

DANIEL KUSNECOFF SARAIVA

PROPOSTA, PROJETO E TESTE DE UM NOVO SISTEMA DE DESCARGA DE
GRÃOS DE COLHEDORA BASEADO NA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE
DO SISTEMA ATUAL

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Porto Alegre
Dezembro de 2004



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

**PROPOSTA, PROJETO E TESTE DE UM NOVO SISTEMA DE DESCARGA DE
GRÃOS DE COLHEDORA BASEADO NA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO
SISTEMA ATUAL**

DANIEL KUSNECOFF SARAIVA

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS RE-
QUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica**

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. DARCI B. CAMPANI
UFRGS / DEMEC**

**Prof. MSc. HERALDO J. AMORIM
UFRGS / DEMEC**

**Prof. JUAN CARLOS S. ORTIZ
UFRGS / DEMEC**

**Porto Alegre
Dezembro de 2004**

Dedico a todos que estiveram comigo nessa jornada

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos profissionais que cumpriram com louvável caráter as suas tarefas ao meu lado, engrandecendo este trabalho.

Agradeço a Agco do Brasil pela oportunidade profissional

Agradeço aos engenheiros Roque A. Bassin e Edegar Zago pela confiança depositada e conhecimentos transmitidos, que foram fundamentais para os resultados obtidos.

Agradeço ao meu orientador, Jose. A. Mazzaferro, pela paciência, compreensão e grande disposição na orientação.

O que for da profundidade do teu ser, assim será teu desejo.
O que for teu desejo, assim será tua vontade.
O que for tua vontade, assim serão teus atos.
O que forem teus atos, assim será teu destino.

Brihadaranyaka Upanishad IV

SARAIVA, D. K. **Proposta, Projeto e Teste de um Novo Sistema de Descarga de Grãos de Colhedora Baseado na Análise de Confiabilidade do Sistema Atual.** 2004. 25f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

RESUMO

O setor primário brasileiro encontra-se em destaque mundial e em franco crescimento. Cientes disso, os fabricantes de máquinas agrícolas preocupam-se cada vez mais com a produtividade de seus produtos. Entre eles, as colhedoras de grãos ocupam uma posição de suma importância. Nesse contexto, tais máquinas devem ser projetadas e mantidas sempre buscando uma confiabilidade ótima. A operação de descarga de grãos é a última executada pela colhedora no seu processo de trabalho e é tão importante quanto às demais. Por afetar diretamente a produtividade da máquina, deve ser realizada da forma mais eficaz possível. O presente trabalho tratou de realizar uma análise de confiabilidade sobre um sistema de descarga de grãos que vinha apresentando grande incidência de falhas. Determinou-se que a distribuição mais apropriada é a de Weibull. A análise pôde indicar o modo de falha e as suas causas, apoiando-se em resultados de testes de laboratório. Concluiu-se que a origem das falhas é um problema de manufatura e de projeto que compromete o contato entre os dentes das engrenagens responsáveis pelo acionamento do sistema. A baixa confiabilidade encontrada, aliada ao desempenho insatisfatório e características aquém das desejadas justifica a proposta de um novo sistema. O projeto do novo sistema é apresentado e encontra-se atualmente em fase de testes de campo.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Confiabilidade, Distribuição de Weibull, Colhedoras, Descarga de Grãos

DANIEL, K. S. **Proposal, Project, and Test of a New Grain Unloading System Based on a Reliability Analysis of the Current System.** 2004. 25f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ABSTRACT

The agricultural production in Brazil is in a high place and is in constant growing. Knowing that the agricultural machinery manufacturers are minded ever more on the productivity of their products. Among then the combines stand out. In this context these machines must be projected and kept always aiming the optimum reliability. The grain unloading operation is the last one executed by the combine during its work and it is so important as the others. Because it affects directly the machine productivity it must be taken the most efficiently as possible. The present work issues a reliability analysis on a grain unloading system that has been showing a large number of failures. It has been determinate that the most suitable distribution is Weibull. The analysis could indicate the failure mode and its causes, on the grounds of laboratory tests results. It has been concluded that the failures origins are manufacturing and project problems which compromises the gear tooth contact along the gearing responsible for driving the system. The low reliability found as long as the unsatisfactory performance and characteristics below those desired justify the proposal of a new system. An overview of the project of the new system is given and it is currently on field tests.

KEYWORDS: Reliability Analysis, Weibull Distribution, Combines, Grain Unloading

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
COLHEITA	1
Colheita de Cereais	2
CONFIABILIDADE NA ENGENHARIA	2
Definição Formal	2
Razões Principais para a Engenharia da Confiabilidade	2
A curva da Banheira	3
Vantagens de Programas de Engenharia de Confiabilidade	3
A DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	4
TIPOS DE DADOS	4
INTERFERÊNCIA CARREGAMENTO – RESISTÊNCIA	4
Carregamento e Resistência Distribuídos	4
3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	6
SITUAÇÃO ATUAL	6
DESCRIÇÃO SISTEMA ATUAL	6
RESUMO RELATÓRIOS DE TESTES	7
REL. 124/95	7
REL. 041/99	7
REL 067/99 - 01	8
REL 067/99 – 03	8
REL 015/02	9
4. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE	9
ANÁLISE DOS DADOS	9
5. RESULTADOS E ANÁLISES	12
6. APRESENTAÇÃO DA NOVA PROPOSTA	13
7. CONCLUSÕES	16
8. REFERÊNCIAS	17
9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	17

1. INTRODUÇÃO

O setor primário, mundialmente, tem se tornado cada vez mais competitivo. Perde espaço a agricultura familiar enquanto a produção está cada vez mais baseada em grandes propriedades. O aumento da produtividade, tomando como base um índice de produção por unidade de área, é sem dúvida de fundamental importância. Isso porque as áreas cultiváveis disponíveis estão se tornando cada vez mais escassas, contra um aumento contínuo da população mundial. Esse aumento de produtividade, contudo, só é possível graças aos avanços da genética, à introdução de novas tecnologias e ao crescimento da mecanização agrícola.

Ainda que as máquinas agrícolas se apresentem cada vez mais evoluídas e eficazes, exige-se um número cada vez maior de máquinas por unidade de área plantada. O Brasil, apesar do fato de revelar um índice de mecanização muito inferior ao da maioria dos países europeus, lentamente rumo para números superiores. Essa evolução do cenário nacional pode ser explicada pelo sucesso da exploração das novas fronteiras agrícolas.

Esse crescimento da mecanização agrícola e a constante evolução das máquinas agrícolas exigem dos fabricantes atenção especial aos seus produtos, sob todos os aspectos.

Na hierarquia da importância das máquinas agrícolas as colheitadeiras estão na terceira posição, atrás das plantadeiras e pulverizadores, e à frente dos tratores. A colheitadeira é a máquina responsável basicamente por coletar o produto, efetuar sua limpeza e transferi-lo para outro meio de transporte. Todas as etapas são igualmente vitais e devem ser seguidas sempre com a menor perda, menor agressão ao grão e maior produtividade possíveis.

É da etapa de transferência do produto do tanque de armazenagem da colheitadeira até o meio de transporte que se ocupa esse trabalho. A colheitadeira alvo desse estudo, a MF 5650, produzida pela Agco do Brasil, já está no mercado há quase duas décadas, tendo sofrido recentemente uma atualização em quase todos seus sistemas. Esse esforço para evitar a obsolescência justifica-se pelo fato da máquina apresentar grande valor agregado e baixo custo, sendo uma boa alternativa para pequenos e médios produtores.

O objetivo é analisar o atual sistema de descarga de grãos dessa máquina, que vem apresentando um problema crônico de quebra, apresenta baixa eficiência e características aquém das desejáveis. Para tanto foi feita uma análise de confiabilidade, determinando-se as características de distribuição de falhas e indicando-se então o mais provável modo de falha. A partir dessa análise, uma solução deve ser proposta.

A metodologia de análise do projeto atual, que é feito a partir de uma análise de confiabilidade sobre dados de garantia, foge da maneira que é normalmente seguida pelo fabricante. Procurou-se aplicar um procedimento racionalizado e que pode ser sistematizado e estendido para outros projetos. A Engenharia de Confiabilidade é um ramo que pode vir a ser essencial e trazer grandes benefícios, desde que devidamente compreendida e introduzida.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

COLHEITA

A colheita é a última operação realizada no campo, no processo de produção agrícola. Nos primórdios da agricultura, toda operação de colheita era realizada manualmente. A operação de colheita manual, da mesma forma que os demais processos manuais, é de baixa capacidade operacional e, portanto, viável economicamente apenas em pequenas propriedades, onde a finalidade da produção é a subsistência do agricultor e sua família.

Com o aumento das populações e a necessidade de se produzir mais alimentos, com um número de pessoas empregadas na agricultura cada vez menor, as operações de colheita começaram a ser mecanizadas (BALASTREIRE, 1997).

Colheita de Cereais

A colheita de cereais envolve as etapas de corte e alimentação, trilha, separação, limpeza e transporte e armazenagem. Quando uma única máquina realiza todas as operações citadas e também é autopropelida, ela é chamada de colhedora combinada ou simplesmente combinada. A bibliografia agrônômica geralmente utiliza o termo “colhedora”, mas uma vez que o mercado de máquinas agrícolas adota o termo “colheitadeira”, esse será o utilizado nesse texto. As colheitadeiras funcionam a partir de cinco sistemas com funções específicas básicas, que são:

- Mecanismos de Corte e Alimentação;
- Mecanismos de Trilha;
- Mecanismos de Separação;
- Mecanismos de Limpeza;
- Mecanismos de Transporte e Armazenagem.

Uma vez que a operação de descarga é a única que não é computada como tempo produtivo da máquina, é interessante que ela seja feita no menor tempo possível e até mesmo com a máquina em movimento, sem interromper a colheita. Um sistema de grande vazão de descarga é fundamental para que a máquina possa ter um tanque de grande capacidade, o que resulta em menor número de operações de descarga e conseqüentemente menor número de paradas ou menores ciclos de exigência de máxima potência do motor onde a descarga em movimento é possível.

CONFIABILIDADE NA ENGENHARIA

Definição Formal

A engenharia da confiabilidade provê as ferramentas teóricas e práticas através das quais a probabilidade e capacidade de partes, componentes, equipamentos, produtos e sistemas de exercerem as suas funções por períodos desejados de tempo sem que ocorra falha, em condições especificadas, e com uma confiança desejada possam ser especificados, desenhados, previstos, testados e demonstrados (KECECIOGLU, 1991).

Razões Principais para a Engenharia da Confiabilidade

- Para que uma empresa tenha sucesso no ambiente altamente competitivo e tecnologicamente complexo atual, é essencial que ela conheça a confiabilidade de seus produtos e seja capaz de controlá-la de forma que possa fabricar produtos com nível ótimo de confiabilidade. O nível ótimo de confiabilidade garante um custo mínimo de ciclo de vida para o usuário, assim como minimiza os custos do fabricante de tal produto sem comprometer a qualidade e confiabilidade do produto (KECECIOGLU, 1991).
- Não é suficiente para um produto trabalhar por um período de tempo inferior àquele que se deseja. Ao mesmo tempo, não há a necessidade de se desenvolver um produto que opere muito além de sua intenção de vida, já que só importaria custos adicionais ao fabricante (KECECIOGLU, 1991).
- As falhas dos produtos variam desde falhas menores que causam pequenos incômodos, até falhas catastróficas. A engenharia da confiabilidade surgiu da necessidade de se evitar essas falhas catastróficas. Não é à toa que a Boeing foi uma das primeiras companhias a implementar a engenharia da confiabilidade, e o sucesso de tal pode ser visto na segurança das viagens aéreas atuais.
- Hoje, a engenharia da confiabilidade pode e deve ser aplicada a todos os produtos. As falhas menores citadas acima podem não ter conseqüências maiores na vida ou morte do consumidor. Contudo, pode impor um risco de vida ou morte a uma entidade não-biológica: a companhia que

fabrica tal produto. O consumidor moderno é mais inteligente e mais consciente do produto que o consumidor do passado. O consumidor não tolera mais produtos que não operam de forma confiável, ou de acordo com o que foi prometido e divulgado. A não satisfação do consumidor com a confiabilidade de um produto pode ter resultados financeiros desastrosos para o fabricante. Estatísticas mostram que quando um consumidor está satisfeito com o produto ele irá recomendá-lo a outras 8 pessoas; um consumidor insatisfeito, porém, irá contar a 22 pessoas sobre a inadequação do produto.

A curva da Banheira

A maioria dos produtos (assim como nós, seres humanos), exibe características como mostradas na curva da banheira ilustrada na figura 01. Essa curva é plotada com a vida do produto no eixo horizontal e com a taxa de falhas no eixo vertical. A vida pode ser em minutos, horas, anos, ciclos ou qualquer outra unidade quantificável de tempo. A taxa de falhas é dada como falha pela unidade de tempo escolhida.

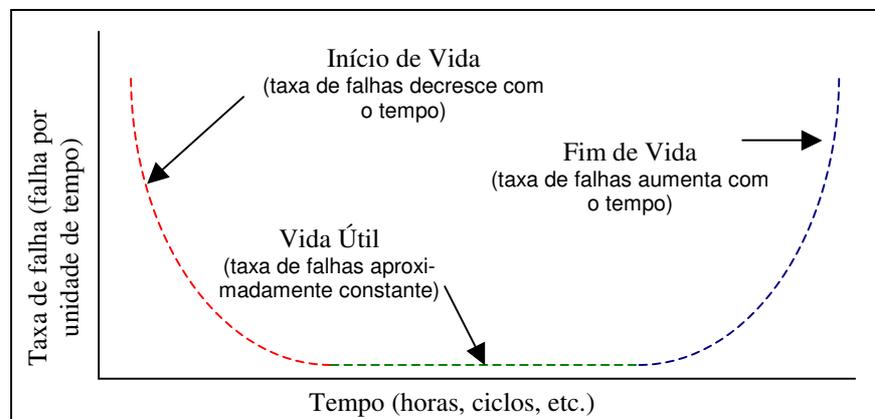


Fig.01: A curva da banheira idealizada, com as três principais fases de vida.

Como pode ser visto desse gráfico, a maioria dos produtos irá começar sua vida com uma alta taxa de falha (que é devida a defeitos de manufatura, mão-de-obra não qualificada, controle de qualidade ineficiente, etc) e exibirão uma taxa de falhas decrescente.

A taxa de falhas normalmente se estabiliza para um valor constante durante a região da vida útil, onde as falhas observadas são falhas aleatórias, e então se encaminha para a região de desgaste onde a taxa de falhas cresce rapidamente.

Vantagens de Programas de Engenharia de Confiabilidade

A lista abaixo apresenta algumas das informações úteis que podem ser obtidas pela implementação de um programa efetivo de confiabilidade:

- Período de garantia ótimo e estimativa de custos de garantia;
- Melhores informações a respeito dos tipos de falhas percebidas pelos componentes e sistemas que ajudam a projetar, pesquisar e desenvolver esforços para minimizar tais falhas;
- Estabelecimento de quais falhas ocorrem em qual período da vida do produto e a melhor preparação para lidar com elas;
- Base para comparação entre dois ou mais projetos e a escolha do melhor do ponto de vista da confiabilidade;
- Auxilia provendo linhas para práticas de controle de qualidade;
- Aumento da satisfação dos consumidores e aumento das vendas como consequência;
- Promoção de uma imagem positiva e reputação da companhia.

A DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A distribuição de Weibull é uma das mais utilizadas distribuições de vida útil na engenharia da confiabilidade. É uma distribuição versátil que pode assumir as características de outros tipos de distribuição, baseado no valor do parâmetro de forma, β .

A distribuição de Weibull é amplamente utilizada na análise de confiabilidade e de dados de vida devido à sua versatilidade. Dependendo dos valores dos parâmetros, a distribuição de Weibull pode ser usada para modelar uma grande variedade de comportamentos de vida. Os valores do parâmetro de forma β e do parâmetro de escala η afetam as características dessa distribuição, como a curva *pdf*, a confiabilidade e a taxa de falha.

TIPOS DE DADOS

Modelos estatísticos suportam-se extensivamente em dados para que sejam feitas previsões. Aqui, os modelos são as distribuições estatísticas e os dados são os dados de vida ou tempo até a falha do produto. A precisão de qualquer predição é diretamente proporcional à qualidade, precisão e suficiência dos dados obtidos.

Na análise de dados de vida, queremos usar todas as informações disponíveis, as quais podem estar incompletas ou incluir incerteza sobre quando a falha ocorreu. Para possibilitar isso, dividem-se os dados de vida em duas categorias: completos e censurados.

Dados completos significam que o valor de dada amostra é observado ou conhecido. No caso da análise de dados de vida, os dados completos seriam aqueles que compreendem o tempo até a falha de todas as unidades da amostra.

Em muitos casos quando dados de vida são analisados, de todas as unidades da amostra nenhuma pode ter falhado, i.e. o evento de interesse não foi observado ou o tempo exato até a falha de todas as unidades não é conhecido. Esse tipo de dado é usualmente chamado de dado censurado. Há três tipos de possíveis esquemas de censura: dados censurados pela direita, dados censurados por intervalo e dados censurados pela esquerda (O'CONNOR, 1988).

O caso mais comum de censura é ao que se refere como dados censurados pela direita, ou dados suspensos. Nesse caso de dado de vida, esses dados são compostos por unidades que não falharam. O termo “censurado pela direita” implica que o evento de interesse está à direita do ponto. Em outras palavras, se a unidade fosse mantida em operação a falha ocorreria algum tempo após a coleta do dado (à direita na escala do tempo).

INTERFERÊNCIA CARREGAMENTO – RESISTÊNCIA

Uma causa muito comum de falha é quando o carregamento excede a resistência. Carregamento e resistência são considerados na sua definição mais ampla. Carregamento pode ser tensão, temperatura, radiação ou qualquer outro tipo de ação que pode levar o sistema à falha. Resistência seria então alguma propriedade física que um corpo ou material pode apresentar, tal como dureza, ponto de fusão ou adesão (O'CONNOR, 1988).

Carregamento e Resistência Distribuídos

O gráfico à esquerda na figura 02 corresponde ao enfoque que é normalmente dado em projetos. É considerado que o carregamento e a resistência correspondem a valores pontuais. Quando a engenharia é vista com olhos determinísticos esse enfoque é suficiente, uma vez que o carregamento é inferior à resistência. O que acontece na vida real é que nem o carregamento e nem a resistência são fixos, e sim distribuídos estatisticamente. Isso pode ser visto no gráfico à direita na figura 02. A distribuição tem um valor médio, representado por C, e R é um desvio padrão correspondente. Se um evento ocorrer na intersecção das duas distribuições, como por

exemplo um item na ponta fraca da distribuição da resistência estiver sujeito ao carregamento do extremo superior da distribuição do carregamento, tal que as “caudas” das distribuições se sobreponham, irá ocorrer uma falha. Essa situação pode ser vista no gráfico da esquerda na figura 03.

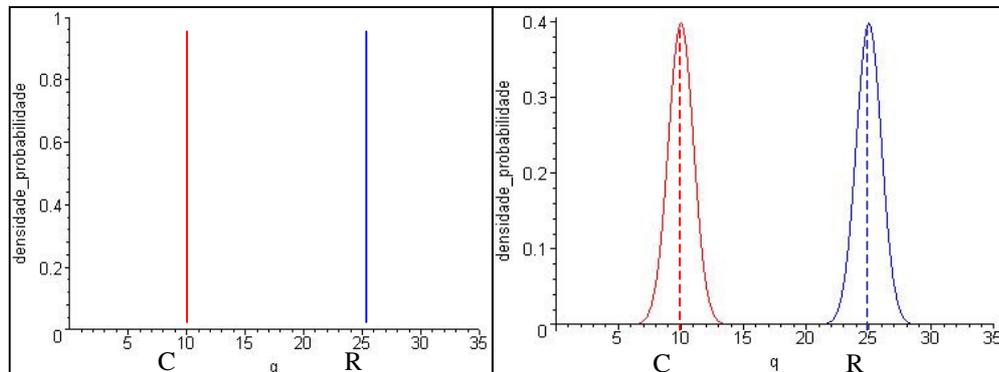


Fig. 02: carregamento e resistência pontuais

Para distribuições de carregamento de resistência pode-se definir dois fatores:

- Margem de Segurança: é a separação relativa dos valores médios de carregamento e resistência.
- Dispersão do Carregamento: é o desvio padrão do carregamento.

Ambos fatores são relativos ao desvio padrão combinado das distribuições de carregamento e resistência. A margem de segurança e a dispersão do carregamento permitem, em teoria, analisar como as distribuições de carregamento e resistência se interferem, e gerar uma probabilidade de falha. Em contraste, o tradicional fator de segurança determinístico, baseado nos valores médios ou extremos, não permite que uma estimativa de confiabilidade seja feita.

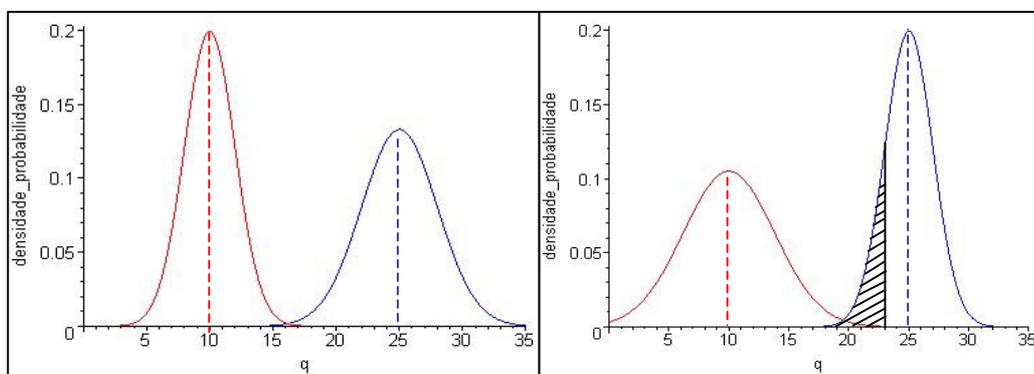


Fig. 03: dois casos de carregamento e resistência distribuídos

Exemplos de diferentes margens de segurança (SM) e dispersões do carregamento (LR) são mostrados nas figuras 02 e 03. O gráfico à direita na figura 02 apresenta uma situação de grande confiabilidade: distribuições de carregamento e resistência estreitas, grande margem de segurança e pequena dispersão do carregamento. O gráfico à esquerda na figura 03 apresenta uma situação onde a dispersão do carregamento ainda é baixa, mas devido a um maior desvio padrão da resistência, a margem de segurança é menor. Carregamentos extremos irão causar a falha dos itens mais fracos. Contudo, apenas uma pequena proporção dos itens irá falhar.

O gráfico à direita na figura 03 apresenta uma baixa margem de segurança e uma alta dispersão do carregamento. Essa é uma situação indesejada do ponto de vista da confiabilidade, uma vez que um carregamento extremo irá causar a falha de uma grande proporção da população. As opções seriam aumentar a margem de segurança através do aumento da resistência média, o que pode ser caro, ou então determinar maneiras de estreitar a distribuição do carregamento.

3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

SITUAÇÃO ATUAL

De Janeiro de 2001 até agosto de 2004 foram registradas aproximadamente 600 ocorrências de garantia no conjunto dos pinhões de acionamento do tubo de descarga, tendo sido movimentados aproximadamente R\$ 650.000,00 para resolução desses casos.

A atual posição de descarga é de aproximadamente 4,1m medidos do centro da máquina até o centro do bocal de descarga do tubo. Essa medida, para uma plataforma de 19', permite um vão livre de menos de um metro, o que dificulta a aproximação da carreta de transporte.

DESCRIÇÃO SISTEMA ATUAL

O sistema atual de descarga de grãos da colheitadeira MF 5650 apresenta-se praticamente inalterado desde a introdução da versão Advanced. De uma maneira global, o sistema é o mesmo desde o lançamento da máquina. A figura 04 apresenta fotos da máquina antes e depois da introdução da versão que se encontra em fabricação atualmente. Percebe-se que visualmente o tubo de descarga de grãos é o mesmo.



Fig.04: fotos das versões Super Serie e Advanced da colheitadeira MF 5650

A figura 06 apresenta um diagrama de blocos resumido do sistema. Percebe-se que todos os blocos estão em série, o que significa que a falha de um dos componentes compromete o sistema inteiro. Esse tipo de disposição é a que apresenta a menor confiabilidade global, uma vez que a confiabilidade de um sistema em série é o produto das confiabilidades de seus sub-sistemas (LAWRENCE, 1995). Contudo, essa disposição é muito comum em máquinas agrícolas (ASAE EP456).

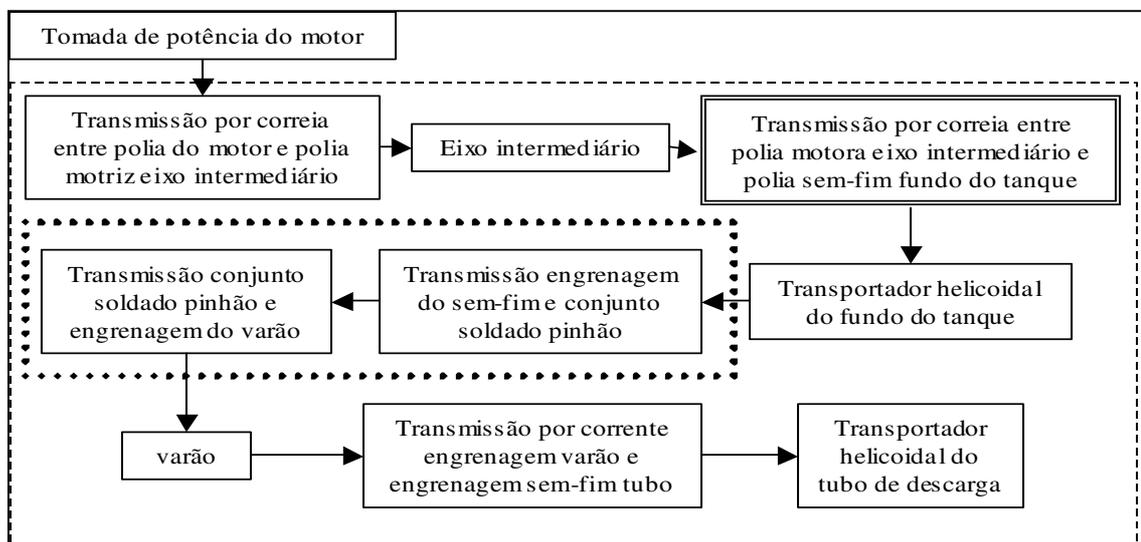


Fig.05: diagrama de blocos do sistema de descarga de grãos atual

O diagrama de blocos da figura 05 está resumido aos elementos que transmitem o movimento, desde a tomada de potência do motor até o bocal de descarga. Os dois blocos destacados por uma caixa pontilhada constituem o conjunto chamado de cárter do tanque de grãos, onde estão montados os pinhões da transmissão entre o transportador helicoidal do fundo do tanque de grãos e o varão que é montado paralelo ao tubo de descarga.

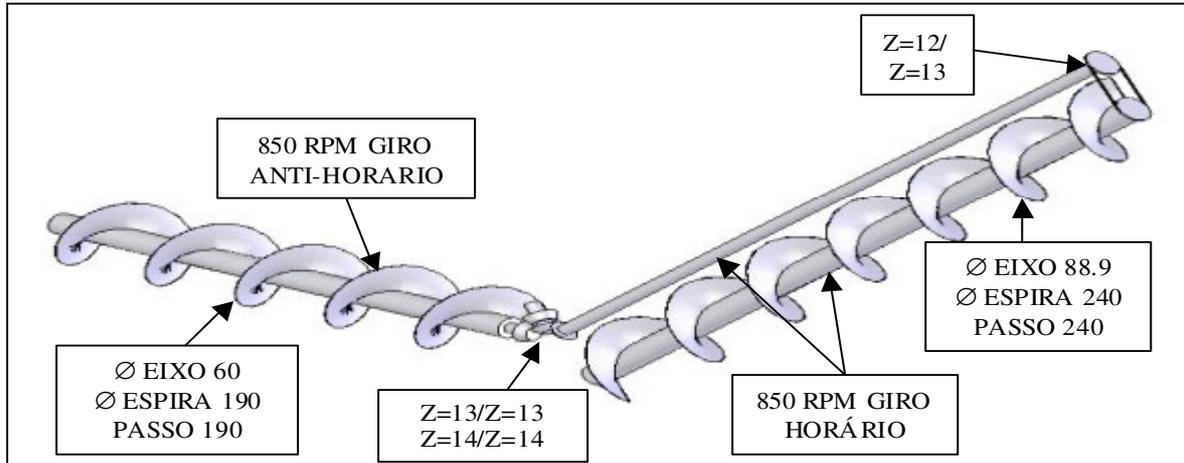


Fig.06: desenho esquemático das partes principais do sistema atual

A figura 06 apresenta um desenho esquemático do atual sistema de descarga de grãos. Podem ser vistas as principais partes de interesse, descritas pela figura 05. Também estão descritas as principais características dos transportadores helicoidais, destacando o fato de ambos apresentarem uma relação entre passo e diâmetro externa unitária, sendo a mais aplicada e conhecida como “passo quadrado” (ANSI/ASAE EP389.2).

RESUMO RELATÓRIOS DE TESTES

Diversos testes de laboratório e de campo já foram realizados para que fossem obtidas maiores informações sobre a performance do sistema de descarga de grãos da colheitadeira MF 5650. Os resultados destes testes são apresentados abaixo de forma resumida, baseado no que é apresentado nos relatórios.

REL. 124/95

Em 1995 foi realizado um teste de laboratório que pretendia medir a durabilidade do conjunto de pinhões da transmissão do descarregador que estava sendo produzido comparativamente com uma nova proposta. À época as engrenagens eram montadas sobre um eixo estriado, e a nova proposta era criar um eixo soldado. Para o teste foi aplicado um torque de 24,5kgf sobre o eixo do sem-fim do tubo de descarga, em ciclos de 17s de carga e 79s de alívio. O objetivo era que as amostras resistissem a 3000 ciclos. O conjunto de linha falhou com 16 ciclos, apresentando quebra generalizada de seus componentes. A nova proposta resistiu a 115 ciclos antes de apresentar quebra de uma das engrenagens.

REL. 041/99

No teste de laboratório N.º041/99 foi medida a vazão média do descarregador e a capacidade volumétrica do tanque graneleiro. O valor encontrado para a vazão foi de 43,3l/s, e o volume do tanque foi estimado em 4830l. Durante a realização desse teste ocorreu a quebra de um dos pares de pinhões da transmissão e o rompimento da corrente da ponta do tubo por duas vezes.

REL 067/99 - 01

Realizado em 1999, o teste descrito no relatório N.º067/99-01 pretendia avaliar a vida útil do sistema de transmissão do descarregador. A metodologia foi de aplicação de um torque de 20kgf.m no eixo do caracol do tubo de descarga por ciclos de 30s, seguidos de pausas de 80s. A expectativa era de uma durabilidade de 4000 ciclos. Das duas amostras testadas, uma resistiu por 162 ciclos e outra por 141 ciclos. Foi sugerido nesse relatório que o contato entre os dentes das engrenagens deveria ser melhorado e o módulo aumentado. As fotos da figura 07 apresentam o sistema de montagem para realização dos ensaios, o detalhe da quebra de um dos pinhões e o detalhe da não-uniformidade do contato entre dentes.



Fig.07: fotos do relatório 067/99 emissão 01

REL 067/99 – 03

Semelhante ao teste descrito no relatório N.º067/99-01, porém com objetivo de avaliar a durabilidade da nova proposta de projeto dos pinhões do conjunto de acionamento. O ângulo de pressão foi alterado de 25° para 27°, o material foi alterado de 20MnCr5 para 16MnCr5, a profundidade de têmpera foi aumentada de 0,4-0,6mm para 0,6-0,8mm e também foram analisadas amostras com a folga de engrenamento reduzida e uma amostra com sistema de engrenagens com dentes helicoidais. Os resultados obtidos foram:

- Amostra com ângulo de pressão de 25° (normal) – resistiu 187 ciclos.
- Amostra com ângulo de pressão de 27° e folga de 0,6-0,7mm – resistiu 105 ciclos.
- Amostra com dentes helicoidais: resistiu 3 ciclos.
- Amostra com ângulo de pressão de 27° e folga de 0,25mm – resistiu 236 ciclos.
- Amostra com ângulo de pressão de 27° e folga de 0,4mm – resistiu 527 ciclos.



Fig.08: fotos do relatório 067/99 emissão 03

As fotos da figura 08 apresentam alguns detalhes das amostras.

REL 015/02

Foi realizado um teste de campo para comparar a vazão de descarga da 5650 série I com a 5650 série Advanced, conforme descrito no relatório N.º015/02. A tabela 01 apresenta um resumo dos resultados obtidos. O produto colhido nos testes era trigo.

Tabela 01: valores de vazão obtidos em teste de campo.

Regulagem	Fase I (l/s)	Advanced (l/s)
Como usado p/ cliente	30,27	35,3
Máxima Vazão	46,11	43,87
Mínima Vazão	19,25	22,04

Também foi observado nesse teste que o sem-fim do fundo do tanque transportava parte do material pela sua parte superior. Esse material, ao encontrar os suportes dos conjuntos de pinhões, gerava vórtices, e foi apontado como provável causa de entupimento e dificuldade de escoamento.

4. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

Esta seção descreve como foi feita a análise de confiabilidade do sistema de descarga de grãos em questão. Para determinação da distribuição de confiabilidade, seus parâmetros e gráficos foi utilizado o software Weibull++6.

ANÁLISE DOS DADOS

Os dados de tempo até falha foram obtidos junto ao setor de Garantia do Departamento de Pós-Vendas. A garantia das colheitadeiras em estudo é de 600 horas ou um ano, o que vencer primeiro. Contudo, ocorrem casos excepcionais onde é concedida a garantia mesmo após um desses dois eventos, o que é chamado de garantia tecnicamente precedente, e que só deve ser concedida se confirmada falha de manufatura (erro de montagem, falha de material, etc.). Por essa razão, as informações armazenadas são aquelas que ocorrem em até 600 horas de operação da máquina, com alguns casos excedendo esse limite.

Praticamente todas as falhas que ocorrem no sistema atual de descarga de grãos ocorrem nos pinhões que transmitem o movimento do transportador helicoidal do fundo do tanque de grãos para o transportador helicoidal do tubo descarregador. Dessa forma, a análise será voltada exclusivamente para esse sub-sistema.

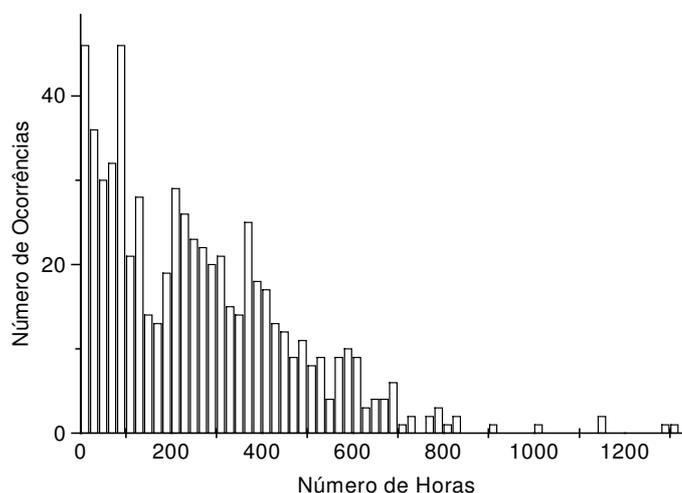


Fig. 09: Histograma do número de ocorrências por número de horas

As informações obtidas estão representadas na figura 09, agrupadas em intervalos de 10 horas através de um histograma.

Uma vez que a descrição do defeito é muito subjetiva e depende da análise de um funcionário da concessionária responsável pela máquina e também do coordenador de serviços, para efeitos da análise de confiabilidade todos os defeitos foram reunidos sob o mesmo grupo. Esse enfoque pode gerar uma sobreposição de modos de falhas na aproximação por alguma distribuição, mas assume-se esse risco na presente análise.

Os dados de tempo até falha obtidos correspondem ao intervalo entre janeiro de 2000 e junho de 2004, período no qual foram vendidas aproximadamente 3000 máquinas. Foi escolhida essa data de entrada por representar a introdução da proposta de alteração de projeto descrita no relatório N°067/99-03 e que vem sendo aplicada até hoje. Dessa forma, considerou-se o universo de 603 falhas e 2397 dados censurados. Para que os dados censurados não influenciassem a determinação da melhor distribuição das falhas foi feita primeira uma análise prévia com apenas os dados de tempo até falha.

Para escolha da melhor distribuição foi feita uma comparação entre as distribuições Exponencial, Normal, Lognormal e de Weibull, através da análise do papel de probabilidade e do método da máxima verossimilhança. Em ambos quesitos a distribuição de Weibull foi a mais indicada. A figura 10 apresenta o papel de probabilidade encontrado para a distribuição de Weibull, assim como seus parâmetros. Percebe-se a forte concordância entre os pontos e a reta que os aproxima.

Para análise do universo de dados disponíveis foi preciso primeiramente determinar o número de horas que se desejava aplicar aos dados censurados. Uma vez que esses dados encontram-se fora do período de garantia e sua estimativa é muito difícil, foi escolhido o valor de 1000 horas como representativo das amostras que não apresentaram falhas relatadas. Como nesse caso há uma dispersão desconhecida dos dados, o método da máxima verossimilhança foi aplicado a fim de evitar os possíveis erros causados por outros métodos.

A figura 11 apresenta os gráficos da função acumulada de falha e a distribuição da função probabilidade da distribuição encontrada. No gráfico da probabilidade versus a função acumulada de falha podemos notar que há uma divergência entre os dados e a distribuição que os aproxima, depois de 1000hrs. Isso se deve ao grande número de dados censurados lançados com esse valor. Como o horizonte de interesse está abaixo desse valor, contudo, ignora-se essa divergência na presente análise. Caso fosse de interesse, seria necessária a coleta de dados mais precisos de vida durante um período mais extenso.

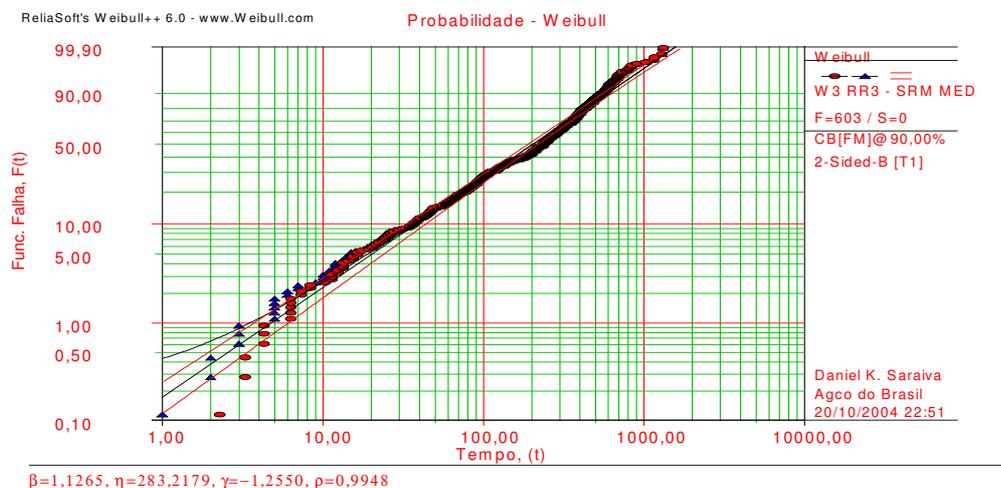


Fig.10: papel de probabilidade para os dados de falhas não-censurados

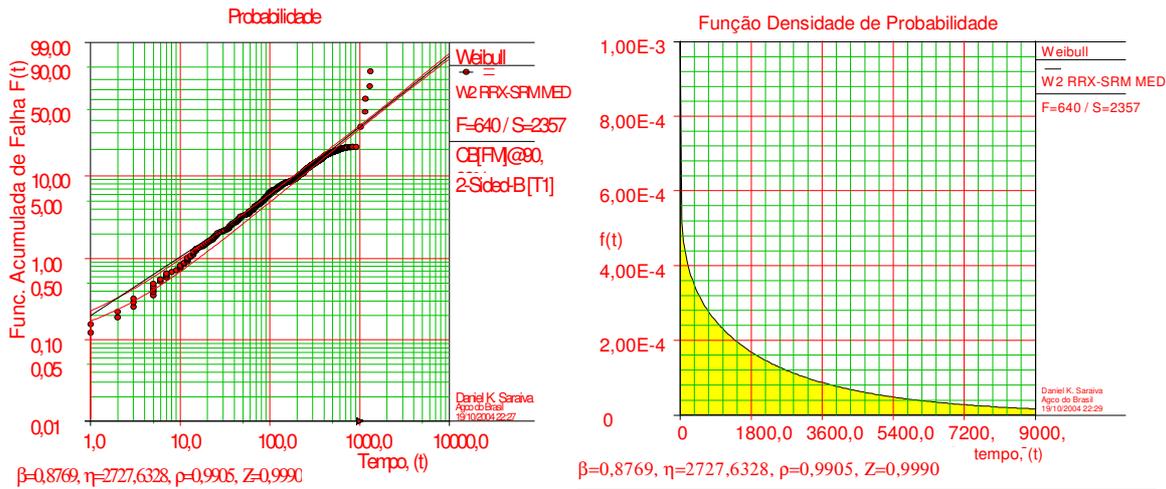


Fig. 11: papel de probabilidade e função densidade de probabilidade

Na figura 12 apresentam-se os gráficos de taxa de falha e confiabilidade versus tempo.

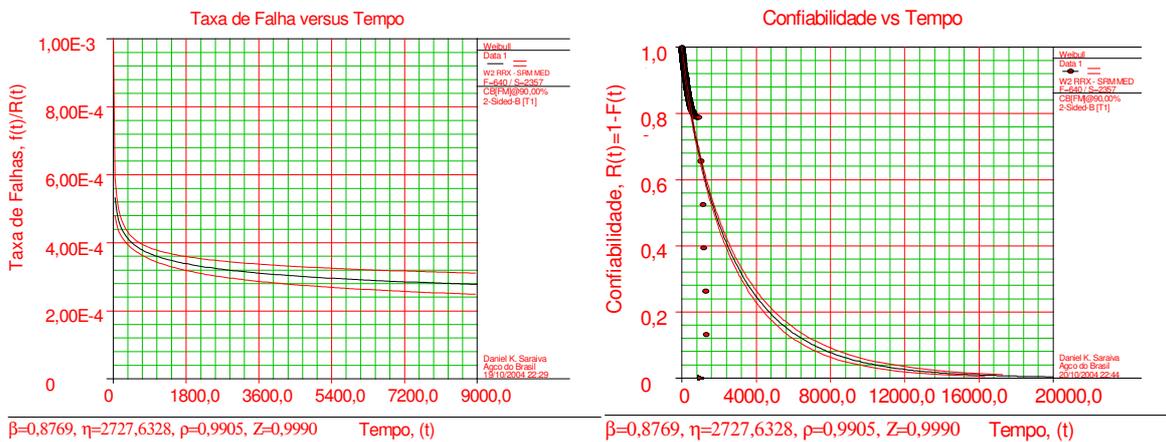


Fig.12: gráficos da taxa de falhas e confiabilidade versus tempo

Do gráfico da taxa de falha podemos notar que a taxa decresce com o tempo, mais acentuadamente até aproximadamente 800hrs, e depois tende para um valor constante. Esse comportamento é tipicamente característico das duas primeiras fases da curva da banheira.

Assim como no papel de probabilidade, os pontos no gráfico da confiabilidade versus tempo divergem da curva da distribuição depois de aproximadamente 1000hrs. É indicado que a confiabilidade se aproxima de zero com aproximadamente 20000hrs de vida, o que só poderia ser verificado com o monitoramento de uma amostra representável do universo de máquinas no campo. Contudo, até pouco antes de 1000hrs, podemos afirmar que a distribuição aproxima-se dos dados com uma incerteza inferior a 10%. A função de confiabilidade de Weibull, com os parâmetros calculados a partir dos dados de vida do sistema de transmissão da descarga de grãos, pode ser descrita então conforme a equação abaixo.

$$R(T) = e^{-\left(\frac{T-\gamma}{n}\right)^\beta} \Rightarrow R(T) = e^{-\left(\frac{T}{2727,63}\right)^{0,8769}}$$

Da equação acima podemos calcular, por exemplo, a vida esperada para uma confiabilidade de 50%, que é a vida na qual metade das unidades falhará. Esse tempo é de 1800hrs.

Em todos os gráficos apresentados nessa seção (com exceção da função densidade de probabilidade), estão presentes as bandas que delimitam a incerteza em 10% (em mais ou menos 5%).

5. RESULTADOS E ANÁLISES

A partir dos resultados da análise de confiabilidade do sistema de descarga de grãos da colheitadeira MF 5650 podemos tirar algumas conclusões a respeito do projeto corrente. Como apresentado na figura 12, a taxa de falhas por unidade de tempo é fortemente decrescente nas primeiras horas de operação das máquinas, caracterizando a fase de mortalidade infantil do produto. Pode-se concluir, portanto, que as quebras são ocasionadas por problemas de manufatura, material inadequado ou controle de qualidade ineficiente.

Conforme o que está descrito nos relatórios N.º067/99-01 e 02 e resumido na seção 4, as transmissões testadas em laboratório falharam com um número de ciclos muito inferior à expectativa. O principal resultado das falhas foi quebra generalizada de pelo menos um dos pinhões do conjunto, tal como os casos relatados no campo e registrados pelo setor de Garantia.

A proposta do fornecedor dos pinhões à época, e que foi adotada pela Engenharia do Produto, foi a de aumentar o ângulo de pressão e diminuir a folga entre os dentes.

O aumento do ângulo de pressão faz com que o dente da engrenagem tome uma forma mais robusta, aumentando sua base e reduzindo sua ponta. Também reduz o risco de interferência em engrenagens de pequeno número de dentes (como é o caso), além de deslocar o vetor força resultante numa direção mais radial, diminuindo a flexão do dente e conseqüentemente a tensão na sua raiz (NORTON, 1998). O ônus da mudança do ângulo de pressão de 25° para 27° é que se abandonou um valor comercial, de grande disponibilidade, para adotar-se um valor pouco comum e conseqüentemente de maior custo.

A redução da folga entre dentes (*backlash*) é indicada para casos onde as engrenagens estão submetidas à reversão de torque, segundo SHIGLEY, 1989. Para o caso da transmissão da descarga de grãos, onde não há mudança no sentido do torque, a redução da folga entre dentes como solução para o aumento da durabilidade das engrenagens é questionável. Fica comprovado apenas o aumento do custo de fabricação, pela exigência de obtenção de tolerâncias mais estreitas.

O aumento do módulo (razão entre o diâmetro e o número de dentes) não era uma alternativa. Isso porque as engrenagens estão montadas em um habitáculo que fica submerso no fluxo dos grãos durante a operação de descarga, atuando como um agente de restrição. O aumento do módulo deveria ser seguido por um aumento no habitáculo, aumentando conseqüentemente a restrição.

As figuras 07 e 08 mostram que já em laboratório foi comprovado que o contato entre os dentes não é uniforme e ocorre em uma área muito pequena dos dentes. O contato não uniforme é causa comum de falha em engrenagens, e é a explicação para que as engrenagens helicoidais tenham apresentado um comportamento tão aquém do esperado (uma vez que esse tipo de engrenagem é muito sensível às variações de montagem). O contato disperso no caso tem origem no fato dos pinhões serem montados em um conjunto muito complexo, onde há grande chance de acúmulo de erros. São diversas partes fundidas, usinadas e soldadas, ainda com o agravante de que um dos pinhões é fixo diretamente no tubo de descarga, que é removido para o transporte da máquina até a concessionária e só então remontado.

O resultado do contato não uniforme é um carregamento também não uniforme, com grande dispersão. Segundo o que foi apresentado na seção 03, a alta dispersão do carregamento pode ocasionar a falha de um grande número de itens da população. Isso é o que aparenta estar ocorrendo no caso da transmissão da descarga de grãos da colheitadeira MF 5650. Os itens mais fracos falham precocemente, ainda dentro do prazo de garantia, o que explica que a taxa de falhas seja alta e decrescente, característico da fase de mortalidade infantil.

6. APRESENTAÇÃO DA NOVA PROPOSTA

Baseado no que foi descrito nas seções anteriores, duas possibilidades de propostas para a solução do problema apresentado são possíveis, respeitando os objetivos específicos:

- a) Reformulação do sistema atual.
- b) Introdução de um novo sistema.

A primeira proposta tratar-se-ia de uma otimização do sistema atual, buscando atuar diretamente sobre os pontos fracos, já identificados. A segunda proposta apresentaria um sistema substituto ao atual, com características superiores. Uma vez que esse novo sistema pode ser baseado em sistemas já existentes, e portanto de comportamento previsível, optou-se por não se efetuar a otimização do sistema atual, o que levaria a necessidade de testes mais extensos e provavelmente processos iterativos de projeto e maior custo.

Um dos objetivos é que o novo sistema fosse o menos intrusivo possível, ou seja, deve apresentar a capacidade de poder ser introduzido em máquinas no campo sem a exigência de alterações profundas. Isso descarta a possibilidade de adoção do sistema de transmissão utilizado nas colheitadeiras mais novas, constituído de duas juntas universais que fazem a ligação entre o transportador helicoidal do fundo do tanque e o transportador do tubo de descarga. Essa possibilidade exigiria alterações na constituição do tanque de grãos, o que seria inviável de ser realizado em campanha.

A próxima alternativa seria a mudança da disposição do tubo, passando do tipo “*swivel*” (tubo simples articulado num plano a 45°) para o tipo “*turret*” (tubo composto articulado num plano horizontal). Assim é possível a adoção de um sistema similar ao de outras máquinas produzidas pelo fabricante, exigindo tempo de desenvolvimento reduzido. Alguns exemplos de máquinas disponíveis como modelo para tal disposição são:

- Gleaner C62
- Agco Allis Optima 440
- Massey Ferguson MF 6855

Fotos dessas máquinas podem ser vistas na fig.13.



Fig. 13: fotos das colheitadeiras Gleaner C62, AA 440 e MF 6855

A colheitadeira Gleaner C62, por ter sido projetada e construída nos Estados Unidos, não é considerada como um bom modelo, uma vez que é admitida a diferença de comportamento entre as máquinas em solo americano e solo sul-americano. As outras duas máquinas já são conhecidas e sabe-se que o desempenho de seus sistemas de descarga de grãos é completamente satisfatório. Ainda seria vantajosa a adoção da máxima similaridade com a colheitadeira MF 6855, por tratar-se de um projeto nacional e de completo domínio.

Analisando-se o projeto da MF 6855, nota-se que o sistema de transmissão entre o transportador do fundo do tanque e o transportador vertical pode ser utilizado sem profundas alterações. Contudo, o sistema de transmissão entre o caracol vertical e o horizontal não seria adequado, uma vez que exige um espaço não disponível na MF 5650. Observando o mesmo aspecto na Agco Allis Optima pode-se concluir que é viável a adoção da solução adotada nessa máquina.

O dimensionamento dos transportadores helicoidais fica limitado ao diâmetro do caracol do fundo do tanque, que não pode ser aumentado. O único parâmetro que pode ser variado é o passo, para que se possa obter uma maior vazão de material. Opta-se, assim, pela máxima razão passo sobre diâmetro sugerida em ANSI/ASAE EP389.2, 2000.

Sabendo-se que cada transportador helicoidal deve apresentar uma vazão pelo menos 10% superior ao subsequente, partiu-se para o dimensionamento dos demais caracóis. Preferiu-se escolher como parâmetro de partida os diâmetros externos, para possibilitar a adoção da mesma curva de ligação entre os tubos vertical e horizontal que é utilizada na AA Optima.

Tendo sido definidos os sistemas de transmissão e as dimensões dos transportadores helicoidais e suas rotações, o projeto preliminar está concluído, podendo ser visualizado na fig.14. A vazão teórica do transportador helicoidal do fundo do tanque é de 45l/s para o trigo.

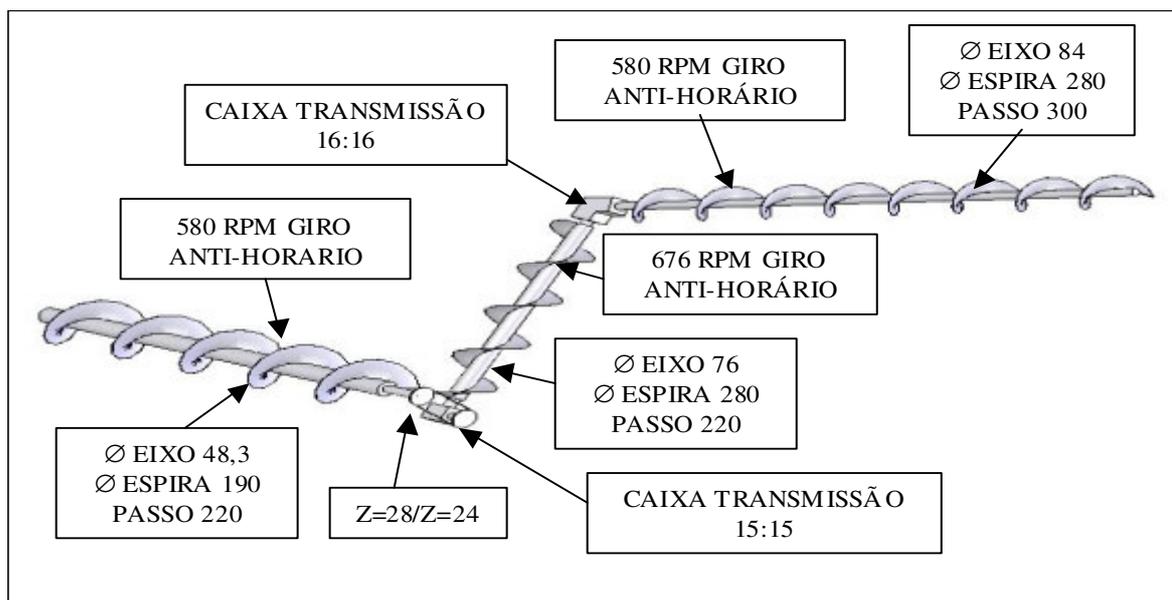


Fig.14: desenho esquemático do sistema proposto

O subsequente projeto detalhado tratou de fazer a interface entre as características determinadas no projeto preliminar e o que se apresentava disponível da máquina. Incluíram-se aqui todos os conjuntos de solda para instalação do novo sistema, assim como a previsão de reforços nos pontos mais solicitados.

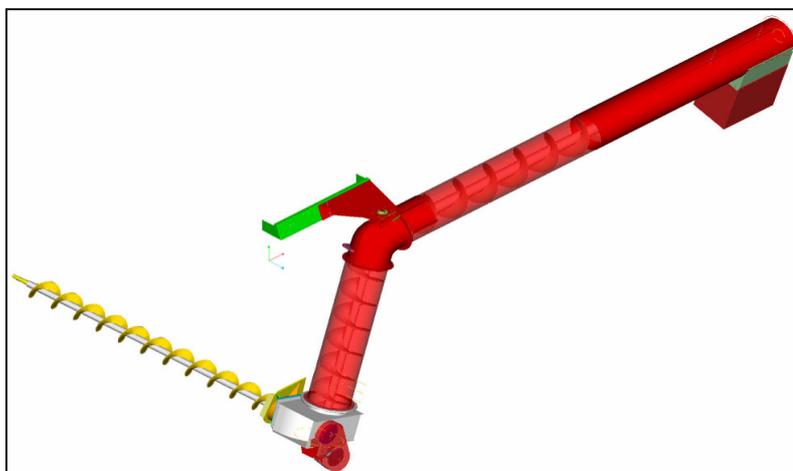


Fig.15: modelo do sistema proposto

A figura 15 apresenta o sistema já completamente modelado no sistema de CAD utilizado pelo fabricante (Pro-Engineering). A figura 16 apresenta o diagrama de blocos do sistema pro-

posto. Pode-se perceber que a disposição em série permanece inalterada, apenas com diferença nos blocos. É interessante destacar que, se considerarmos que os blocos críticos continuam sendo os que representam os pontos de transferência, esses agora estão contidos em blocos fechados, sendo portanto alvos mais fáceis de possíveis correções que possam ser exigidas. A ação do operador para o acionamento, através de comando hidráulico, não sofre nenhuma alteração.

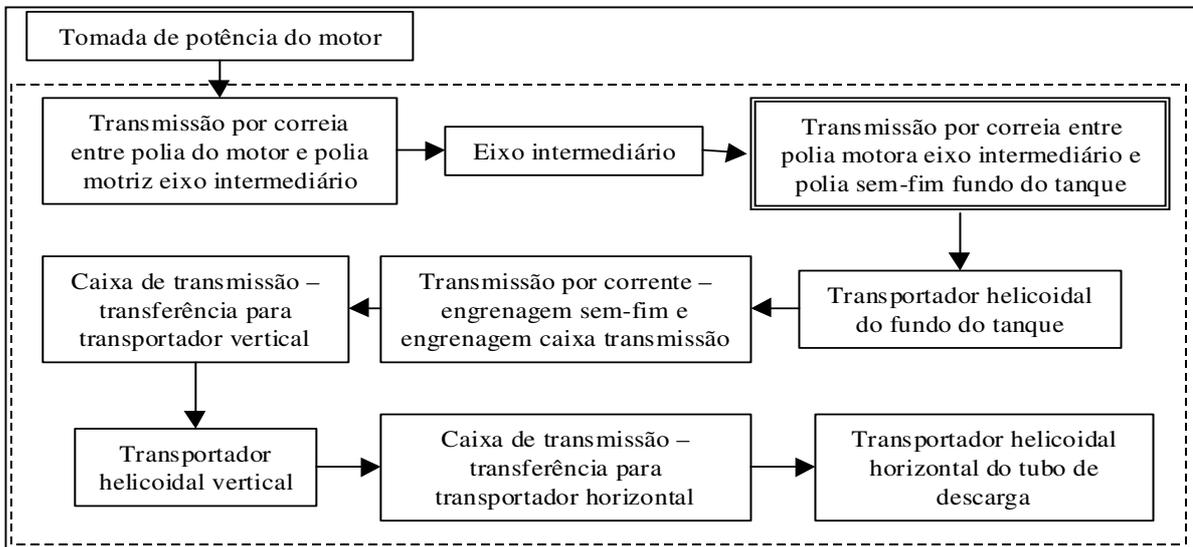


Fig.16: diagrama de blocos do sistema proposto

As duas caixas de transferência a serem utilizadas no sistema apresentam engrenagens mais robustas. O módulo, que representa a relação entre o diâmetro e o número de dentes e dá uma idéia da capacidade de transferência de carga, é 25% maior do que nas engrenagens do sistema atual. Além disso, como já citado acima, as caixas são fornecidas montadas, o que elimina possíveis falhas de montagem dentro da fábrica ou mesmo nos concessionários.

A figura 17 apresenta as diferenças entre as dimensões externas principais do sistema atual e do sistema proposto. A altura do ponto de descarga foi ligeiramente aumentada, enquanto que a distância até a lateral da plataforma de corte aumentou em mais de um metro, representando um aumento de 135% no vão livre.

A figura 18 traz duas fotos do protótipo construído a partir do novo projeto proposto, a primeira na fase final de montagem pela Engenharia Experimental. A segunda mostra a máquina já em testes de campo, sendo executados na colheita de trigo. Até o momento a máquina já executou aproximadamente 100hrs de trabalho, insuficientes para uma avaliação da confiabilidade do novo projeto. Os demais aspectos, contudo, já se apresentaram muito satisfatórios. A distância até o caminhão (vista na figura 18) é muito segura, e a vazão de descarga máxima medida é igual a 55l/s, aproximando-se dos valores da concorrência.

A próxima etapa é de otimização do projeto, com base nos resultados dos testes de campo.

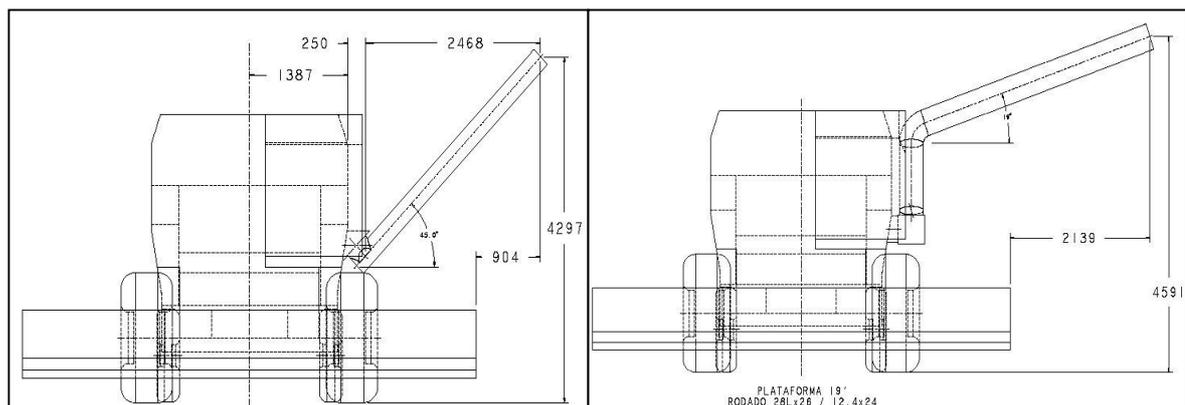


Fig.17: dimensões externas principais dos sistemas atual e proposto



Fig. 18: fotos do protótipo na fase final de montagem e em teste de campo

7. CONCLUSÕES

A Engenharia de Confiabilidade apresenta-se como uma ferramenta qualificada e de fácil aplicação para identificação do modo de falha e de qual a abordagem pode ser dada para a resolução do problema. A análise realizada nesse trabalho aponta para a substituição do sistema atual, e serve ainda de exemplo das possibilidades geradas pela implementação de um Programa de Confiabilidade.

A valor de confiabilidade do sistema atual para o tempo de 600hrs, que corresponde ao prazo de garantia, é de aproximadamente 0,8, i.e., existe a certeza de que apenas 80% das máquinas não vão falhar dentro do período de garantia. Um dado de ASAE D497.4, 2003, coletado nos Estados Unidos em 1970, mostra que a confiabilidade em 40ha de uso de uma colheitadeira de grãos era de aproximadamente 0,64, e que o tempo ocioso da máquina em função de falha era de 8,2 horas/ano. Pode parecer arriscado utilizar dados de um mercado pouco semelhante ao nosso e coletados há tanto tempo, contudo uma interessante leitura pode ser feita. A confiabilidade daquelas máquinas era baixa, porém seu tempo ocioso também era baixo. Isso indica que grande parte da quebras era devido a pequenos problemas que podiam ser revolidos rapidamente, como por exemplo rompimento de correntes ou correias, quebra de pequenas peças móveis, deformação de chapas devido à esforços excessivos, etc.

Projetando tal efeito no nosso contexto, o fato das falhas serem de fácil solução não justifica uma confiabilidade baixa. Em geral as máquinas de hoje apresentam uma produtividade e um índice de ocupação muito maiores do que há trinta anos atrás, e por isso mesmo pequenos tempos ociosos devido a falhas podem representar um custo muito mais significativo. E esses tempos só podem ser reduzidos através da garantia de índices aceitáveis de confiabilidade. Por esse motivo, justifica-se a necessidade da proposta de um novo sistema de descarga de grãos para a colheitadeira MF 5650.

A proposta aqui apresentada, por ser baseada no projeto de outros sistemas, teve seu andamento acelerado. Ainda que não se possa afirmar muito sobre a sua confiabilidade, seu comportamento deve ser bastante previsível. Nas quase cem horas de teste decorridas até o momento não foi constatada nenhuma irregularidade grave. O novo sistema já vem trazendo ótimos resultados, com uma vazão de descarga 25% superior ao atual e desempenho muito bem recebido pelos produtores.

8. REFERÊNCIAS

AGCO, Relatório de Testes N.º 124/95, Agco do Brasil, 1995

AGCO, Relatório de Testes N.º 041/99, Agco do Brasil, 1999

AGCO, Relatório de Testes N.º 067/95, emissão 01, Agco do Brasil, 1999

AGCO, Relatório de Testes N.º 067/95, emissão 03, Agco do Brasil, 1999

AGCO, Relatório de Testes N.º 015/02, Agco do Brasil, 2002

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING, **ASAE D497.4**, Agricultural Machinery Management Data, 2003

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING, **ANSI/ASAE EP389.2**, Auger Flighting Design Considerations, 2000

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING, **ASAE EP456**, Test and Reliability Guidelines, 2001

BALASTREIRE, L., **Máquinas Agrícolas**, 1ª Ed., Editora Manole Ltda. 1987

KECECIOGLU, D., **Reliability Engineering Handbook**, Vol. 1, Prentice Hall, Inc., Engelwood Cliffs, New Jersey, 1991

LAWRENCE, L., **Reliability-Probabilistic Models and Strategical Methods**, Prentice Hall, Inc., Engelwood Cliffs, New Jersey, 1995

NORTON, R., **Machine Design**, Prentice-Hall, 1998

O'CONNOR, P., **Practical Reliability Engineering**, 2ª ed., John Wiley & Sons, 1988.

SHIGLEY, J., MISCHKE, C., **Mechanical Engineering Design**, 5ª ed., McGraw-Hill Book Company, 1989.

9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AGCO, Operação e Manutenção MF 3640 e 5650, Agco do Brasil, 2003

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING, **ASAE/ISO 5687:1999(E)**, Equipment for Harvesting – Combine Harvester – Determination and designation of grain tank capacity and unloading device performance, Miami, 1999

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING, **ASAE S374**, Terminology and Specification Definitions for Agricultural Auger Conveying Equipment, Miami, 2001

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING, **ASAE EP496.2**, Agricultural Machinery Management, 2003

UNICAMP, Relatório Técnico N.001/95, UNICAMP, 1995