

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

Clóvis Geordane Fernandes

**Metodologia para melhorar a confiabilidade  
de subsistemas através de análise de falhas e  
testes acelerados**

Porto Alegre

2010

Clóvis Geordane Fernandes

**Metodologia para melhorar a confiabilidade de subsistemas através de análise de falhas e testes acelerados**

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: Prof. Flávio Sanson  
Fogliatto, *Ph.D.*

Porto Alegre  
2010

Clóvis Geordane Fernandes

**Metodologia para melhorar a confiabilidade de subsistemas através de análise de falhas e testes acelerados**

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. Flávio Sanson Fogliatto, *Ph.D.***

Orientador PPGEP/UFRGS

---

**Prof. Carla Ten Caten, *Dr.***

Coordenador PPGEP/UFRGS

**Banca Examinadora:**

Professor José Luís Duarte Ribeiro, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Professora Liane Werner, Dr. (DMAT/UFRGS)

Professor Michel José Anzanello, *Ph.D.* (CNPq)

## Dedicatória

Dedico esta dissertação de mestrado aos meus pais, sempre presentes em minha educação, me apoiando e incentivando em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço meus pais, Osvaldir e Valéria, pelo apoio e compreensão demonstrado durante a realização do trabalho, visto que, por muitas vezes, não foi possível dedicar muito tempo a eles. Agradeço também aos meus amigos, que também demonstraram compreensão pelo tempo que precisei dedicar a dissertação.

Sou grato ao meu orientador, Flávio S. Fogliatto, pelo apoio e contribuições oferecidas durante o desenvolvimento e conclusão desta dissertação.

Finalmente, agradeço a John Deere, pela oportunidade proporcionada para a realização deste curso de pós graduação e formação como mestre.

## **RESUMO**

Esta dissertação propõe uma metodologia de estimativa de vida útil de componentes mecânicos através de atividades de Confiabilidade inseridas no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP). Atividades das fases de projeto são apresentadas em uma aplicação prática, em um sistema de uma colhedora de grãos. Busca-se estruturar uma Análise de Causa Raiz (ACR) integrada a uma Análise dos Modos e Efeitos de falha (FMEA), para que os resultados da FMEA sejam de melhor qualidade. Após a geração de soluções para o sistema, faz-se a verificação e validação em bancadas aceleradas de teste, onde o tempo de validação é comprimido. Os resultados desses testes são utilizados para a análise de confiabilidade, comparando-se a configuração atual com a proposta na FMEA. Além deste estudo, este artigo apresenta uma revisão de conceitos teóricos de PDP, Confiabilidade e Garantias.

## **ABSTRACT**

This dissertation proposes a methodology to estimate the life of mechanical components using Reliability activities in the Product Development Process (PDP). Design activities are illustrated through a case study using a specific system of a harvest combine. This work integrates Root Cause Analysis (RCA) with Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) with the goal of attaining better quality in the FMEA results. Such results lead to product improvement that need to be submitted to verification and validation tests, which will be performed in accelerated test, to minimize validation time. Test results are used in a reliability analysis comparing the current and proposed design. This work also presents a revision of theoretical concepts related to PDP, Reliability and Warranty.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de Referência PDP.....	23
Figura 2. Modelo PDP e atividades de confiabilidade.....	25
Figura 3. Ciclo PDCA e atividades de confiabilidade.....	27
Figura 4. Fluxograma de atividades do projeto conceitual.....	30
Figura 5. Classificação das falhas.....	36
Figura 6. Característica dos tipos de falha.....	36
Figura 7. Etapas do processo de Análise de Causa Raiz.....	39
Figura 8. Simbologia utilizada na Análise de Sequência de Eventos.....	41
Figura 9. Procedimento da FMEA.....	43
Figura 10. Formulário típico para realização da FMEA.....	44
Figura 11. Rankings da FMEA.....	45
Figura 12. Exemplo de produtos, medidas de desempenho e variáveis de estresse.....	50
Figura 13. Quadro das distribuições de probabilidade.....	53
Figura 14. Fluxograma da metodologia proposta.....	55
Figura 15. Fluxograma de atividades para Análise de Causa Raiz.....	58
Figura 16. Metodologia 5W2H.....	64
Figura 17. Constituição de uma Colhedora de grãos convencional.....	69
Figura 18. Sistema convencional – saca-palhas.....	70
Figura 19. Colhedora de fluxo axial utilizando um rotor.....	70
Figura 20. Colhedora de fluxo axial.....	71
Figura 21. Cilindro de dentes e côncavo dentado.....	72
Figura 22. Sistema de separação.....	72
Figura 23. Sistema de alimentação por gravidade.....	73
Figura 24. Esquema – funcionamento da colhedora de grãos.....	73
Figura 25. Gráfico de pareto para gastos de garantia do sistema de limpeza.....	75
Figura 26. Gráfico de pareto para os valores de FPM dos componentes do sistema de limpeza.....	76
Figura 27. Quadro resumo – modos de falha – relatórios de garantia.....	79
Figura 28 – Falhas mais comuns do sistema de limpeza.....	80
Figura 29. Acionamentos do lado esquerdo da colhedora de grãos.....	82
Figura 30. Acionamentos do lado direito da colhedora de grãos.....	83
Figura 31. Configurações de engrenagens do sistema de limpeza.....	84

Figura 32. Estrutura do sistema de limpeza.....	85
Figura 33. Sequência de eventos dos sistemas da colhedora de grãos.....	86
Figura 34. Sequência de eventos da transmissão intermediária do ventilador.....	87
Figura 35. Sequência de eventos da engrenagem do Saca-Palhas.....	87
Figura 36. Sequência de eventos dos braços basculadores.....	88
Figura 37. Sequência de eventos e possíveis falhas dos braços basculadores.....	89
Figura 38. Quadro resumo dos modos de falha identificados na análise de sequência de eventos.....	90
Figura 39. Recomendações de solução para as possíveis causas de falha levantadas na análise de causa raiz.....	91
Figura 40. FMEA de projeto – Análise de modo e feito de falha.....	94
Figura 41. Maiores valores de RPN para a FMEA do sistema de limpeza.....	97
Figura 42. Metodologia 5W2H para modos de falha com maiores de RPN.....	98
Figura 43 – papel de probabilidade weibull – corrente de rolos configuração atual.....	103
Figura 44 – papel de probabilidade lognormal– corrente de rolos configuração atual.....	104
Figura 45 – papel de probabilidade exponencial– corrente de rolos configuração atual.....	104
Figura 46 – papel de probabilidade normal– corrente de rolos configuração atual.....	105
Figura 47 – papel de probabilidade weibull– bucha de borracha I .....	105
Figura 48 – papel de probabilidade lognormal – bucha de borracha I .....	106
Figura 49 – papel de probabilidade normal – bucha de borracha I .....	106
Figura 50 – papel de probabilidade exponencial – bucha de borracha I .....	107
Figura 51 – papel de probabilidade weibull– bucha de borracha II .....	107
Figura 52 – papel de probabilidade lognormal– bucha de borracha II .....	108
Figura 53 – papel de probabilidade normal – bucha de borracha II .....	108
Figura 54 – papel de probabilidade exponencial – bucha de borracha II .....	109
Figura 55 – papel de probabilidade weibull– corrente proposta.....	105
Figura 56 – papel de probabilidade lognormal– corrente proposta .....	111
Figura 57 – papel de probabilidade normal– corrente proposta .....	111
Figura 58 – papel de probabilidade exponencial– corrente proposta .....	112
Figura 59 – Gráfico de confiabilidade dos componentes testados na bancada.....	113
Figura 60 – Gráfico de taxa de falhas dos componentes testados na bancada.....	113

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Valores de FPM – Sistema de limpeza.....	76
Tabela 2. Quadro resumo das análises de Pareto (FPM e Custos).....	77
Tabela 3. Tempo até Falha – Teste de bancada configuração atual.....	102
Tabela 4. Tempo até Falha – Teste de bancada configuração proposta.....	106
Tabela 5. Resumo dos resultados da análise de confiabilidade.....	108
Tabela 6. Quadro resumo para valores de confiabilidade.....	114
Tabela 7. Quadro resumo para valores de taxa de falha.....	115

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	14
INTRODUÇÃO.....	14
1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS.....	14
1.2 TEMAS E OBJETIVOS.....	16
1.2.1. Objetivo Principal.....	17
1.2.2 Objetivos Secundários.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA DE TEMAS E OBJETIVOS.....	17
1.4 MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO DE TRABALHO.....	18
1.5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	20
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
CAPÍTULO 2.....	22
REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1 VISÃO GERAL DO MÉTODO PDP.....	22
2.2 PDP E CONFIABILIDADE.....	24
2.2.1 Planejamento do Projeto.....	28
2.2.2 Projeto Informacional.....	29
2.2.3 Projeto Conceitual.....	30
2.2.4 Projeto Detalhado.....	31
2.2.5 Preparação para a produção do produto.....	32
2.3 GARANTIA.....	32
2.3.1 Relação de garantia e outras áreas da empresa.....	33
2.3.2 Análise dos dados de garantia.....	34
2.4 FALHA.....	35
2.5 CONFIABILIDADE.....	37
2.5.1 Análise de Causa Raiz.....	38
2.5.2 FMEA.....	42
2.5.3 ENSAIOS ACELERADOS.....	47
Formas de aceleração de um teste.....	49

Aceleração por taxa de uso.....	49
Aceleração por altos níveis de estresse.....	49
2.5.4 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE.....	51
Distribuição de tempos-até-falha (Modelos de Confiabilidade).....	52
CAPÍTULO 3.....	55
METODOLOGIA DE TRABALHO.....	55
3.1 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA.....	57
3.2 COLETA E ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE GARANTIA.....	57
3.3 DETALHAMENTO DOS DADOS DE GARANTIA E IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA DO SISTEMA.....	58
3.4 ANÁLISE DE CAUSA RAIZ.....	59
3.4.1 Análise de sequência de eventos.....	61
3.4.2 Recomendação de ações para solução dos modos de falha.....	62
3.5 FMEA DE PROJETO.....	62
3.6 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO PROPOSTA.....	64
3.6.1 Ensaio de bancada para validação do sistema.....	64
3.6.2 Objetivos do ensaio.....	65
3.6.3 Planejamento do ensaio.....	65
3.6.4 Realização do ensaio acelerado.....	66
3.7 MODELAGEM DOS DADOS E CONCLUSÕES.....	66
CAPÍTULO 4.....	68
ESTUDO DE CASO.....	68
4.1 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA.....	68
4.2 COLETA E ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE GARANTIA.....	74
4.3 DETALHAMENTO DOS DADOS DE GARANTIA E IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA DO SISTEMA.....	77
4.4 ANÁLISE DE CAUSA RAIZ.....	79
4.4.1 Aspectos funcionais do sistema.....	82
4.4.2 Análise de sequência de eventos.....	85
4.4.3 Recomendação de ações para solução dos modos de falha.....	90

4.5 FMEA DE PROJETO.....	93
4.6 ENSAIO DE BANCADA PARA VALIDAÇÃO DAS SOLUÇÕES DOS MODOS DE FALHA.....	101
4.6.1 Resultados do teste de bancada para configuração atual .....	102
4.6.2 Resultados do teste de bancada para configuração proposta.....	109
4.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS SOBRE A CONFIABILIDADE DO SISTEMA .....	112
CAPÍTULO 5.....	116
CONCLUSÕES.....	116
REFERÊNCIAS .....	118
ANEXOS.....	123
ANEXO A – VALORES DE FALHA POR MÁQUINA, PERÍODO DE JANEIRO/2004 a JANEIRO/2009.....	123
ANEXO B – FMEA DE PROJETO – ANÁLISE DO MODO E FEITO DE FALHA.....	124

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

#### **1.1. Comentários iniciais**

O processo de globalização está abrindo o mercado brasileiro à concorrência internacional, pondo à prova as empresas estabelecidas no mercado. O Brasil está sendo visto como um mercado de grande potencial de consumo, fazendo com que empresas multinacionais façam grandes investimentos. Desta forma, as empresas que já estão instaladas devem buscar o permanente incremento de qualidade em seus produtos e serviços através da procura por diferenciais de mercado por meio de pesquisa, automação industrial e melhoria do nível dos recursos humanos, entre outros (SOUZA; POSSAMAI, 2000).

Uma das maneiras de uma empresa se destacar em qualquer segmento de mercado é oferecendo ao cliente um produto confiável. De acordo com Freitas e Colosimo (1999), a confiabilidade de um produto tem, sob diversos aspectos, impacto na satisfação do consumidor, aparecendo de maneira inconsciente nas decisões de compra. Assim, um caminho a ser seguido pelas empresas para aumentar a sua fatia de mercado é aumentar a confiabilidade de seus produtos. Nesse mesmo contexto, Ahmed (1996) afirma que, além de ser importante para a satisfação do consumidor, a confiabilidade do produto pode possibilitar que o cliente permaneça fiel à marca. Um produto confiável proporciona maior segurança ao consumidor em termos das funções que desempenha, além de uma maior durabilidade em comparação com produtos da concorrência. Por outro lado, um produto não-confiável pode levar ao fechamento da empresa, devido à perda de negócios causada pela má reputação destes produtos (DUPOW; BLOUNT, 1997).

Para avaliar a confiabilidade de um produto, não existe um procedimento padrão a ser seguido. Cada item possui sua particularidade e a aplicação direta dos modelos disponíveis na literatura costuma não ser possível. Historicamente, equipamentos eram superdimensionados em seus projetos de forma a alcançar uma confiabilidade adequada. Isto não é mais possível, pois a economia atualmente foca na minimização de custo e tempo de desenvolvimento; assim, super-dimensionando componentes os custos do produto seriam elevados e, sub-dimensionando componentes, as falhas poderiam ser catastróficas (DUPOW; BLOUNT, 1997).

Um processo de desenvolvimento de produtos que permite maior foco em confiabilidade sem, contudo, extrapolar os custos de um projeto, é o PDP (*Product Development Process*). Esse método consiste na divisão do processo de desenvolvimento de produto em etapas, que se interagem em pontos adequados. A partir da necessidade de mercado e restrições tecnológicas, considerando-se as estratégias competitivas e de produto da empresa, chega-se às especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção, para que a manufatura possa produzi-lo. Atividades de acompanhamento do produto após o lançamento também são incluídas, para que sejam realizadas eventuais mudanças nas especificações, bem como realiza-se o planejamento da descontinuidade do produto no mercado (ROZENFELD *et al.*, 2006).

No contexto de desenvolvimento de produto, a previsão de confiabilidade é utilizada para determinar, tão cedo quanto possível, se o equipamento será confiável o suficiente para a aplicação requerida ou se é necessário alterar o projeto nos estágios iniciais para se alcançar os níveis desejados de confiabilidade (DUPOW; BLOUNT, 1997). Braglia *et al.* (2007) afirmam que a importância da confiabilidade durante o desenvolvimento de produto cresce rapidamente. Atualmente, se a qualidade do produto é necessária para se estar no negócio, nos mercados do futuro, a confiabilidade será pré-requisito para se fazer negócios.

Nas fases iniciais de desenvolvimento de produto, a técnica FMEA (*Failure Mode Effect Analysis*) é utilizada para avaliar os modos de falha potenciais de um sistema ou produto. Essa técnica identifica, de maneira antecipada, estruturada e lógica, as causas e efeitos de cada modo de falha de um sistema ou produto (LAFRAIA, 2001).

Entretanto, a aplicação da FMEA requer informações de entrada qualificadas, já que elas servirão de base para as posteriores análises a serem realizadas. Sakurada (2001) propõe a utilização da FTA (*Fault Tree Analysis*) para fornecer informações de entrada em um nível adequado de detalhes. No entanto, uma limitação da FTA está na

determinação das probabilidades associadas às falhas dos componentes de um sistema, as quais não são, em muitos casos, de fácil obtenção. Nesta dissertação propõe-se utilizar uma Análise de Causa Raiz (ACR) estruturada para fornecer informações detalhadas para a realização da FMEA de projeto.

O principal resultado de uma FMEA de projeto é uma lista de sugestões para solução das falhas encontradas em um sistema ou produto. As sugestões se transformarão em itens físicos, que serão utilizados no novo sistema ou produto. Antes de liberar o produto ao mercado, sua confiabilidade deve ser avaliada (BRAGLIA *et al.* 2007).

Para se fazer uma análise de confiabilidade, entretanto, necessita-se de dados de tempo-até-falha do produto a ser avaliado. Tal informação pode ser obtida através de ensaios de laboratório ou através da análise dos dados de campo, obtidos junto aos clientes. Essas informações devem ser agrupadas em um sistema de registro de confiabilidade, juntamente com informações como tempo de operação, número de falhas e condições apresentadas no momento da ocorrência de cada falha (WERNER E RIBEIRO, 1996).

Os dados de tempo-até-falha obtidos em campo geralmente apresentam tempos-até-falha muito longos, e tempo necessário para obtenção de uma amostra significativa costuma ser proibitivo. Para contornar esse problema e diminuir o tempo de desenvolvimento dos itens, utilizam-se testes acelerados de confiabilidade (NELSON, 2004). De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2009), esses testes são utilizados para encurtar a vida de produtos ou acelerar a degradação de suas características de desempenho, e, têm por objetivo a obtenção de dados de confiabilidade em um menor período de tempo.

## **1.2. Tema e objetivos**

O tema proposto para este trabalho são PDP, Confiabilidade, Análise de Causa Raiz e Testes Acelerados.

Os objetivos deste trabalho podem ser subdivididos em principal e secundário, conforme apresentado a seguir.

### **1.2.1. Objetivo Principal**

Este trabalho tem por objetivo principal propor uma metodologia para melhorar a confiabilidade de subsistemas através de análise de falhas e testes acelerados. Para tanto, serão utilizados a Análise de Causa Raiz integrada à FMEA, para que os problemas relacionados ao produto sejam mapeados detalhadamente; ensaios acelerados para avaliar as soluções propostas na FMEA e, modelagem de confiabilidade para verificar se as soluções propostas atendem às expectativas determinadas na fase inicial do projeto.

### **1.2.2. Objetivo Específico**

O primeiro objetivo específico deste estudo é fazer um levantamento na bibliografia sobre as tarefas de confiabilidade propostas ao longo das fases do PDP. Através desse mapeamento, será possível determinar quando determinada atividade deverá ser utilizada no processo.

O segundo objetivo específico é estruturar a metodologia de Análise de Causa Raiz em etapas, para que todos os pontos relacionados à falha de um componente sejam abordados. A Análise de Causa Raiz será utilizada para gerar informações, em maior nível de detalhe, para subsidiar a realização da FMEA de projeto.

O terceiro objetivo específico será avaliar a efetividade da solução proposta na FMEA de projeto através da realização de ensaios acelerados. Os ensaios serão comparativos, em que a proposta de solução será comparada com testes realizados em produto similar já existente.

## **1.3. Justificativa de temas e objetivos**

Sob o ponto de vista do consumidor, é essencial que produtos funcionem de maneira adequada, sem falhar por um longo período de tempo. O tempo de vida do produto é, portanto, uma de suas mais importantes características de qualidade. Produtos com alta confiabilidade podem operar por um tempo longo sem apresentar falhas. Dessa forma, é fundamental que o processo de desenvolvimento de produtos garanta um produto com alta confiabilidade, através da realização das atividades necessárias durante as fases de desenvolvimento de produto. Testes de vida para

produtos de alta confiabilidade em condições normais de uso levariam muito tempo para gerar informações significativas sobre falhas do produto. O uso de testes acelerados de confiabilidade, nesta situação, é uma forma de contornar essas dificuldades (MEEKER e ESCOBAR, 2006). Testes acelerados são essenciais para que o tempo de desenvolvimento do produto seja diminuído sem que a sua qualidade seja prejudicada.

Segundo Theije *et al.* (1998), um produto com um bom planejamento de desenvolvimento pode render economias significativas à empresa; os autores estimam que 70% a 80% dos custos futuros relacionados a um produto dependerão das decisões tomadas durante o seu desenvolvimento. Sendo assim, o objetivo do trabalho, que é consolidar as atividades de confiabilidade necessárias durante as fases de desenvolvimento de produtos PDP, vêm de encontro às necessidades de um bom planejamento de produto.

Historicamente, os desenvolvimentos de projetos na empresa analisada no estudo de caso não eram submetidos a atividades de confiabilidade, progredindo do projeto virtual para os testes de campo. Testes de componentes mecânicos em campo tipicamente requerem tempo longo e recursos elevados, pois, além de se querer testar um componente novo, os demais componentes do sistema devem estar em perfeitas condições para que não influenciem os resultados do teste. Sendo assim, através da aplicação de atividades de confiabilidade, pretende-se obter resultados satisfatórios quanto ao projeto analisado.

#### **1.4. Método de desenvolvimento do trabalho**

O método de pesquisa científica utilizada nesta dissertação é classificado como estudo de caso, de acordo com Yin, 2001. O Método do Estudo de caso consiste em uma abordagem qualitativa e é frequentemente utilizado para coleta de dados. Para Stake (2000), o estudo de caso na pesquisa caracteriza-se por interesse em casos individuais, e não pelos métodos de investigação, que podem ser o mais variado, tanto qualitativo como quantitativos.

O Método do Estudo de Caso envolve três fases distintas (Yin, 1993): (i) a escolha do referencial teórico, a seleção dos casos e o desenvolvimento de procedimentos para a coleta de dados; (ii) a condução do estudo de caso, com a coleta e análise de dados,

culminando com o relatório do caso; (iii) a análise dos dados obtidos à luz da teoria selecionada, interpretando os resultados (Yin, 2001).

Na primeira fase deve-se desenvolver os procedimentos e regras gerais a serem adotados no estudo; uma visão geral do projeto, com tema do mesmo e questões de estudo. Os procedimentos a serem adotados na coleta de dados e o plano de análise dos dados coletados também devem ser determinados.

Na segunda fase do estudo são obtidas as evidências que comporão o material sobre o caso: trata-se da análise de documentos, do desenvolvimento de entrevistas junto às pessoas relacionadas ao caso, bem como de observações do investigador sobre as evidências do estudo de caso. É fundamental a utilização de várias fontes para evidenciar o problema, evitando assim conclusões precipitadas sobre o estudo de caso.

Na última fase do estudo faz-se a categorização e a classificação dos dados, voltando às proposições iniciais do estudo. O autor YIN (2001) propõe duas estratégias gerais: basear a análise em proposições teóricas, organizando-se o conjunto de dados com base nas mesmas e buscando evidência das relações causais propostas na teoria; desenvolver uma estrutura descritiva que ajude a identificar a existência de padrões de relacionamento entre os dados.

O método de trabalho utilizado no desenvolvimento desta dissertação subdivide-se nas seguintes etapas. Primeiramente, fez-se uma pesquisa bibliográfica para obtenção de conceitos teóricos. De acordo com Gil (1991), esse tipo de pesquisa é realizado com base em material já elaborado, sendo, neste trabalho, utilizados principalmente livros e artigos científicos. A grande vantagem desse tipo de pesquisa é a de permitir ao investigador a cobertura de uma gama de fenômenos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente. Após a obtenção dos dados de referenciais teóricos, fez-se um levantamento das atividades de confiabilidade necessárias em cada fase de desenvolvimento de produtos PDP, para que uma linha de referência de atividades fosse estabelecida.

Após a apresentação da metodologia, aplicou-se a mesma através de um estudo de caso prático, a fim de exemplificar o método. Desenvolveu-se a metodologia segundo as etapas: (i) identificação e caracterização do sistema; (ii) coleta e estratificação dos dados de garantia; (iii) detalhamento dos dados de garantia; (iv) análise de causa raiz; (v) FMEA de projeto; (vi) verificação e validação; (vii) modelagem de confiabilidade dos resultados; (viii) comparativo dos resultados das configurações atual e proposta. No estudo de caso, comparam-se resultados de tempo-até-falha de um

produto atualmente comercializado pela empresa com resultados de tempo-até-falha de um produto proposto através das melhorias apontadas na FMEA.

Por fim, através de informações oriundas da aplicação da metodologia, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são geradas.

### **1.5. Limitações do trabalho**

O trabalho apresenta uma proposta de metodologia para melhorar a confiabilidade de subsistemas através de análise de falhas e testes acelerados. No entanto, atividades estratégicas da empresa, que são realizadas na fase de planejamento de projeto, não são abordadas. O trabalho aborda atividades de confiabilidade relacionadas às fases intermediárias do PDP. Mais especificamente, Análise de Causa Raiz, FMEA, e análise de confiabilidade de dados de tempo-até-falha.

Os ensaios acelerados abordados neste trabalho apenas comprimem o tempo total do teste através do funcionamento ininterrupto da bancada. Neste caso, entende-se aceleração do ensaio a comparação entre uma utilização normal do sistema com sua utilização na bancada, onde não há paradas como na utilização em campo. Não há aceleração do teste através do aumento de carga (ou utilização de outro fator de estresse). Essa limitação deve-se aos altos custos dos testes.

### **1.6. Estrutura do trabalho**

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, descritos nos parágrafos abaixo.

No primeiro capítulo, faz-se uma introdução do tema com os comentários iniciais relacionados ao assunto, justificando-se a importância das atividades de confiabilidade nas fases do desenvolvimento de produtos, bem como da importância de comprimir os tempos de desenvolvimento de produtos. Neste capítulo comenta-se sobre os objetivos principais e secundários deste trabalho, bem como o método, as limitações e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo, faz-se uma revisão bibliográfica sobre os assuntos do trabalho. Conceitos teóricos sobre PDP, FMEA, Ensaios Acelerados e Confiabilidade são apresentados, assim como equações sobre o último assunto. O objetivo deste

capítulo é embasar o leitor com informações que o permitam entender a metodologia proposta e o estudo de caso realizado nos próximos capítulos.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia que foi proposta neste estudo, seguindo-se as etapas apresentadas na seção 1.4, desde a identificação do sistema até a análise de confiabilidade dos dados de experimentos acelerados em bancada, utilizados para as configurações atual e proposta.

No quarto capítulo se realiza o estudo de caso, aplicando-se a metodologia desenvolvida no capítulo anterior em um sistema específico de uma colhedora de grãos.

O quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir do trabalho realizado, esclarecendo-se as limitações da pesquisa. Sugestões para trabalhos futuros também são apresentadas.

## CAPÍTULO 2

### REFERENCIAL TEÓRICO

#### 2.1 Visão geral do modelo PDP

O desenvolvimento de produto envolve uma grande quantidade de tarefas a serem executadas por diversos profissionais de diferentes áreas de uma empresa, tais como: Marketing, Pesquisa & Desenvolvimento, Engenharia de Produto, Materiais, Manufatura e Suporte ao Cliente – em que cada área contribui de acordo com sua perspectiva em relação ao produto. Esse fato exige que essas atividades e suas decisões relacionadas sejam realizadas em conjunto e de forma integrada, o que torna necessária a estruturação de um processo específico que reúna esse conjunto de atividades a serem planejadas e gerenciadas de forma estruturada (ROZENFELD, 2006; SASKIA *et al.*, 1998; PMI, 2000).

Projetos de desenvolvimento de produtos têm por objetivo executar o processo de geração de uma idéia de um bem-material ao longo de várias fases, até o lançamento do produto no mercado. O processo no qual esses projetos são desenvolvidos é denominado de Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) (PMI, 2000; EPPINGER, 2000).

A contribuição do PDP como vantagem competitiva para empresas é cada vez mais enfatizada. Estima-se que algo em torno de 85% dos custos do ciclo de vida de um produto seja reflexo da fase de projeto, sendo determinado em função do que é definido no projeto, podendo ser tecnologias básicas do produto e do processo, materiais, especificações, etc (ROZENFELD, 2006; EPPINGER, 2000; SASKIA *et al.*, 1998).

Estima-se também que são possíveis reduções de mais de 50% no tempo de lançamento de um produto, quando os problemas de projeto são identificados e resolvidos com antecedência; reduzindo assim, o número de alterações posteriores à

criação do item físico. Além disso, é importante considerar o “efeito escala” do aumento do custo de alteração (mudanças) no produto ao longo dos seus estágios de desenvolvimento (idéia, projeto, protótipo, produção e lançamento): estima-se que o atraso na detecção e correção dos problemas à medida que se avança do projeto para a produção e para o consumo representa um aumento do custo de alteração, que cresce em progressão geométrica de razão 10 a cada fase (SASKIA *et al.*, 1998).

O modelo PDP é estruturado em macrofases, que são divididas em fases e atividades. As três macrofases são: pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento. O que determina uma fase é a entrega de um conjunto de resultados que juntos determinam um novo patamar de evolução do projeto de desenvolvimento. A figura 1 mostra o modelo do PDP, com suas macrofases e fases (ROZENFELD, 2006; EPPINGER, 2000; PMI, 2000)

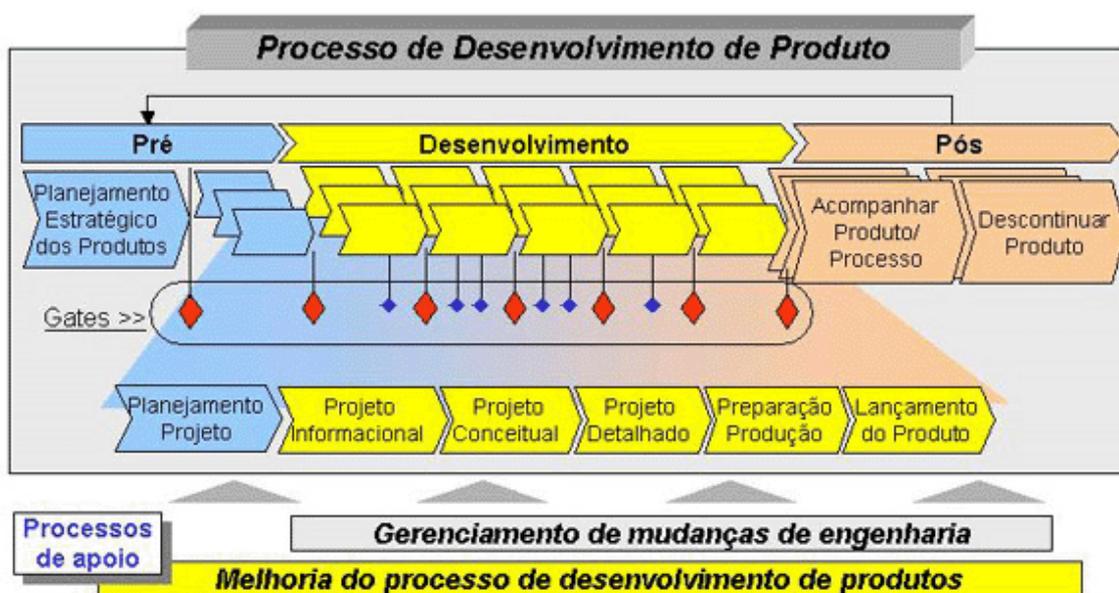


Figura 1 – Modelo de Referência PDP

Fonte: Rozenfeld (2006)

A macrofase de pré-desenvolvimento envolve atividades de definição do projeto de desenvolvimento, realizadas a partir da estratégia da empresa, considerando as restrições de recurso, conhecimentos e informações sobre os consumidores, bem como levantamento de informações sobre tendências mercadológicas e tecnológicas. Inicialmente, define-se o desdobramento do resultado do planejamento em um portfólio

da empresa, e finaliza-se com a declaração do escopo e o plano de projeto de um dos produtos previstos no portfólio de projetos (ROZENFELD, 2006; KERZNER, 1998).

Após a definição do portfólio de produtos e do planejamento dos projetos, inicia-se a macrofase de desenvolvimento de produtos. Essa macrofase é composta pelas fases: (1) projeto informacional; (2) projeto conceitual; (3) projeto detalhado; (4) preparação para a produção; e (5) lançamento do produto. Cada fase composta por uma série de atividades que devem ser concluídas para que a fase do projeto seja aprovada (ROZENFELD, 2006; EPPINGER, 2000).

Ao final da macrofase de desenvolvimento, as informações técnicas detalhadas de produção e comerciais relacionadas ao produto são disponibilizadas; os protótipos já foram aprovados; os recursos a serem utilizados para a sua produção, comercialização e suporte técnico foram comprados, testados e instalados; já ocorreu o lançamento no mercado e as equipes da cadeia de suprimentos estão informadas e treinadas, tanto as empresas parceiras nos fornecimentos, como as equipes envolvidas na comercialização e suporte (ROZENFELD, 2006; MEREDITH e MANTEL JR., 1995).

A macrofase do pós-desenvolvimento compreende a retirada sistemática do produto do mercado. Também é realizada uma avaliação de todo o ciclo de vida do produto, para que as lições aprendidas sejam utilizadas como referência para futuros desenvolvimentos. Essa macrofase possibilita que o conhecimento adquirido durante o desenvolvimento esteja à disposição da empresa no acompanhamento da vida do produto (ROZENFELD, 2006; EPPINGER, 2000).

O objeto de estudo deste trabalho diz respeito às atividades relacionadas à confiabilidade do produto, pertencentes à macrofase de desenvolvimento.

## **2.2 PDP e Confiabilidade**

Nos dias de hoje, as indústrias confrontam-se continuamente com expectativas mais rigorosas em relação à qualidade e confiabilidade de produtos, enfrentando restrições quanto ao incremento de custos, bem como à pressão por ciclos de desenvolvimento de produtos reduzidos. A importância da confiabilidade durante o desenvolvimento do produto cresce a cada dia. Atualmente, se a qualidade do produto é necessária para permanecer-se no negócio, no mercado futuro, a confiabilidade será considerada obrigatória para se fazer negócio (BRAGLIA *et al.*, 2006).

A busca por confiabilidade tem tornado a atividade de verificação e validação dos produtos ainda mais crítica. Dessa forma, o processo de desenvolvimento de produto deve ser suportado de maneira efetiva por um programa de verificação e validação para assegurar que os requisitos de confiabilidade sejam atingidos pelo novo projeto (YADAV *et al.*, 2006).

Produtos são submetidos a inspeções e testes para assegurar sua adequação aos requisitos do cliente, sendo os testes de confiabilidade utilizados para este fim. Diferente de muitos testes de qualidade, testes de confiabilidade demandam tempo longo para execução, além de serem frequentemente destrutivos (MADU, 1999).

Testes e atividades de confiabilidade são utilizados no estágio de desenvolvimento do produto para modelar o comportamento de confiabilidade. Dodson (1999) e O'Connor (1995) sugerem atividades a serem realizadas durante as fases do PDP para que a confiabilidade do produto seja atingida. Transpondo essas atividades para o modelo do PDP proposto por Rozenfeld (2006), tem-se o esquema apresentado na figura 2.

<b>Fases PDP</b>					
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Planejamento do Projeto</b>	<b>Projeto Informacional</b>	<b>Projeto Conceitual</b>	<b>Projeto Detalhado</b>	<b>Preparação Produção</b>	<b>Lançamento do Produto</b>
Estabelecer linhas de produto da empresa e estratégias de verificação e validação	Estabelecer Riscos de confiabilidade e funcionalidade	Atualização dos riscos de confiabilidade e funcionalidade		Finalizar atividades de riscos de confiabilidade e funcionalidade	Arquivar Resultados e Procedimentos de Verificação e validação
	Desenvolver Planos de Verificação e Validação	Executar planos de verificação e validação		Completar planos de verificação e validação	
	Desenvolver planos de confiabilidade	Executar planos de confiabilidade		Completar planos de confiabilidade	

Figura 2 Modelo PDP e atividades de confiabilidade

Fonte: Adaptado de O'Connor (1995) e Dodson (1999) e Rozenfeld (2006)

Conforme ocorre o progresso no desenvolvimento de um produto, alguns requisitos de confiabilidade determinados inicialmente podem não ser atingidos. Para contornar esse problema, melhorias de confiabilidade podem ser realizadas através de alterações do projeto, podendo estas serem de alto ou baixo impacto. Geralmente um projeto novo resulta em uma confiabilidade inicial baixa, que é aumentada com o

decorrer do tempo. O processo de testes de confiabilidade deve ser repetido até que as metas de confiabilidade do projeto sejam atingidas (DODSON, 1999; VOLLERT, 1996).

Testes de confiabilidade devem satisfazer as seguintes demandas (SASKIA *et al.*, 1998):

- detectar os erros de projeto o mais cedo possível no processo de desenvolvimento de produtos, para que as mudanças sejam realizadas com custos menores;
- detectar os pontos fracos do novo projeto, permitindo reação pró-ativa aos erros encontrados e;
- simular as condições de carregamento às quais a máquina é exposta no mercado, para evitar falhas na operação.

No entanto, mesmo sabendo-se da importância dos testes de confiabilidade, o maior problema enfrentado pela organização responsável pelo programa de confiabilidade é a determinação de tarefas que permitam estimar a confiabilidade do componente ou sistema. As tarefas de confiabilidade associadas ao produto devem ser tais que todos os pontos críticos sejam passíveis de avaliação. O objetivo é determinar quando e o que incluir na proposta de estabelecer um programa de confiabilidade aceitável e com boa relação custo-benefício (DODSON, 1999).

Saskia *et al.* (1998) propõem que, para o desenvolvimento de um plano efetivo de testes, três dimensões sejam consideradas: estrutura física do produto; tempo em serviço para verificar o comportamento dos danos no sistema; requisitos funcionais do produto. A consideração dessas três dimensões serviria como base para responder questões relativas ao plano do programa de confiabilidade.

O plano do programa de confiabilidade é usado para gerenciar a efetividade deste programa, através do entendimento e execução de suas tarefas. Isso assegura que os procedimentos de implantação e controle das tarefas de confiabilidade estejam adequados. A figura 3, proposta por Madu (1999), relaciona o ciclo PDCA às atividades de confiabilidade.

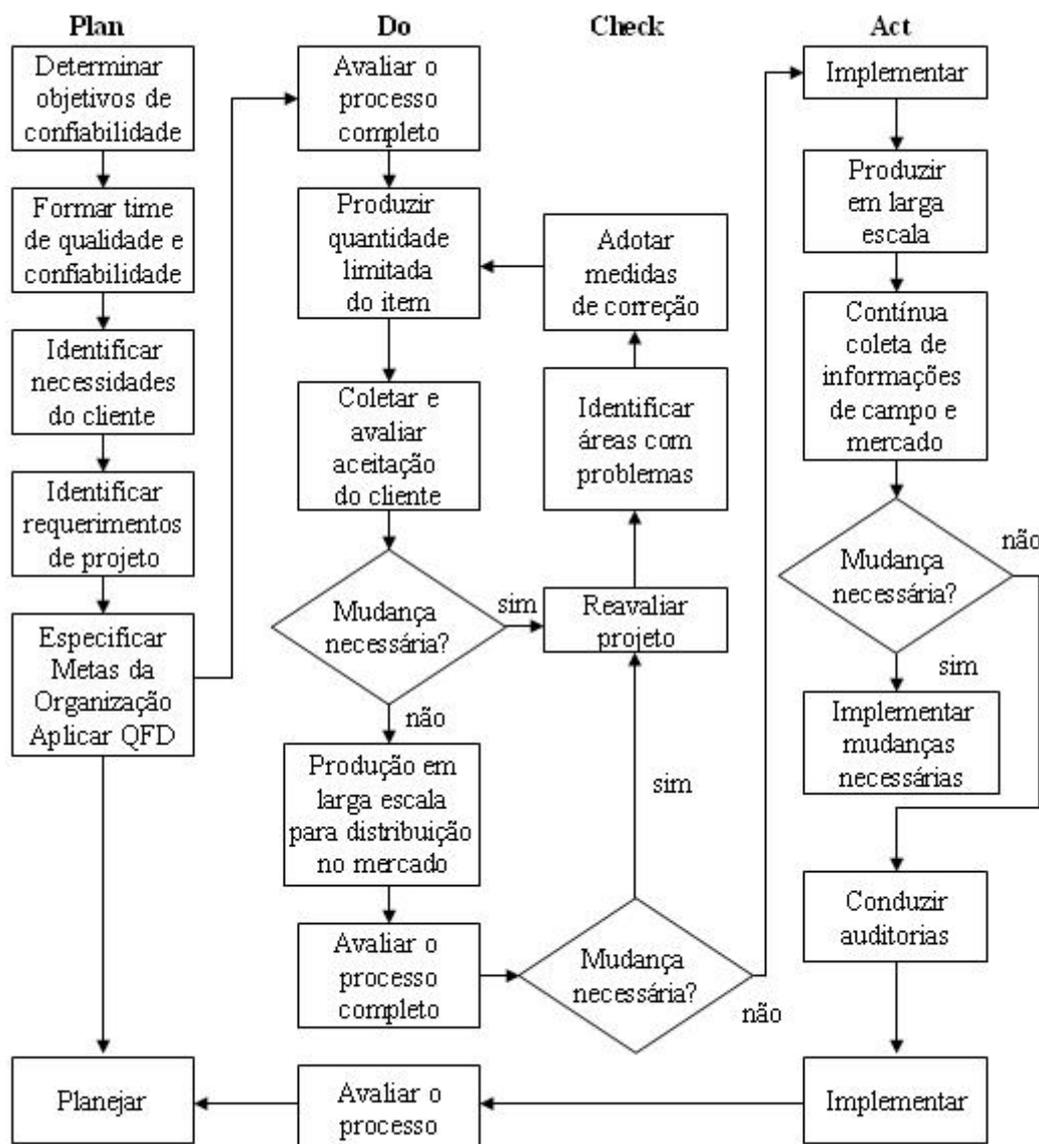


Figura 3 – Ciclo PDCA e atividades de confiabilidade

Fonte: Madu (1999)

O plano de confiabilidade deve incluir, mas não limitar-se a (DODSON, 1999; O'CONNOR, 1995):

- descrição da forma de condução do programa, detalhando cada tarefa e procedimentos para avaliar o seu progresso;
- descrição das inter-relações entre as tarefas de confiabilidade e como elas servirão de informação para outras tarefas orientadas ao sistema. Essa descrição inclui cronogramas com datas estimadas de início e fim de cada tarefa;

- identificação do pessoal chave para gerenciar o programa de confiabilidade, incluindo a descrição da estrutura do gerenciamento das tarefas, bem como a relação entre tarefas e pessoal necessário.

Revisões formais e avaliação dos requisitos de confiabilidade do produto devem ser conduzidas periodicamente no programa. Essas revisões devem ser realizadas pelo menos duas vezes por mês, embora o tempo possa ser estendido de acordo com o progresso do programa. Discussões representativas deveriam incluir análises de confiabilidade, análises de falha, cronograma e progresso dos testes, problemas relacionados ao programa de confiabilidade do fornecedor, assim como a avaliação de problemas no projeto ou manufatura de itens (DODSON, 1999; O'CONNOR, 1995).

As revisões devem ocorrer de maneira organizada e disciplinada. Para serem efetivas, as revisões devem ser realizadas por pessoas que entendem do projeto, não sendo, necessariamente, o responsável pelo projeto o facilitador das reuniões de revisão. O time de confiabilidade deveria ser o responsável por coordenar estas atividades, sempre envolvendo a equipe multi-departamental inicialmente alocada para estas atividades, gerando atualizações nas documentações de análise de confiabilidade. (O'CONNOR, 1995; BIEDA, 1991)

### **2.2.1 Planejamento do Projeto**

A fase do planejamento do projeto tem por objetivo identificar as atividades, recursos e a melhor forma de integrá-los para que o mesmo seja bem sucedido. Informações relevantes ao planejamento e execução do projeto são incluídas no plano do projeto, que consiste na descrição das ações e recursos a serem empregados pela empresa, visando à obtenção de um novo produto. Tais informações incluem: escopo do projeto, conceito do produto, previsões das atividades do projeto, prazos, orçamento, definição do pessoal responsável, recursos necessários para realizar o projeto, especificação dos critérios e procedimentos para avaliação da qualidade e análise de riscos e indicadores de desempenho selecionados para o projeto do produto (ROZENFELD, 2006; EPPINGER, 2000).

As atividades relacionadas à confiabilidade, na macrofase de pré-desenvolvimento, dizem respeito à determinação das metas da empresa em relação à verificação e validação dos testes de componentes e sistemas como, por exemplo, determinar o percentual de verificação e validação que será feito virtualmente através de

simulações. Em paralelo à determinação dessas metas, deve-se verificar a quantidade de recursos de pessoal e laboratório para apoiar as metas do projeto (DODSON, (1999); O'CONNOR,1995; CROW, 1994).

### **2.2.2 Projeto Informacional**

O final da fase de planejamento de produto define o escopo do produto, onde o mesmo é descrito, assim como as definições e restrições que contornam o projeto, além de informar os recursos necessários para o mesmo. Se o projeto for viável economicamente, a equipe de desenvolvimento pode ser reunida e a fase do projeto informacional pode ser iniciada (EPPINGER, 2000; DU *et al.*, 2003)

O projeto informacional é caracterizado pela coleta e análise de informações que especificam o produto com maior clareza a fim de orientar a geração de futuras soluções de projeto. Dessa forma, informações coletadas de maneira incorreta ou que deixam de ser obtidas podem implicar na obtenção de soluções que não atenderão a qualidade final esperada pelo cliente (FREITAS e COLOSIMO, 2007).

Segundo Rozenfeld (2006), o produto final do projeto informacional são as especificações-meta: requisitos do produto com valores-meta referentes a parâmetros quantitativos e mensuráveis, tais como meta de vida útil do produto, distribuições de potência no produto; informações adicionais qualitativas obtidas junto ao cliente que dizem respeito às diretrizes não-mensuráveis, porém importantes para o desenvolvimento do produto tais como: avaliação do cliente quanto ao desempenho do novo produto e servicibilidade.

As atividades relacionadas à confiabilidade na fase de projeto informacional consistem na determinação das metas de confiabilidade do produto. A confiabilidade total do produto também deve ser objetivada, com cada componente contribuindo com sua parcela. Algumas atividades pertencentes a esta fase são (DODSON, 1999):

- análise de fornecedores – internos e externos;
- testes de laboratório (internos e externos);
- análises virtuais;
- testes de campo e desempenho;
- FMEA;
- validação em cliente;

- revisão de aspectos de segurança do projeto;
- testes de homologação do produto;
- revisão de servicibilidade do produto;
- revisão de requisitos de software;

As datas de conclusão de atividades dos planos de confiabilidade, percentuais de verificação referenciados nas normas e procedimentos de testes, bem como critérios de aceitação devem ser apresentados. O plano de verificação e validação deve ser monitorado para verificação do progresso das atividades de confiabilidade relacionadas ao projeto (DODSON, 1999).

### 2.2.3 Projeto conceitual

Na fase de projeto conceitual, soluções de projeto são geradas e estudadas detalhadamente até se encontrar a melhor solução possível que seja capaz de atender às especificações-meta concebidas no projeto informacional. Na fase de projeto conceitual, as atividades da equipe de projeto relacionam-se com a busca, criação, representação e seleção de soluções para o problema de projeto. A busca por soluções já existentes pode ser feita pela observação de produtos concorrentes ou similares através de artigos, catálogos ou por *benchmarking* (ROZENFELD, 2006). A figura 4 apresenta as atividades realizadas na fase do projeto conceitual.

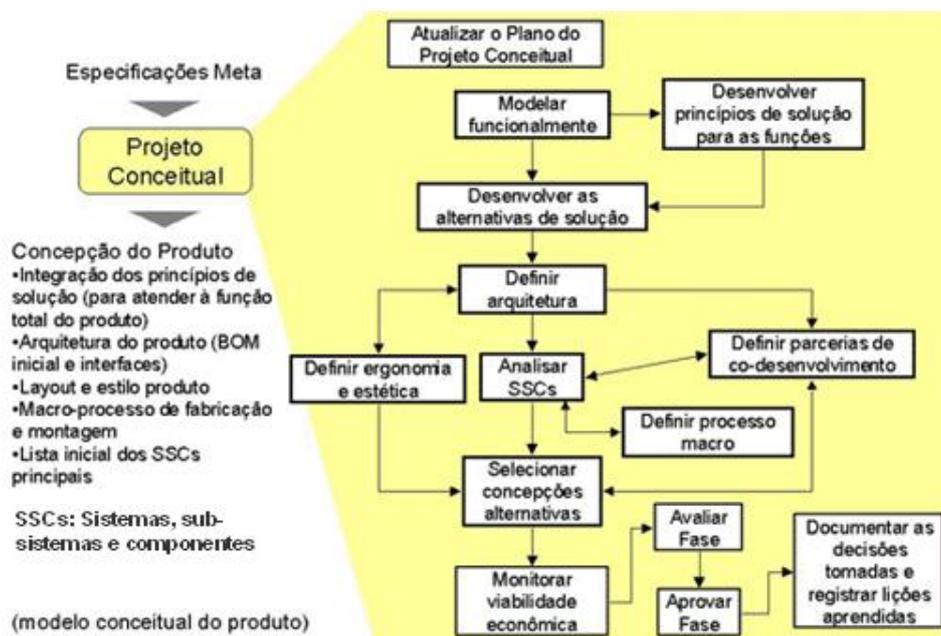


Figura 4 – Fluxograma de atividades do projeto conceitual

Fonte: Rozenfeld (2006)

Na fase de projeto conceitual, o produto é modelado funcionalmente e descrito de uma forma abstrata, de forma a evitar experiências ou preconceitos contra novas soluções. Em outras palavras, deseja-se que o foco seja mantido na essência do problema e não na sua solução imediata (ROZENFELD, 2006).

O propósito das atividades de confiabilidade, na fase de projeto conceitual e de projeto detalhado, é avaliar o projeto de acordo com o plano de verificação e validação determinado. Atividades da fase de projeto conceitual do PDP devem ser, principalmente, de análise e testes de laboratório. A meta principal é minimizar os testes de campo encontrando os modos de falha através das análises e testes de laboratório (SASKIA *et al.*, 1998; DODSON, 1999; O'CONNOR, 1995).

#### **2.2.4 Projeto detalhado**

Na fase de projeto detalhado, a concepção do produto é detalhada e transformada nas especificações finais. Documentações relacionadas a protótipo funcional, projeto dos recursos, dispositivos e ferramentas são gerados. O protótipo é aprovado, o produto pode ser homologado e as especificações finais são fixadas (ROZENFELD, 2006).

No projeto conceitual são realizados desdobramentos sucessivos dos sistemas em subsistemas, e destes em componentes, os quais são associados aos processos de fabricação, documentados no plano de processo macro, partindo dos requisitos dos clientes. Já no projeto detalhado, com os componentes já definidos, faz-se o detalhamento dos mesmos para uma correta integração dos componentes em subsistemas, sistemas e, de maneira sucessiva, até o produto final. Outros detalhamentos completam a concepção, resultante do projeto conceitual, com o objetivo de obter um produto integrado, contendo as tolerâncias de seus parâmetros e especificações críticas dentro de uma faixa de valores que atenda aos requisitos dos clientes e todas as especificações-meta da fase de projeto informacional (ROZENFELD, 2006; EPPINGER, 2000).

Na fase do projeto detalhado deve ocorrer a transição entre testes de laboratório e de campo para o protótipo físico. Quando uma falha é encontrada nos testes, deve-se entender a falha e encontrar a solução para o problema. A execução do plano de verificação e validação deverá ser analisada para que a equipe responsável pela confiabilidade do produto visualize o desempenho do sistema (DODSON, 1999; O'CONNOR, 1995; DEPPE, 1994).

Estimativas de confiabilidade em termos de tempo médio entre falhas (MTBF) devem ser feitas ao longo do PDP. Uma vez que falhas de campo iniciam-se na fase 4, dados de falha do produto em campo, taxas de ocorrência destas falhas, bem como o tempo acumulado de teste em campo deveriam ser usados para medir a confiabilidade do item. O crescimento da confiabilidade do produto testado deve ser comparado ao crescimento da confiabilidade planejado anteriormente. Da mesma forma, as metas de confiabilidade para cada novo sistema devem ser comparadas aos dados de confiabilidade dos sistemas atuais (DODSON, 1999; O'CONNOR,1995).

### **2.2.5 Preparação para a produção do produto**

Durante a preparação para produção, o produto é certificado com base nos resultados dos lotes piloto. Isso significa que os testes são feitos com produtos fabricados com peças oriundas da linha de produção. O objetivo da fase de preparação para a produção do produto é garantir que a empresa, assim como a cadeia de suprimentos, consiga atender aos volumes de produção definidos na declaração do escopo do projeto. Nesta fase, testa-se toda a estrutura produtiva da fábrica, onde o resultado é a montagem do produto final (SASKIA, 1998; ROZENFELD, 2006).

Em termos de confiabilidade, as projeções de garantia na forma de MTBF devem ao menos ser iguais às metas de garantia estipuladas para a introdução do produto. O atingimento dessa meta deveria ser parte do critério para lançamento do produto. Se as projeções de garantia não são atingidas, a postergação do projeto deveria ser considerada, com o consenso da gerência do projeto, considerando a situação econômica do negócio (DODSON, 1999; O'CONNOR,1995).

### **2.3 Garantia**

Produtos concorrentes disponíveis no mercado costumam apresentar características e funções similares, dificultando, assim, a escolha do produto a ser adquirido. Em algumas situações, fatores pós-venda, disponibilidade de peças e custo, serviço e manutenção são de grande importância na escolha do produto (MURTHY, 2006). Um importante elemento de pós-venda de um produto é a garantia oferecida ao cliente que compra o produto, que deve ser exaustivamente apresentada no momento da compra. Dessa forma, a garantia de um produto pode ser definida como um contrato

sobre o qual o fabricante de um produto ou fornecedor de um serviço garanta toda a assistência quando o produto falha ou o serviço não atende às expectativas do consumidor (ELSAYED, 1996; SANTOS, 2008).

Garantias são também utilizadas para indicar o desempenho e confiabilidade do produto. O desempenho do produto, em conjunto com os termos de garantia, determina os custos estabelecidos pelo fabricante, ou seja, um longo período de garantia vai resultar em maiores custos, a menos que o desempenho do produto seja correspondente à qualidade superior. Dessa forma, se um fabricante oferece maior garantia do que um concorrente, a confiabilidade do produto deve ser maior para reduzir os custos associados com utilizações da garantia (MURTHY, 2006).

A garantia pode ser vista sob três pontos de vista: (i) do comprador, (ii) do produtor e (iii) do legislador (MURTHY, 2006; MURTHY e DJAMALUDIN, 2002). Do ponto de vista do comprador, a garantia desempenha o papel protecionista, pois garante ao comprador a troca ou reparo do componente ou sistema que venha a falhar durante período anterior ao estabelecido pelo fabricante. Do ponto de vista do fabricante, a garantia estabelece as condições de uso do produto, de acordo com o que foi homologado pela equipe de desenvolvimento, permitindo cobertura limitada dos pedidos de garantia, em caso de utilização incorreta do produto. Sob o ponto de vista do legislador, a garantia é utilizada para definição de condições de contorno e responsabilidades. Pelo fato de proteger tanto o fabricante quanto o consumidor, torna-se necessária a determinação de limites e responsabilidades entre as partes envolvidas (TAVARES e FOGLIATTO, 2008).

### **2.3.1 Relação de garantia e outras áreas da empresa**

Kotler (2006) afirma que as garantias reduzem o risco percebido pelo comprador, sugerindo que o produto é de alta qualidade e que a empresa é confiável. A garantia de produtos tem sido utilizada pelas empresas, não apenas como uma ferramenta de *marketing*, mas também como um meio de definir, cultivar e manter a qualidade em toda a organização. O mesmo autor afirma também que as garantias são mais eficazes em duas situações. A primeira é quando a empresa ou o produto não é conhecido e a segunda é quando a qualidade do produto é superior à da concorrência.

As decisões sobre aplicação de garantia devem ser levadas em conta nos quatro estágios do ciclo de vida de um produto: (i) projeto e desenvolvimento, (ii) produção, (iii) comercialização e (iv) suporte de pós venda (TAVARES e FOGLIATTO, 2008).

As modificações para melhorar a confiabilidade de um produto são realizadas em nível de projeto. Nessa fase, as estratégias de garantia são inseridas nas estratégias técnicas e comerciais, em que o aumento da confiabilidade resulta em diminuição dos custos de garantia. Majeske (1997) sugere a utilização de itens já existentes, para diminuir a possibilidade de altos índices de garantia, visto que o produto já é homologado em aplicação similar.

A produção deve fazer com que as alterações propostas em projeto sejam implantadas na linha de montagem, sem que ocorra, contudo, a geração de itens não conformes com as especificações de projeto, evitando tais custos (MURTHY, 2006).

Como ferramenta de *marketing*, a garantia proporciona ao comprador um grau de segurança contra incertezas do processo de compra. A comercialização deve expor e apresentar o produto aos possíveis compradores e cabe ao suporte pós-venda a instalação do produto, serviços de garantia e manutenção, programas de treinamento e atualização de produtos, dentre outras formas de assistência ao cliente (TAVARES e FOGLIATTO, 2008).

### **2.3.2 Análise dos dados de garantia**

Um ponto de partida em estudos de confiabilidade é a existência de dados sobre o produto de interesse. Geralmente estes dados são coletados durante o período de garantia dos produtos. Estes dados mostram o desempenho em campo dos produtos comercializados. Analisa-se este tipo de dados: (i) na revisão ou na determinação precisa do período de garantia a ser oferecido ao produto tendo em vista um custo-alvo; (ii) em projetos de melhoria de produtos; (iii) para se estabelecer uma linha de base no desenvolvimento de novos produtos similares aos já existentes, baseando-se em dados de garantia (TAVARES e FOGLIATTO, 2008).

Os dados de garantia são obtidos de: (i) registros históricos, (ii) artigos e material científico, (iii) fornecedores, (iv) opinião de especialistas, (v) testes e resultados experimentais, (vi) manuais técnicos e científicos, (vii) pesquisas de mercado, (viii) utilização de serviço de garantia e suporte de campo, (ix) revistas e relatórios de consumidores e (x) desempenho de produtos similares que podem ser úteis na criação de

um produto (ELSAYED, 1996). Estes dados devem ser confiáveis, pois muitas decisões são tomadas a partir de sua análise.

Os dados de garantia são uma ótima fonte de informação sobre confiabilidade de produtos. Entretanto, dados de garantia possuem limitações que dificultam sua utilização, tais como (SANTOS, 2008):

- sistemas com muitos módulos podem penalizar os módulos que apresentam menos falhas, comparando-se com módulos que apresentam mais falhas, pois os dados são tratados de maneira igual entre os módulos, independente da incidência ou não de falhas;
- registros incompletos sobre falhas, assim como tempos inexatos de falhas tornam os dados de garantia não confiáveis;
- apresentação de reclamações inválidas, após o período de garantia, ou reclamações que são válidas mas não são apresentadas por desconhecimento dos termos de garantia, utilização indevida do produto ou reclamação quando não houve falha.

## **2.4 Falha**

Falha é um conceito fundamental em qualquer análise de confiabilidade. De acordo com normas, falha é definida como o final da habilidade de um item desempenhar as funções para o qual ele foi projetado (HOYLAND e HAUSAND, 2005). Em complemento a essa definição, as falhas podem ser classificadas sobre vários aspectos, tais como origem, extensão, velocidade, manifestação, criticidade ou idade, conforme ilustrado na figura 5. As características relacionadas a cada tipo de falha são mostradas na figura 6.

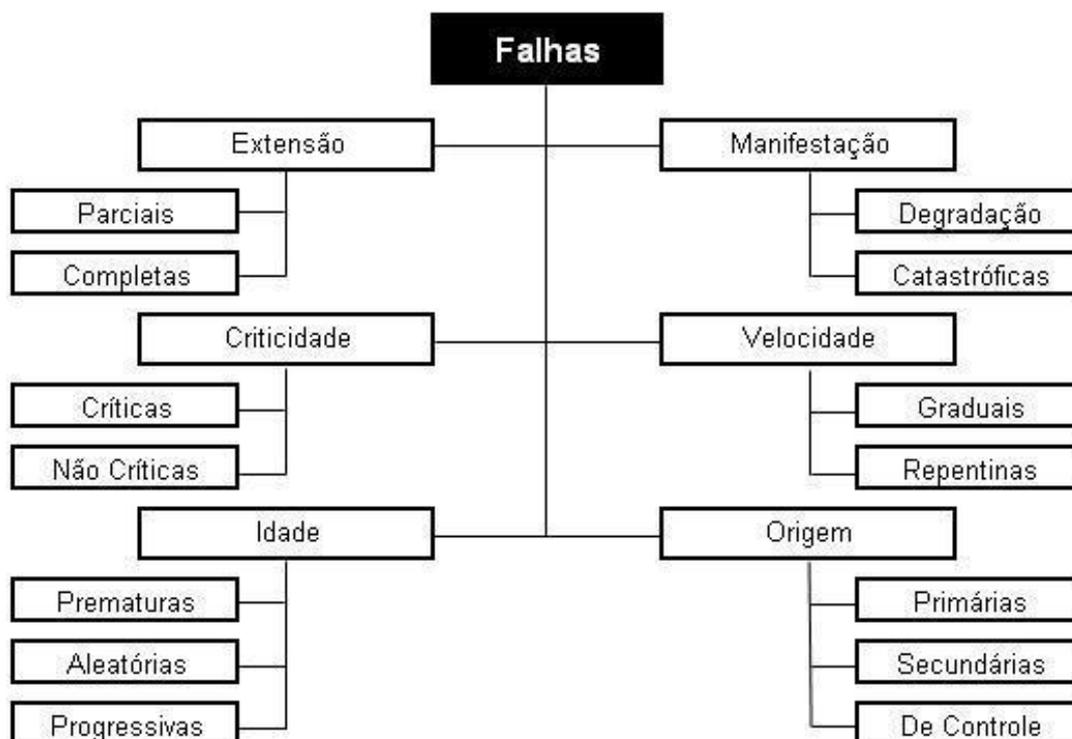


Figura 5 – Classificação das falhas

Fonte: Siqueira (2005)

Falha	Característica
Primária	Decorrente da deficiência do componente dentro do limite de operação
Secundária	Decorrente da deficiência do componente fora do limite de operação
Parciais	Desvio de característica funcional do item e sem perda total de sua funcionalidade
Completas	Ocorre a falta completa de uma função exigida do item
Graduais	Podem ser verificadas mediante inspeção
Repentinas	Não permitem inspeção.
Degradação	Ocorrem simultaneamente de forma gradual e parcial
Catastrófica	Ocorre de forma repentina e completa
Críticas	Produzem condições perigosas e inseguras ao usuário
Não-Críticas	Não produzem condições perigosas e inseguras ao usuário
Prematuras	Ocorrem na fase inicial da vida do item devido a defeitos de fabricação
Aleatórias	Ocorre de maneira imprevisível, durante o período de vida útil
Progressiva	Ocorrem após o final da vida útil em consequência do desgaste do item.

Figura 6: Característica dos tipos de falha

Fonte: Adaptado de Siqueira (2005)

A qualidade de uma análise de confiabilidade depende fortemente da habilidade do analista em identificar todas as funções requeridas do sistema, para poder antecipar todas as possíveis falhas do item em análise (HOYLAND e HAUSAND, , 2004). Informações que complementam essa análise subjetiva podem vir de fontes como histórico de falhas, estudos de FMEA, aplicações de componentes similares, relatos de operadores, experiência de projetistas e mantenedores. Como tarefa adicional à pesquisa das fontes de informações, há algumas regras práticas e critérios que podem auxiliar na identificação das falhas possíveis; por exemplo: lista das operações fora dos limites funcionais, distinção entre falhas com perda total da função e associação de cada falha a uma função definida. A falha deve estar sempre associada a um estado de incapacidade do item de desempenhar uma função específica, dentro dos limites desejados de desempenho. Dessa forma, a falha está associada a um estado do sistema ou equipamento, e não a um evento específico (SIQUEIRA, 2005).

Após a pesquisa e identificação das falhas possíveis de ocorrer em um sistema, deve-se identificar como elas ocorrem, ou seja, os modos de falha, que é a manifestação de uma falha vista de fora do ambiente, correspondendo ao término de uma ou mais das funções do item. Modos de falha podem ser definidos como: (i) um evento ou condição física que causa uma falha funcional ou (ii) um dos possíveis estados de falha de um item para uma dada função requerida (HOYLAND e HAUSAND, 2005; SIQUEIRA, 2005).

A causa da falha descreve a razão do modo de falha, ocorrendo por circunstâncias ocorridas no projeto, manufatura ou uso do item e que o tenham levado à falha. A causa da falha é informação chave para evitar a sua recorrência (HOYLAND e HAUSAND, 2005). Os efeitos de falha podem ser definidos como a propagação dos modos de falha e como estes influem nos objetivos e funcionalidade do sistema em análise. A finalidade do estudo dos efeitos das falhas é a de pesquisar os impactos dos modos de falha nas funções do sistema (SIQUEIRA, 2005).

## **2.5 Confiabilidade**

Uma das definições de confiabilidade é a de que ela é a probabilidade de um produto ou serviço operar corretamente durante um especificado período de tempo, sob condições de operação e sem apresentar falha. Dessa forma, a confiabilidade pode ser utilizada como uma medida de sucesso na operação de um sistema (ELSAYED, 1996).

Para O'Connor, (1995), a confiabilidade é o estudo sobre as falhas que podem ocorrer com o produto durante o seu ciclo de vida, não sendo apenas o cálculo da taxa de falha ou da probabilidade de falha de um componente ou sistema, mas o estudo, avaliação e correção das falhas que podem ocorrer com o produto, durante o seu ciclo de vida.

Um aspecto importante no estudo da confiabilidade é a durabilidade (FREITAS e COLOSIMO, 1997). Produtos menos confiáveis podem necessitar de intervenções mais frequentes para reparos, cujos gastos poderão anular a vantagem de um custo mais baixo de aquisição. Este aspecto possui relação direta com outro ponto importante do estudo de confiabilidade, que é a prevenção das falhas, citado por Ubiratan (2002) como sendo a principal aplicação de um estudo de confiabilidade.

### **2.5.1 Análise de Causa Raiz**

A análise de causa raiz é composta de uma sequência de passos que guia o investigador no processo de isolar os fatos que contornam um evento ou falha. Uma vez que o problema tenha sido totalmente definido, a análise sistematicamente determina o melhor curso de ação que resolverá o evento e assegurará que ele não se repetirá (MOBLEY, 1999). Essa análise é utilizada para investigar e categorizar as causas raízes de eventos envolvendo questões de segurança, saúde, meio ambiente, qualidade, confiabilidade e com impactos em produção (ROONEY e HEUDEL, 2004).

A análise de causa raiz objetiva auxiliar a identificar não somente o que e como um evento ocorreu, mas também porque ocorreu. Somente quando o investigador é capaz de determinar o porquê de um evento, ele será capaz de especificar ações corretivas para prevenir futuras ocorrências. O entendimento da razão de ocorrência dos eventos é a chave para o desenvolvimento de ações efetivas de prevenção. Causas raízes podem ser definidas como: (i) causas mais importantes da falha; (ii) aquelas que são razoavelmente identificáveis; (iii) aquelas sobre as quais a gerência possui controle; ou (iv) aquelas para as quais recomendações de solução podem ser geradas (ROONEY e HEUDEL, 2004).

A meta do investigador deveria ser identificar as causas mais importantes da falha. Quanto mais específico o investigador pode ser sobre o porquê de um evento ocorrer, mais fácil será chegar às recomendações que prevenirão recorrências. As causas raízes devem ser também razoavelmente identificáveis, ou seja, deve haver uma relação custo-benefício na análise, pois não é prático que o investigador fique indefinidamente

procurando pela causa raiz da ocorrência (ROONEY e HEUDEL, 2004; MOBLEY, 1999).

As causas raízes devem ser controláveis pela gerência da fábrica. A equipe deve investigar a geração de classificações gerais para as causas de falha, tais como erro dos operadores, falha do equipamento ou fatores externos. Causas raízes devem ser tais que permitam a geração de ações corretivas para solução das falhas. As recomendações deveriam endereçar diretamente às causas raízes identificadas durante a investigação. Em complemento à definição anterior, se a equipe investigadora chegar a conclusões vagas sobre a causa da falha, tais como melhorar advertências sobre a utilização do equipamento, então provavelmente a causa da falha não foi corretamente determinada (ROONEY e HEUDEL, 2004). Mobley (1999) sugere os passos apresentados na figura 7 para o processo de análise de causa raiz.

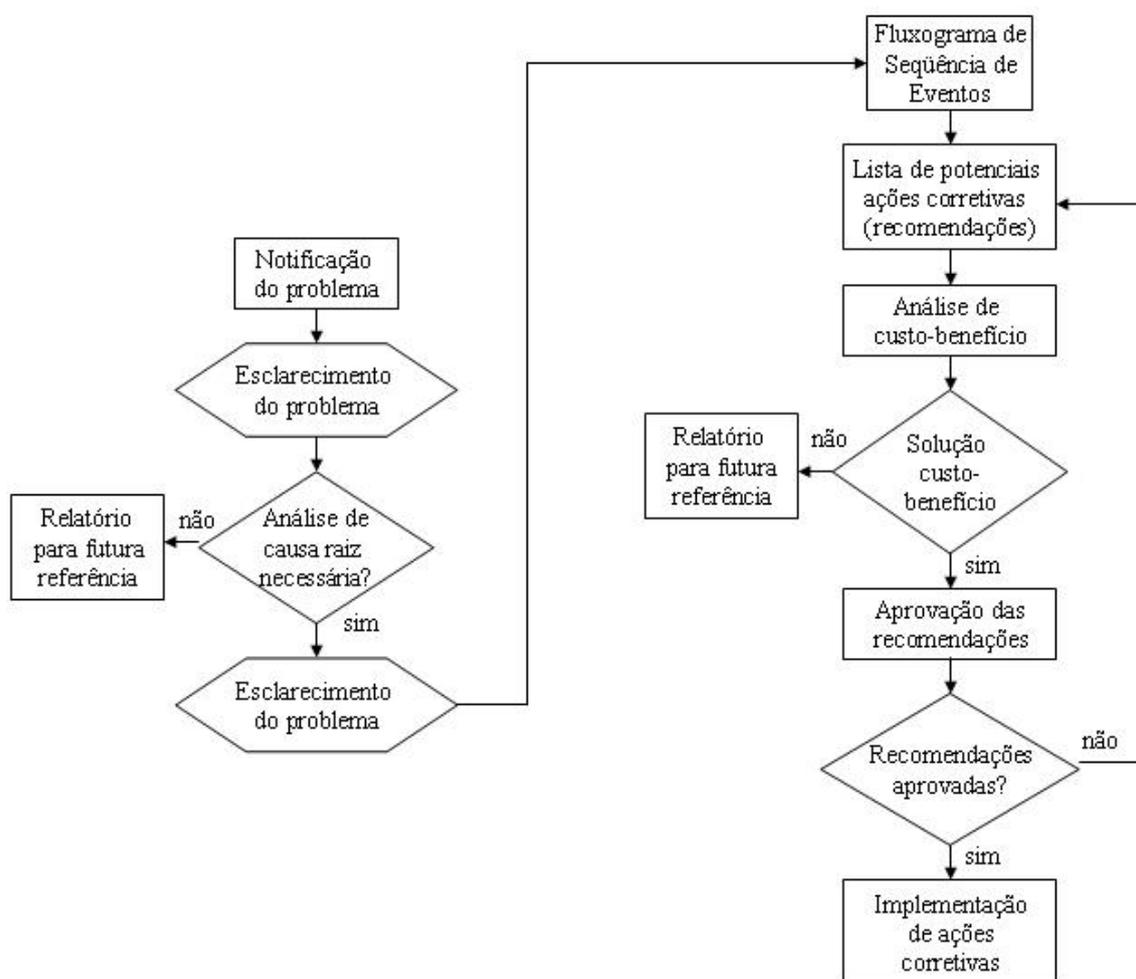


Figura 7 – Etapas do processo de Análise de Causa Raiz

Fonte: Mobley (1999)

A primeira etapa da análise de causa raiz deve ser a obtenção de uma clara definição do problema potencial ou evento. Quando ocorre uma falha, raramente o investigador está presente. Entretanto, o primeiro passo é a notificação inicial de que um incidente ou problema ocorreu (MOBLEY, 1999; VOLLERT, 1996).

Uma etapa efetiva na definição do evento ou problema é determinar seus reais sintomas e estabelecer os limites de contorno do evento. Nesse estágio da investigação, a tarefa pode ser cumprida através de uma entrevista com a pessoa que avistou primeiramente o problema. Após a definição do evento ou problema, os esforços da equipe investigadora devem ser voltados para a coleta de dados que resultem na solução da falha encontrada. A coleta de dados deveria clarificar o problema ou evento reportado. Esta fase da avaliação inclui entrevistas com o pessoal adequado, coletando evidências físicas do problema e estabelecendo as condições de contorno do incidente, devendo-se conduzir também outras pesquisas, tais como a realização da análise de sequência de eventos, que é necessária para um melhor entendimento do problema (MOBLEY, 1999).

A primeira prioridade durante a investigação de um evento envolvendo falha ou dano de um equipamento é a preservação das evidências físicas. O local onde ocorreu a falha deveria ser completamente fotografado e documentado antes da máquina ser removida de sua instalação. Fotografias, desenhos e a instrumentação e parâmetros de controle deveriam ser completamente documentados para assegurar que todos os arquivos estejam preservados para a equipe de investigação. Além disso, a inspeção de um componente para o qual se verificou uma falha pode ser uma ferramenta diagnóstica muito efetiva. Em muitos casos, a inspeção visual fornece pistas que direcionam o investigador para o provável modo de falha ou causa raiz (MOBLEY, 1999; CROW, 1994).

Após o levantamento de informações relacionadas à falha do componente ou sistema, bem como do levantamento das evidências que possam levar à identificação das causas da falha, a análise de sequência de eventos do funcionamento do sistema deve ser realizada. Realiza-se essa análise plotando-se graficamente as ações que levam ao próximo evento, acidente ou falha, para visualizar o que aconteceu. É importante usar um diagrama desde o início da investigação. Isto não auxilia somente na organização da informação, mas também na identificação de dados faltantes ou conflitantes, mostrando a relação entre eventos e incidentes e destacando as potenciais

causas do incidente. A figura 8 apresenta a simbologia utilizada na análise de sequência de eventos proposta por Mobley (1999).

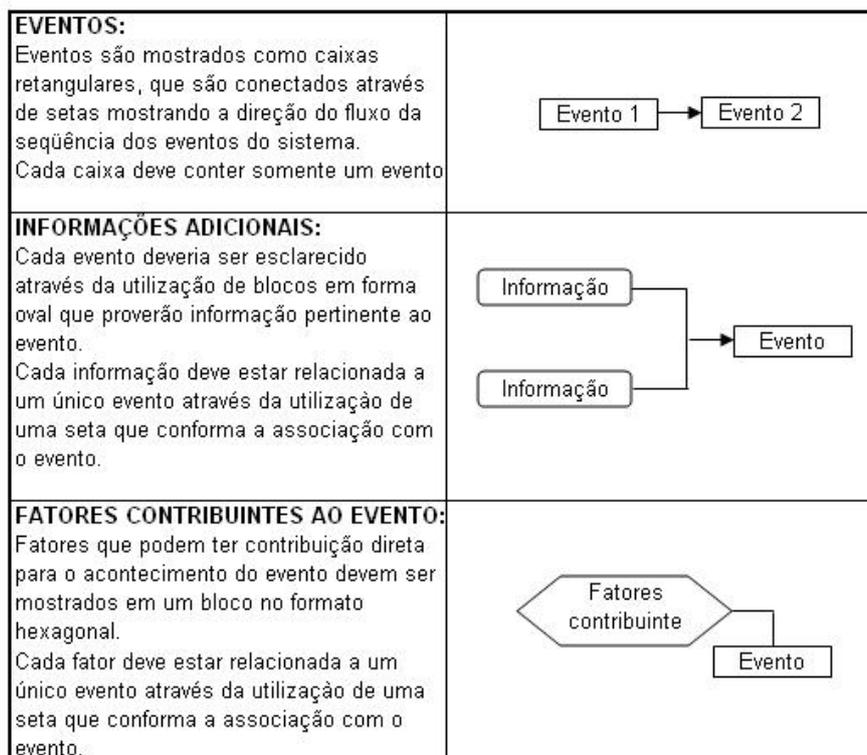


Figura 8 – Simbologia utilizada na Análise de Sequência de Eventos

Fonte: Mobley (1999)

A análise de sequência de eventos ajuda o investigador a organizar a informação coletada, identificando informações conflitantes, melhorando seu entendimento através da organização dos eventos em sua ordem cronológica, destacando as causas potenciais de falha do incidente. O diagrama de sequência de eventos deve ser um documento dinâmico gerado logo após o relato do problema e deve ser continuamente modificado até a completa resolução do evento. A utilização desse diagrama requer a descrição do evento em ordem lógica, descrevendo eventos em termos ativos ao invés de passivos, e qualificando cada evento ou fatores contribuintes ao evento (MOBLEY, 1999; SAKURADA, 2001).

Como resultado da análise de causa raiz, a equipe passa a possuir maior compreensão sobre a falha e a desenvolver uma lista de potenciais ou prováveis razões para a falha. Dessa forma, é possível definir uma ou mais potenciais ações corretivas para resolver o incidente ou evento durante a investigação. O próximo passo na análise é garantir a adoção prática das ações corretivas. A análise de custo-benefício da ação

proposta também deve ser realizada para futura adoção em linha de produção (ROONEY e HEUDEL, 2004).

### 2.5.2 FMEA

Para assegurar boa qualidade de produto, um sistema de qualidade eficiente deve ser estabelecido nos primeiros estágios de desenvolvimento de produto. Mediante ocorrência de problema de confiabilidade no produto, os engenheiros devem examinar dois aspectos. Primeiro, se o projeto do produto está adequado, pois o mesmo pode não atender aos requisitos de confiabilidade do cliente. Segundo, as possíveis falhas nas operações de manufatura. Neste caso, a confiabilidade do sistema deve ser avaliada e melhorada, e o controle de qualidade deve ser realizado em nível satisfatório (TENG e HO, 1996).

Para cobrir tanto projeto quanto produção, utiliza-se a FMEA, traduzida para português como “Análise de Modos e Efeitos de Falhas”. Trata-se de um método para examinar o projeto proposto, de maneira que os modos de falha em potencial sejam verificados (BEN-DAYA e RAOUF, 1996).

A FMEA deve ser aplicada durante o desenvolvimento de produto nos estágios do PDP. Os objetivos da FMEA são prevenir falhas inaceitáveis sob o ponto de vista do consumidor, bem como suportar a gerência da empresa na melhor utilização dos recursos através da determinação da criticidade dos problemas (BEN-DAYA e RAOUF, 1996).

A equipe que executa a FMEA é composta por pessoas que possuem conhecimento sobre o produto em análise. Além das engenharias de produto e processo, a equipe da FMEA deve incluir responsáveis pelo suporte ao cliente, confiabilidade e suprimentos, de modo a identificar as potenciais falhas de qualidade e confiabilidade no processo de projeto (TENG e HO, 1996).

Existem dois tipos de FMEA: de produto (projeto) e de processo. Na FMEA de produto, identifica-se cada componente do sistema e seus possíveis modos de falha e efeitos no sistema como um todo. Já a FMEA de processo é utilizada para analisar projetos de processo (FREITAS e COLOSIMO, 1997).

O objetivo de uma FMEA é identificar todos os modos de falha em potencial em um projeto e todas as probabilidades de falhas catastróficas e críticas, de tal maneira que elas possam ser eliminadas ou minimizadas através da correção do projeto, o mais cedo

possível. Nesse procedimento de análise, identifica-se também os testes necessários e meios requeridos para certificar um projeto, além de documentar todas as suas revisões. A FMEA deve ser iniciada tão logo que se disponha de informação preliminar sobre o projeto, relacionada aos componentes ou etapas de um processo (FREITAS e COLOSIMO, 1997; LAFRAIA, 2008).

Há três estágios considerados críticos para garantir o sucesso da FMEA. O primeiro é determinar os potenciais modos de falha. O segundo é obter dados para classificação de ocorrência, detecção e severidade dos potenciais modos de falha. O terceiro é a modificação do produto ou processo atual e o desenvolvimento do controle de processo baseado no relatório de FMEA (TENG e HO, 1996).

A FMEA tem como ponto de partida a definição precisa da função do componente ou processo, relacionando os modos de falha com os efeitos, as causas do tipo de falha, os riscos de ocorrerem falhas e os mecanismos atuais para prevenção da ocorrência. Finalmente, a aplicação da FMEA pressupõe que, na análise de cada modo de falha em potencial, todas as demais características estão conforme especificação de projeto. Por consequência, a FMEA restringe-se à consideração de falhas no produto ou processo, não fornecendo elementos para a quantificação da confiabilidade do item (LAFRAIA, 2008). A figura 9 ilustra o procedimento de realização da FMEA.

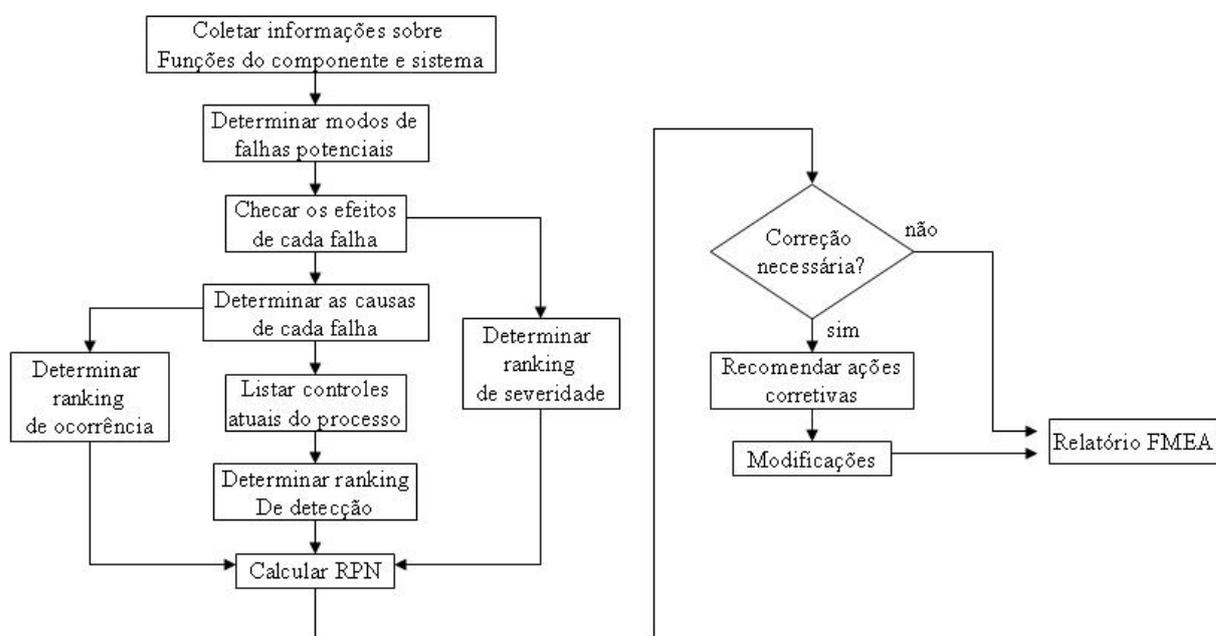


Figura 9 – Procedimento da FMEA

Fonte: Teng & Ho (1997)

Na figura 10 pode-se verificar um formulário típico para realização da FMEA. Nos campos 1 a 5, a FMEA é identificada e classificada e é informado o item em análise e função operacional considerada. Nos campos 6 a 9 listam-se informações referentes à falha tais como: modo de ocorrência, efeito, meios de detecção e medidas de controle. Os campos 10 a 12 trazem o resultado da análise do modo de falha relativamente a três indicadores: probabilidade de ocorrência, severidade e facilidade de detecção. Na análise dos indicadores utilizam-se as escalas da figura 11.

### FMEA - Análise de Modos de Falha e Efeitos

Sistemas: \_\_\_\_\_ Participantes: \_\_\_\_\_ Produto/Processo:   1    
 Subsistema \_\_\_\_\_ Data:   /  /   Folha:   /  /   Dados de Registro:   2  

Item	Componente Processo	Funções	Modo de Falha	Efeito(s) de Falha	Severidade	Causas	Ocorrência	Meios de detecção	Detecção	RPN	Ações Corretivas/ Preventivas
Campo 3	Campo 4	Campo 5	Campo 6	Campo 7	Campo 11	Campo 8	Campo 10	Campo 9	Campo 12	Campo 13	Campo 14

Figura 10 – Formulário típico para realização da FMEA

Fonte: Lafraia, 2008

<b>Tabela de Probabilidade de Ocorrência</b>		
<i>Probabilidade de Falha</i>	<i>Ranking</i>	<i>Taxa de Falhas</i>
Baixa: A falha é improvável	1	< 1 em 10e <sup>6</sup>
Baixa: Relativamente poucas falhas	2	1 em 20.000
	3	1 em 4.000
Moderada: Falhas ocasionais	4	1 em 1.000
	5	1 em 400
	6	1 em 80
Alta: Falhas repetitivas	7	1 em 40
	8	1 em 20
Muito Alta: Falhas quase que inevitáveis	9	1 em 8
	10	1 em 2

<b>Tabela de Severidade</b>	
<i>Severidade das Consequências</i>	<i>Ranking</i>
<i>Marginal</i> : A falha não teria efeito real no sistema. O cliente provavelmente nem notaria a falha.	1
<i>Baixa</i> : A falha causa apenas pequenos transtornos ao cliente. O cliente notará provavelmente leves variações no desempenho do sistema.	2
	3
<i>Moderada</i> : A falha ocasiona razoável insatisfação do cliente. O cliente ficará desconfortável e irritado com a falha. O cliente notará razoável deterioração no desempenho do sistema.	4
	5
	6
<i>Alta</i> : Alto grau de insatisfação do cliente. O sistema se torna inoperável. A falha não envolve riscos à segurança operacional ou o descumprimento de requisitos legais.	7
	8
<i>Muito Alta</i> : A falha envolve riscos à operação segura do sistema e/ou descumprimento de requisitos legais	9
	10

<b>Tabela de Probabilidade de Detecção</b>	
<i>Probabilidade de Detecção</i>	<i>Ranking</i>
Muito Alta: A falha será certamente detectada durante o processo de projeto/fabricação/montagem/operação	1
	2
<i>Alta</i> : Boa chance de determinar a falha	3
	4
<i>Moderada</i> : 50% de chance de determinar a falha	5
	6
Baixa: Não é provável que a falha seja detectável	7
	8
Muito Baixa: A falha é muito improvavelmente detectável	9
Absolutamente indetectável: A falha não será detectada com certeza	10

Figura 11 – Rankings da FMEA

Fonte: Lafraia, 2008

Os riscos da FMEA podem ser quantificados através do cálculo do RPN (*Risk Priority Number* – Número de Prioridade de Risco). O RPN é dado pela multiplicação dos indicadores de ocorrência, detecção e severidade, sendo o resultado informado no campo 13 da figura 9. As falhas com maior índice de risco devem ser tratadas prioritariamente, e, sobre elas deve ser feito um plano de ação para o estabelecimento de contramedidas. Na FMEA são informadas também ações preventivas recomendadas para prevenção das falhas. Dentre essas ações podem estar incluídas maneiras para reduzir a severidade do risco para prevenir e detectar o risco, sendo estas informações incluídas no campo 14. Para finalizar o preenchimento do formulário FMEA, anotam-se as ações preventivas efetivamente adotadas e aplicadas no campo 15 (LAFRAIA 2008; SIQUEIRA 2005).

A FMEA é provavelmente uma das ferramentas de análise da confiabilidade de projeto mais difundida e utilizada. Sua utilização como ferramenta de apoio à tomada de decisões é dependente de dois fatores: (i) da qualidade das informações utilizadas para sua confecção e (ii) da eficácia com a qual o conhecimento gerado a respeito de um problema é comunicado logo no início do projeto; possibilitando, assim, que as ações corretivas ou preventivas sugeridas possam ser analisadas e implantadas (FREITAS & COLOSIMO, 1997).

Em muitas aplicações da FMEA, ela é terminada tão logo o relatório da FMEA é gerado. Para algumas empresas, a FMEA é realizada apenas para atender requisitos de um fornecedor. Sendo feita apenas para esse propósito, tais empresas estão desperdiçando tempo e recurso. Como o principal propósito da análise FMEA é melhorar a qualidade e confiabilidade do produto ou processo, a FMEA deve ir além da documentação, chegando à implantação das ações levantadas (TENG e HO, 1996).

Problemas associados à implantação da FMEA incluem o tempo total do processo durante as fases de projeto, o estabelecimento de uma equipe bem treinada e balanceada e a coordenação de departamentos na geração do relatório da FMEA. De maneira similar ao processo de engenharia simultânea, o objetivo da FMEA é diminuir o tempo de desenvolvimento de um produto ou processo (TENG e HO, 1996).

A confiabilidade deve ser um dos grandes objetivos da fase de projeto, e é nesta fase que os esforços devem ser concentrados. A cooperação mútua entre departamentos deve ser um dos pilares para o sucesso do processo de FMEA. Os relatórios da FMEA são de extrema importância para os times de engenharia simultânea (TENG e HO, 1996; VOLLERT, 1996).

Uma boa utilização da FMEA pode resultar em benefícios à companhia, como confiabilidade alta dos produtos, menores alterações no projeto, melhor planejamento de qualidade, melhoria contínua no projeto do produto e processo e menores custos de manufatura (TENG e HO, 1996).

### **2.5.3 Ensaio acelerados**

A confiabilidade de um produto contribui de maneira expressiva para a competitividade de uma empresa. Os departamentos de pesquisa e desenvolvimento das empresas concentram esforços determinando a confiabilidade dos produtos, tanto para novos produtos quanto para aqueles já em produção. Nesses estudos de confiabilidade em produtos, identificam-se as causas de falha de determinado componente ou conjunto, fazendo-se estudos de conceitos de projeto, matérias-primas e métodos de manufatura, para que se obtenham os dados que retratem a situação atual do produto avaliado. Após a determinação da proposta de projeto para melhorar a confiabilidade de um determinado produto, faz-se necessária a validação da mesma antes de sua implantação na linha de produção, evitando que algum problema com o produto seja identificado pelo cliente (NELSON, 2004).

O desenvolvimento de produtos com alta confiabilidade em prazos curtos tem incentivado o uso de experimentos planejados. O uso de experimentos vem de encontro às modernas filosofias de produção de produtos com alta confiabilidade, que é a de alcançar alta confiabilidade melhorando o projeto e o processo de manufatura, não utilizando tempo e recurso em inspeções ou exames minuciosos que prolongam o tempo total de desenvolvimento (ESCOBAR e MEEKER, 2006).

Em sua grande maioria, os produtos possuem vida longa e demandam um tempo longo em testes para validação, fato que pode inviabilizar os testes nas condições de aplicação recomendada para o produto. No entanto, muitos produtos podem ser testados em condições mais severas de aplicação, para que as falhas ocorram em um intervalo de tempo menor (NELSON, 2004). Testes em condições mais severas de aplicação são testes acelerados (FREITAS e COLOSIMO, 1997).

A finalidade de testes acelerados é a de obter informações sobre confiabilidade de maneira mais rápida. Componentes, subsistemas ou sistemas inteiros são submetidos a um nível acima do normal de uma ou mais variáveis, tais como tensão e temperatura. Os resultados dos testes são utilizados para previsão da vida de tais unidades nas condições

normais de uso (ESCOBAR e MEEKER, 2006). No entanto, para validar tal informação necessita-se conhecer a relação entre o mecanismo causador das falhas e as condições ambientais, representadas por uma ou mais variáveis de estresse (FOGLIATTO, 2008).

A teoria de testes acelerados envolve conceitos como falha e tipos de censura, assim como conceitos específicos para este tipo de teste. De acordo com os tipos de dados coletados nos testes, estes podem ser classificados em: (i) testes de vida acelerado, cujo dado é o tempo-até-falha, que pode ser completo ou censurado, dependendo da natureza e das limitações do teste; (ii) teste de degradação acelerado, quando a resposta é alguma medida de desempenho do produto ou componente, tais como resistência à tração ou oxidação, medidas ao longo do tempo (FOGLIATTO, 2008; FREITAS e COLOSIMO, 1997).

Em todos os testes descritos acima, os dados são gerados porque as unidades de teste são submetidas a esforços em níveis diferentes daqueles considerados em condições normais de uso, de forma a diminuir o tempo-até-falha. Tais esforços são denominados variáveis de estresse (FREITAS e COLOSIMO, 1997).

O termo “teste acelerado” é utilizado para descrever dois tipos importantes de testes, que possuem propósitos diferentes (ESCOBAR e MEEKER, 2006): os testes acelerados quantitativos (*QuanAT*) e os testes acelerados qualitativos (*QualAT*).

Em testes acelerados quantitativos unidades são expostas a combinações de carregamentos mais altos que os usuais para certas variáveis de estresse. O objetivo deste tipo de teste é obter informações sobre distribuições de tempo de falha ou de degradação. Geralmente, sabe-se a relação entre o mecanismo de falha e a variável de estresse, que pode ser utilizado para extrapolação dos resultados para aplicações normais de estresse (ESCOBAR e MEEKER, 2006).

Por sua vez, em testes acelerados qualitativos unidades são submetidas a carregamentos variáveis cíclicos de temperatura, vibração ou tensão. O objetivo destes testes específicos é identificar pontos falhos dos produtos, geralmente causados por defeitos no projeto do produto ou no processo de manufatura. Quando há uma falha no teste acelerado qualitativo, é necessário encontrar a causa raiz desta falha e verificar se há alguma relação com uma eventual falha em condições normais de operação (NELSON, 2004).

## Formas de aceleração de um teste

De maneira geral, acelera-se um teste escolhendo níveis para as variáveis de estresse mais altos do que aqueles ao qual o produto é submetido em condições normais de uso (FREITAS e COLOSIMO, 1997). As formas de aceleração são divididas de acordo com os tipos de variáveis de estresse.

- Aceleração por taxa de uso

Uma maneira simples de acelerar a vida de produtos é submetê-los a uma taxa de uso mais severa. Isso pode ser obtido de duas maneiras (NELSON, 2004): *(i)* utiliza-se o produto em velocidades mais altas ou *(ii)* utiliza-se o produto continuamente.

O propósito desse tipo de teste é estimar a vida do produto em condições normais de operação. No entanto, testes com alta taxa de uso normalmente aumentam a temperatura do produto e este aumento pode causar um novo modo de falha. Nesta situação específica, um resfriador deveria ser utilizado para manter a temperatura nos níveis encontrados em operação. Dessa forma, para assegurar que os modos de falha encontrados no teste acelerado sejam os mesmos que os encontrados em testes normais, os testes devem ser planejados cuidadosamente (NELSON, 2004).

- Aceleração por altos níveis de estresse

Este tipo de teste consiste em testar o produto a níveis mais altos das variáveis de estresse para diminuir a vida do mesmo ou degradar o desempenho dele de maneira mais rápida. As variáveis de estresse podem ser temperaturas, voltagem, cargas mecânicas, ciclo térmico, umidade e vibração (FOGLIATTO, 2008). A figura 12 mostra algumas medidas de desempenho e variáveis de estresse para alguns produtos.

<i>Produtos</i>		
Tipo	Medida de Desempenho	Variável de Estresse
Semicondutores e componentes microeletrônicos	Tempo até a falha e características de operação	Temperatura; corrente; voltagem; umidade; pressão
Capacitores	Tempo até a falha	Temperatura; voltagem; vibração
Resistores	Tempo até a falha	Temperatura; voltagem; vibração
Contatos elétricos	Tempo até falha; corrosão	Temperatura; umidade; corrente
Lâmpadas	Tempo até falha; eficiência; luminosidade	Voltagem; temperatura; choque (elétrico ou mecânico)

Figura 12 - Exemplo de produtos, medidas de desempenho e variáveis de estresse

Fonte: Nelson, 2004

### **Objetivos do ensaio**

A primeira etapa de um ensaio acelerado deve ser a determinação dos objetivos do ensaio. Segundo Nelson (2004), os objetivos usuais são:

- obter medidas de confiabilidade: avaliar se um projeto deve ser liberado para fabricação ou se um produto deve ser liberado para um cliente; estimar custos de garantia e serviço, taxas de falha, tempo médio até a falha (*MTTF*);
- identificar falhas de projeto: eliminar ou reduzir falhas através de redundâncias, melhorias no projeto dos componentes;
- identificar defeitos de manufatura: eliminar os defeitos através de melhoria no processo de manufatura; estimar a melhoria da confiabilidade através da eliminação ou redução de certos modos de falha;
- controle da qualidade: monitorar a confiabilidade do produto e executar ações corretivas conforme necessário; por exemplo, quando um novo modo de falha aparece ou o desempenho se degrada.

Um teste acelerado pode cumprir a um ou mais desses objetivos, relacionados a projeto, fabricação, marketing e serviço de assistência técnica. Para todos os casos, os objetivos do teste devem ser determinados de maneira clara antes de se realizar o teste,

uma vez que ele determinará os procedimentos a serem seguidos durante o planejamento e sua execução.

### **Planejamento do ensaio**

A precisão e validação das informações oriundas de um ensaio acelerado são impactadas por aspectos que devem ser levados em conta quando se planeja o teste. No planejamento deve-se ponderar entre aspectos práticos e condições ótimas determinadas com base em critérios estatísticos. Deve-se encontrar um equilíbrio entre os recursos disponíveis e os requisitos necessários para a realização dos ensaios (NELSON, 2004).

Os ensaios de vida acelerados são compostos por uma série de elementos. Tais elementos devem ser especificados de maneira adequada, para que o experimento obtenha sucesso, ou seja, para um custo e duração de teste fixado, gerando o máximo de informação sobre o produto sob teste ou, para uma quantidade de informação especificada, menor tempo de duração e custo do teste (FREITAS e COLOSIMO, 1997).

#### **2.5.4 Análise de confiabilidade**

A análise de confiabilidade requer o estudo das estimativas de confiabilidade, em que as principais funções utilizadas para análise de confiabilidade de um produto são: (i) a função confiabilidade  $R(t)$ ; (ii) a função de risco  $h(t)$ ; (iii) o tempo médio até a falha,  $MTTF$  (*Mean Time to Failure*), para sistemas não-reparáveis; e (iv)  $MTBF$  (*Mean Time Between Failures*) para sistemas reparáveis (ELSAYED, 1996).

O estudo matemático dos mecanismos de falha é iniciado pela modelagem da variação temporal da probabilidade de falha do item por unidade de tempo, sendo representada pela função de distribuição de probabilidade dada por (SIQUEIRA, 2005):

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1)$$

em que  $f(t)$  é a função de densidade de probabilidade de falha, e  $F(t)$  é a distribuição de probabilidade acumulada de falhas a partir de um determinado instante. Na expressão (1), a variável  $t$  pode ser substituída por qualquer outra variável que reflita o ciclo

operacional da função e que esteja relacionada à ocorrência de falhas, tal como operações e ciclos.

A partir do conhecimento da  $f(t)$ , é possível determinar a confiabilidade de um item, definida como a função acumulada de sucesso na operação do item até o tempo  $t$ , dada pela equação (2), (ELSAYED, 1996):

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

Outra função de interesse na caracterização de um item é a função de risco  $h(t)$ , definida pela equação (3) (ELSAYED, 1996):

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{d \log R(t)}{dt} \quad (3)$$

A função de risco caracteriza a taxa de incidência de falhas no item ao longo de sua vida operacional. Diferentes mecanismos de falha provocam diferentes comportamentos dos itens ao longo da vida útil, os quais podem ser analisados através do comportamento da função de risco.

Outras estimativas de confiabilidade muito difundidas são utilizadas como forma de quantificar a confiabilidade de um sistema, e são conhecidas como Tempo Médio até a Falha (*MTTF*) para sistemas não reparáveis e Tempo Médio entre Falhas (*MTBF*) para sistemas reparáveis.

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

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (4)$$

### **Distribuições de tempos-até-falha (Modelos de confiabilidade)**

Estudos de confiabilidade implicam em uma modelagem estatística de dados de tempos-até-falha. Quatro distribuições de probabilidade são frequentemente utilizadas para descrever os tempos-de-falha: (i) exponencial, (ii) weibull, (iii) gama, e (iv)

lognormal. As representações apresentadas para as distribuições são as mais comumente usadas em estudos de confiabilidade: função de densidade  $f(t)$ , função de confiabilidade  $R(t)$ , função de risco  $h(t)$  e tempo-médio-até-falha  $MTTF$  (FOGLIATTO, 2008).

A figura 13 traz um resumo das principais representações de confiabilidade associadas às distribuições listadas acima. Para um detalhamento sobre essas distribuições em estudos de confiabilidade, bem como exemplos de aplicação, recomendam-se os trabalhos de Fogliatto e Ribeiro (2009) e Hoyland e Hausand (2005).

Modelos	$h(t)$	$f(t)$	$R(t)$	$MTTF$
Exponencial	$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda$	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	$R(t) = e^{-\lambda t}$	$MTTF = \frac{1}{\lambda}$
Weibull	$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \alpha \lambda^\alpha t^{\alpha-1}$	$f(t) = \alpha \lambda^\alpha t^{\alpha-1} e^{-(\lambda t)^\alpha}$	$R(t) = e^{-(\lambda t)^\alpha}$	$MTTF = \frac{1}{\lambda} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)$
Gama	$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{\lambda}{\Gamma(k)} (\lambda t)^{k-1} e^{-\lambda t}}{\sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}}$	$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(k)} (\lambda t)^{k-1} e^{-\lambda t}$	$R(t) = \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}$	$MTTF = \frac{k}{\lambda}$
Log-normal	$h(t) = \frac{\phi\left[\frac{(\mu - \ln t)/\sigma}{\sigma}\right]}{\phi\left[\frac{(\mu - \ln t)/\sigma}{\sigma}\right]}$	$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{(\ln t - \mu)}{\sigma}\right]^2\right\}$	$R(t) = \Phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right)$	$MTTF = e^{\frac{(\mu + \sigma^2)}{2}}$

Figura 13 – Quadro das distribuições de probabilidade

Fonte: Elsayed

Duas formas de verificação de ajuste de dados a distribuições de probabilidade são comumente utilizadas: (i) gráfica, por meio de histogramas de frequência e papel de probabilidade e (ii) analítica, através de testes de aderência.

O ajuste gráfico é operacionalizado através da análise dos histogramas de frequência e de risco dos dados empíricos. Os histogramas são comparados com distribuições conhecidas para verificar similaridade; se esta for confirmada, a análise deve ser refinada através da utilização do papel de probabilidade da distribuição hipotetizada. Esse procedimento transforma a função acumulada da distribuição em um gráfico linear. Quanto mais próximos os dados transformados estiverem da reta que representa a distribuição, melhor será o seu ajuste à distribuição hipotetizada (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

Os testes analíticos de aderência mais utilizados são o do Qui-Quadrado e o de Kolmogorov-Smirnov. Ambos os testes apresentam a estrutura de um teste de hipóteses, em que a hipótese nula ( $H_0$ ) é de que os dados seguem uma determinada distribuição

hipotetizada. No teste do Qui-Quadrado, comparam-se os dados de densidade de probabilidade de falhas observados com os valores esperados para a distribuição em análise. O teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) trabalha com frequências acumuladas ao invés de frequências absolutas, utilizando melhor a informação contida na amostra. O KS é um teste não-paramétrico, de uso mais adequado no caso de poucos dados amostrais disponíveis (O'CONNOR,1995).

## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGIA DE TRABALHO**

A finalidade deste trabalho é estimar a melhoria da confiabilidade de subsistemas através de análise de falhas e testes acelerados. Inicia-se com o estudo de uma situação de baixa confiabilidade de componentes ou sistemas enfrentada por uma empresa, investigando-se os respectivos modos de falha e geração de propostas para solução desses modos de falha. A etapa seguinte da metodologia consiste em testes de validação do sistema, para que medidas de confiabilidade possam ser obtidas.

Esta metodologia foi desenvolvida a partir de um estudo de caso, podendo, entretanto, ser aplicada a outros componentes, visto que as etapas que a compõem são genéricas. A aplicação da metodologia requer a participação de pessoas com conhecimento técnico sobre o sistema de estudo, bem como uma equipe multi-departamental para apoiar as atividades relacionadas à confiabilidade previstas na metodologia PDP.

A metodologia divide-se em duas etapas: a primeira consiste em uma análise da situação atual, em que se verifica o comportamento do sistema de interesse nas condições atuais de aplicação. O levantamento de custos e falhas relacionados aos componentes do sistema é realizado através do estudo dos dados de garantia. Para determinação de soluções para os modos de falha da configuração atual, realiza-se a análise de causa raiz (ACR); as informações de saída da ACR são utilizadas como informações de entrada na FMEA.

A segunda etapa está relacionada à obtenção de medidas de confiabilidade para as configurações atual e proposta, através da realização de ensaios em bancada, e posterior análise de confiabilidade dos dados de tempo-até-falha obtidos nestes ensaios.

Este capítulo está dividido nas seguintes etapas e conteúdos. O item 3.1 descreve a identificação e caracterização do sistema. No item 3.2, relata-se a coleta e

estratificação dos dados de garantia. O item 3.3 apresenta o detalhamento dos dados de garantia. O item 3.4 introduz o assunto análise de causa raiz. No subitem 3.4.1, é descrita a análise de sequência de eventos. O subitem 3.4.2 mostra a recomendação de ações para solução dos modos de falha levantados nas etapas anteriores. A seção 3.5 aborda a FMEA de projeto. O item 3.6 introduz a verificação e validação de solução. O subitem 3.6.1 aborda os ensaios de bancada para validação do sistema. No subitem 3.6.2, são descritos os objetivos de um ensaio, cujo planejamento é descrito no subitem 3.6.3. O subitem 3.6.4 descreve a realização do ensaio e, na seção 3.7, é realizada a modelagem dos resultados e consolidação do estudo. As etapas aqui descritas podem ser visualizadas no fluxograma da figura 14.

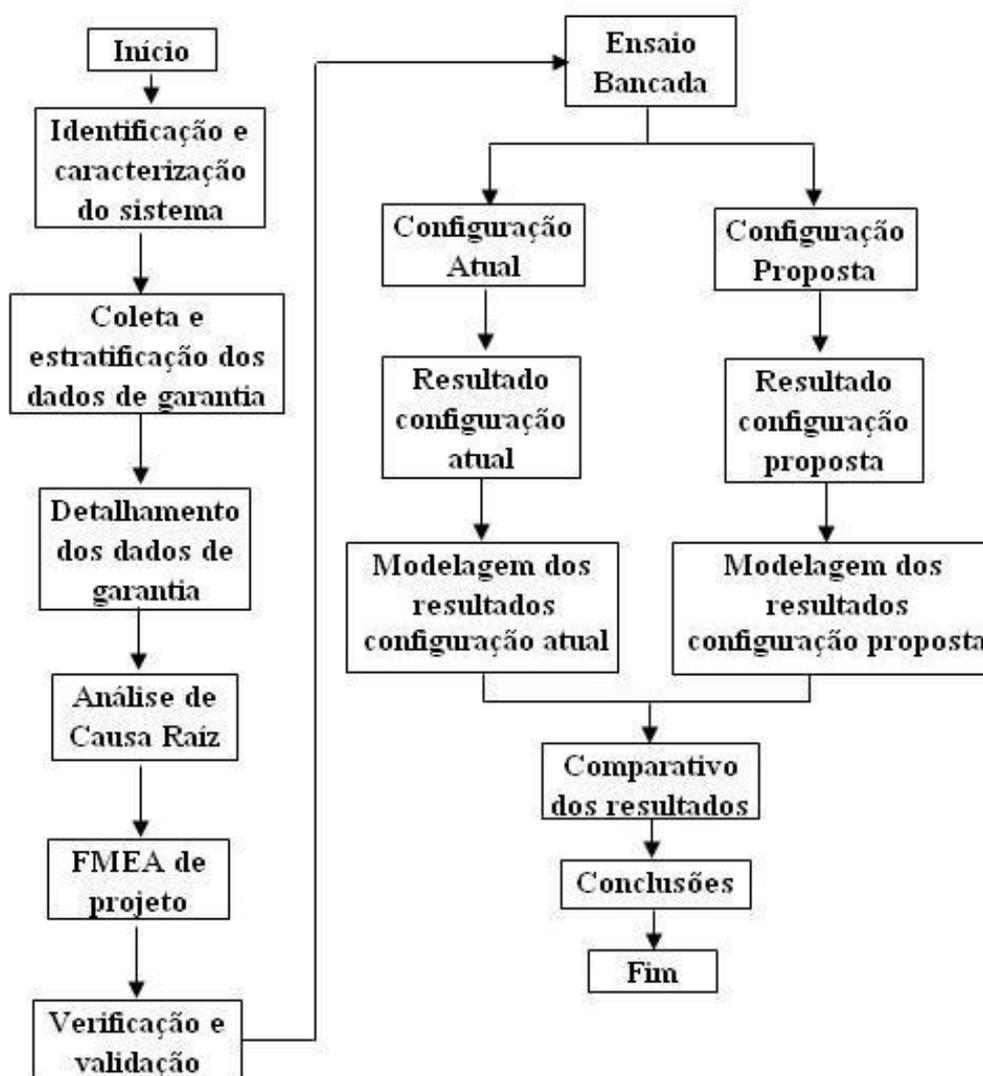


Figura 14. Fluxograma da metodologia proposta

### **3.1 Identificação e caracterização do sistema**

Ao iniciar a investigação de uma falha em um componente ou sistema, é fundamental estabelecer uma base de informações sobre o mesmo. Tal base inclui a descrição de sua aplicação, esforços atuantes, modos e percentuais de falha de cada componente, entre outros. A investigação deve ser uma etapa dinâmica durante o processo de solução de falha, pois novas informações tornam-se necessárias na medida em que a investigação é aprofundada.

A caracterização do sistema é realizada através das etapas: *(i)* detalhamentos dos aspectos físicos do sistema, descrição do seu funcionamento e componentes de vinculação; *(ii)* organização dos dados de desempenho do sistema e seus componentes durante o período de garantia, e *(iii)* definição do componente ou sistema a ser analisado.

### **3.2 Coleta e estratificação dos dados de garantia**

A coleta de dados de garantia é a base para a análise de dados sobre o sistema. De acordo com Tavares (2008), essa etapa consiste em: *(i)* coletar dados de registros históricos, em poder do produtor, relacionados ao período de garantia e *(ii)* realizar a análise preliminar dos dados de garantia.

Os registros históricos através de acompanhamento sistemático das unidades, operando em campo, fornecem os dados de falha referentes a estas unidades. Tais registros possibilitam avaliar algumas características do produto; por exemplo, identificar modos de falhas predominantes durante o período de garantia, seus percentuais e forma de ocorrência e regiões onde estão mais concentradas as ocorrências de falha.

A primeira etapa da coleta dos dados de garantia consiste em determinar os componentes a serem analisados. Esses componentes podem ser determinados através de sua associação com a função do sistema a ser analisada na FMEA, parte integrante desta metodologia. Os componentes podem também ser identificados através da construção de um diagrama de blocos mostrando as funções exercidas pela máquina até o funcionamento do sistema. Completando essa etapa, deve-se definir o período de coleta dos dados de garantia. Esse período deve ser determinado de acordo com o

histórico do projeto, para evitar a escolha de um período, em que diferentes revisões de um projeto podem estar sendo contabilizadas nos pedidos de garantia.

A segunda etapa consiste na estratificação dos dados de garantia. Duas informações principais podem ser obtidas: a primeira sobre os custos envolvidos no atendimento dos pedidos de garantia; a segunda em relação ao percentual de falhas atribuído a cada componente do sistema, tendo como base de informações todas as falhas ocorridas no período analisado.

As informações relacionadas a custos de garantia e falha devem ser tabuladas através de uma análise de Pareto para visualização dos componentes que possuem o maior índice de FPM (Falha por Máquina), por exemplo. A mesma análise pode ser feita enfocando os custos de garantia relacionados a cada componente. Com a visualização dos componentes que mais contribuem para os índices falha por máquina e custos de garantia, é possível estabelecer um critério de priorização na investigação e posterior endereçamento de ações para solução das falhas.

### **3.3 Detalhamento dos dados de garantia e identificação dos modos de falha do sistema**

O objetivo principal dessa etapa é identificar os modos de falha dos componentes do sistema através da realização das seguintes subetapas: *(i)* detalhamento dos dados de garantia; *(ii)* análise de amostras falhadas e *(iii)* obtenção da percepção do cliente sobre as falhas do produto.

A atividade de detalhamento dos dados de garantia consiste na leitura e interpretação das solicitações de garantia que chegam à empresa através do sistema de atendimento aos clientes. Esta atividade requer a participação de uma pessoa com conhecimento técnico adequado sobre o sistema e o produto, pois em muitas situações os relatórios de garantia não são preenchidos corretamente, o que pode induzir a uma má interpretação das informações.

Outra atividade necessária para a identificação dos modos de falha do sistema é a análise de amostras falhadas. Esta atividade permite o contato do investigador com o componente que apresentou falha, o que é fundamental para a identificação de diferentes modos de falha que possam estar agindo nos componentes do sistema.

A percepção do cliente sobre as falhas do sistema também deve ser obtida. Isso pode ser feito através de reuniões com a equipe de suporte ao cliente, a qual geralmente

possui um conhecimento abrangente sobre a aplicação da máquina em diferentes regiões e culturas.

O detalhamento dos dados de garantia permite que a equipe investigadora faça o mapeamento sobre as circunstâncias das causas de falhas dos componentes, possibilitando o estudo das causas raízes das falhas do componente ou sistema.

### 3.4 Análise de causa raiz

A análise de causa raiz consiste em uma sequência de passos que guia o investigador no processo de isolar os fatos que caracterizam um evento ou falha. Desta forma, com o problema totalmente definido, a análise sistematicamente determina o melhor curso de ação para solução do problema, para assegurar a não recorrência.

Na metodologia aqui proposta, o objetivo da análise de causa raiz é fornecer informações em nível detalhado para realização da FMEA de projeto, em uma etapa posterior. Esta análise é estruturada como mostra o fluxograma da figura 15.

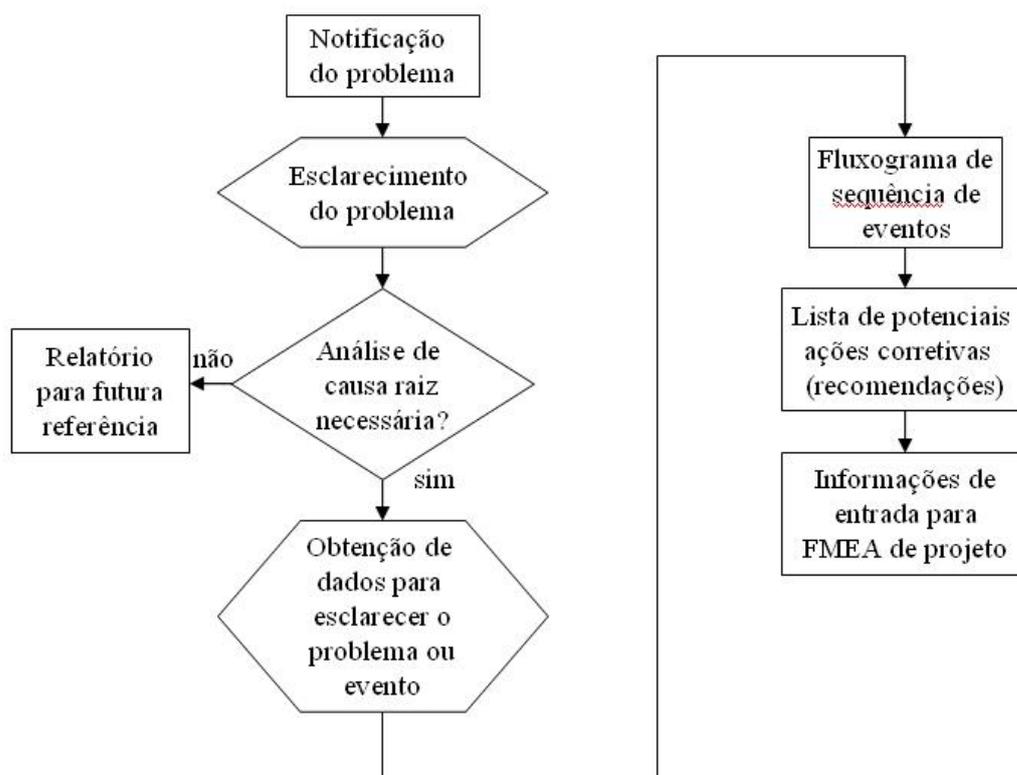


Figura 15 – Fluxograma de atividades para Análise de Causa Raiz

Fonte: Mobley (1999)

A primeira etapa da análise é a notificação do problema. Nela, a equipe responsável, por investigar a falha, é notificada da ocorrência de um problema através das mais variadas fontes, já que raramente alguém da equipe encontra-se presente quando ocorre o incidente.

Após o recebimento da notificação, é necessário esclarecer o problema para que se determine qual a verdadeira gravidade e para que as devidas ações sejam tomadas. A forma mais efetiva de definir o problema é verificar as consequências por ele causadas, os sintomas percebidos na máquina antes do problema e estabelecer os limites da ocorrência desta falha.

As evidências físicas da ocorrência da falha devem ser preservadas, para avaliar corretamente o modo de falha e estabelecer as condições de contorno para o problema. O local onde ocorreu a falha deve ser fotografado antes de se realizar o reparo do componente falhado. Todas as informações pertinentes à ocorrência da falha devem ser coletadas e repassadas ao time responsável por sua investigação. Determinados problemas podem ser resolvidos com um simples diagnóstico da equipe responsável pelo sistema; outros necessitam da aplicação de um processo de análise de causa raiz para solução das falhas.

A próxima etapa da metodologia é determinar a necessidade de aplicação da análise de causa raiz. Caso não seja necessário, deve-se arquivar o relato da falha ocorrida e da solução tomada para evitar recorrência futura; caso haja necessidade de aplicação, inicia-se o estudo das causas da falha do problema.

Definida a necessidade de análise de causa raiz, para aumentar sua probabilidade de sucesso é fundamental que a equipe investigadora possua conhecimento detalhado sobre o sistema em que ocorreu a falha, pois qualquer comportamento anormal pode ser o causador da falha. O investigador deverá conhecer quais são os componentes do sistema estudado, bem como a interação entre eles, para que o funcionamento do sistema ocorra sem problemas.

Conhecendo-se o sistema, é possível determinar os limites de contorno a serem aplicados no estudo. Isso é importante para evitar um estudo muito extenso, abrangendo sistemas além da necessidade, ou muito curto, desconsiderando partes importantes relacionadas à falha.

### **3.4.1 Análise de sequência de eventos**

A análise de sequência de eventos consiste na elaboração de um fluxograma que mostra as ações e acontecimentos que levam ao próximo evento dentro do funcionamento do sistema. A organização dos eventos em forma de um fluxograma auxilia não apenas na organização da informação, mas também na identificação de dados faltantes ou conflitantes, apresentando a relação entre os eventos e incidentes, e destacando as potenciais causas do incidente.

Além dos acontecimentos que ocorrem no sistema e fatores que influenciam diretamente na ocorrência da falha, esta análise mostra também informações adicionais, mesmo aquelas que não contribuem para a falha do sistema. Essas informações são mostradas com a utilização de simbologia específica, apresentada no capítulo 2.

Na execução da análise de sequência de eventos é essencial entender claramente os parâmetros de projeto e especificações do sistema associados ao evento que ocasionou a sua falha. A menos que a equipe investigadora do problema entenda precisamente a capacidade de um sistema e suas limitações, é praticamente impossível isolar uma causa raiz baseado apenas em informações relacionadas à falha, sem saber qual a condição normal de funcionamento do sistema.

Todas as variáveis contribuintes para um evento devem ser incluídas na análise. Os modos de falha mais prováveis relacionados a cada evento devem ser relacionados, para que seja possível identificar os mais críticos para o sistema e que poderiam gerar falhas em outros componentes. O resultado desta análise deve ser a listagem dos modos de falha associados aos eventos do sistema, para que a etapa de recomendação de soluções para os modos de falha seja realizada.

### **3.4.2 Recomendação de ações para solução dos modos de falha**

Os dados coletados na etapa de investigação do problema devem fornecer uma compreensão sobre a falha para que a equipe investigadora desenvolva uma lista de suas potenciais ou prováveis razões. Dessa forma, o próximo passo da metodologia é a geração de recomendações para solucionar os modos de falha, sendo essas necessárias para evitar recorrência das falhas. Para tanto, propõe-se a elaboração de uma planilha organizada conforme descrito na sequência:

- na primeira coluna apresenta-se uma descrição geral da falha, de maneira que a mesma seja facilmente identificada;
- na segunda se apresenta a possível causa para o respectivo modo de falha da primeira coluna;
- finalmente, na terceira coluna, a solução proposta para o modo de falha é apresentada.

A utilização deste formato de relatório auxilia a equipe investigadora a relacionar uma solução a cada modo de falha encontrado. De maneira geral, o investigador deve almejar investigar os dados primeiramente para identificar o que aconteceu durante a ocorrência, após para descrever como aconteceu e finalmente entender a razão de ter acontecido a falha.

### **3.5 FMEA de projeto**

A FMEA de projeto está inserida nesta metodologia com o objetivo de fazer a priorização na investigação das causas de falha levantadas na análise de causa raiz, através dos valores de RPNs (*Risk Priority Numbers*) gerados na avaliação dos modos de falha. A FMEA é realizada por uma equipe multidisciplinar, que deve ser adequada aos recursos disponíveis na empresa. Essa equipe deve incluir representantes de áreas como Engenharias de Produto, Confiabilidade e Qualidade, Manufatura, Materiais, Marketing, Suporte ao Cliente e Segurança.

A FMEA é realizada através de aplicação do formulário apresentado na figura 9. Os modos de falha potenciais relacionados à função do sistema são identificados na etapa de análise de causa raiz. No entanto, esta pré-definição dos modos de falha não significa que novos modos de falha não possam ser encontrados pela equipe multidisciplinar.

Durante a realização da FMEA, avalia-se a severidade, ocorrência e forma de detecção dos modos de falha. A avaliação utiliza a escala de 1 a 10, apresentada na figura 10. Com a determinação desses valores, calcula-se o RPN, através de sua multiplicação. Esses resultados classificam o modo de falha como sendo de baixo, médio ou alto risco.

O processo FMEA inclui também as formas de controle do projeto. Essas atividades consistem na prevenção e detecção dos modos de falha do projeto, de maneira a assegurar que tais modos de falha não ocorram. A primeira consiste em

prevenir a ocorrência da causa de falha ou do modo de falha, ou reduzir a sua taxa de ocorrência e a segunda consiste em detectar a causa da falha ou modo de falha, tanto por métodos analíticos ou físicos, antes do item ser liberado para produção. Preferencialmente a abordagem de prevenção deve ser utilizada, pois evita a ocorrência do modo de falha.

As ações recomendadas para os modos de falha também são geradas. Tais ações devem ser primeiramente direcionadas às altas severidades, alto *RPN* e outros itens designados pela equipe. O objetivo das ações recomendadas deve ser reduzir os índices na seguinte ordem: severidade, ocorrência e detecção, sempre buscando a redução de riscos e o aumento da satisfação do cliente através do aperfeiçoamento do projeto.

Cada ação recomendada deve estar relacionada a um responsável, para que ações para solução do modo de falha analisado ocorram no tempo adequado. A FMEA é um documento dinâmico e deve refletir o último nível de alteração de projeto, bem como as últimas ações relevantes implantadas. Algumas formas de assegurar a implantação das ações incluem, entre outras:

- assegurar que os requisitos do projeto tenham sido alcançados;
- analisar criticamente as especificações de engenharia;
- confirmar a incorporação das modificações na documentação de manufatura; e
- analisar criteriosamente as FMEA's de processo e planos de controle.

Após a conclusão das etapas da FMEA, a equipe responsável por trabalhar nas ações levantadas nesta reunião deve priorizar os modos de falha que representam maior risco para o projeto, ou seja, que possuam valores altos de *RPN*. Para esses valores, planos de ação devem ser estabelecidos seguindo a metodologia 5W2H, que significa: O Que? (*What*), Quem? (*Who*), Onde? (*Where*), Por quê? (*Why*), Quando? (*When*), Como? (*How*) e Quanto? (*How much*). Essas perguntas visam direcionar, planejar, definir as responsabilidades e quantificar as ações. A figura 16 mostra um modelo de utilização de 5W2H.

<b>Modo de falha</b>	
O QUÊ?	O que será feito (etapas)?
POR QUÊ?	Por que será feito (justificativa)?
ONDE?	Onde será feito (local)?
QUANDO?	Quando será feito (tempo)?
QUEM?	Por quem será feito (responsabilidade)?
COMO?	Como será feito (método)?
QUANTO?	Quanto custará fazer (custo)?

Figura 16 – Metodologia 5W2H

### 3.6 Verificação e validação da solução proposta

As soluções propostas devem ser submetidas a um plano de validação para que a confiabilidade seja verificada antes do início da produção. Na fase de projeto informacional do PDP são determinados os riscos relacionados à confiabilidade do projeto, assim como são desenvolvidos os planos de validação e confiabilidade. Nas fases de projeto conceitual e detalhado os planos devem ser executados para que os objetivos do projeto sejam alcançados. Esta etapa da metodologia proposta deve ser aplicada nas fases de projeto conceitual e detalhado do PDP, através da aplicação de ensaios de bancada.

Os ensaios de bancada são ensaios acelerados, com o propósito de realizar o plano de validação do componente em um curto intervalo de tempo. A aplicação dos ensaios acelerados deve estar relacionada às necessidades do projeto e aos recursos disponíveis. O objetivo é realizar um teste que forneça os resultados mais rápidos e utilizando a menor quantidade de recursos.

#### 3.6.1 Ensaio de bancada para validação do sistema

A realização dos ensaios acelerados consiste na aplicação das seguintes etapas: (i) determinação dos objetivos do ensaio acelerado; (ii) planejamento do ensaio acelerado e (iii) execução dos ensaios acelerados.

### 3.6.2 Objetivos do ensaio

O objetivo do ensaio acelerado nesta metodologia é obter medidas de confiabilidade das soluções propostas para o sistema. Estas medidas consistem em taxas de falha e tempo médio até a falha (*MTTF*).

Em paralelo a estes objetivos espera-se identificar as falhas do projeto e manufatura, para que as correções sejam realizadas e os objetivos do ensaio sejam alcançados.

### 3.6.3 Planejamento do ensaio

Os ensaios de vida acelerados utilizados nesta metodologia consistem apenas na compressão do tempo de realização do ensaio. Os elementos de um ensaio acelerado relacionados ao aumento de estresse não são aqui abordados. Dessa forma, quanto à forma do ensaio, são abordados os elementos: (i) escolha da medida de desempenho; (ii) condições do teste; e (iii) mecanismo de censura. Por não haver diferentes níveis de estresse no ensaio, o plano experimental limita-se apenas a determinar o número de amostras a serem testadas.

Os elementos relacionados à forma do teste são determinados a partir de condições existentes na empresa para a sua realização e de normas técnicas de engenharia. Conforme comentado anteriormente, os elementos que constituem a forma do teste são (NELSON, 2004):

- escolha da medida de desempenho, também conhecida como variável resposta. Para muitos produtos existem normas que definem quais medidas de desempenho devem ser utilizadas e sua forma de medição;
- determinação das condições do teste: muitos testes acelerados diferem da utilização do produto em campo. Assim, assume-se que a vida da amostra é comparável no máximo à vida do produto, sendo geralmente inferior a esta. O ideal é que o teste acelerado simule as condições de uso, com exceção dos níveis de variável de estresse utilizados;
- mecanismo de censura: usualmente, o tratamento estatístico dos dados é o mesmo independente do mecanismo de censura utilizado. A censura por falha (tipo II) é utilizada quando se tem pouca ou nenhuma informação sobre o produto em estudo. Dessa forma, garante-se um número mínimo de falhas para

realizar a análise estatística dos dados. Essa abordagem tem a desvantagem de não determinar de forma exata o tempo de duração do teste. Já a censura por tempo (tipo I) é usada em combinação com informações anteriores sobre o produto, permitindo um planejamento do tempo de duração do estudo.

### **3.6.4 Realização do Ensaio Acelerado**

A realização de um ensaio acelerado requer uma infraestrutura adequada, ou seja, equipamentos para a execução da lógica do ensaio, para controlar as variáveis envolvidas e dessa forma impor ao componente testado os níveis desejados de estresse. A aplicação dessa lógica de ensaio é possível através do uso de circuitos de comando que permitam uma repetição automática dos ciclos de teste, podendo ser circuitos elétricos ou eletrônicos, montados especificamente para este fim, ou ainda com controladores CLP (controlador lógico programável).

O ensaio acelerado consiste em submeter os componentes às condições de funcionamento pré-determinadas, fazendo o registro do tempo até a falha de cada unidade. Os resultados dos ensaios são dados de falha obtidos sob estresse e que devem ser submetidos aos modelos de probabilidade e de testes acelerados, devendo os resultados serem transpostos para as condições de uso.

### **3.7 Modelagem dos dados e conclusões**

A análise de confiabilidade dos dados de ensaios acelerados é iniciada através da identificação da distribuição estatística que melhor representa os dados. Os dados obtidos nos ensaios devem ser ordenados de acordo com o tempo até a falha, e ainda com a indicação se houve falha (F) ou suspensão (S). Valores suspensos indicam que os componentes não apresentaram falha até a interrupção do ensaio. A suspensão também recebe o nome de censura a direita, indicando que o evento de interesse (falha) ocorreria em um ponto à direita do ponto de suspensão na linha do tempo.

Com as informações disponíveis sobre os tempos-até-falha da bancada são realizadas as modelagens da distribuição da função de risco do componente. A escolha da função de distribuição mais adequada pode ser feita graficamente, através de papéis de probabilidade, ou analiticamente, através de testes de aderência. A análise gráfica é a forma mais simples de verificar a aderência de dados à distribuições, estando

disponíveis em softwares comerciais de confiabilidade. Testes de aderência mostram a discrepância entre os valores observados e os valores esperados para o modelo em questão e possuem a estrutura de um teste de hipótese.

Após determinação da distribuição teórica que melhor modela os dados de tempo-até-falha do componente são determinados o seu valor de MTTF a sua curva de confiabilidade e função de risco. Com essas informações para as configurações atual e proposta é realizada uma comparação entre configurações, fazendo-se as conclusões sobre as alterações realizadas no projeto

## **CAPÍTULO 4**

### **ESTUDO DE CASO**

O estudo de caso apresentado a seguir descreve a utilização da metodologia proposta nesta dissertação como uma ferramenta para avaliação da confiabilidade de componentes de um sistema de uma colhedora de grãos. A sequência de atividades são a identificação e caracterização do sistema, realização da FMEA, execução da verificação e validação das soluções propostas através de testes de bancada e finaliza-se com a realização do estudo de confiabilidade, comparando-se os resultados obtidos nos ensaios da configuração atual de produção com os resultados obtidos na configuração proposta.

#### **4.1 Identificação e caracterização do sistema**

A metodologia é aqui utilizada para análise do desempenho de componentes de um sistema de uma colhedora de grãos, fabricada em uma empresa multinacional localizada na região sul do Brasil. Esse sistema é composto por componentes não reparáveis; ou seja, os dados coletados referentes às falhas verificadas são registros únicos de tempos-até-falha. A importância da aplicação desta metodologia no equipamento está no fato de se buscar uma padronização no estudo de falhas de um sistema, com o objetivo de evitar que tais estudos sejam prejudicados por diferentes abordagens.

A colhedora de grãos é uma máquina complexa. Ela engloba unidades de colheita e de trilha, motor, o sistema de transmissão de potência, o sistema elétrico e o sistema hidráulico, dessa forma tornando-se uma das máquinas mais complexas na agricultura.

Os componentes básicos de uma colhedora de grãos convencional são mostrados na figura 17. Na figura 18 é mostrada uma vista em corte de uma colhedora

convencional, na qual o sistema em estudo está inserido. Nas figuras 19 e 20 é apresentada uma colhedora com sistema em fluxo axial, que é outra categoria de colhedoras. No sistema de fluxo axial, o rotor recebe o material a ser trilhado pela frente e não radialmente. O côncavo é disposto abaixo do rotor. As funções de corte, limpeza e manejo dos grãos são basicamente as mesmas nesses modelos.

Todas as colhedoras de grãos realizam as seguintes etapas na colheita:

1. Corte e Alimentação;
2. Trilha;
3. Separação;
4. Limpeza;
5. Manejo de grãos;

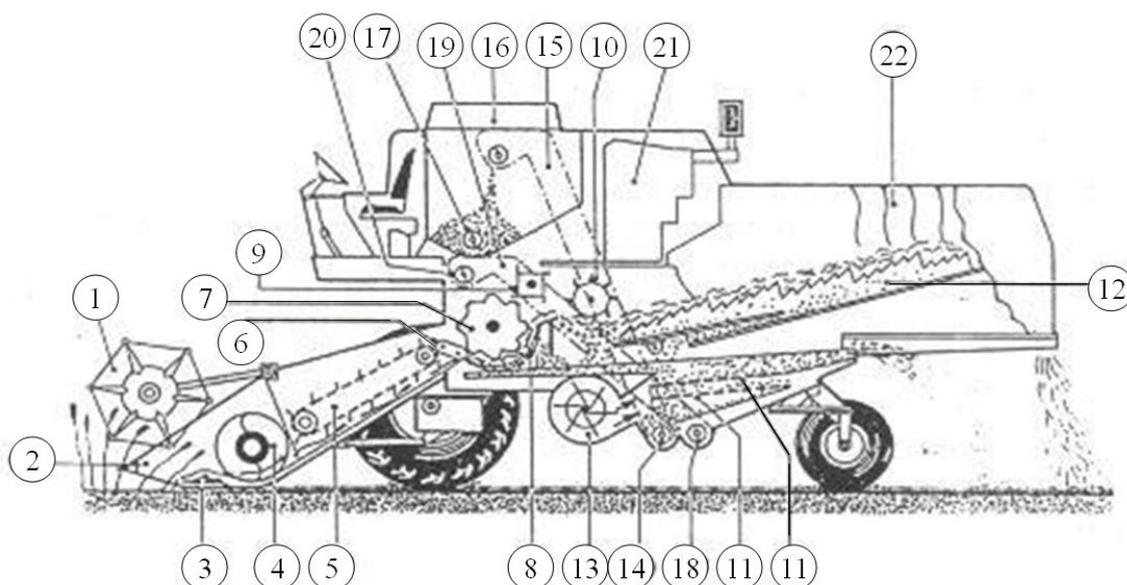


Figura 17. Constituição de uma colhedora de grãos convencional. 1) molinete, 2) divisor lateral, 3) barra de corte, 4) transportador helicoidal, 5) elevador de esteira, 6) separador de pedras, 7) cilindro trilhador, 8) côncavo, 9) bater, 10) separador, 11) peneiras - A (superior) e B (inferior), 12) saca-palha, 13) ventilador, 14) transportador para grãos limpos, 15) elevador de grãos limpos, 16) depósito de grãos, 17) transportador helicoidal de grãos limpos, 18) transportador de grãos para retilha, 19) transportador de grãos para segunda retilha, 20) condutor helicoidal alimentador do cilindro da segunda retilha, 21) motor, 22) cortinas homogenizadoras. (Fonte: HATHAWAY 1991)



Figura 18. Sistema convencional – saca-palhas

Fonte: HATHAWAY, 1991

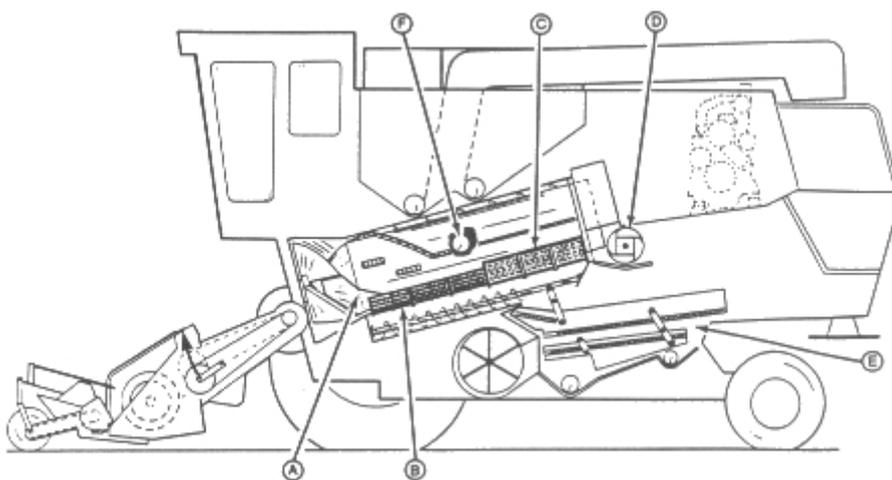


Figura 19. Colhedora em fluxo axial utilizando um rotor: A) rotor, B) côncavo de trilha, C) côncavo de separação, D) batedor, E) peneira de limpeza (Fonte: HATHAWAY 1991).



Figura 20. Colhedora de fluxo axial

Fonte: HATHAWAY, 1991

A etapa de corte e alimentação, como o nome indica, consiste no corte da planta, realizada através de uma plataforma, que se subdivide em plataforma de corte, para culturas como soja, arroz e feijão e, plataforma de milho. O material cortado é conduzido ao sistema de trilha através do alimentador, que é uma esteira transportadora composta de correntes longitudinais, com travessas transversais.

O sistema de trilha é conhecido como sendo o “coração” da máquina. Os mecanismos de trilha utilizados nas colhedoras são basicamente três: cilindro de dentes e côncavo, cilindro de barras e côncavo e, cilindro com fluxo axial. O cilindro de dente consiste de um cilindro composto por duas flanges laterais nas quais estão presas barras contendo os dentes responsáveis pela trilha. O côncavo é composto por uma chapa perfurada curva, com um comprimento suficiente para cobrir  $\frac{1}{4}$  da circunferência do cilindro de trilha. Os dentes do côncavo são montados alternadamente, de maneira que um dente do cilindro passe entre dois dentes de duas fileiras diferentes do côncavo. A figura 21 mostra como é a forma do cilindro e côncavo.

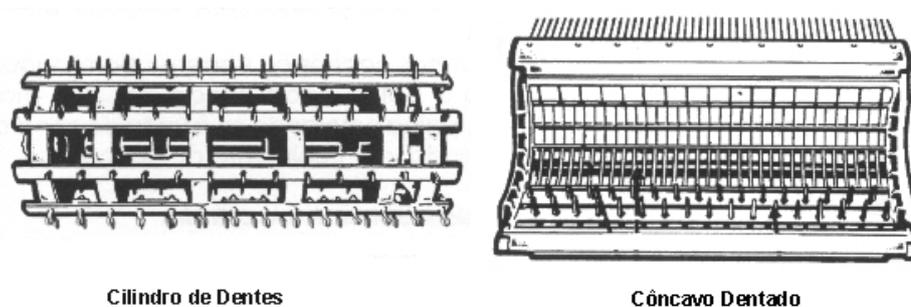


Figura 21. Cilindro de dentes e côncavo dentado

Fonte: Manual técnico colhedoras John Deere, 2009

Após passar pelo sistema de trilha, o material restante é composto por um aglomerado, onde está presente palha inteira e triturada, grãos debulhados e não debulhados e materiais estranhos. Deseja-se separar o grão dos demais corpos. Essa separação começa ser feita na grade do côncavo, grades do cilindro e, por fim, nos saca-palhas, para o sistema convencional de colhedoras, como mostra a figura 22.

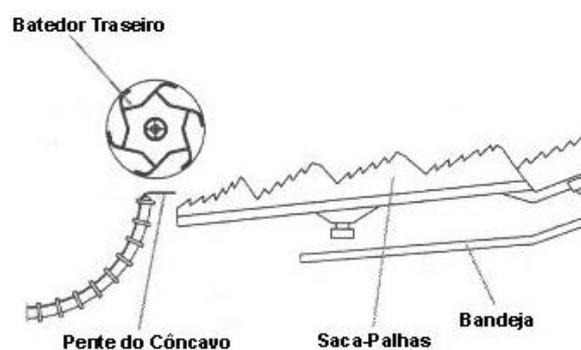


Figura 22. Sistema de separação

Fonte: Manual técnico - colhedoras John Deere, 2002

O processo de separação termina no saca-palhas, que é um mecanismo composto em partes (ou seções), sendo que cada parte é composta de duas chapas laterais, disposta como dentes de serras voltados para a traseira da máquina. Os grãos, após passarem pelas aberturas do saca-palhas, são direcionados para uma bandeja recolhadora (bandejão), localizada abaixo de cada uma de suas partes. É essa bandeja que encaminha o produto para o sistema de limpeza.

Após passar pelo sistema de trilha e separação, grãos e impurezas devem ser

levados ao sistema de limpeza da máquina, seja por gravidade ou por meio de um transportador. A figura 23 apresenta o sistema de alimentação do mecanismo de limpeza de uma colhedora. Os grãos caem diretamente pelo côncavo ou são levados por uma bandeja localizada abaixo do saca-palha.

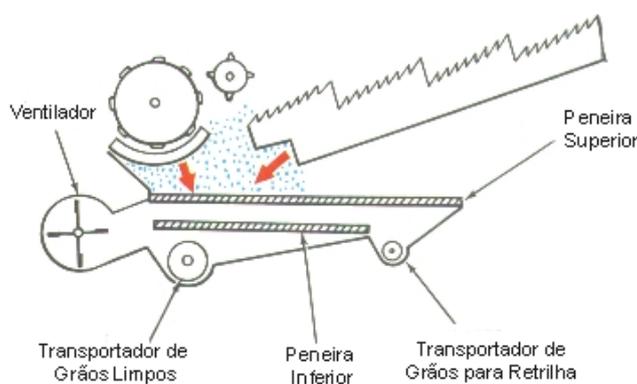


Figura 23. Sistema de alimentação por gravidade

Fonte: Manual Técnico – Colhedoras John Deere, 2002

Os principais mecanismos de limpeza nas colhedoras são a peneira superior, a peneira inferior e o ventilador. O ventilador é montado em frente ao suporte das peneiras (figura 23). O fluxo de ar do ventilador remove a maioria das impurezas contida na massa de grão. O fluxo de ar do ventilador deve ser ajustado para diferenciar o peso da massa de grãos das impurezas. Quanto mais alta for sua rotação, maior será a limpeza e também os riscos de perda de grãos. Se a rotação for abaixo da adequada, as impurezas não serão jogadas para fora da máquina, sobrecarregando assim as peneiras.

A peneira superior é localizada abaixo do saca-palha e logo atrás do bandejão. A limpeza do material sobre a peneira é realizada pela ação vibratória da própria peneira e pela ação do fluxo de ar imposto pelo ventilador. Esse movimento alternado é propiciado por braços articuladores, orientados para dar um leve movimento para cima, no curso da peneira. Os grãos limpos que passam pela peneira inferior, caem num condutor helicoidal que atravessa toda peneira inferior. Esse condutor entrega os grãos a outro condutor, que então os leva para o tanque graneleiro. Os grãos não limpos são encaminhados novamente para a região de trilha, pela retrilha da máquina, fazendo parte do manejo dos grãos.

O estudo de caso que se apresenta nesta dissertação de mestrado está relacionado ao sistema de limpeza. Falhas estão sendo encontradas em alguns componentes deste

sistema e um estudo detalhado faz-se necessário.

A metodologia proposta no capítulo 3 será aplicada agora neste estudo. As próximas seções envolvem as etapas propostas no capítulo 3.

#### 4.2 Coleta e estratificação dos dados de garantia

Quando ocorrem falhas durante o período de garantia, os clientes estão habilitados a utilizar a concessionária, responsável pelos reparos relacionados ao desempenho do equipamento. O período de garantia é muito valorizado pelos compradores e as condições de garantia devem ser cumpridas rigorosamente. Dessa forma, os registros de falhas no período de garantia são considerados fonte de dados confiáveis, sendo essa informação repassada ao fabricante através do armazenamento de registros disponíveis em banco de dados alimentados pelas redes de concessionárias distribuídas pelo país, América Latina e Europa.

A primeira etapa da coleta dos dados de garantia consiste na determinação de quais seriam os componentes a serem analisados, bem como o período para levantamento dos dados de garantia. Para o produto que está sendo tratado neste trabalho, o período de garantia é de 1500 horas ou um ano de duração, o que ocorrer primeiro. Os dados de garantia foram coletados no período entre Janeiro de 2004 e Janeiro de 2009 e estão disponíveis no Anexo A. Os componentes analisados foram determinados a partir do esquema que representa de maneira macro o funcionamento do sistema, como apresentado na figura 24.

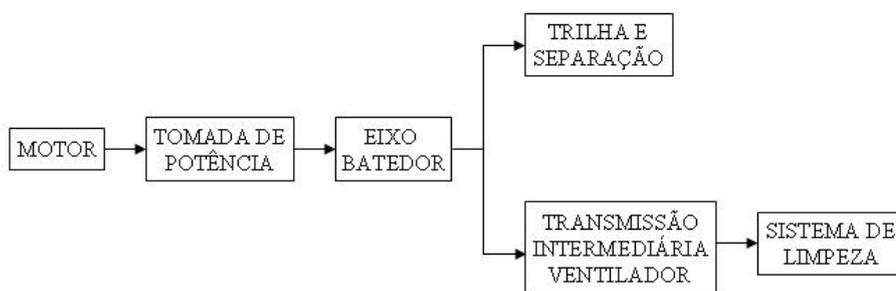


Figura 24. Esquema – funcionamento da colhedora de grãos

Com base no diagrama de blocos, procedeu-se a coleta dos dados de garantia dos principais componentes do sistema de limpeza. Também se procurou associar todos os componentes relacionados à função do sistema que será posteriormente analisada na

FMEA, que é transmitir o movimento do sistema de limpeza. Essas informações foram obtidas diretamente do banco de dados da empresa.

Para esse estudo de caso, foram obtidos dados de 950 falhas, no período de fabricação informado anteriormente. A população de máquinas no período analisado foi de 9981 máquinas. Nesse período, o valor gasto com garantias foi de aproximadamente R\$350.000,00, incluindo gastos com substituição das peças e gastos relacionados à mão-de-obra necessária para realização do trabalho. A distribuição desses gastos pelos grupos de componentes do subsistema analisado é apresentada na figura 25.

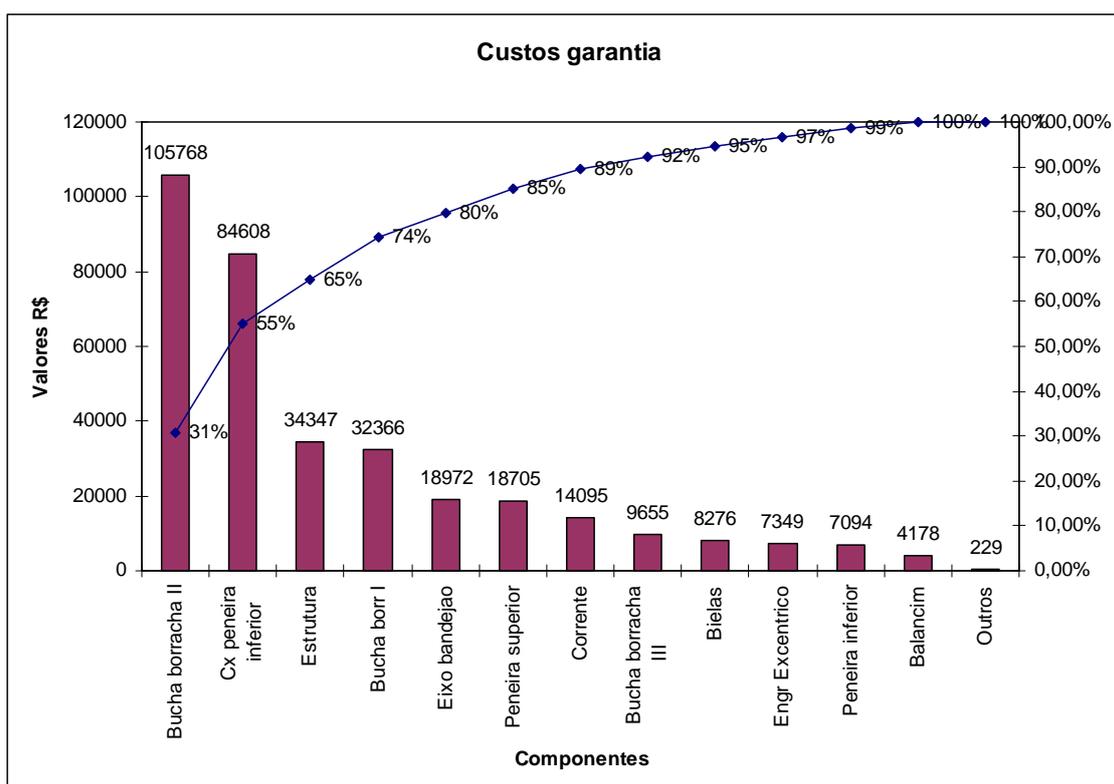


Figura 25. Gráfico de pareto para gastos de garantia do subsistema analisado

Uma informação importante no estudo dos dados de garantia diz respeito à utilização anual das máquinas. Esse índice é chamado de Período Médio de Utilização das máquinas (*PMU*). Este índice é obtido através da atualização das máquinas vendidas em um determinado mês, e que entram no período de garantia, subtrai-se o número de máquinas que entraram na garantia no mesmo mês, mas no ano anterior. Essa abordagem permite a contribuição proporcional ao tempo de utilização da máquina no período de garantia para o cálculo de falhas por máquinas.

Outra informação importante no estudo dos dados de garantia é o índice de Falhas por Máquina (*FPM*), que consiste na divisão do número de falhas encontrado em

determinado componente no período analisado pelos PMUs. Os valores de FPM dos componentes do sistema estudado no período analisado estão disponibilizados na tabela 1.

Tabela 1. Valores de FPM – Sistema de limpeza

Pareto FPM		Pareto FPM	
Componente	FPM	Componente	FPM
Bucha borracha II	0,0800	Bielas	0,0061
Cx peneira inferior	0,0165	Bucha borracha III	0,0059
Corrente	0,0153	Peneira superior	0,0059
Bucha borracha I	0,0136	Peneira inferior	0,0042
Eixo bandejão	0,0123	Balancim	0,0033
Estrutura	0,0096	Outros	0,0020
Engr. Excêntrico	0,0094	Total	0,1837

Os dados de garantia foram coletados para uma grande quantidade de itens relacionados ao sistema de limpeza da colhedora. Com o objetivo de priorizar os itens para estudo das causas de falha, elaborou-se um gráfico de pareto, apresentado na figura 26.

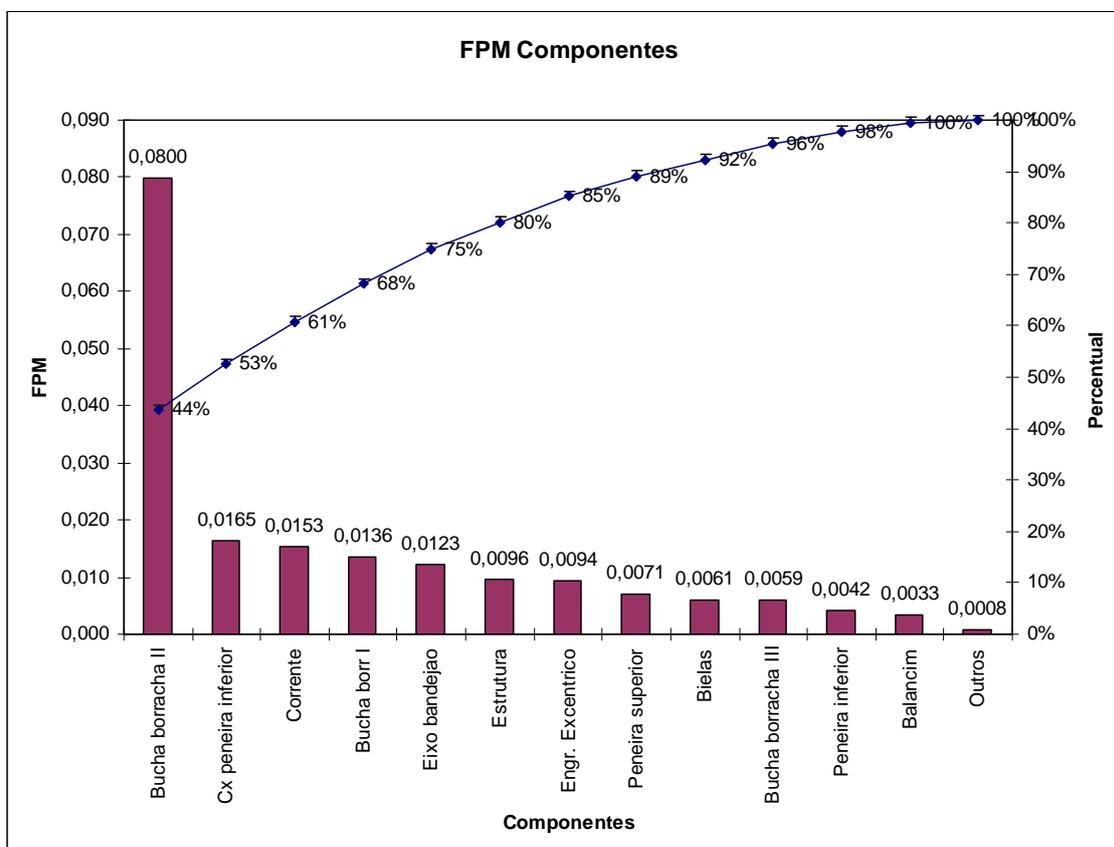


Figura 26. Gráfico de pareto para os valores de FPM dos componentes do sistema de limpeza

As análises de pareto para custos de garantia e FPM mostraram coerência entre os componentes que apresentam maior percentual de falha e os custos de garantia a eles relacionados. A tabela 2 traz um comparativo entre as análises de pareto.

Tabela 2. Quadro resumo das análises de pareto (FPM e Custos)

Pareto FPM			Pareto Custos		
Componente	FPM	%	Componente	Custos (R\$)	%
Bucha borracha II	0,079982	44%	Bucha borracha II	105767,9	31%
Cx peneira inferior	0,016494	53%	Cx peneira inferior	84608,4	55%
Corrente	0,015257	61%	Estrutura	34347,2	65%
Bucha borracha I	0,013561	68%	Bucha borracha I	32366,2	74%
Eixo bandejão	0,012296	75%	Eixo bandejão	18972,3	80%
Estrutura	0,009555	80%	Peneira superior	18705,5	84%
Engr. Excêntrico	0,009401	85%	Corrente	14095,3	88%
Bielas	0,006053	88%	Bucha borracha III	9654,5	91%
Bucha borracha III	0,005856	92%	Bielas	8276,1	93%
Peneira superior	0,005856	95%	Engr Excêntrico	7349,3	95%
Peneira inferior	0,004166	97%	Peneira inferior	7094,4	97%
Balancim	0,003266	99%	Balancim	4178,0	100%
Outros	0,002000	100%	Outros	228,7	100%

Os resultados da análise de pareto orientam a realização da próxima etapa da metodologia, que é o detalhamento dos dados de garantia.

#### 4.3 Detalhamento dos dados de garantia e identificação dos modos de falha do sistema

O resultado da etapa anterior foi a determinação dos componentes com maior percentual de falha no sistema de acionamento da limpeza. No entanto, cada componente pode estar exposto a mais de um modo de falha, sendo o objetivo desta etapa a sua identificação.

A identificação dos modos de falha dos componentes selecionados na etapa anterior foi iniciada através da leitura dos relatórios de garantia. Como mencionado anteriormente, esses dados refletem a sua aplicação em campo. No entanto, na maioria das vezes, os relatórios de garantia não são preenchidos com a qualidade requerida, dificultando a identificação do modo de falha. Dessa forma, a leitura destes dados orienta o investigador a descobrir quais são os modos de falha do sistema.

Na empresa onde este trabalho foi realizado há um departamento destinado à análise dos pedidos de garantia. Antes de aprovar ou rejeitar os pedidos, faz-se a análise das amostras que retornam do campo para decidir se realmente o problema é relacionado ao fabricante ou se a falha está relacionada a uma má aplicação do produto pelo cliente. Para o estudo de caso, analisaram-se as amostras disponíveis no departamento de garantias para que houvesse o contato do responsável pelo projeto com as amostras das peças falhadas no campo. A análise destas amostras é muito importante para a identificação dos modos de falha destes componentes.

Além da análise dos dados de garantia e das amostras falhadas, outra atividade que auxilia na identificação dos modos de falha é obter a percepção do cliente sobre as falhas do produto através de entrevistas e reuniões com a equipe de suporte técnico ao cliente. No entanto, reforça-se a importância de comprovar, através de fatos e dados, quais são os componentes críticos a serem analisados, não se devendo limitar a análise apenas à percepção dessa equipe.

O detalhamento dos relatórios de garantia mostrou que as buchas de borracha apresentaram o mesmo modo de falha (desgaste), fato comprovado através da verificação das amostras vindas do campo, e das informações obtidas da equipe de suporte técnico.

Foram observados também modos de falha comuns aos itens estruturais do sistema de limpeza, caixas de peneiras superior e inferior: trincas, quebras e empenamento. Em muitos relatos de garantia, há uma relação destes modos de falha com desgastes ocorridos nas buchas de borracha nas quais este sistema é montado.

Na corrente de rolos ocorreram os modos de falha de desgaste nos pinos e nas placas, rompimento dos anéis *o'ring* e também ruptura das placas. Para este componente, a análise das amostras foi fundamental para distinção entre modos de falha, visto que os relatórios de garantia relacionavam a falha apenas como sendo por desgaste, não havendo maior detalhamento sobre o tipo de desgaste observado na corrente. As engrenagens, nas quais a corrente é montada, sofreram um modo de falha similar, o desgaste nos dentes. As informações sobre os modos de falhas obtidos nesta etapa estão reunidas na figura 27.

<b>Componente</b>	<b>Possível causa da falha</b>
Buchas borracha	Desgaste
Caixa de Peneira inferior	Quebra
Peneira superior	Trinca
Corrente	Ruptura das placas
	Desgaste nos pinos e placa
	Rompimento dos anéis o'ring

Figura 27. Quadro resumo - modos de falha - relatórios de garantia

#### 4.4 Análise de Causa Raiz

A realização da análise de causa raiz tem por objetivo principal fornecer informações detalhadas sobre o sistema e seus modos de falha para a realização da FMEA de projeto. Conforme apresentado no capítulo 3, a análise de causa raiz consiste em isolar os fatos que contornam um evento ou falha. Deseja-se descobrir as causas raízes dos problemas ocorridos com o sistema de limpeza. As etapas descritas a seguir apresentam como a metodologia de análise de causa raiz foi estruturada.

O primeiro contato do investigador com o problema se deu através de relatórios gerados pelas equipes de suporte técnico de campo, bem como por informação de dados de garantia e FPM dos componentes envolvidos neste sistema. Os resultados de FPM para os principais componentes do sistema são mostrados na figura 26 e as informações relacionadas aos dados de garantia destes componentes foram apresentados na seção 4.3.

Após a identificação do problema e dos componentes afetados, o investigador deve determinar os sintomas relacionados à falha do sistema, bem como estabelecer os limites que contornam este problema. Entendem-se limites como os sistemas que devem ou não ser analisados. Isso é importante para que a investigação não seja estendida para sistemas não relacionados às falhas encontradas.

Após o levantamento de informações sobre os sintomas relacionados às possíveis causas da falha, o investigador deve buscar evidências físicas das falhas ocorridas no sistema. A forma mais prática de se obter tais evidências é através da análise de amostras de componentes que apresentaram falhas durante o período de garantia e que retornam a um departamento específico da empresa. No entanto, a limitação desse tipo de análise está no fato de que um percentual pequeno de peças retorna ao departamento. Na maioria das vezes, os componentes são retrabalhados na

propriedade do cliente, impossibilitando qualquer tipo de análise, visto que ele não representa mais a configuração de projeto.

Outra fonte de evidências físicas de falhas são amostras oriundas de testes de validação ocorridos em bancada, que são utilizados para validação do sistema. Nesse tipo de teste a condição de campo é reproduzida, visto que ocorre uma simulação de condições da máquina em operação. Dessa forma, quando ocorrem falhas nos componentes da bancada, a aparência dos componentes é avaliada, podendo-se identificar o modo de falha, para então verificar e avaliar sua interação com os demais componentes do sistema.

A análise das amostras oriundas do departamento de garantia e também das bancadas de teste revelaram as falhas, mais comuns no sistema, que são apresentadas na figura 28.

A figura 28A mostra um rompimento na placa da corrente. A figura 28B mostra outro modo de falha, que é o desgaste dos pinos da corrente. A figura 28C mostra o desgaste das buchas de borracha, responsável pela maioria dos pedidos de garantia; observa-se um desgaste não uniforme da bucha na área dos diâmetros interno e externo. Um componente similar a este é mostrado na figura 28D, onde se observa também o desgaste acentuado na borracha. Essas buchas possuem a mesma função no sistema de limpeza, onde, além de servir como suporte, também absorvem e suavizam os movimentos dos conjuntos da peneira inferior e superior. Na figura 28E, é mostrada uma falha que ocorre na parte estrutural do sistema de limpeza. A figura 28F mostra uma falha que ocorre no rasgo de chaveta do virabrequim de acionamento da saca-palha. A figura 28G mostra uma falha que ocorre no conjunto da biela, na qual se observa uma quebra na seção transversal da biela, além de haver também quebra na flange, como mostrado na figura 28H.

Após a realização das etapas de coleta e estratificação de dados de garantia, bem como análise das amostras falhadas, o investigador já possui uma idéia sobre as falhas que ocorrem com o sistema. No entanto, para que as causas raízes dessas falhas sejam determinadas, o investigador deve conhecer detalhadamente todos os aspectos funcionais do sistema.

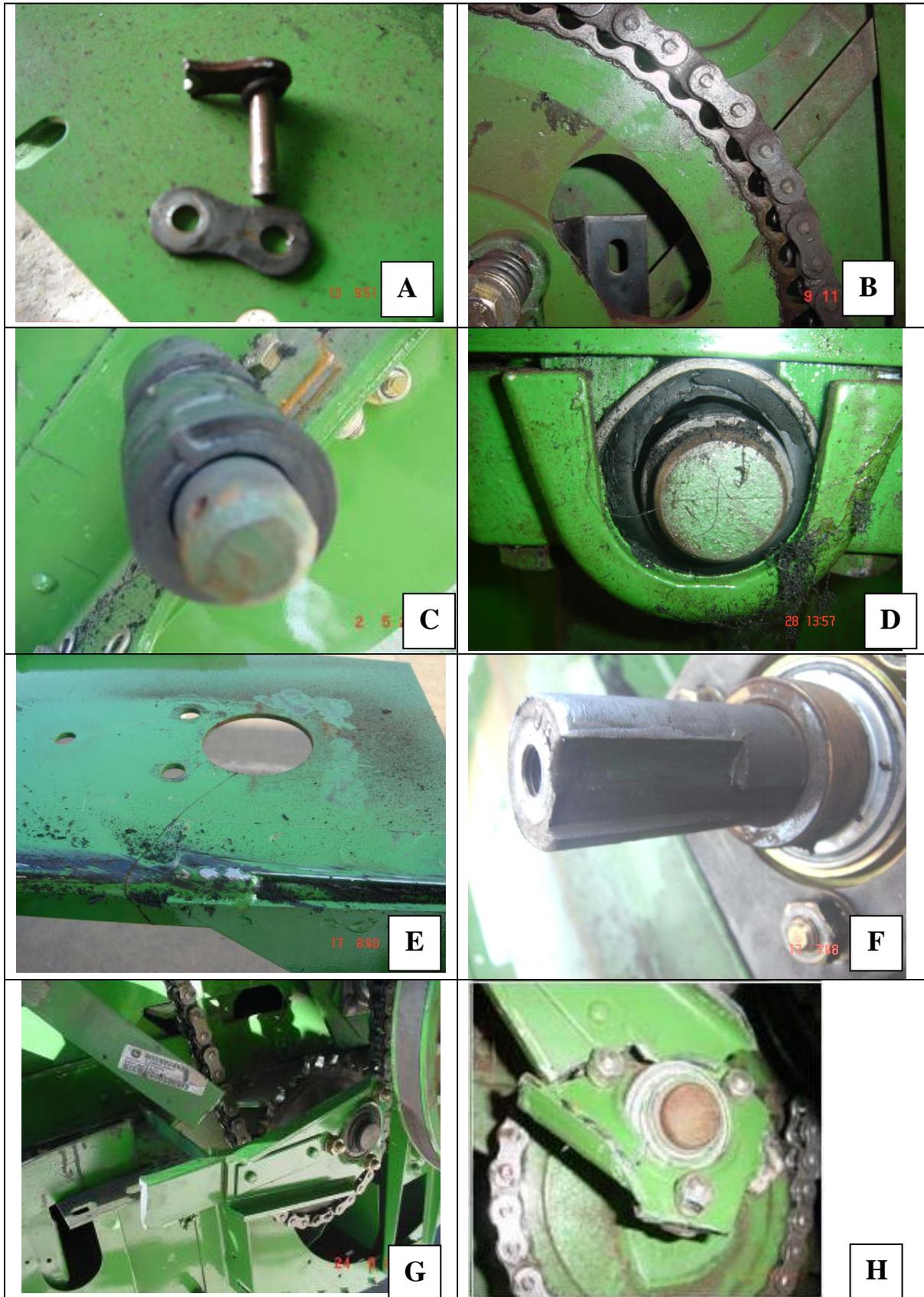


Figura 28. Falhas mais comuns do sistema de limpeza

#### 4.4.1 Aspectos funcionais do sistema

Assim como todos os sistemas da colhedora de grãos, o acionamento do sistema de limpeza inicia na tomada de potência do motor. Este acionamento consiste em uma polia montada na saída do motor, lado esquerdo da máquina, cuja rotação é 2400 rpm. Desta polia principal parte uma correia que aciona o eixo do batedor, parte integrante do sistema de trilha da colhedora de grãos. A polia do acionamento do batedor possui diâmetro de 560 mm. Como a polia da tomada de potência que faz acionamento desse sistema possui diâmetro de 190 mm, a rotação do batedor é 814 rpm. A figura 29 apresenta os acionamentos do lado esquerdo de uma colhedora de grãos.

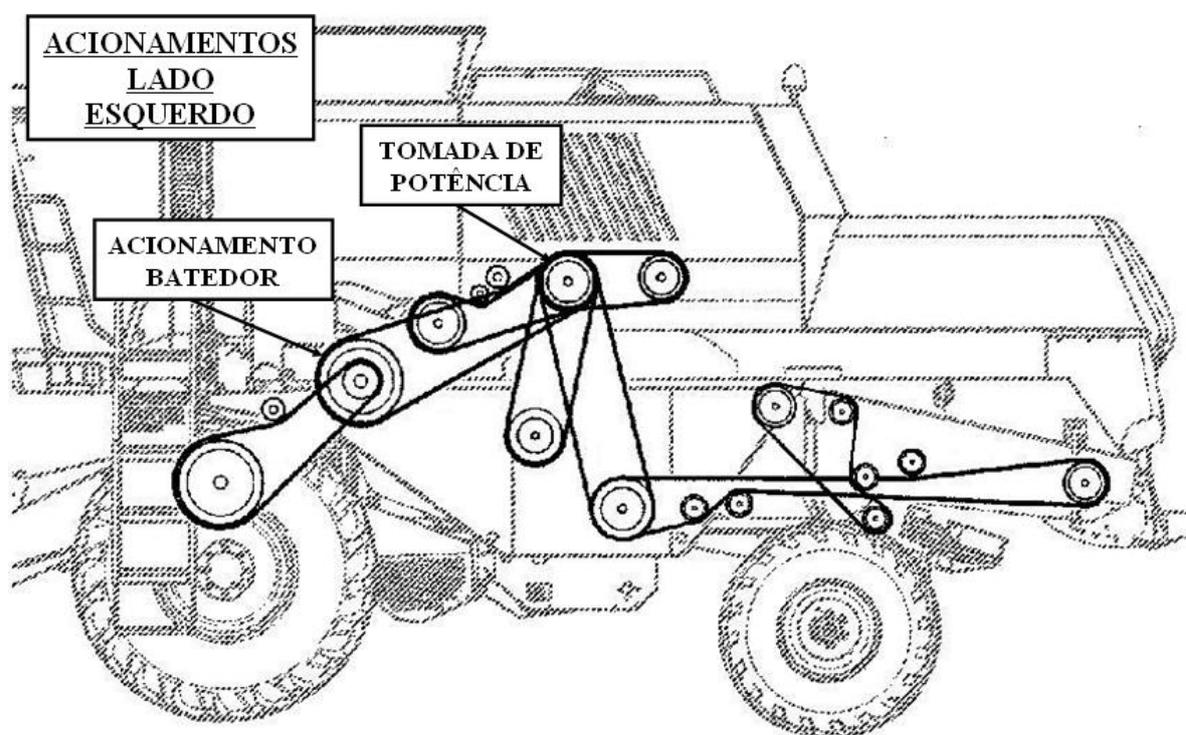


Figura 29. Acionamentos do lado esquerdo da colhedora de grãos

O eixo do batedor transmite a rotação para o lado direito da colhedora de grãos. Neste lado da máquina, a polia do batedor é a motora para os acionamentos do cilindro da trilha, para a transmissão intermediária do ventilador. O sistema de limpeza está relacionado à transmissão intermediária do ventilador, cuja polia motora possui diâmetro de 362 mm. Como a parte da polia do batedor que faz o acionamento da transmissão do ventilador possui diâmetro de 300 mm, a rotação de entrada nessa transmissão é 670 rpm. A figura 30 traz os acionamentos do lado direito de uma colhedora de grãos.

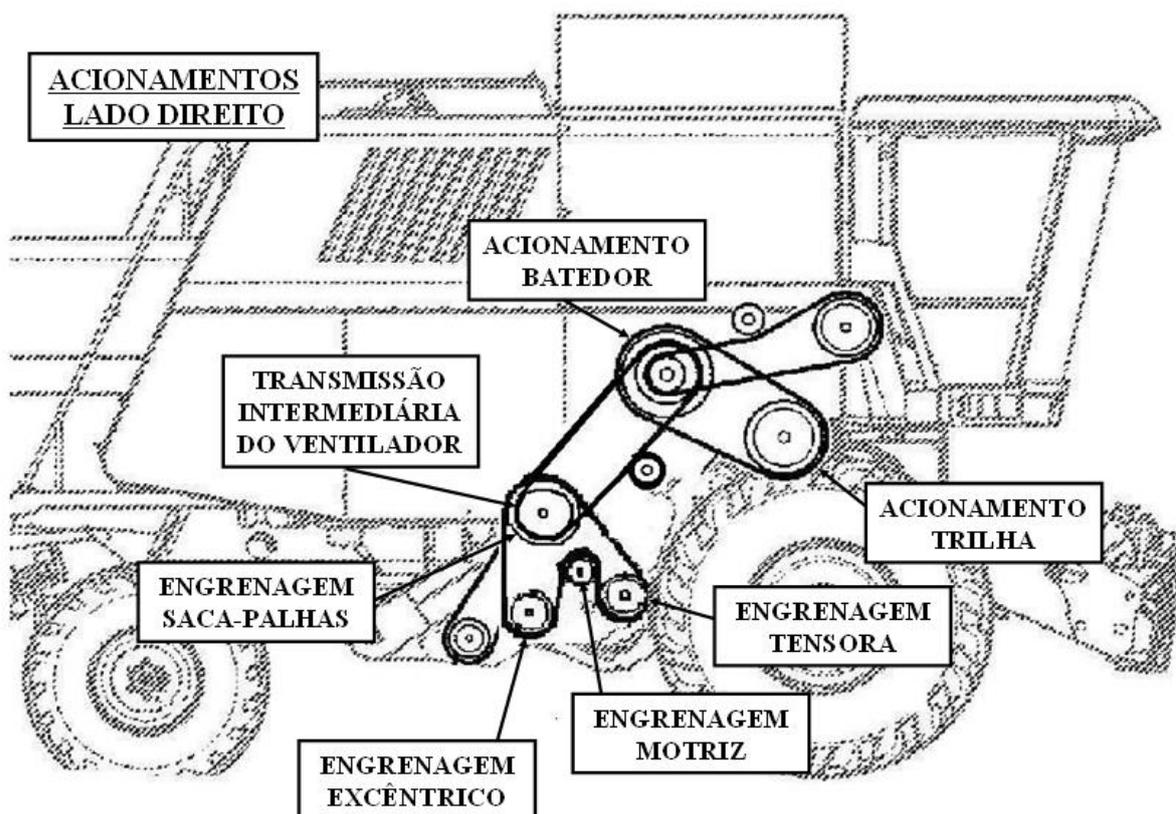


Figura 30. Acionamentos do lado direito da colhedora de grãos

No eixo da transmissão intermediária do ventilador há a engrenagem motriz do sistema de acionamento de limpeza, com diâmetro primitivo de 79,6 mm. Esta engrenagem é montada no eixo de transmissão do ventilador através de uma chaveta. A configuração de engrenagens do sistema de limpeza é mostrada na figura 31.

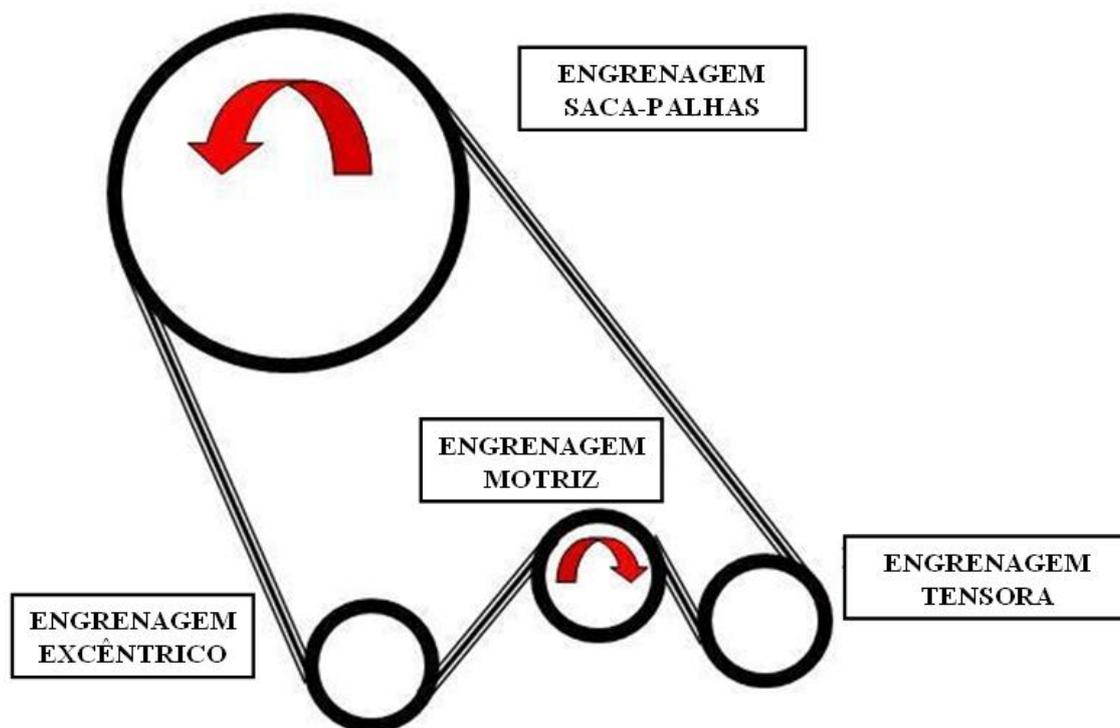


Figura 31. Configurações de engrenagens do sistema de limpeza

As demais engrenagens do sistema de limpeza, que são as engrenagens de acionamento do saca-palhas e a engrenagem do excêntrico, são acionadas através de uma corrente de rolos. As engrenagens do saca-palhas e a engrenagem do excêntrico possuem diâmetros primitivos de 357,94 e 188,29 mm, resultando nas rotações de 149 e 283 rpm respectivamente.

O saca-palhas é montado em dois virabrequins e é acionado através de uma engrenagem, que possui uma catraca de acionamento, que é acionada após carregamento superior a 320 N.m de torque no virabrequim. A engrenagem é montada sobre um cubo de ferro fundido, fixado ao virabrequim através de uma chaveta e de um parafuso.

A parte estrutural do sistema de limpeza da colhedora, que inclui bandeirão, caixas de peneira inferior e superior, e, peneira inferior e superior, são acionadas através da engrenagem com excêntrico. Essas partes estruturais do sistema de limpeza são mostradas na figura 32.

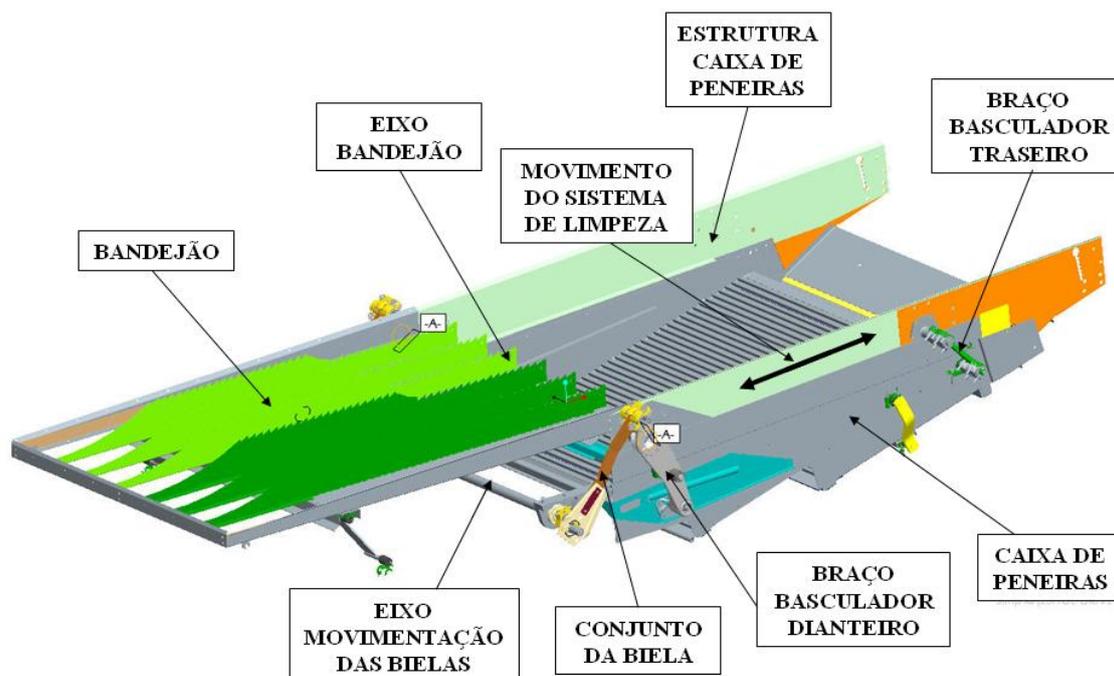


Figura 32. Estrutura do sistema de limpeza

A engrenagem com excêntrico transmite primeiramente o movimento para uma peça similar localizada no outro lado da máquina através de um eixo de comprimento igual à largura da máquina, para que estes dois componentes em conjunto façam o movimento retilíneo alternativo do sistema de limpeza, conforme mostrado na figura 14. O movimento é transmitido da engrenagem com excêntrico para uma biela de acionamento, e, esta aciona os braços basculadores dianteiros. Entre esses braços é montado um eixo que suporta o conjunto do bandejão e da peneira superior, chamado de eixo do bandejão. Os braços basculadores possuem buchas de borracha para amortecimento do sistema, sobre as quais as partes estruturais do sistema de acionamento de limpeza são suspensas. Na parte traseira da máquina os basculadores superiores e inferiores também possuem borrachas de amortecimento que suspendem a parte estrutural do sistema de limpeza.

#### 4.4.2 Análise de sequência de eventos

A análise de sequência de eventos estabelece que todas as etapas do funcionamento do sistema sejam listadas, forçando, desta forma, o seu estudo detalhado. Nesta análise, os mais prováveis modos de falha associados a cada evento são relacionados, facilitando a visualização das falhas do sistema de uma maneira geral,

diminuindo-se as chances de se avaliar componentes de maneira isolada, o que poderia resultar em propostas de soluções não eficazes.

A análise de sequência de eventos inicia-se com uma etapa macro apresentada na figura 19. O sequenciamento de eventos para os subsistemas acionamento do ventilador, engrenagem do saca-palhas e braços basculadores são apresentados nas figuras 33 a 37 respectivamente.

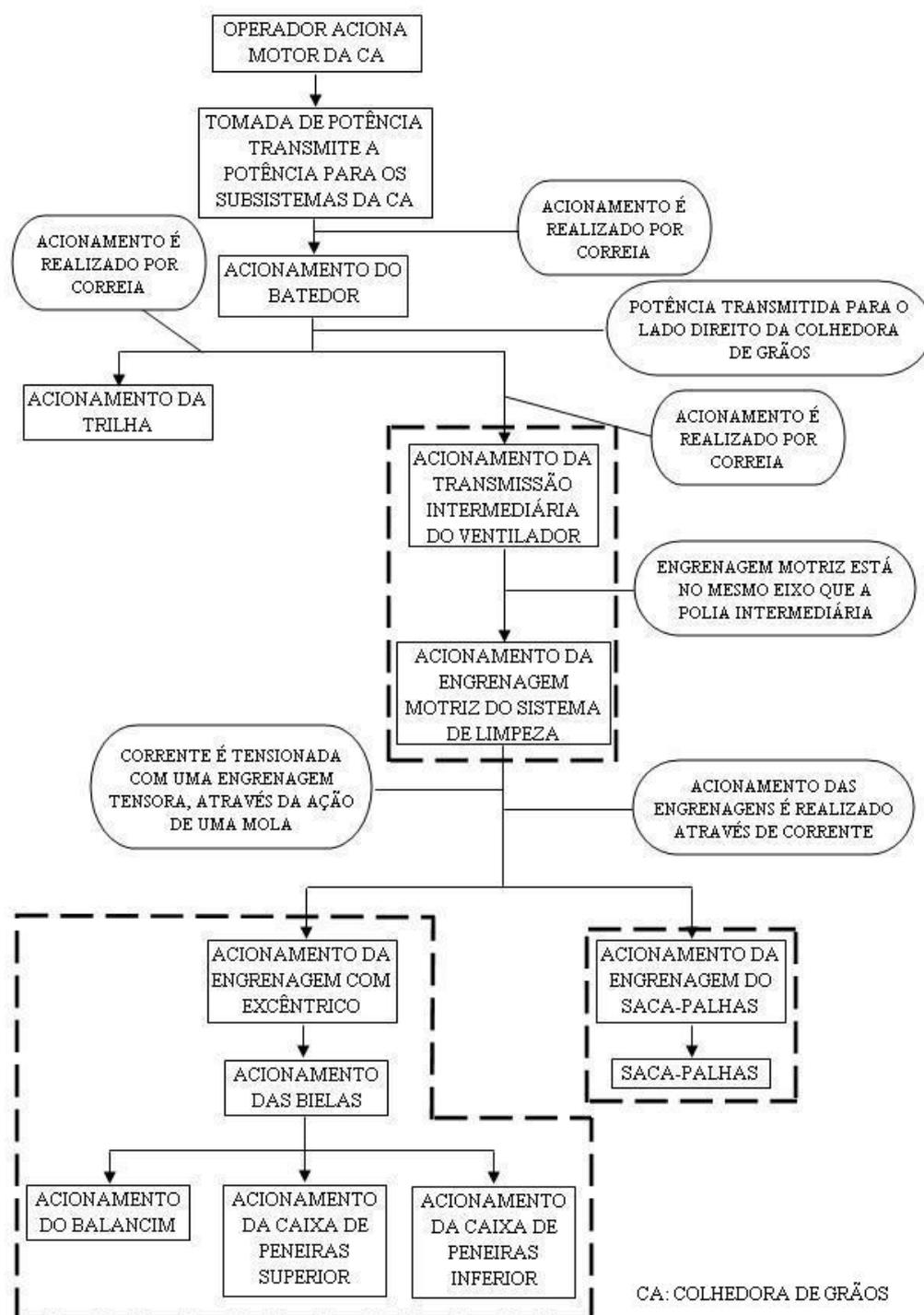


Figura 33. Sequência de eventos dos sistemas da colhedora de grãos

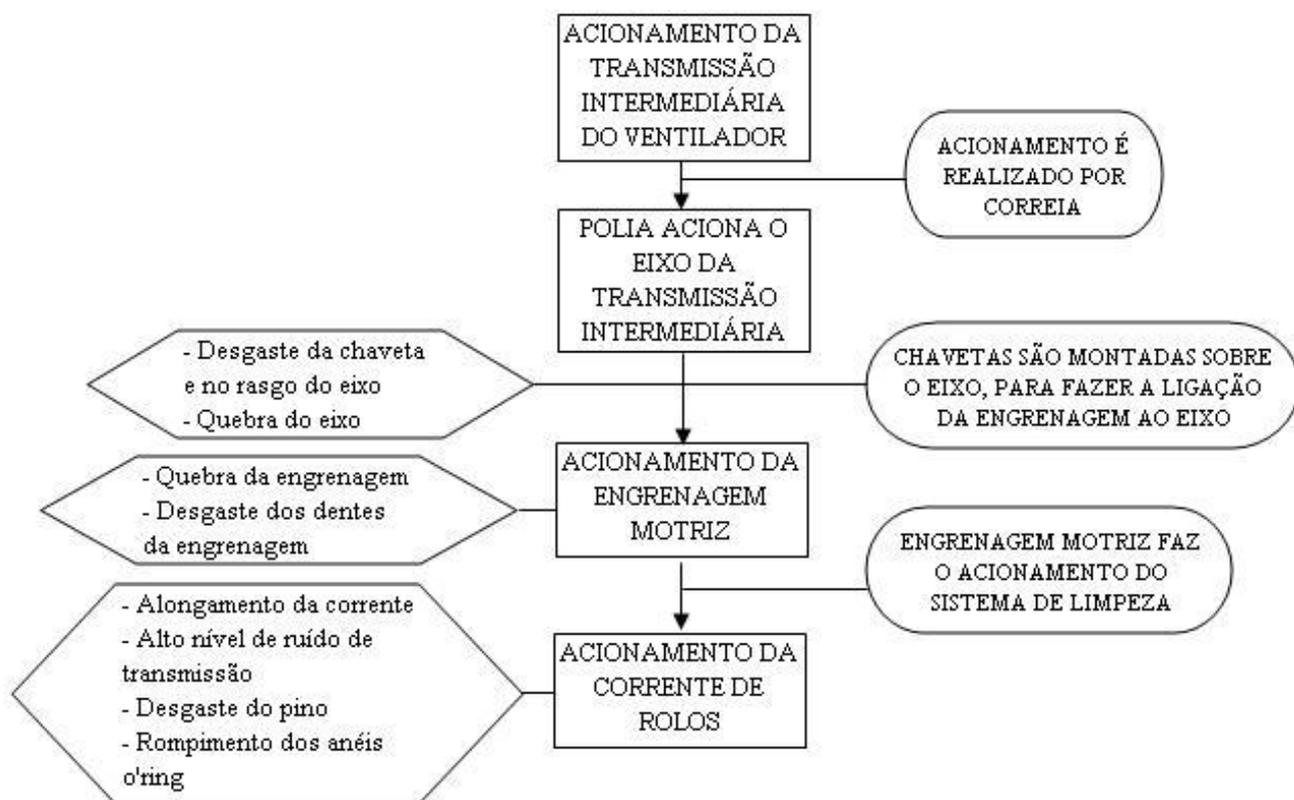


Figura 34. Sequência de eventos da transmissão intermediária do ventilador

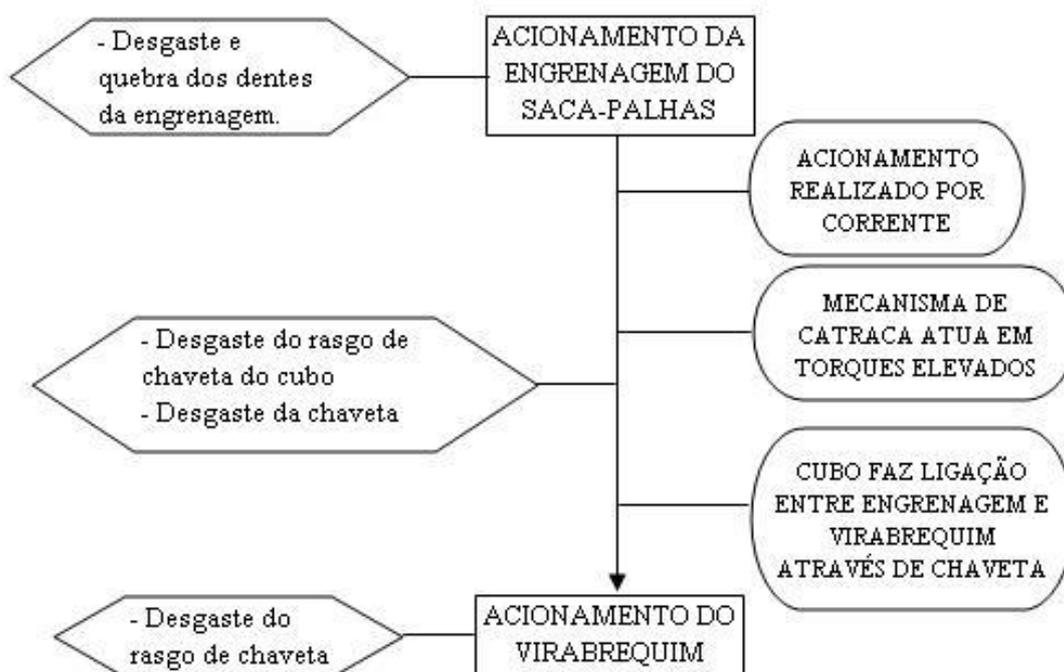


Figura 35. Sequência de eventos da engrenagem do Saca-Palha

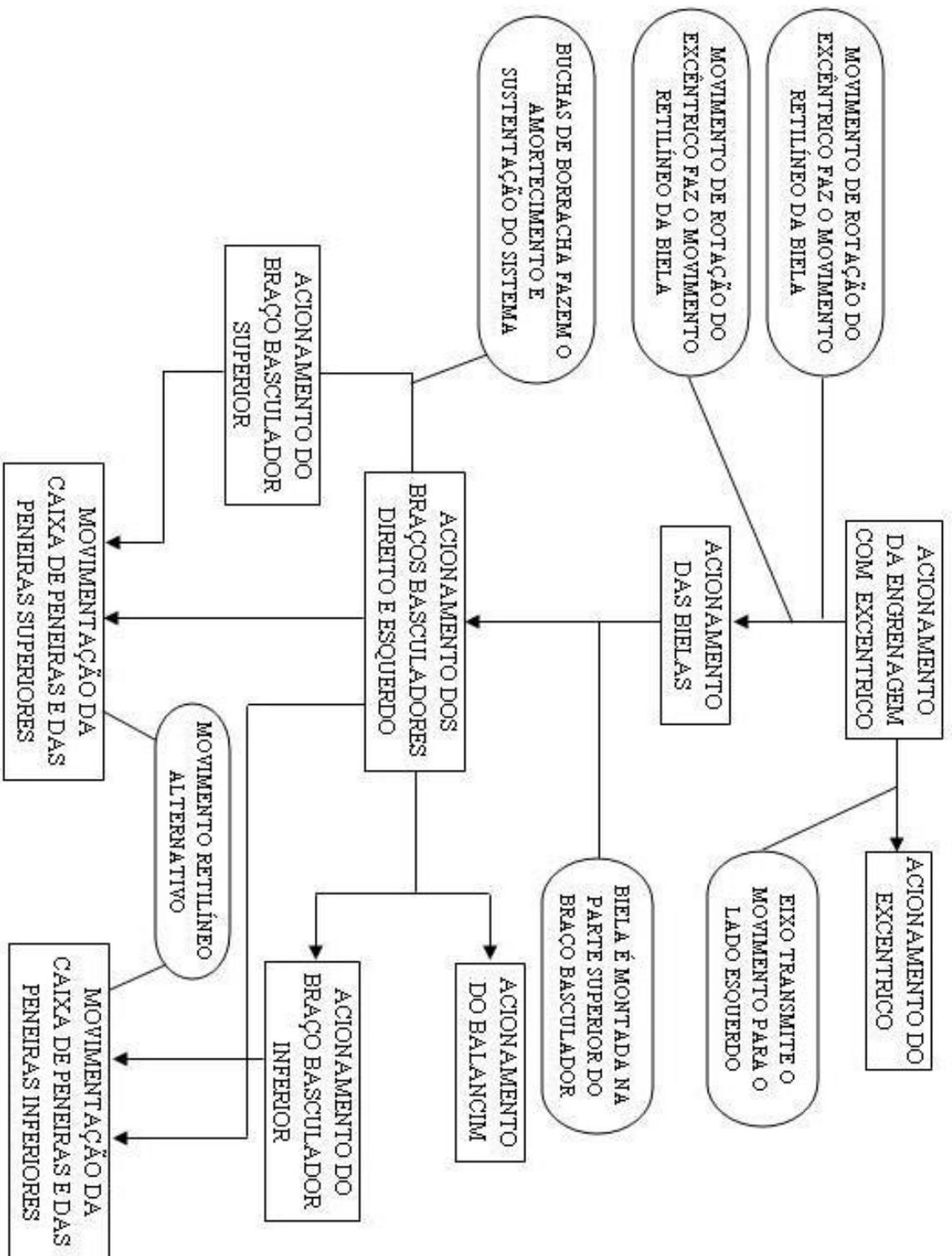


Figura 36. Sequência de eventos dos braços basculadores

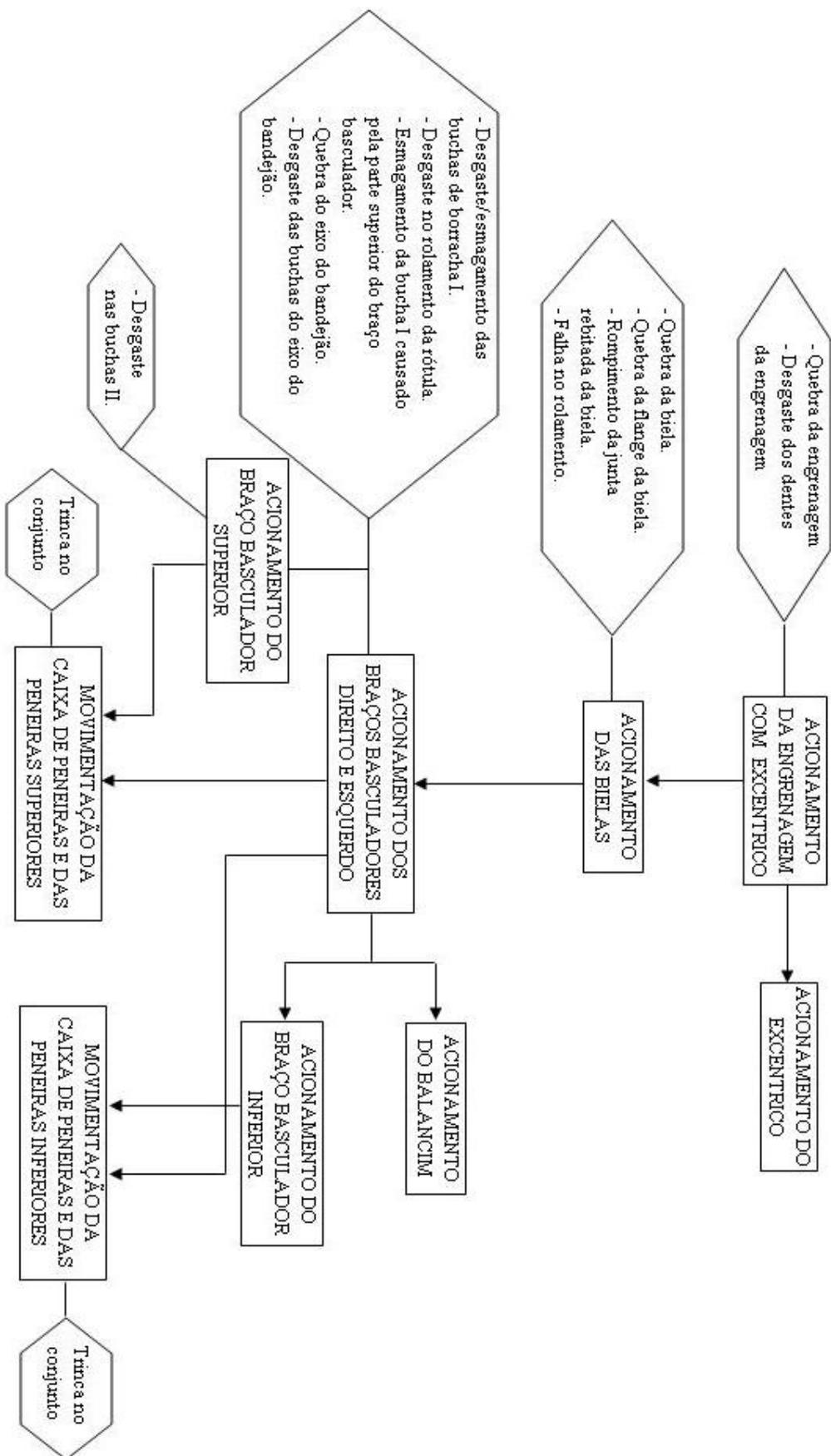


Figura 37. Sequência de eventos e possíveis falhas dos braços basculadores

A análise de sequência de eventos mostra que muitas falhas podem ser originárias de uma mesma causa, além de haver componentes que falham em decorrência da falha de outros componentes. Nestes casos, considera-se endereçada a solução para a falha quando o componente primário for corrigido. A sequência de eventos permite também que falhas originadas de mais de um componente também sejam identificadas. Para o sistema estudado, as falhas mostradas na figura 38 foram classificadas como primárias.

<b>Falhas Sistema de Limpeza</b>	
<b>Componente/Conjunto</b>	<b>Modo de falha</b>
Buchas de borracha	Rompimento da bucha
	Esmagamento da bucha
Biela de acionamento	Quebra da biela
Engrenagem Sacas-Palhas	Folga radial e axial no conjunto
Rolamento rótula	Folga no rolamento da rótula
Rolamento conjunto da biela	Dificuldade de giro do rolamento da biela.
Corrente	Alongamento da corrente
	Desgaste do pino
	Rompimento dos anéis <i>o'ring</i>
	Alto nível de ruído da transmissão

Figura 38. Quadro resumo dos modos de falha identificados na análise de sequência de eventos

A determinação dos modos de falha encerra a etapa de análise de sequência de eventos, preparando para a próxima etapa da metodologia, que é a recomendação das ações para solução dos modos de falha.

#### **4.4.3 Recomendação de ações para solução dos modos de falha**

O último passo da análise de causa raiz, é a recomendação das ações para solução dos modos de falha. Para aqueles levantados na análise da sequência de eventos, foram geradas as recomendações na figura 39.

Falha	Possível Causa	Solução Proposta
Rompimento e esmagamento das buchas	Bucha subdimensionada para o sistema e deslocamento relativo em relação ao local de montagem	Especificar bucha correta para a aplicação
	Montagem incorreta da bucha na máquina	Identificar posição neutra de montagem da bucha na máquina
Quebra no conjunto da biela	Concentração de tensão causada por repuxo não uniforme na flange	Substituir repuxo por furo cilíndrico e acrescentar flanges para montagem dos rolamentos
	Rompimento das juntas rebitadas	Substituir rebites por parafusos
	Alto carregamento de momento gerado pela carga axial da biela.	Diminuir altura da biela
	Tensão residual ocorrida no processo de montagem	Montar corretamente as buchas de borracha. Verificar perpendicularismo e paralelismo entre bucha e braço
Travamento do rolamento	Rolamento subdimensionado para aplicação	Verificar especificações e as cargas atuantes no rolamento
	Montagem inadequada	Verificar o processo de montagem
Folga radial e axial no conjunto da engrenagem do saca-palhas	Desgaste excessivo no rasgo de chaveta do cubo e do virabrequim e também desgaste na chaveta	Diminuir tolerâncias de montagem da chaveta nos rasgos do cubo e virabrequim. Aumentar o comprimento e acrescentar tratamento térmico na chaveta
	Fixação insuficiente da engrenagem do saca-palhas	Substituir sistema atual de fixação do conjunto da engrenagem do saca-palhas
Alongamento da corrente	Falta de lubrificação causada pelo rompimento dos anéis <i>o'ring</i>	Evitar o rompimento dos anéis <i>o'ring</i> alinhando as engrenagens
	Tensionamento inadequado	Verificar tensionamento do sistema periodicamente (cada 50 horas)
	Corrente inadequada	Modificar especificação da corrente
Alto nível de ruído da transmissão	Lubrificação inadequada	Alterar a corrente para facilitar a lubrificação ou utilizar um óleo de baixa viscosidade
	Desalinhamento das engrenagens	Alinhar as engrenagens
	Tensionamento inadequado	Verificar tensionamento utilizado
Desgaste do pino	Falta de lubrificação entre pino e bucha	Alterar a corrente para facilitar a lubrificação ou utilizar um óleo de baixa viscosidade
	Desalinhamento das engrenagens	Alinhar as engrenagens
Rompimento dos anéis <i>o'ring</i>	Alta temperatura de trabalho	Alinhar as engrenagens
Falhas no conjunto da rótula	Rolamento subdimensionado para aplicação	Verificar especificações do rolamento
		Verificar alternativa para a função de rótula do sistema.
	Montagem inadequada	Verificar o processo de montagem

Figura 39. Recomendações de solução para as possíveis causas de falha levantadas na análise de causa raiz

As recomendações de solução apresentadas na tabela 9 resultaram nas seguintes propostas de melhoria para o sistema de limpeza:

- substituição das buchas de borracha da articulação frontal, bem como da articulação traseira inferior por buchas de borracha já utilizadas em outra aplicação e que não apresentam taxa de falhas nos níveis observados. Verificou-se também a posição correta de montagem deste conjunto na máquina, reforçando a necessidade de fazer o aperto dos parafusos de fixação dos braços basculadores à estrutura da máquina em uma posição determinada através de um dispositivo.
- o conjunto da biela de acionamento foi melhorado na área de fixação da biela à flange, substituindo-se a junta rebitada por uma parafusada. A seção transversal da biela foi aumentada. A altura da biela foi diminuída, minimizando as componentes transversais das forças na biela. Foram feitas melhorias nas flanges de fixação do rolamento, facilitando o deslocamento angular do conjunto da biela.
- a fixação do conjunto da engrenagem do saca-palhas foi melhorado, substituindo-se o conceito de fixação ao virabrequim através de parafuso por um encaixe cônico tipo mandril. A chaveta de fixação deste conjunto ao virabrequim foi melhorada através do aumento do comprimento e adição de tratamento térmico.
- foi adotado autoalinhamento da engrenagem tensora, permitindo o seu alinhamento de acordo com as demais engrenagens.
- com a mudança da fixação da engrenagem do saca-palhas e mudança no suporte da tensora, estabeleceu-se o procedimento de alinhamento das engrenagens de acionamento do sistema de limpeza, condição essencial para boa vida útil da corrente.
- melhorias na corrente tais como aumento de espessura da placa, melhoria e tratamento térmico nos pinos e buchas da corrente foram propostas, de maneira a substituir a corrente com anéis *o'ring*.

#### **4.5 FMEA de projeto**

A FMEA tem por objetivo identificar os modos de falha em potencial de um projeto e suas probabilidades de falha, de modo que elas possam ser eliminadas ou minimizadas através da correção de projeto, conforme mencionado no capítulo 2.

A fim de evitar desvio de foco em relação aos objetivos do projeto, e também de prover informações com um maior embasamento, a análise de causa raiz foi realizada com um nível grande de detalhe, para que a equipe multi-departamental quantifique através do cálculo do RPN quais atividades ou ações são necessárias na continuidade das atividades do projeto.

A realização das etapas anteriores para mapear e identificar os modos de falha do sistema tem por objetivo fornecer informações mais detalhadas para a realização da FMEA de projeto. A reunião de FMEA é realizada com uma equipe multidisciplinar, com representantes de áreas chaves para o desenvolvimento de produtos. A FMEA também foi conduzida pelo engenheiro responsável pelo projeto, sendo assessorado pelo engenheiro de confiabilidade. O resultado da FMEA é apresentado na figura 40.

FMEA DE PROJETO - ANÁLISE DO MODO E EFEITO DE FALHA																			
SISTEMA																			
Subsistema																			
Data:																			
						Controle													
Função	Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Severidade	Causa Potencial	Ocorrência	Prevenção	Deteccção	Deteccção	RPN	Ações recomendadas	Resp.	Data	Ação tomada	Severidade	Ocorrência	Deteccção	RPN		
Transmitir movimento ao sistema de limpeza	Rompimento/esmagamento das buchas	Parada da máquina	8	Bucha sub-dimensionada	10		Teste bancada	5	400	Utilizar bucha de outra máquina.	CF	jul/08							
				Montagem incorreta da bucha.	2		Teste montagem	4	64	Criação de ferramenta para montagem na posição neutra do sistema.	CF	jul/08							
	Quebra da biela	Parada de máquina	8	Rompimento das juntas rebitadas	4		Teste bancada	5	160	Utilização de juntas parafusadas.	CF	jul/08							
				Repuxo não uniforme da flange	4		Teste bancada	3	96	Eliminação do repuxo da flange.	CF	ago/08							
				Carga de flexão	2		Teste bancada	3	48	Diminuir altura da biela	CF	ago/08							
				Tensão residual de montagem	2	Instrução montagem	Teste bancada	5	80	Montagem correta dos basculadores - GD&T.	CF	jul/08							
	Falha no rolamento do conjunto da biela	Parada da máquina	8	Rolamento sub-dimensionado	1		Teste bancada	2	16	Verificar cargas no rolamento.	CF	jul/08							
				Montagem inadequada. Flange entortada.	10	Teste torque de rolagem	1	80	Verificar o processo de montagem.	CF	jul/08								

Folga radial e axial no conjunto da engrenagem do saca-palha	Perda gradual de performance	7	Desgaste excessivo no rasgo de chaveta do cubo e do virabrequim na chaveta.	3		Teste bancada	5	105	Reavaliar tolerâncias de montagem da chaveta. Aumentar comprimento e acrescentar tratamento térmico na chaveta.	CF	jul/08						
			Fixação insuficiente da engrenagem do saca-palhas.	3		Teste bancada	5	105	Substituir sistema atual de fixação da engrenagem do saca-palhas.	CF	jul/08						
Alongamento da corrente e quebra	Parada de máquina	8	Falta de lubrificação	8	Alinhamento das engrenagens	Teste bancada	5	320	Evitar o rompimento dos anéis o'ring alinhando as engrenagens.	CF	jul/08						
			Tensão inadequada	2	Revisar intervalo tensionamento	Teste bancada	3	48	Verificar tensionamento do sistema periodicamente (cada 50 horas).	CF	jul/08						
			Corrente inadequada	1	Dimensionar corrente		1	8	Modificar especificação da corrente.	CF	jul/08						
Alto nível de ruído da transmissão	Insatisfação do Cliente	5	Falta de lubrificação	7	Alinhamento das engrenagens	Teste bancada	4	140	Modificar especificação da corrente para permitir lubrificação.	CF	jul/08						
			Desalinhamento das engrenagens	9	Alterar forma de montar engrenagens	Teste bancada	4	180	Alinhar as engrenagens.	CF	jul/08						
Desgaste do pino da corrente	Parada de máquina	8	Falta de lubrificação entre pino e bucha.	2		Verificar amostras	2	32	Modificar especificação da corrente para permitir lubrificação.	CF	jul/08						

			Desalinhamento das engrenagens	9	Alterar forma de montar engrenagens	Teste bancada	4	288	Alterar forma de alinhamento das engrenagens.	CF	jul/08					
Rompimento dos anéis o'ring	Perda de performance	7	Desalinhamento das engrenagens	9	Alterar forma de montar engrenagens	Teste bancada	4	252	Modificar processo de montagem alinhando as engrenagens.	CF	jul/08					
Folga no rolamento da rótula	Aumento dos esforços em outros componentes.	8	Montagem inadequada	10	Alterar forma de montagem		5	400	Verificar o processo de montagem.	CF	jul/08					
			Rolamento subdimensionado	1	Rever especificação		1	8	Rever especificações do rolamento. Verificar outras alternativas para rótula.	CF	jul/08					
Quebra do eixo do bandeijão.	Parada de máquina	8	Desgaste das buchas, desgaste da corrente, falha do conjunto da rótula	3		Teste bancada	5	120	Verificar o sistema e aplicação do eixo.	CF	jul/08					

Figura 40 – FMEA de Projeto

A determinação dos valores de RPN na FMEA tem por objetivo priorizar os modos de falha potenciais a serem analisados. Para a FMEA realizada apresentam-se os maiores valores de RPN na figura-41.

Função	Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Severidade	Causa Potencial	Ocorrência	Deteção	RPN	Ações recomendadas
Transmitir movimento ao sistema de limpeza	Rompimento/esmagamento das buchas de borracha	Parada da máquina	8	Bucha subdimensionada	10	5	400	Utilizar bucha com maior camada de borracha.
	Folga no rolamento da rótula	Aumento dos esforços em outros componentes.	8	Montagem inadequada	10	5	400	Verificar o processo de montagem.
	Alongamento da corrente e quebra	Parada de máquina	8	Falta de lubrificação	8	5	320	Evitar o rompimento dos anéis <i>o'ring</i> alinhando as engrenagens.
	Desgaste do pino da corrente	Parada de máquina	8	Desalinhamento das engrenagens	9	4	288	Alterar forma de alinhamento das engrenagens.
	Rompimento dos anéis <i>o'ring</i>	Perda de desempenho	7	Desalinhamento das engrenagens	9	4	252	Modificar processo de montagem alinhando as engrenagens.
	Alto nível de ruído da transmissão	Insatisfação do cliente	5	Desalinhamento das engrenagens	9	4	180	Alinhar as engrenagens.
	Quebra da biela	Parada de máquina	8	Rompimento das juntas rebitadas	4	5	160	Utilização de juntas parafusadas.

Figura 41: Maiores valores de RPN para a FMEA do sistema de limpeza

A priorização destes modos de falha conduz à elaboração de planos para solução de problemas relacionados às principais partes afetadas no sistema de limpeza, que são as buchas de borracha, corrente de rolos, conjunto da rótula e conjunto da biela. Para estruturar o plano de ação para estes modos potenciais de falha, a metodologia 5W2H foi utilizada, sendo mostrada na figura 42.

<b>Modo de falha: Rompimento/Esmagamento das buchas de borracha</b>	
O QUÊ?	Utilização de bucha de borracha utilizada em outra máquina (mais reforçada).
POR QUÊ?	Para solucionar problemas relacionados ao desgaste e esmagamento das buchas de borracha.
ONDE?	Laboratório de testes / Área de manufatura
QUANDO?	Mar/08 - Dez/09
QUEM?	Eng. Produto.
COMO?	Tolerâncias de projeto adequadas para a rigidez da borracha/ Testes de validação em bancada.
QUANTO?	Avaliar impacto de custo na adoção das novas buchas de borracha.

<b>Modo de falha: Folga no rolamento da rótula</b>	
O QUÊ?	Correção no processo de montagem do rolamento da rótula
POR QUÊ?	Para evitar falhas prematuras do rolamento causadas pela prensagem incorreta do rolamento (Anel externo contra anel interno).
ONDE?	Área de manufatura
QUANDO?	Set/08
QUEM?	Eng. Manufatura/ Eng. Produto
COMO?	Projeto de uma nova ferramenta de montagem do rolamento para prensagem simultânea dos anéis interno e externo.
QUANTO?	R\$1.200,00 (custo do ferramental)

<b>Modo de falha: Alongamento da corrente / Desgaste do pino da corrente / Rompimento dos anéis <i>o'ring</i> da corrente / Alto nível de ruído da transmissão.</b>	
O QUÊ?	Reprojeto do sistema de engrenagens do sistema de limpeza. Especificar nova corrente com placas mais espessas e pinos com tratamento térmico. Corrente <i>heavy duty</i> (sem <i>anéis o'ring</i> ).
POR QUÊ?	Facilitar o alinhamento das engrenagens. Aumento de vida útil da corrente com a utilização de materiais com melhores propriedades mecânicas. Nova corrente permitirá lubrificação.
ONDE?	Laboratório de testes / Área de manufatura
QUANDO?	Mar/08 - Dez/09
QUEM?	Eng. Produto/Eng. Confiabilidade/Eng. Manufatura/ Área de suprimentos
COMO?	Novo procedimento de montagem da corrente. Testes de validação em bancada.
QUANTO?	Verificar incremento de custo de todo o projeto.

<b>Modo de falha: Quebra do conjunto da biela</b>	
O QUÊ?	Substituição de juntas rebitadas por parafusadas /Aumento da seção transversal da biela/ Eliminação de repuxos na flange da biela / Adoção de flanges adequadas para montagem do rolamento.
POR QUÊ?	Aumentar vida útil do conjunto da biela.
ONDE?	Laboratório de testes / Área de manufatura
QUANDO?	Mar/08 - Dez/09
QUEM?	Eng. Produto/Eng. Confiabilidade/Eng. Manufatura/
COMO?	Novo procedimento de montagem do conjunto da biela. Testes de validação em bancada.
QUANTO?	Verificar incremento de custo de todo o projeto.

Figura 42. Metodologia 5W2H para modos de falha com maiores valores de RPN

Dando continuidade ao processo FMEA, elabora-se a prevenção e detecção das causas potenciais levantadas. A primeira, como o próprio nome diz, refere-se à prevenção da ocorrência das causas potenciais de falha. Para a causa potencial relacionada ao dimensionamento da bucha de borracha não houve ação preventiva relacionada, uma vez que é muito difícil relacionar as propriedades de rigidez da nova bucha de borracha com o sistema atualmente em utilização.

Para a folga do rolamento da rótula, levantou-se como causa potencial a montagem inadequada do mesmo. Isso se deve ao fato de que o processo atual de montagem poder causar o modo de falha de rolamento chamado de brinelamento. Este modo de falha é caracterizado por depressões das esferas na pista do rolamento, que é resultado de aplicação de pré-carga, sem girar o rolamento, ou da prensagem do rolamento com excesso de interferência. Essa situação estava ocorrendo na aplicação, pois um componente estava sendo montado com interferência no anel interno, mas com o anel externo do rolamento já restringido ao conjunto da rótula. Para corrigir este potencial modo de falha foi criada uma ferramenta de montagem de modo que os anéis interno e externo fossem prensados ao mesmo tempo, evitando o modo de falha explicado anteriormente.

Os modos de falha relacionados à corrente tiveram como ação preventiva o alinhamento das engrenagens. O fornecedor de correntes recomenda o desalinhamento máximo de um milímetro a cada metro, considerando-se a distância entre centros das engrenagens. Verificando-se a aplicação atual, valores maiores que o desalinhamento recomendado pelo fornecedor foram encontrados. Para obtenção do alinhamento das

engrenagens, projetou-se o conjunto da engrenagem do saca-palhas, tornando este conjunto ajustável, mudando-se em relação ao conjunto atual, que é fixo. O suporte da engrenagem tensora da corrente foi alterado, permitindo o auto-ajuste desta engrenagem de acordo com o posicionamento das demais engrenagens do sistema.

Para as falhas relacionadas ao conjunto da biela, as ações preventivas aplicáveis ao modo de falha de quebra foram a realização de uma análise de elementos finitos, para verificar pontos que necessitariam de melhorias no ponto de vista estrutural. Outra causa potencial para a quebra da biela foi relacionada a sua montagem no braço basculador. Tensões residuais geradas no momento do aperto do parafuso na biela poderiam estar relacionadas a variações dimensionais na montagem das buchas no braço basculador. Para verificação da falha relacionada ao rolamento do conjunto, realizou-se como ação preventiva um teste para verificar o torque necessário para rotação angular deste rolamento dentro dos flanges. No teste constatou-se que os flanges utilizados atualmente não permitiam um deslocamento angular do rolamento dentro da faixa de torques adequada, pois o alojamento esférico dos flanges estava não conforme, o que tornava obrigatória a deformação do flange para evitar o giro do anel externo do rolamento.

A causa potencial relacionada ao rompimento das juntas rebitadas foi endereçada através da utilização de junta parafusada. As juntas rebitadas podem falhar devido a defeitos no processo de fabricação, em que os rebites poderiam estar montados de maneira não-uniforme.

A outra forma de controle das ocorrências é através da detecção dos modos de falha. Esta forma de controle é apontada na FMEA para que os modos de falha sejam verificados antes que o produto seja disponibilizado para produção. Na maioria dos modos de falha apontados na FMEA, a detecção ocorre através da realização de testes de bancada que simulam condições de campo. Antes da realização dos testes, a detecção do modo de falha rompimento ou esmagamento das buchas é realizada através do teste de montagem das buchas no braço basculador, com o objetivo de verificar sinais de deformação da bucha de borracha. O anexo B apresenta a FMEA preenchida com as ações tomadas para solução dos modos de falha.

#### 4.6 Ensaio de bancada para validação das soluções propostas

Na aplicação, o ensaio de bancada comprimiu o tempo de ensaio através da utilização ininterrupta da bancada. Não há a aceleração do teste através da utilização de cargas mais severas do que as cargas observadas em condições normais de aplicação. Conforme apresentado no capítulo 3, algumas etapas da metodologia de testes acelerados disponíveis na literatura (NELSON, 2004) são utilizadas no estudo aplicado, como apresentado a seguir.

O objetivo dos ensaios de bancada para o estudo de caso é obter medidas de confiabilidade para avaliação das soluções propostas para o sistema de acionamento da limpeza através da verificação de taxas de falha e tempo médio até a falha (*MTTF*). Para o estudo de caso, espera-se obter resultados superiores aos obtidos com a configuração utilizada atualmente em produção, mas o principal é que as buchas de borracha e os componentes estruturais do sistema superem 3500 horas sem falha, e que a corrente de rolos atinja 900 horas sem sinais de falha.

No que se refere ao planejamento do ensaio acelerado, escolheu-se como medida de desempenho o valor de tempo-até-falha dos componentes do sistema de limpeza. As condições do teste simulam condições de campo já que a bancada utilizada para os testes foi construída tendo como base a estrutura da colhedora de grãos, onde todos os componentes relacionados ao sistema de limpeza são montados e funcionam através de um motor elétrico que aciona o eixo da transmissão intermediária do ventilador. Nos testes de bancada, condições de ambiente como sujeiras e umidade não são simuladas.

Como comentado anteriormente, não há a aceleração do teste através do aumento de cargas no sistema. A rotação do sistema também não é alterada; a rotação de entrada na transmissão intermediária do ventilador deve variar entre 640 e 720, para que a rotação no virabrequim permaneça na faixa entre 141 e 159RPM, aproximadamente. Um ciclo de carga é utilizado na bancada de teste para representar condições de utilização do ventilador em colheita, ou seja, por um determinado tempo mantém-se certa rotação, sendo alterada de maneira sucessiva.

Durante o desenvolvimento do teste, alguns passos devem ser seguidos. Primeiramente, antes de iniciar o teste, a condição dos componentes da bancada deve ser avaliada, de forma a evitar que componentes com algum tipo de falha façam parte do teste. Com a periodicidade de 50 horas, buchas de borracha, corrente de acionamento e o aparecimento de folga entre o cubo e o virabrequim do saca-palhas são verificadas.

Neste mesmo intervalo de tempo, a corrente de acionamento deve ser lubrificada com óleo 15w40, utilizado também no motor da colhedora de grãos, fato que ocorre em aplicações de campo. A cada 100 horas, o aparecimento de trincas na parte estrutural do sistema de limpeza deve ser verificado.

#### 4.6.1 Resultados do teste de bancada para configuração atual

Para determinação dos resultados de tempo-até-falha dos componentes da configuração atual, foi seguido o procedimento descrito na seção 4.6. Os resultados de tempo-até-falha são disponibilizados na tabela 3.

Tabela 3: Tempo até Falha - Teste de bancada configuração atual

Corrente rolos		Bucha borracha II		Bucha borracha I	
Amostra	TTF	Amostra	TTF	Amostra	TTF
1	579	1	1013	1	1324
2	576	2	808	2	1256
3	666	3	759	3	902
4	759	4	902	4	799
5	1047	5	799	5	2030
6	973	6	619	6	1315
7	916	7	1411	7	1342
8	999	8	1315	8	861
9	715	9	1023	9	1163
10	859	10	693	10	1299
11	813	11	487	11	1164
12	723	12	548	12	1771
13	1566	13	782		
14	912	14	173		
15	665	15	1577		
		16	852		

Conforme apresentado no capítulo 3, primeiramente é realizada a modelagem da distribuição da função de risco dos componentes listados na tabela 9. A seguir obtêm-se o histograma de frequência da função de densidade de probabilidade e os gráficos das funções de risco. Estes histogramas e os papéis de probabilidade são utilizados para verificar a compatibilidade desses dados com as distribuições conhecidas através de verificação visual. No entanto, devido ao baixo número de amostras, não foram obtidos os histogramas de frequência da função de densidade de probabilidade. Após

verificação da distribuição de probabilidade, obtêm-se também os valores de MTTF dos componentes.

Os gráficos de papel de probabilidade, cálculos de parâmetros dos modelos de distribuições e aplicações dos testes de aderência deste trabalho foram realizados com o auxílio do *software* Proconf.

A modelagem da confiabilidade da Corrente de rolos usando o papel de probabilidade Weibull (ver figura 43) revelou Parâmetro de localização = 523,0 horas, Gamma = 1,39, Theta = 368,7 horas e MTTF = 859,6 horas. O teste KS (Kolmogorov-Smirnov) apresentou nível de confiança 0,303 (superior a 0,05), logo conclui-se que a hipótese que a população de tempos até a falha da Corrente de rolos segue o modelo Weibull não pode ser rejeitada.

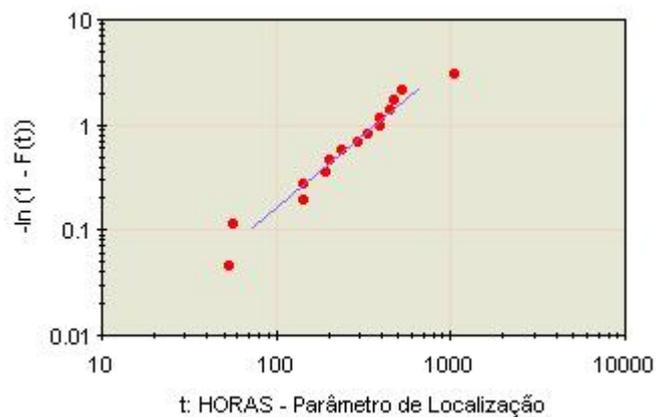


Figura 43 – papel de probabilidade weibull – corrente de rolos configuração atual

Utilizando-se o papel de probabilidade Lognormal (figura 44) foi obtido média ( $\mu$ ) = 6,713, sigma ( $\sigma$ ) = 0,2684 e MTTF = 853,6 horas. O teste KS apresentou nível de confiança 0,37, e conclui-se que a hipótese que a população de tempos até a falha da corrente de rolos segue o modelo Lognormal não pode ser rejeitada.

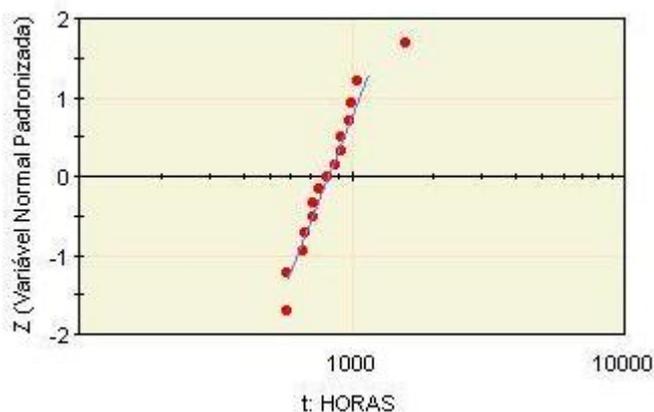


Figura 44 – papel de probabilidade lognormal – corrente de rolos configuração atual

A modelagem dos dados para a distribuição exponencial (figura 45) resultou em parâmetro de localização = 523 horas, inclinação ( $\lambda$ ) = 0,003 e MTTF = 850 horas. O teste KS apresentou nível de confiança 0,053, e desta forma conclui-se que a hipótese que a população de tempos até a falha da corrente de rolos segue o modelo Exponencial não pode ser rejeitada.

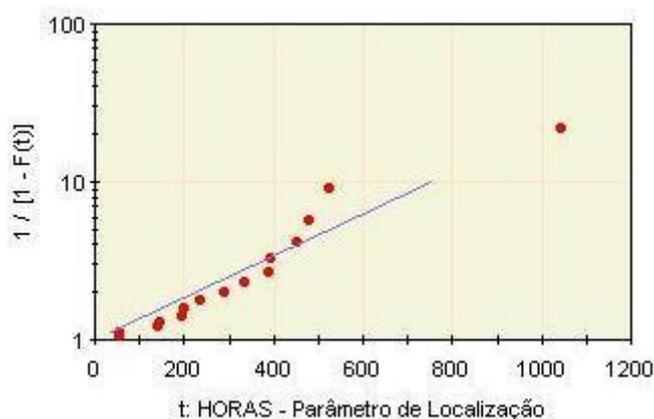


Figura 45 – papel de probabilidade exponencial – corrente de rolos configuração atual

A distribuição Normal (figura 46) apresentou como resultados média ( $\mu$ ) = 851,2 horas e sigma ( $\sigma$ ) = 241,444. O teste KS apresentou nível de confiança = 0,24, e a hipótese de que a distribuição Normal modele estes dados não pode ser rejeitada.

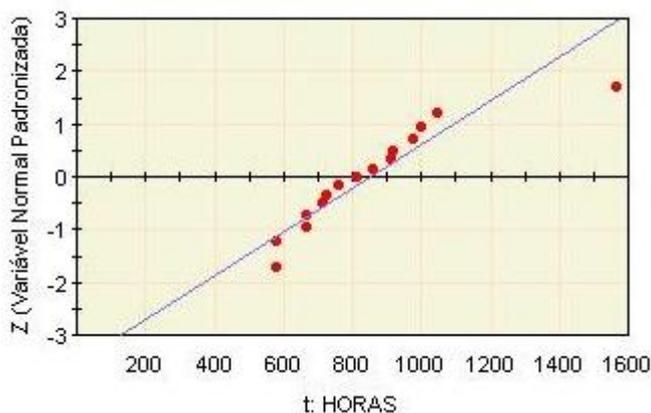


Figura 46 - papel de probabilidade normal – corrente de rolos configuração atual

Os resultados da análise de confiabilidade para a corrente de rolos apresentou três distribuições como possíveis candidatas para melhor representação dos dados. Verificando-se graficamente as distribuições, Weibull e Lognormal parecem ser as que melhores representam os dados de falha da corrente de rolos da configuração atual.

Para a bucha de borracha I, a modelagem da confiabilidade utilizando-se o papel de probabilidade Weibull (ver figura 47) revelou parâmetro de localização = 661,1 horas, Gamma = 1,39, Theta = 629,3 horas e MTTF = 1222 horas. O teste KS apresentou nível de confiança 0,06 e conclui-se que a hipótese que a população de tempos até a falha da bucha de borracha I segue o modelo Weibull não pode ser rejeitada.

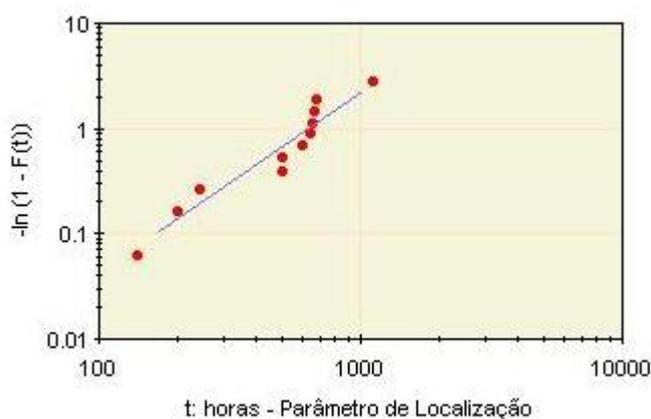


Figura 47 - papel de probabilidade Weibull – bucha de borracha I

Para a distribuição Lognormal (figura 48) obteve-se média ( $\mu$ ) = 7,06, sigma ( $\sigma$ ) = 0,2416 e MTTF = 1205,5 horas. O teste KS apresentou nível de confiança 0,17, e a hipótese de que a população de tempos até a falha da bucha de borracha I segue o modelo Lognormal não pode ser rejeitada.

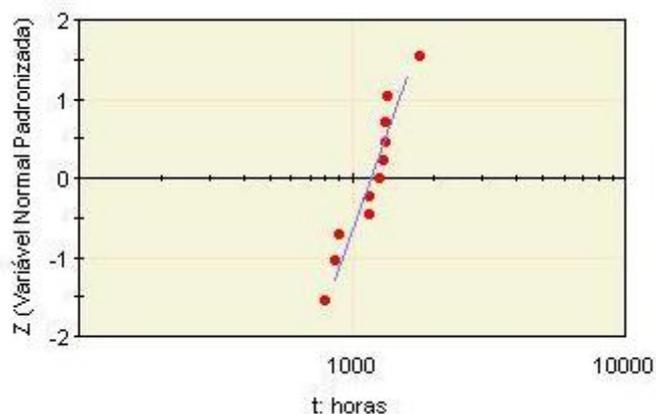


Figura 48 - papel de probabilidade Lognormal – bucha de borracha I

O papel de probabilidade da distribuição Normal (figura 49) apresentou como resultados média ( $\mu$ ) = 1199,6 horas e sigma ( $\sigma$ ) = 283,7. O teste KS apresentou nível de confiança = 0,19, e a hipótese de que a distribuição Normal modele estes dados não pode ser rejeitada.

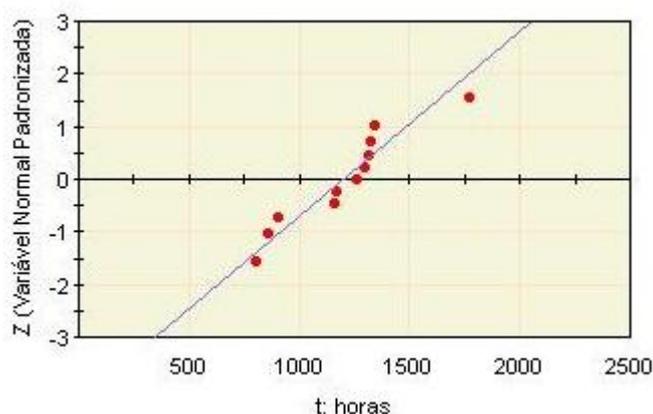


Figura 49 - papel de probabilidade Normal – bucha de borracha I

A modelagem dos dados para a distribuição exponencial (figura 50) resultou em parâmetro de localização = 661,1 horas, inclinação ( $\lambda$ ) = 0,002 e MTTF = 1178,9 horas. O teste KS apresentou nível de confiança 0,0012, e conclui-se que a hipótese que a população de tempos até a falha da bucha de borracha I segue o modelo Exponencial é rejeitada.

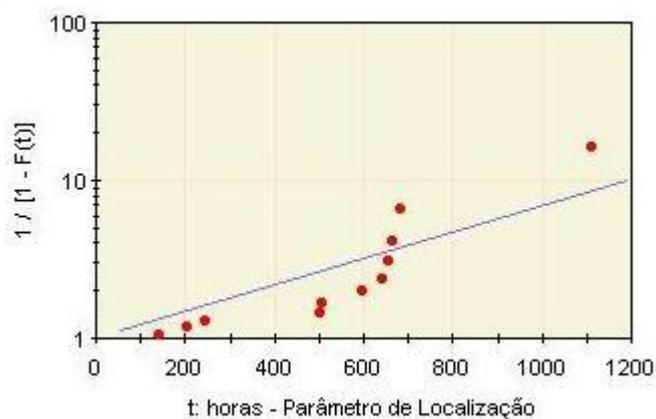


Figura 50 - papel de probabilidade exponencial – bucha de borracha I

Para a bucha de borracha I, o gráfico da distribuição Lognormal parece mostrar a melhor representação dos dados de tempo-até-falha.

A modelagem da confiabilidade da bucha de borracha II usando o papel de probabilidade Weibull (figura 51) revelou parâmetro de localização = 0 horas, Gamma = 2,15, Theta = 998,4 horas e MTTF = 884,2 horas. O teste KS apresentou nível de confiança 0,29 e a hipótese que a população de tempos até a falha da bucha de borracha II segue o modelo Weibull não pode ser rejeitada.

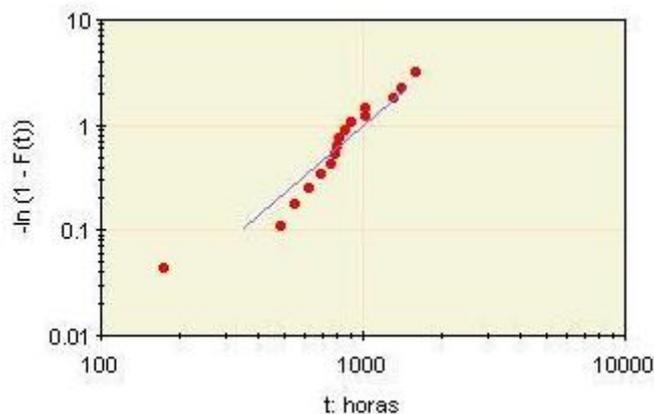


Figura 51 - papel de probabilidade weibull – bucha de borracha II

O papel de probabilidade Lognormal (figura 52) apresentou Média ( $\mu$ ) = 6,65, Sigma ( $\sigma$ ) = 0,506 e MTTF = 883,2 horas. O teste KS apresentou nível de confiança 0,17, e conclui-se que a hipótese que a população de tempos até a falha da bucha de borracha II segue o modelo Lognormal não pode ser rejeitada.

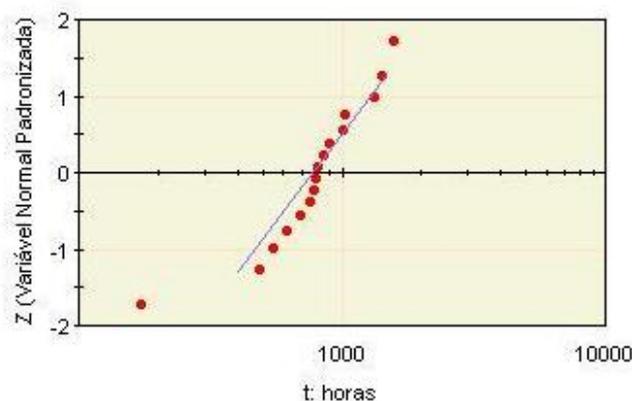


Figura 52 - papel de probabilidade lognormal – bucha de borracha II

A distribuição Normal (figura 53) apresentou como resultados média ( $\mu$ ) = 1199,6 horas e sigma ( $\sigma$ ) = 283,7. O teste KS apresentou nível de confiança = 0,24, e a hipótese de que a distribuição Normal modele estes dados não pode ser rejeitada.

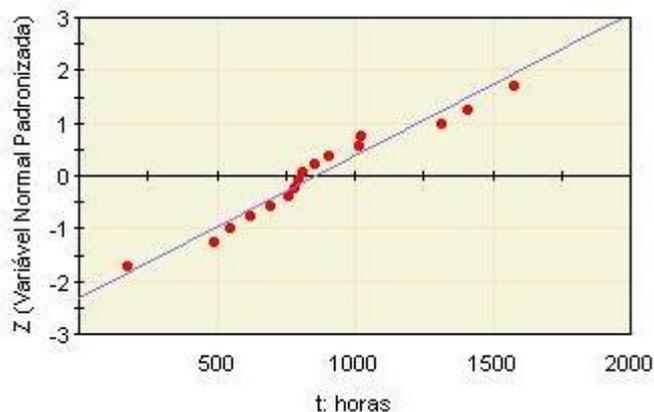


Figura 53 - papel de probabilidade normal – bucha de borracha II

A modelagem dos dados para a distribuição exponencial (figura 54) resultou em parâmetro de localização = 0 horas, inclinação ( $\lambda$ ) = 0,0013 e MTTF = 786,7 horas. O teste KS apresentou nível de confiança 0,0001, e conclui-se que a hipótese que a

população de tempos até a falha da bucha de borracha II segue o modelo exponencial é rejeitada.

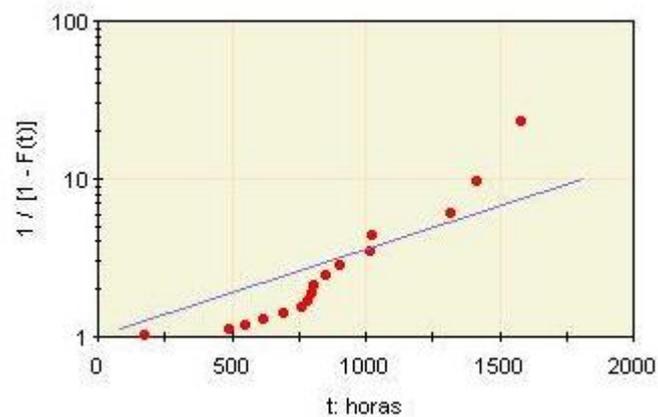


Figura 54 - papel de probabilidade exponencial – bucha de borracha II

Para a bucha de borracha II, as distribuições Weibull e Lognormal parecem ser as que melhores representam os dados de falha.

#### 4.6.2 Resultados dos testes de bancada para configuração proposta

Após a realização dos testes com a configuração atual, a próxima etapa consiste na realização dos testes com a configuração proposta. A montagem dos componentes do novo sistema foi realizada de acordo com o determinado no projeto para evitar falhas prematuras por fatores não relacionados ao projeto. Como o propósito do teste é comparativo, os mesmos procedimentos de teste utilizados na configuração atual foram utilizados no teste desta nova configuração.

A configuração proposta apresentou um comportamento diferente daquele apresentado pela configuração atual. Nesses testes não ocorreram falhas nas buchas de borracha (I e II), que foram substituídas na configuração proposta. Os testes de bancada foram suspensos em 3500 horas, sendo considerado este valor como MTTF para as buchas de borracha. O componente corrente de rolos apresentou falhas conforme tabela 4.

Tabela 4. Tempo até Falha - Teste de bancada configuração proposta

Corrente rolos	
Amostra	TTF
1	965
2	1095
3	1107
4	996
5	928
6	1419
7	959
8	1124

A modelagem da confiabilidade da corrente proposta na metodologia usando o papel de probabilidade Weibull (figura 55) revelou parâmetro de localização = 899,9 horas, Gamma = 1,14, Theta = 191,3 horas e MTTF = 1082,3 horas. O teste KS apresentou nível de confiança 0,29 e conclui-se que a hipótese que a população de tempos até a falha da corrente proposta segue o modelo Weibull não pode ser rejeitada.

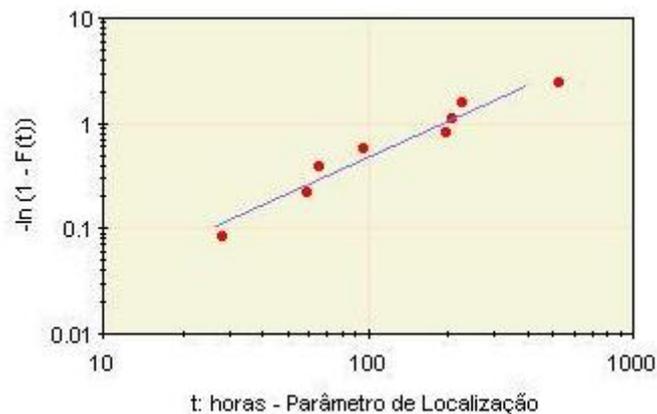


Figura 55 - papel de probabilidade Weibull – corrente proposta

Utilizando-se o papel de probabilidade Lognormal (figura 56) obteve-se média ( $\mu$ ) = 6,97, Sigma ( $\sigma$ ) = 0,14 e MTTF = 1075,4 horas. O teste KS apresentou nível de confiança 0,21, e conclui-se que a hipótese que a população de tempos até a falha da corrente proposta segue o modelo Lognormal não pode ser rejeitada.

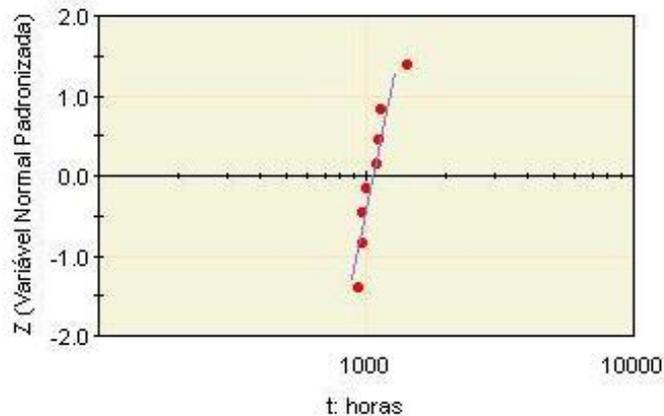


Figura 56 - papel de probabilidade lognormal – corrente proposta

A distribuição Normal (figura 57) apresentou os resultados média ( $\mu$ ) = 1074,1 horas e sigma ( $\sigma$ ) = 153,7. O teste KS apresentou nível de confiança = 0,15, e a hipótese de que a distribuição Normal modele estes dados não pode ser rejeitada.

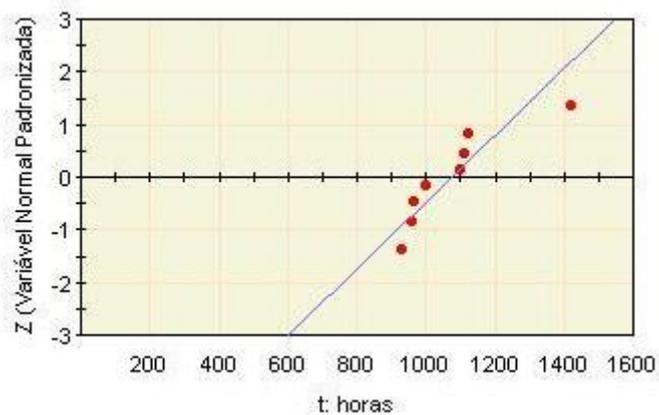


Figura 57 - papel de probabilidade normal – corrente proposta

A modelagem dos dados para a distribuição exponencial (figura 58) resultou em Parâmetro de Localização = 899,9 horas, Inclinação ( $\lambda$ ) = 0,0051 e MTTF = 1095,5 horas. O teste KS apresentou nível de confiança 0,29, e conclui-se que a hipótese que a população de tempos até a falha da bucha de borracha II segue o modelo Exponencial não pode ser rejeitada.

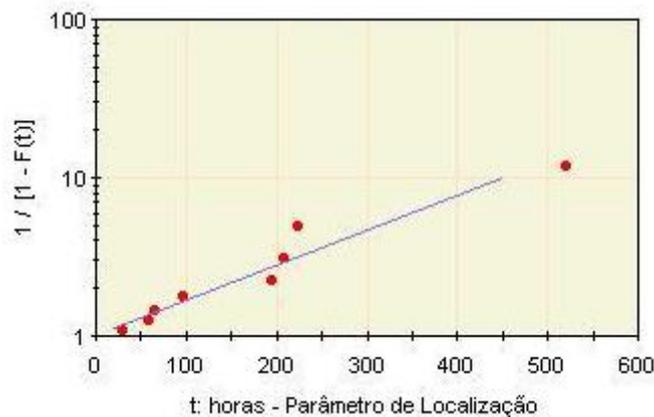


Figura 58 - papel de probabilidade exponencial – corrente proposta

Embora para a corrente proposta todas as distribuições de probabilidade não são rejeitadas, graficamente a distribuição Lognormal é a que melhor representa os dados de distribuição de falha.

#### 4.7 Análise dos resultados obtidos sobre a confiabilidade do sistema

As amostras da configuração atual apresentaram falhas para os três componentes, fato que não ocorreu para a configuração proposta, onde apenas a corrente de rolos apresentou falha. Para este caso, as buchas de borracha tiveram os testes suspensos em 3500 horas. Tomando-se como base a relação entre MTTF e tempo da primeira falha para estes componentes na configuração atual, obtém-se um valor de aproximadamente 1,5 para a bucha de borracha I e 2,5 vezes para a bucha de borracha II. Sendo assim, a MTTF para estes dois componentes poderia ser estimada através da multiplicação do tempo em que o teste foi suspenso por estes fatores, sendo apresentados na tabela 5:

Tabela 5: Resumo dos resultados da análise de confiabilidade

Componente	Configuração atual	Configuração Proposta
	MTTF	MTTF
Bucha de borracha II	883	8750 (estimado)
Bucha de borracha I	1205	5250 (estimado)
<i>Corrente de rolos</i>	851	1075

Os resultados de confiabilidade para os componentes da configuração proposta testados na bancada foram superiores aos dos componentes da configuração atual. O

objetivo deste teste de validação foi comparar a configuração atual com a configuração proposta.

Os resultados de confiabilidade dos componentes testados comprovam o melhor desempenho do sistema proposto. A figura 59 mostra as curvas de confiabilidade para os componentes.

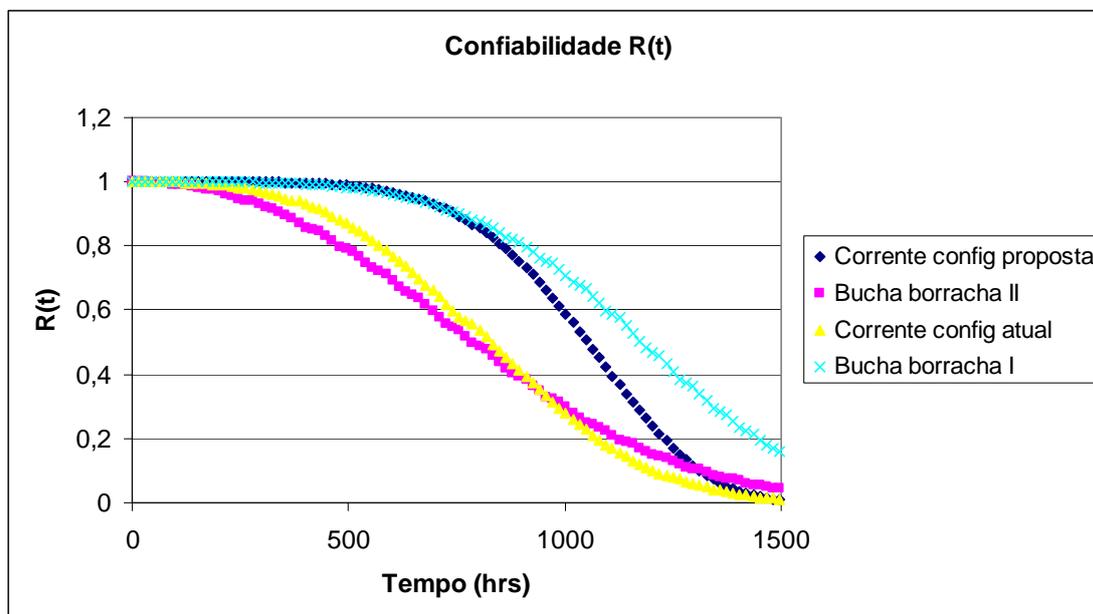


Figura 59. Gráfico de confiabilidade dos componentes testados na bancada

Em complemento ao gráfico de confiabilidade, o gráfico de taxa de falhas também mostra os resultados dos componentes da configuração atual e proposto, conforme apresentado na figura 60.

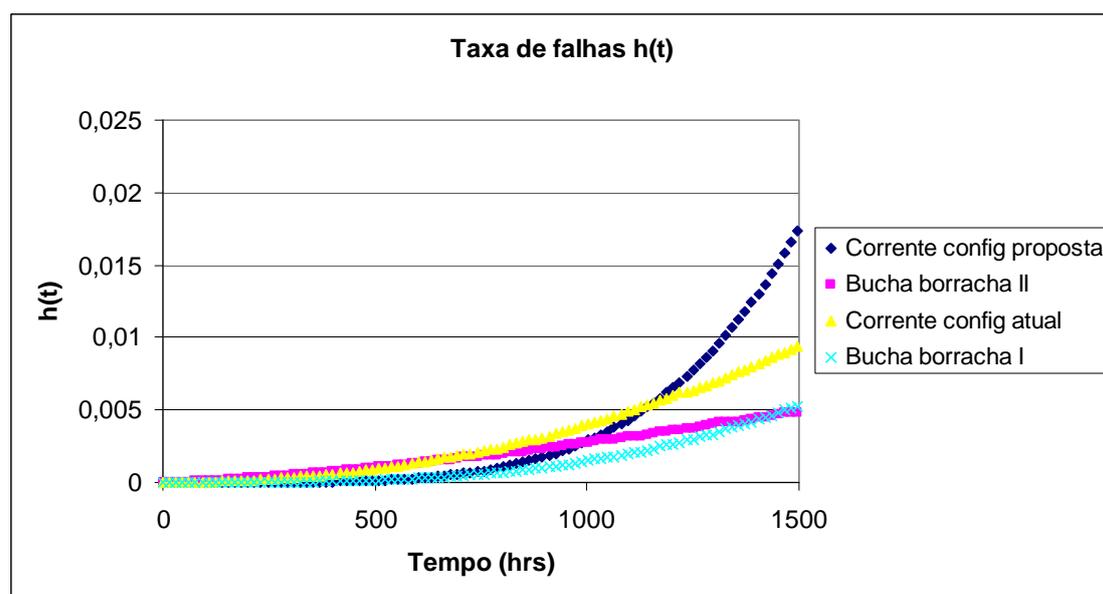


Figura 60. Gráfico de taxa de falhas dos componentes testados na bancada

Fazendo-se um comparativo entre resultados de MTTF, comprova-se um melhor desempenho da configuração de proposta. As buchas de borracha não apresentaram falhas nos testes da configuração proposta, com o teste suspenso em 3500 horas. Na configuração atual, a bucha de borracha II apresentou MTTF de 883 horas e a bucha de borracha I apresentou MTTF de 1205 horas. A bucha de borracha II para a configuração proposta apresentou melhoria de 10 vezes, enquanto que a bucha de borracha I apresentou melhoria de 4 vezes aproximadamente. No caso da corrente, a MTTF da configuração atual foi de 851 horas, enquanto que para a configuração proposta a MTTF foi de 1025 horas, resultando em 20% de melhoria.

Os resultados de confiabilidade mostram a superioridade da configuração proposta. Para comparação de resultados, três instantes de tempo são apresentados: 600, 1000 e 1500 horas. O tempo de 600 horas reflete a utilização média de uma colhedora no Sul Brasil. O tempo de 1000 horas está relacionada a utilização na região Centro-Oeste do Brasil, principalmente por empresas que alugam colhedoras para colher a cultura em diversas propriedades de diferentes clientes. Com o mesmo propósito, o tempo de 1500 horas relaciona-se a este tipo de cliente na Argentina, onde é muito comum clientes alugarem suas máquinas para terceiros. A tabela 6 mostra um quadro resumo dos resultados obtidos na análise de confiabilidade:

Tabela 6. Quadro resumo para valores de Confiabilidade

<b>Confiabilidade</b>				
Tempo (t)	Corrente config proposta	Bucha borr I	Corrente config atual	Bucha borr II
600	0,9685	0,9613	0,775	0,7221
1000	0,5932	0,7102	0,2821	0,3242
1500	0,0083	0,1495	0,0109	0,0489

Os resultados de taxa de falha para os instantes  $t = 600$  horas e  $t = 1000$  horas apresentaram valores maiores para a corrente da configuração atual. No entanto, após o período  $t = 1000$  horas, a taxa de falhas para a corrente da configuração proposta aumenta em relação à corrente da configuração atual, e isto está relacionado ao baixo número de amostras para a corrente da configuração atual. Para as buchas de borracha I

e II, os resultados mostraram-se estáveis ao longo dos três intervalos de tempo. Os resultados de taxa de falha podem ser vistos na tabela 7:

Tabela 7. Quadro resumo para valores de taxa de falha

<b>Taxa de falha</b>				
Tempo (t)	Corrente config proposta	Bucha borr I	Corrente config atual	Bucha borr II
600	2,91E-4	2,78E-4	1,36E-3	1,34E-3
1000	2,86E-3	1,48E-3	3,97E-3	2,73E-3
1500	1,76E-2	5,33E-3	9,42E-3	4,85E-3

As análises de confiabilidade com base nos dados do ensaio de bancada apresentaram melhores resultados relacionados à configuração proposta. O novo projeto está solucionando os problemas de confiabilidade das buchas de borracha, que era o principal causador das falhas dos componentes do sistema de limpeza. Para a corrente de rolos, também houve acréscimo de vida útil, o que pode é atribuído às alterações de projeto realizadas na corrente e nas demais partes do sistema. Desta forma, consideram-se satisfatórios os resultados de validação da configuração proposta, atendendo às expectativas iniciais do projeto.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES**

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver uma metodologia para melhorar a vida útil de um sistema mecânico, através de atividades de confiabilidade ao longo do processo de desenvolvimento de produtos PDP.

Primeiramente, estudou-se a bibliografia para referenciar as atividades de confiabilidade ao longo das fases do PDP de uma maneira macro, para posteriormente aprofundar as atividades de confiabilidade relacionadas às fases iniciais do desenvolvimento de produtos, como a análise de causa raiz e a FMEA. A etapa seguinte do trabalho consistiu em ensaios acelerados da configuração atual de produção e da configuração proposta, na qual as alterações que foram geradas na FMEA foram testadas, e onde realizou-se um comparativo entre as duas configurações.

A bibliografia estudada para os assuntos do trabalho destacou assuntos relacionados à confiabilidade nas fases de desenvolvimento de produtos. Na maioria dos casos, os pesquisadores convergiam para a necessidade da aplicação de atividades de confiabilidade desde as primeiras fases do PDP, evitando que o produto seja submetido a testes de campo se não apresentar um bom nível de maturidade em termos de confiabilidade. Os temas garantia, análise de causa raiz e FMEA também foram abordados, de modo a permitir ao leitor um conhecimento teórico dos assuntos que compõem a metodologia e o estudo aplicado.

A definição da metodologia proposta foi motivada pelo estudo de caso de um sistema da colhedora de grãos, apresentado no capítulo 4. Explicações sobre o funcionamento da máquina, bem como do sistema em estudo, foram fornecidas para se obter um maior entendimento sobre o tema abordado no trabalho.

A utilização de uma análise de causa raiz estruturada para fornecer informações de entrada para a FMEA mostrou a importância de um detalhamento de informações sobre as condições que contornaram a ocorrência da falha, oferecendo assim à equipe da

FMEA mais informações para que ações possam ser tomadas para evitar a ocorrência dos modos de falhas potenciais.

A aplicação da metodologia gerou como resultado estimativas de MTTF,  $h(t)$  e  $R(t)$  para o sistema analisado. A comparação entre MTTFs permitiu verificar as melhorias decorrentes da configuração proposta. As buchas de borracha da configuração proposta apresentaram vida superior à configuração atual em no mínimo 4 vezes. A nova corrente apresentou um incremento de 20% na vida útil. Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se citar:

- a) Realização de ensaios acelerados utilizando-se cargas mais elevadas do que as cargas das condições normais de operação;
- b) Integração de uma análise de QFD às análises de confiabilidade realizada, permitindo uma priorização de atividades que resultarão em maior satisfação do cliente; e
- c) Aprofundamento da análise financeira das soluções geradas ao final da FMEA, buscando-se, além de confiabilidade no produto, uma solução que não penalize o projeto em termos de custos.

## Referências:

**AHMED, J. U.** Modern approaches to product reliability improvement. *International Journal of Quality & Reliability Management*. Vol.13 No. 3 1996, pp. 27-41.

**BEN-DAYA M. ; ABDUL R.** A revised failure mode and effects analysis model. *International Journal of Quality & Reliability Management* Vol. 13 No. 1996, pp. 43-47.

**BIEDA, J.** Reliability Growth Test Management in a Product Assurance Environment within the Automotive Component Industry. *In: Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1991, 317-321.*

**BRAGLIA; M., FANTONI G. and FROSOLINI M.** The house of reliability. *International Journal of Quality & Reliability Management* Vol. 24 No. 4, 2007 pp. 420-440.

**CROW H, L. FRANKLIN H.P., ROBBINS B.N.,** Principles of Successful Reliability - Growth Applications. *In: Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1994, p. 157-159*

**DEPPE W.R. & MINOR O. E.,** *Reliability Enhancement Testing (RET)*  
In: *Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1994, p. 91-98*

**DODSON, B.; NOLAN, D.** *Reliability Engineering Handbook*. Marcel Dekker Inc., New York , New York / Quality Publishing, Tucson , Arizona , 1999, 639p.

**DUPOW H.; BLOUNT G.;** A review of reliability prediction. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. Volume 69. Number 4 – 1997 – pp. 356-362

**ELSAYED, E. A.** *System Reliability Engineering*. Longman Inc. 1996. 739p.

**FOGLIATTO, F.S. e RIBEIRO, J.L.D.** *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. Ed. Campus, 2010.

**FREITAS, M. A.; COLOSIMO, E. A.** *Confiabilidade: Análise de tempo de falha e teste de vida acelerado* – Volume 12 da Série Ferramentas da Qualidade, Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, UFMG, definição da British Standard, BS 4778, 1997. 289p.

**GIL, A. C.** *Como elaborar projetos de pesquisa*. 3<sup>a</sup> Ed., São Paulo: Atlas, 1996, 159 p.

**GUIMARÃES, U. V.**, *Modelagem para análise da confiabilidade de produtos em garantia*. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Administração 2002.  
(Dissertação: Mestrado em Administração)

**HATHAWAY, L. R.**, *Fundamentals of Machine Operation*. 4<sup>a</sup> Ed., Deere & Company. Moline, Illinois, 1991. 215p.

**KERZNER**. *Project Management: a systems approach to planning, scheduling and controlling*. John Wiley & Sons, Inc. 1998

**KOTLER P.; KELLER K. L.**; *Administração de Marketing*, 12<sup>a</sup> Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006, 750p.

**LAFRAIA, J. R. Bo.** *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. 1<sup>a</sup> Ed., Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.388p.

**MADU, C. N.** Reliability and quality interface. *International Journal of Quality & Reliability Management*. Vol.16 No. 7 1999, pp. 691-698.

**Manual técnico de colhedora de grãos – Funções e Operações das colhedoras de grãos** – John Deere, 2009.

**MEEKER, W. Q.; ESCOBAR, L. A.** *Review of Accelerated Test Models*. Statistical Science. 2006 Vol. 21. No. 4, 553-577.

**MEREDITH, J.R.; MANTEL Jr., S.J.** *Project Management: a managerial approach*. John Wiley & Sons, 1995

**MOBLEY, R. K.** *Root Cause Failure Analysis*. Butterworth-Heinemann, 1999. 325p.

**MURTHY D.N.P.** *New Product Warranty: A literature review*. Springer Science + Business Media, Inc. 2006. *Ann Oper Res* (2006) 143: 133-146

**MURTHY D.N.P; Djamaludin I.** *New Product Warranty: A literature review*. *International journal of production economics* 79 (2002) 231-260.

**NELSON, W. B.** *Accelerated Testing Statistical Models, Test Plans and Data Analysis*. 2<sup>a</sup> Ed., Canada: John Wiley & Sons, 2006. 601p.

**O'CONNOR; Patrick D. T.;** *Practical Reliability Engineering*, 3<sup>a</sup> ed. – John Wiley & Sons Ltd. 1995, 431p.

**POSSAMAI, O., SOUZA R.** *Confiabilidade e falhas de campo: Uma metodologia para suporte ao projeto. II Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto – São Carlos, SP – 30-31 Agosto 2000.*

**PROJETCT MANAGEMENT INSTITUTE.** *Um Guia do Conjunto de Conhecimentos do Gerenciamento de Projetos (PMBOK Guide)*. Pennsylvania: Project Management Institute, 2000.

**RAUSAND, M.; HØYLAND, A.** *System reliability theory: models, statistical methods, and applications*. 2<sup>a</sup> Ed., New York: John Wiley & Sons, 2004, 636p.

**ROONEY J. J. ; HEUVEL L. N. V.** *Root Cause Analysis for Beginners* Quality Progress, July 2004

**ROZENFELD; H.** *Gestão de Desenvolvimento de Produtos – Uma referência para a melhoria do processo.* 1ª Ed., São Paulo: Editora Saraiva, 2006. 588p.

**SAKURADA, E. Y.,** *As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos.* Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2001.  
(Dissertação: Mestrado em Engenharia Mecânica)

**SANTOS, G. T.;** *Modelo de Confiabilidade associando dados de garantia e pós-garantia a três comportamentos de falhas.* Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2008. (Tese: Doutorado em Engenharia de Produção)

**SASKIA M. de T.; PETER C. S. and BROMBACHE A. C. R.** Reliability tests to control design quality: a case study. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 15 No. 6, 1998, pp. 599-618.

**SIQUEIRA, I. P.** *Manutenção Centrada da Confiabilidade: Manual de implementação.* Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005, 388p.

**TENG, S.H. and HO, S.Y.** Failure mode and effects analysis: an integrated approach for product design and process control. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 13 No. 5, 1996, pp.8-26.

**THIOLLENT, M.** *Pesquisa-Ação nas Organizações.* São Paulo: Atlas, 1997

**ULRICH; K. T.; EPPINGER; S.n D.** *Product Design and Development.* 2ª Ed. - McGraw Hill – 2000. 358p.

**VOLLERT, J. R.** *Confiabilidade e falhas de campo: um estudo de caso para melhoria da confiabilidade de um produto e do reparo, através de um procedimento sistemático de coleta de dados.* Florianópolis: Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 1996. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Produção)

**WERNER, L.; RIBEIRO, J. L. D.** *Modelagem dos tempos de falhas ao longo do calendário*. Porto Alegre: Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 1996. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Produção).

**XUEHONG D.; J. J.; MITCHELL M. T.** Identifying customer need patterns for customization and personalization. *Integrated Manufacturing Systems*, 14/5, 387-396, 2003.

**YADAV; O. P.; SINGH N.; GOEL P. S.** Reliability demonstration test planning: A three dimensional consideration. *Reliability Engineering and System Safety* 91 (2006) 882-893

**ANEXO A – VALORES DE FALHA POR MÁQUINA , NO PERÍODO DE GARANTIA - JANEIRO/2004 A JANEIRO/2009**

ANO	2004	2005	2006	2007	2008	Total
<b>MUPs</b>	2365	1560	778	771	1015	<b>6489</b>
Número de Falhas Total	206	412	230	120	215	<b>1183</b>
FPM	0,0871	0,2641	0,2956	0,1556	0,2118	<b>0,1823</b>
Bucha borracha II	65	200	61	58	135	519
	0,0275	0,1282	0,0784	0,0752	0,1330	0,0800
Caixa de peneira inferior	14	42	40	4	7	107
	0,0059	0,0269	0,0514	0,0052	0,0069	0,0165
Corrente	24	42	17	5	11	99
	0,0101	0,0269	0,0219	0,0065	0,0108	0,0153
Bucha borracha I	5	33	21	18	11	88
	0,0021	0,0212	0,0270	0,0233	0,0108	0,0136
Eixo do bandejão	38	12	10	3	9	72
	0,0161	0,0077	0,0129	0,0039	0,0089	0,0111
Estrutura	11	13	14	8	16	62
	0,0047	0,0083	0,0180	0,0104	0,0158	0,0096
Engrenagem Excêntrico	15	22	18	2	4	61
	0,0063	0,0141	0,0231	0,0026	0,0039	0,0094
Bielas	11	11	8	7	2	39
	0,0047	0,0071	0,0103	0,0091	0,0020	0,0060
Bucha borracha III	3	13	16	5	1	38
	0,0013	0,0083	0,0206	0,0065	0,0010	0,0059
Peneiras superiores	8	6	13	5	5	37
	0,0034	0,0038	0,0167	0,0065	0,0049	0,0057
Peneiras inferiores	5	8	6	3	5	27
	0,0021	0,0051	0,0077	0,0039	0,0049	0,0042
Balancim	6	7	4	2	2	21
	0,0025	0,0045	0,0051	0,0026	0,0020	0,0032
Outros	1	3	2	0	7	13
	0,0004	0,0019	0,0026	0,0000	0,0069	0,0020

**ANEXO B - FMEA DE PROJETO - ANÁLISE DO MODO E EFEITO DE FALHA**
**SISTEMA**

Data:

**Sub-sistema**

Função	Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Severidade	Causa Potencial	Ocorrência	Controle		Detecção	RPN	Ações recomendadas	Resp.	Data	Ação tomada	Severidade	Ocorrência	Detecção	RPN
						Prevenção	Detecção										
Transmitir movimento ao sistema de limpeza	Rompimento/esmagamento das buchas	Parada da máquina	8	Bucha sub-dimensionada	10		Teste bancada	5	400	Utilizar bucha de outra máquina.	CF	jul/08	Teste de bancada mostrou significativo aumento da vida	8	3	5	120
				Montagem incorreta da bucha.	2		Teste montagem	4	64	Criação de ferramenta para montagem na posição neutra do sistema.	CF	jul/08	Desenvolvimento de ferramenta adequada para montagem	8	1	4	32
	Quebra da biela	Parada de máquina	8	Rompimento das juntas rebitadas	4		Teste bancada	5	160	Utilização de juntas parafusadas.	CF	jul/08	Reprojeto, teste e aprovação	8	2	5	80
				Repuxo não uniforme da flange	4		Teste bancada	3	96	Eliminação do repuxo da flange.	CF	ago/08	Reprojeto, teste e aprovação	8	2	3	48
				Carga de flexão	2		Teste bancada	3	48	Diminuir altura da biela	CF	ago/08	Reprojeto, teste e aprovação	8	1	3	24
				Tensão residual de montagem	2	Instrução montagem	5	80	Montagem correta dos basculadores - GD&T.	CF	jul/08	Itens submetidos ao plano da qualidade	8	8	5	320	
	Falha no rolamento do conjunto da biela	Parada da máquina	8	Rolamento sub-dimensionado	1		Teste bancada	2	16	Verificar cargas no rolamento.	CF	jul/08	Melhorado ajustes do rolamento	8	1	2	16
				Montagem inadequada. Flange entortada.	10	Teste torque de rolagem	1	80	Verificar o processo de montagem.	CF	jul/08	Substituição da flange do rolamento	8	2	2	32	

Folga radial e axial no conjunto da engrenagem do saca-palha	Perda gradual de performance	7	Desgaste excessivo no rasgo de chaveta do cubo e do virabrequim na chaveta.	3		Teste bancada	5	105	Reavaliar tolerâncias de montagem da chaveta. Aumentar comprimento e acrescentar tratamento térmico na chaveta.	CF	jul/08	Aumento do comprimento e adição de tratamento térmico na chaveta.	7	1	4	28
			Fixação insuficiente da engrenagem do saca-palhas.	3		Teste bancada	5	105	Substituir sistema atual de fixação da engrenagem do saca-palhas.	CF	jul/08	Reprojeto do sistema de fixação da engrenagem.	7	1	4	28
Alongamento da corrente e quebra	Parada de máquina	8	Falta de lubrificação	8	Alinhamento das engrenagens	Teste bancada	5	320	Evitar o rompimento dos anéis o'ring alinhando as engrenagens.	CF	jul/08	Alterado conceito da corrente e alinhamento das engrenagens	8	2	4	64
			Tensão inadequada	2	Revisar intervalo tension.	Teste bancada	3	48	Verificar tensionamento do sistema periodicamente (cada 50 horas).	CF	jul/08	Reforçado com equipe de suporte ao cliente a importância do tensionamento.	8	1	1	8
			Corrente inadequada	1	Dimensionar corrente		1	8	Modificar especificação da corrente.	CF	jul/08	Alterado conceito da corrente	8	1	1	8
Alto nível de ruído da transmissão	Insatisfação do Cliente	5	Falta de lubrificação	7	Alinhamento Engrenagens	Teste bancada	4	140	Modificar especificação da corrente para permitir lubrificação.	CF	jul/08	Alterado conceito da corrente	5	2	4	40

			Desalinhamento das engrenagens	9	Alterar forma de montar engrenagens	Teste bancada	4	180	Alinhar as engrenagens.	CF	jul/08	Reprojeto para permitir alinhamento das engrenagens	5	2	4	40
Desgaste do pino da corrente	Parada de máquina	8	Falta de lubrificação entre pino e bucha.	2		Verificar amostras	2	32	Modificar especificação da corrente para permitir lubrificação.	CF	jul/08	Alterado conceito da corrente	8	2	2	32
			Desalinhamento das engrenagens	9	Alterar forma de montar engrenagens	4	288	Alterar forma de alinhamento das engrenagens.	CF	jul/08	Reprojeto para permitir alinhamento das engrenagens	8	2	4	64	
Rompimento dos anéis o'ring	Perda de performance	7	Desalinhamento das engrenagens	9	Alterar forma de montar engrenagens	Teste bancada	4	252	Modificar processo de montagem alinhando as engrenagens.	CF	jul/08	Reprojeto para permitir alinhamento das engrenagens	7	1	1	7
Folga no rolamento da rótula	Aumento dos esforços em outros componentes.	8	Montagem inadequada	10	Alterar forma de montagem		5	400	Verificar o processo de montagem.	CF	jul/08	Reprojeto do sistema de montagem da rótula	8	1	5	40
			Rolamento subdimensionado	1	Rever especificação	1	8	Rever especificações do rolamento. Verificar outras alternativas para rótula.	CF	jul/08	Reprojeto da flange	8	1	1	8	
Quebra do eixo do bandeijão.	Parada de máquina	8	Desgaste das buchas, desgaste da corrente, falha do conjunto da rótula	3		Teste bancada	5	120	Verificar o sistema e aplicação do eixo.	CF	jul/08	Reprojeto do sistema irá evitar a falha do eixo do bandeijão	8	2	5	80