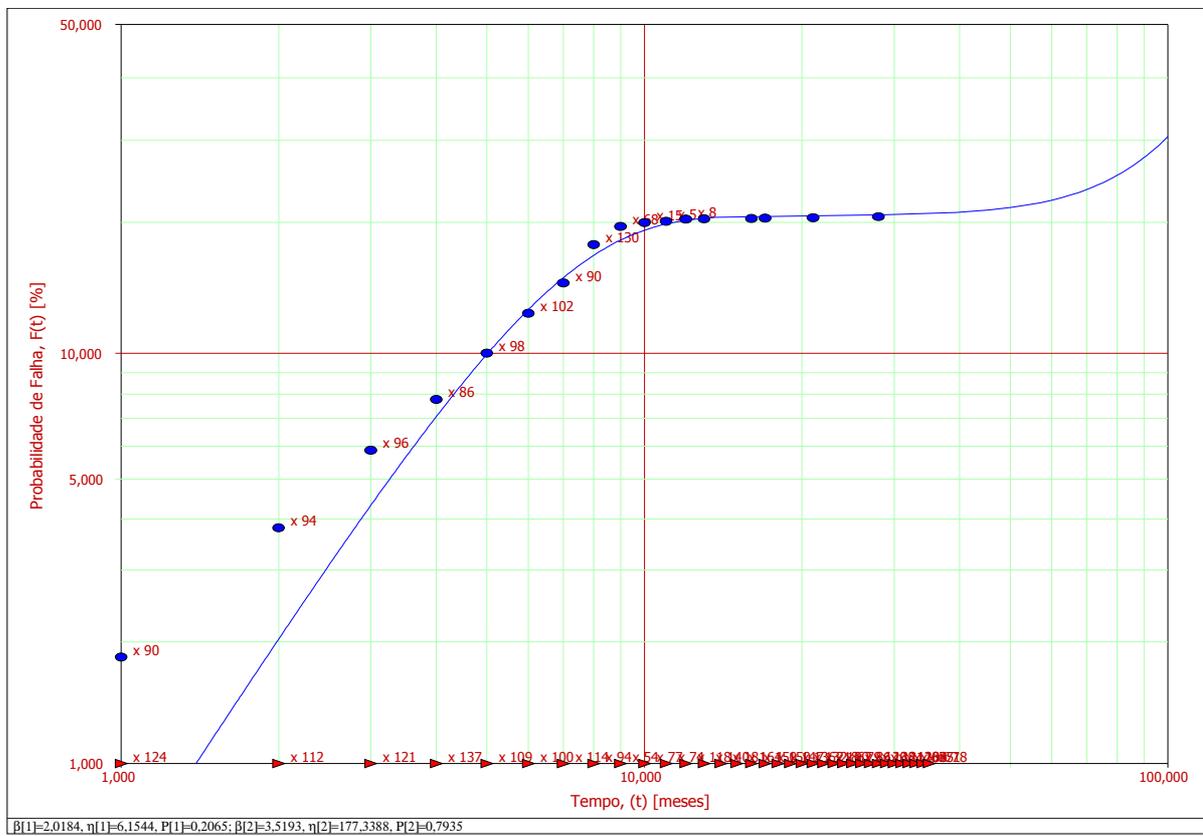
Subsistema Hidráulico – distribuição Lognormal (modelo indicado pelo software)



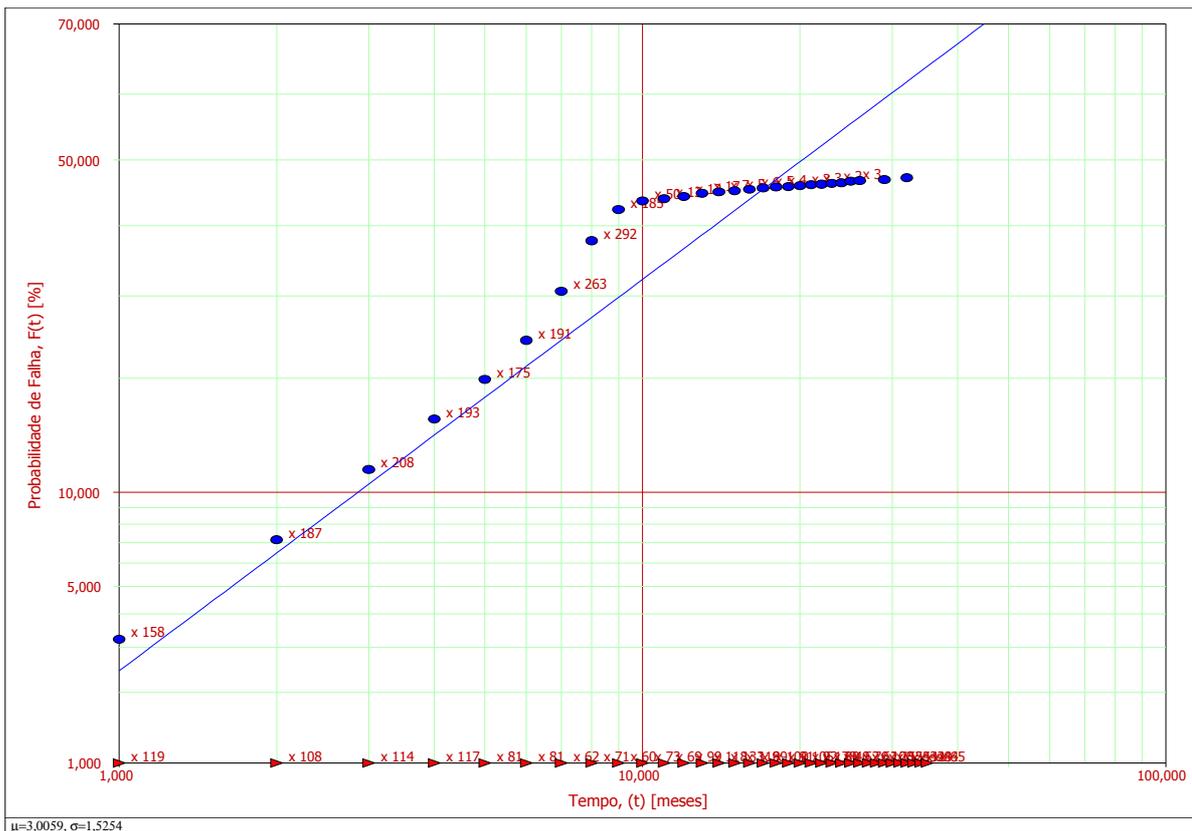
Subsistema Hidráulico – distribuição Weibull Mista (modelo adotado)



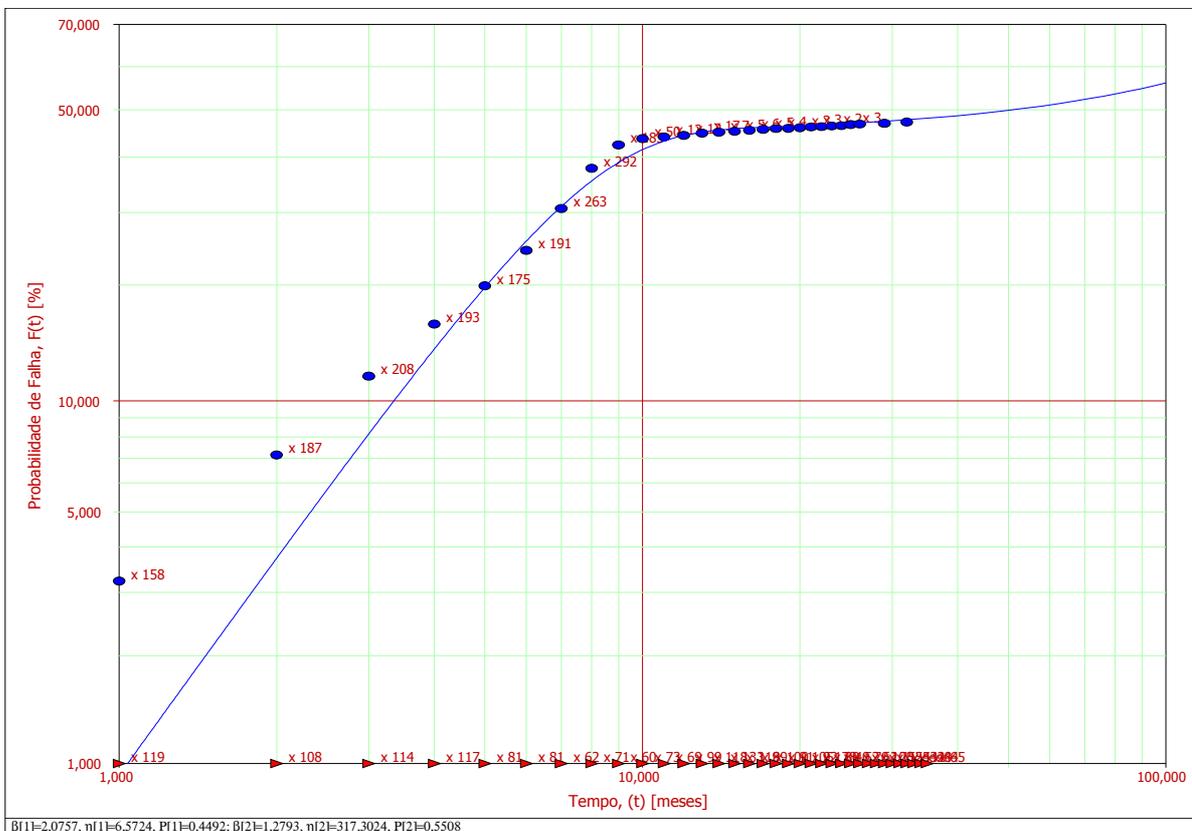
Subsistema Motor – distribuição Lognormal (modelo indicado pelo software)



Subsistema Motor – distribuição Weibull Mista (modelo adotado)



Subsistema Transmissão – distribuição Lognormal (modelo indicado pelo software)



Subsistema Transmissão – distribuição Weibull Mista (modelo adotado)