

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

METODOLOGIA DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE  
APLICADA EM UMA MÁQUINA DE MONTAR PNEUS

por

Daniel Mocelin Tatsch

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.

Porto Alegre, dezembro de 2010.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

METODOLOGIA DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE  
APLICADA EM UMA MÁQUINA DE MONTAR PNEUS

por

Daniel Mocelin Tatsch

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof. Dr. Rodrigo Rossi

Porto Alegre, 03 de dezembro de 2010.

## AGRADECIMENTOS

Nada mais justo e correto do que agradecer a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho:

Primeiramente à Deus pela vida, pela proteção e pela saúde.

Aos meus pais, Lauro e Isabel, por minha mais importante formação: o caráter; sobretudo também pela força incondicional em todos os momentos.

À minha namorada Angélica, pelo amor, pelo carinho, pela paciência e pela compreensão de que abrimos mão de estar juntos, diversas vezes, por um motivo justo.

Ao professor Arnaldo Ruben Gonzalez por acolher a proposta do trabalho e por não medir esforços para que ele se concretizasse.

À John Deere Brasil Montenegro pela oportunidade e pela contribuição para minha vida profissional.

À Engenharia de Manutenção por me acolher de forma respeitosa, pela aprendizagem e pela ajuda fundamental através de todos seus membros, em todos os momentos.

À todos meu humilde e sincero muito obrigado!

TATSCH, D. M. **Metodologia da Manutenção Centrada na Confiabilidade Aplicada em uma Máquina de Montar Pneus**. 2010. 30 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

## **RESUMO**

As exigências cada vez maiores da sociedade para que as empresas atuem de forma responsável, ao mesmo tempo em que a economia globalizada demanda por produtos e sistemas de melhor desempenho a custos competitivos, tem representado um grande desafio, principalmente aos setores de manutenção dessas empresas. Nesse campo difundiu-se a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), uma metodologia que permite determinar racionalmente o que deve ser feito para assegurar que um equipamento continue executando suas funções, cumprindo requisitos de segurança, meio ambiente, operação e economia. O presente trabalho faz uma revisão da bibliografia disponível, a fim de formar uma base de conhecimento suficiente para aplicá-la, através de um projeto piloto, em uma máquina de montar pneus. O resultado é um plano de manutenção para o equipamento, objetivo e bem estruturado, com justificativas fundamentadas tecnicamente para todas as tarefas. O trabalho também aborda o uso de duas ferramentas conhecidas, bastante úteis à MCC: a análise dos modos de falha e efeitos (FMEA) e a distribuição de probabilidade de Weibull. Através da primeira foi possível identificar os modos de falha que podem resultar em falhas funcionais do equipamento, priorizá-los em função da ocorrência, severidade e detectabilidade bem como identificar e categorizar seus efeitos. Através da segunda foi possível modelar a confiabilidade e prever o comportamento da taxa de falha para alguns modos de falha que estavam presentes no histórico de manutenção do equipamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA), Distribuição de Weibull.

TATSCH, D. M. **Reliability Centered Maintenance Methodology Applied on a Tire Mounting Machine**. 2010. 30 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

## **ABSTRACT**

The increasing demand of society for companies who act responsibly, while the global economy demands for products and systems with better performance and with a competitive cost, has represented a major challenge, especially to those involved with the companies maintenance. In this field, the Reliability Centered Maintenance (RCM), which is a methodology to rationally determine what, should be done to ensure that equipment continues performing his duties, meeting safety requirements, environment, operation and economics, has spread. This paper reviews the available literature in order to build a sufficient knowledge basis to apply it, through a pilot project on a tire mounting machine. The result is a maintenance plan for the equipment that is objective and well structured, with technically based justifications for all tasks. This paper also discusses the use of two RCM useful tools: the failure modes and effects analysis (FMEA) and the Weibull probability distribution. With the first tool it was possible to identify eminent failure modes that could result in functional failures of the equipment, prioritize them according to the occurrence, severity and detectability as well as identify and categorize their effects. With the second tool it was possible to model the reliability and predict the behavior of the failure rate for some failure modes that were present in the maintenance history of the equipment.

**KEYWORDS:** Reliability Centered Maintenance (RCM), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Weibull Distribution.

## INDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. MOTIVAÇÃO.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
3.1. FALHA.....	2
3.2. MANUTENÇÃO .....	5
4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	6
4.1. ETAPA 1 – SELEÇÃO DOS SISTEMAS E COLETA DE INFORMAÇÕES .....	7
4.2. ETAPA 2 – ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E EFEITOS .....	9
4.3. ETAPA 3 – IDENTIFICAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS DAS FALHAS .....	10
4.4. ETAPA 4 – SELEÇÃO DE TAREFAS APLICÁVEIS E EFETIVAS.....	10
4.5. ETAPA 5 – DEFINIÇÃO DA PERIODICIDADE DAS TAREFAS .....	13
4.6. ETAPA 6 – COMPARAÇÃO DAS TAREFAS DO PLANO EXISTENTE COM AS PROPOSTAS PELA MCC .....	14
5. CONCLUSÕES .....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	16
Apêndices .....	17
Anexos .....	24

## 1. INTRODUÇÃO

As exigências cada vez maiores da sociedade para que as empresas atuem de forma responsável, prezando pela segurança e meio ambiente, representam um grande desafio. Manter os ativos de forma que os mesmos trabalhem na sua melhor condição, produzindo eficientemente sem que a falha gere acidentes é uma preocupação cada vez maior das áreas de manutenção dessas empresas [Moreira, 2005].

Em anos passados, o objetivo principal da manutenção era a preservação do equipamento, desativando-o, atuando e realizando tudo o que era possível de ser feito. A razão para isto estava no pressuposto de que todos os itens obedeciam a um mesmo mecanismo de falha, representado pela famosa curva da banheira. Segundo essa teoria todo item apresentava inicialmente uma taxa de falha decrescente, estabilizando-se posteriormente e crescendo apenas após o final da vida útil. Era nesse último momento em que a manutenção atuava. Entretanto, estudos recentes revelaram que há cada vez menos relação entre a idade operacional da maioria dos itens e a probabilidade deles falharem [Siqueira, 2009].

Com a evolução tecnológica dos meios de produção, através do crescimento industrial aliado à automação, e com a tendência mundial de utilizar sistemas “just-in-time”, pequenas paradas na produção agora são mais prováveis de parar a planta inteira. O objetivo principal da manutenção passou ser a preservação da(s) funcionalidade(s) desejada(s) do equipamento. Alta confiabilidade e disponibilidade, aliadas a custos racionalizados, tornaram-se questões chaves.

Mas como manter um equipamento com alta disponibilidade e confiabilidade, com baixos custos e ainda levar em conta a preocupação com outros fatores, como segurança e meio ambiente? Eis o ponto de partida para o presente trabalho.

A evolução mencionada resultou na propagação de uma metodologia, que revolucionou a aviação civil mundial e posteriormente os mais diversos setores, a Manutenção Centrada na Confiabilidade – MCC ou RCM do inglês. Através dela, da ferramenta FMEA (Análise dos Modos de Falha e Efeitos) e da distribuição de Weibull, foi desenvolvido um plano de manutenção para uma máquina de montar pneus.

A máquina de montar pneus em tratores é um equipamento muito importante para o processo produtivo da John Deere Montenegro. Sua criticidade de acordo com a empresa é A, numa escala que vai de A (maior) até C (menor), atribuída em função de critérios relacionados à: custo da manutenção corretiva, efeito da falha na segurança, no meio ambiente, na produção e na qualidade. Dentro da empresa é conhecida como Saur (nome proveniente do fabricante), está localizada na linha final e é responsável pela montagem dos pneus, que são últimos componentes fixados em um trator.

O equipamento possui um plano de manutenção que é executado periodicamente. Esse plano foi totalmente desenvolvido e aperfeiçoado de forma empírica pela equipe de manutenção, com base na experiência e em critérios desconhecidos. Apesar disso necessita de tarefas de manutenção corretivas frequentemente, sendo que algumas causam indisponibilidade e interrompem a produção.

## 2. MOTIVAÇÃO

A máquina de montar pneus em tratores dispõe de um histórico de falhas, contendo informações relativas à sua manutenção desde que entrou em operação, por volta de julho de 2007.

Com base nesse histórico, foi feito um levantamento da sua disponibilidade e também das horas x homem utilizadas na manutenção, designadas ou não pelo plano de manutenção existente, a partir de julho de 2009 (quando o plano atual sofreu a última modificação) até setembro de 2010. O resultado pode ser visto no gráfico da figura 2.1.

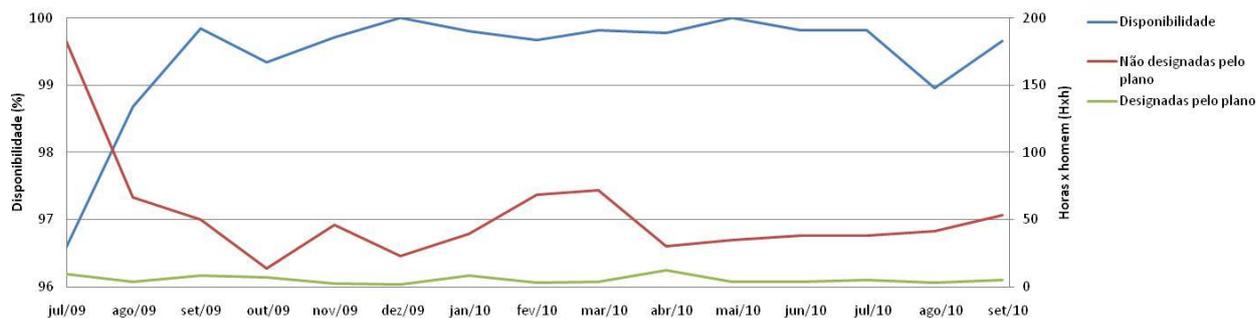


Figura 2.1 – Gráfico da disponibilidade e das horas x homem aplicadas na manutenção do equipamento.

Analisando os dados da figura 2.1, pode-se verificar que a disponibilidade oscilou entre 99 % e 100 %, na maior parte do tempo, e está dentro dos padrões da empresa que estabelece como *goal* o valor de 95 %. Os momentos de indisponibilidade, de acordo com o histórico, foram ocasionados na maioria das vezes por falhas situadas no sistema de controle, bem como no sistema hidráulico, mais precisamente no subsistema de distribuição com autorrecolhimento.

Entretanto a disponibilidade verificada pode ter sido resultado do trabalho não designado pelo plano de manutenção existente, pois ele corrigiu defeitos ou falhas potenciais que poderiam resultar em falhas funcionais. Através desse trabalho, também foram implementadas melhorias no equipamento que de alguma forma preveniram falhas.

O trabalho não designado pelo plano foi executado, em sua maioria, em horários fora do expediente normal da empresa (turno B e finais de semana). Sendo assim, o custo desse trabalho foi maior por necessitar de adicionais noturnos ou horas extras para os técnicos, por exemplo, sem contar custos com transporte e alimentação dos mesmos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. FALHA

Pela definição da norma NBR 5462, 1994, *falha* é o término da capacidade de um item em desempenhar sua função requerida. Entretanto, o item pode estar degradado ou ao mesmo tempo avariado e ainda não causar uma falha. Também de acordo com a norma, a esse fenômeno é atribuído o nome de *defeito*, que significa qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos seus requisitos.

As falhas, para objetivos deste trabalho, são classificadas em duas categorias:

- *Falha funcional*: incapacidade de um item de desempenhar uma função específica dentro de limites desejados. Também é conhecida como *estado de falha*;
- *Falha potencial*: condição identificável e mensurável que indica uma falha funcional pendente ou em processo de ocorrência. Muitas vezes se apresenta em forma de defeito.

Prevenir e corrigir falhas constituem os objetivos primários da manutenção. Para isto é necessário conhecer como os itens falham, caracterizando a forma como as falhas ocorrem.

##### 3.1.1. MODO DE FALHA

De acordo com Siqueira, 2009, *modo de falha* é um evento ou condição física que causa uma falha funcional. Está associado à causa da transição do estado normal para o estado anormal. Em geral podem ser divididos em mecânicos, elétricos, estruturais e humanos.

### 3.1.2. TEMPO ATÉ FALHA

De acordo com Fogliato e Ribeiro, 2009, o *tempo até falha* pode ser definido como o tempo transcorrido desde o momento em que o item é colocado em funcionamento até sua primeira falha. Pode assumir valores discretos, como por exemplo, o número de ciclos até a falha.

### 3.1.3. PROBABILIDADE DE FALHA

A *densidade de probabilidade de ocorrência de falha* é definida pela modelagem da variação temporal da probabilidade de falha funcional do item por unidade de tempo. É a definição matemática do valor associada à probabilidade de ocorrência deste valor. É encontrada através da equação 3.1.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (3.1)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (3.2)$$

onde  $f(t)$  é a função densidade de probabilidade de falha,  $F(t)$  é a distribuição de probabilidade acumulada de falhas e  $t$  é o tempo até falha.

### 3.1.4. CONFIABILIDADE

A *confiabilidade* é a probabilidade de que um item (componente ou sistema) não falhe, por um período de tempo previsto, sob condições de operação especificadas [Lafraia, 2001]. Também conhecida como probabilidade de sobrevivência, pode ser determinada aplicando as equações 3.3 ou 3.4.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (3.3)$$

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (3.4)$$

onde  $R(t)$  é a confiabilidade,  $f(t)$  a função densidade de probabilidade de falha,  $F(t)$  a distribuição de probabilidade acumulada de falhas e  $t$  é o tempo até falha.

### 3.1.5. TAXA DE FALHA

A *taxa de falha*, também conhecida como função de risco, é definida pela probabilidade condicional da ocorrência de falha no intervalo de  $t$  a  $t + dt$ , dado que não houve falha até o instante  $t$ , dividido pelo intervalo  $dt$  [Siqueira, 2009]. A função é representada matematicamente pela equação 3.5.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{d \log R(t)}{dt} \quad (3.5)$$

onde  $\lambda(t)$  é a taxa de falha,  $R(t)$  é a confiabilidade,  $f(t)$  é a função densidade de probabilidade de falha e  $t$  é o tempo até falha.

### 3.1.6. DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A *distribuição de Weibull* é uma distribuição de probabilidade apropriada para a modelagem de tempos até falha apresentando taxas de falha constante, estritamente crescente e estritamente decrescente. Na análise de amostras de tamanho pequeno, supor dados seguindo uma distribuição de Weibull costuma ser um bom ponto de partida [Fogliato e Ribeiro,

2009]. As representações de confiabilidade de Weibull são fornecidas pelas equações 3.6, 3.7 e 3.8.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.6)$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} t^{\beta-1} e^{-\frac{t^\beta}{\eta}} \quad (3.7)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (3.8)$$

onde  $\lambda(t)$  é a taxa de falha,  $R(t)$  é a confiabilidade,  $f(t)$  é a função densidade de probabilidade de falha,  $t$  é o tempo até falha ( $t \geq 0$ ),  $\beta$  é o fator de forma ( $\beta > 0$ ) e  $\eta$  é a vida característica ( $\eta > 0$ ).

### 3.1.7. MECANISMOS DE FALHAS

Os *mecanismos de falhas* estão relacionados com o comportamento da taxa de falhas de um item ao longo do tempo. O estudo deles, objetiva identificar características diferenciais entre as diversas formas como as falhas acontecem, ajudando a escolher as tarefas de manutenção aplicáveis.

De acordo com Siqueira, 2009, em componentes industriais, são usualmente identificados quatro mecanismos típicos: desgaste progressivo, falha inesperada, desgaste por fadiga e mortalidade infantil. Eles estão relacionados a seis curvas básicas do comportamento da taxa de falha ao longo do tempo, conforme pode ser visto na figura 3.1.

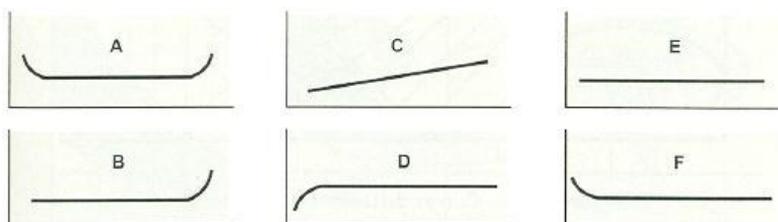


Figura 3.1 – Comportamentos típicos da taxa de falha ao longo do tempo (Fonte: Siqueira, 2009).

### 3.1.8. DISPONIBILIDADE FÍSICA

A *disponibilidade* é a probabilidade de que um componente, sistema ou equipamento que sofreu manutenção exerça a sua função satisfatoriamente para um dado tempo  $t$ . Na prática, é expresso pelo percentual de tempo em que se encontra operante [Lafraia, 2001].

De maneira geral, a *disponibilidade física* é definida como sendo a relação entre o total de horas acumulado de operação e o total de horas transcorrido [Viana, 2009].

Segundo Kardec, 1999, a disponibilidade física pode ser determinada usando a equação 3.9.

$$DISP = \frac{TOPT}{TOPT+TRPT} \quad (3.9)$$

onde DISP é a disponibilidade física, TOPT é o somatório dos tempos de disponibilidade e/ou operação e TRPT é o somatório dos tempos de indisponibilidade por razão de falhas.

## 3.2. MANUTENÇÃO

Segundo Moubray, 2000, do ponto de vista de engenharia, existem dois elementos para o gerenciamento de qualquer ativo físico: ele deve ser mantido e de tempo em tempo ele pode também ser modificado. Essa distinção entre manter e modificar tem profundas implicações, que serão tratadas mais adiante.

A manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida. [NBR 5462, 1994].

A falta de institucionalização das ações técnicas, com justificção insuficiente para as tarefas, resulta em planos de manutenção às vezes desnecessários ou ineficientes, principalmente quando há aceitação cega das recomendações de fornecedores. Essas devem ser discutidas pelos grupos de manutenção e aceitas somente se forem aplicáveis e efetivas [Siqueira, 2009].

Ainda segundo Siqueira, 2009, a situação torna-se mais grave quando as ações são feitas com base nos métodos tradicionais de gestão. A insuficiência de atitudes proativas, somadas à execução desnecessária de tarefas preventivas ou à insuficiência de técnicas preditivas conduz à frequente repetição dos problemas e de erros humanos, com consequências diretas na produção e qualidade do produto.

### 3.2.1. MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

Segundo Moubray, 2000, a MCC é um processo que determina o que deve ser feito para assegurar que qualquer ativo físico continue a fazer o que seus usuários querem que ele faça no seu contexto operacional.

A metodologia da MCC consiste em uma análise estruturada, que implica em encontrar a resposta para sete perguntas sobre os itens em revisão, descritas a seguir. Na prática acrescenta-se uma oitava questão. As questões um até a quatro correspondem às etapas de análise, da questão cinco até a sete às etapas de decisão e a oito corresponde à implementação.

1. *Quais são as funções e padrões de desempenho a preservar?*
2. *De que forma ele falha em cumprir suas funções?*
3. *O que causa cada falha funcional?*
4. *O que acontece quando ocorre cada falha?*
5. *Qual a importância de cada falha?*
6. *O que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha?*
7. *Quais as alternativas restantes?*
8. *Quais as frequências ideais para as tarefas de manutenção?*

### 3.2.2. PLANO DE MANUTENÇÃO

O *plano de manutenção* é um conjunto de tarefas destinadas a manter ou recolocar um equipamento num estado em que possa executar sua(s) função(ões) requerida(s). As tarefas objetivam detectar, prevenir e corrigir os modos de falha, numa frequência de execução definida. Podem também especificar mudanças nos itens ou procedimentos. O plano deve ser estabelecido em função dos efeitos das falhas e composto por tarefas que sejam aplicáveis e eficientes economicamente [Lafraia, 2001].

### 3.2.3. NÍVEL DE INTERVENÇÃO

É a subdivisão de um item sobre o qual são realizadas as tarefas de manutenção. Depende da complexidade de construção do item, da competência do pessoal que executa, da acessibilidade, da segurança e outros [NBR 5462, 1994].

### 3.2.4. CLASSIFICAÇÃO DAS TAREFAS

Para os propósitos de aplicação da MCC, as tarefas de manutenção podem ser classificadas de acordo com a forma de programação e o objetivo.

As tarefas programadas podem ser subdivididas, segundo o critério de programação, em *direcionadas por tempo* quando são executadas em datas ou ciclos limites de operação, *direcionadas por condição* quando executadas de acordo com condições pré-definidas, *direcionadas por falhas* quando objetivam descobrir a ocorrência de modos de falha ocultos ou *orientadas para operação* quando visam suprir os materiais consumíveis e preservar o ambiente da instalação.

Por sua vez, as tarefas não programadas são diferenciadas segundo o motivo da execução em: *correção de defeitos* quando visam corrigir o defeito antes de sua evolução para uma falha; *correção de falhas* quando visam restaurar, substituir ou reparar a capacidade funcional do item e *reprojeto* quando visa a melhoria da capacidade do(s) item(ns).

Quanto ao objetivo, as tarefas de manutenção podem ser classificadas como:

- *Restauração (RP) ou substituição preventiva (SP)*: consiste respectivamente na correção ou na reposição programada de um item em determinada data limite, para prevenir a sua falha funcional;
- *Inspeção preditiva (IP)*: consiste na verificação programada, por sentido humano ou instrumental, do estado de evolução de uma falha potencial;
- *Inspeção funcional (IF)*: consiste na verificação programada do estado funcional, visando descobrir uma falha funcional que já tenha ocorrido;
- *Serviço operacional (SO)*: consiste no ressuprimento de materiais consumíveis de operação e outras tarefas repetitivas básicas destinadas a controlar a incidência de falhas;
- *Manutenção corretiva (MC)*: consiste na restauração não programada da capacidade funcional de um item, visando corrigir defeitos ou falhas potenciais detectadas por uma tarefa programada ou outro meio;
- *Reparo funcional (RF)*: consiste na recuperação não programada da capacidade funcional, visando reparar falhas funcionais já ocorridas;
- *Reprojeto (R) ou alteração de procedimento (AP)*: consiste na modificação da especificação de qualquer parte ou por inteiro do item, no acréscimo de uma redundância, na alteração e readequação dos procedimentos operacionais e de execução da manutenção.

#### 4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A Engenharia de Manutenção da John Deere Montenegro apesar de possuir pessoas com treinamento em MCC, não a utilizava no desenvolvimento de planos de manutenção. Sendo assim, o presente trabalho fez parte também de uma estratégia de implantação, mais propriamente um projeto piloto, onde foi escolhido um equipamento para a aplicação a título de teste e treinamento, antes de estender aos demais.

Conforme constatado também por Zaions, 2003, as literaturas que tratam do assunto estabelecem várias sistemáticas para a aplicação da MCC. Entretanto, as idéias principais apresentadas nas obras são basicamente iguais e apresentam pequenas variações, associadas à experiência de cada um dos autores.

A metodologia foi aplicada através de seis etapas, baseadas na bibliografia, adequadas às condições da empresa e de encontro com os propósitos do presente trabalho. Elas responderam as perguntas mencionadas no item 3 e estão registradas a seguir.

O desenvolvimento das etapas foi realizado através de reuniões com engenheiros, analistas e técnicos de manutenção. O autor deste trabalho atuou como um facilitador, aplicando a lógica da MCC, coletando informações necessárias, documentando as etapas cumpridas, conduzindo a análise e as reuniões.

Para auxiliar o trabalho foram utilizados os softwares Reliasoft Weibull ++<sup>®</sup> 7 e RCM ++<sup>®</sup> 4, disponíveis na empresa, os quais foram responsáveis por documentar o processo e eliminar o uso de formulários de papel propostos pela bibliografia.

#### 4.1. ETAPA 1 – SELEÇÃO DOS SISTEMAS E COLETA DE INFORMAÇÕES

A máquina de montar pneus em tratores é um equipamento composto basicamente por duas pontes rolantes, dotadas de uma garra hidráulica cada. As garras são controladas individualmente através de controle remoto, executando movimentos horizontais em dois eixos, verticais e angulares. O caminho de rolamento das pontes está fixado sobre pilares metálicos, formando um pórtico espacial a 7,2 m de altura.

Basicamente a função do equipamento é a movimentação e posicionamento de pneus para a montagem em tratores. Os pneus são recebidos pré-montados, sobre um *rack*, para serem então acoplados ao trator, dentro do *tack time* da linha. As figuras ilustrativas do equipamento e as características técnicas podem ser vistas nos apêndices 1 e 2.

Segundo Siqueira, 2009, sistemas são conjuntos de componentes, físicos ou virtuais, entre os quais se possam encontrar ou definir alguma relação de funcionalidade. Os subsistemas são partições de um sistema multifuncional, especializados na execução de uma ou mais funções do sistema. Para atender a sua função principal, o equipamento foi subdividido em oito sistemas: hidráulico, elétrico, de controle, estrutural, de movimentação, de manipulação, de segurança e de comando.

Ainda de acordo com Siqueira, 2009, na seleção dos sistemas que serão submetidos à análise da MCC são levados em conta as suas significâncias para a segurança do operador, disponibilidade do equipamento e economia do processo. No intuito de cumprir o objetivo deste trabalho sucintamente, com um bom detalhamento de todas as etapas, foi adotada a significância para a disponibilidade como critério de seleção.

Sendo assim, o sistema de controle e o subsistema de distribuição com autorrecolhimento foram submetidos às próximas etapas de análise, visto que suas falhas foram as principais responsáveis por indisponibilidade do equipamento nos últimos 14 meses, conforme mencionado no item 2, o que não compromete análises futuras dos demais sistemas.

O sistema de controle é composto por dois controles remotos sem fios e seus respectivos receptores de radio frequência, um para cada lado do equipamento, operados individual e independentemente por dois operadores. Sua função principal é receber os comandos manuais do operador e repassar, em forma de sinal digital de tensão, ao sistema de comando. O fluxograma da figura 4.1 mostra o diagrama organizacional do equipamento com destaque para o sistema estudado.

Figura 4.1: Diagrama organizacional do equipamento com destaque para o sistema de controle.



A fronteira do sistema e os fluxos que passam por ela estão representados no diagrama da figura 4.2, onde, os componentes representam o nível de profundidade da análise. Como ele é simétrico, ou seja, componentes idênticos e com mesmas funções para ambos os lados, foi analisado somente o lado esquerdo (LE). O controle pode ser visto no apêndice 1 (D).

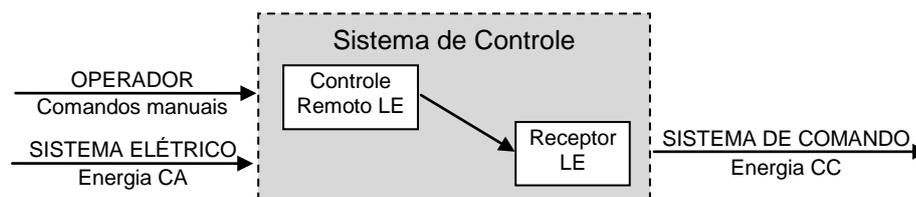


Figura 4.2: Fronteira, fluxos e componentes do sistema de controle.

O subsistema de distribuição com autorrecolhimento é composto por duas conexões hidráulicas fixas, quatro mangueiras hidráulicas fixas (duas *in* e duas *out*), quatro conexões hidráulicas girantes, quatro carretéis enroladores, quatro mangueiras hidráulicas submetidas ao enrolamento, quatro roletes limitadores e quatro conexões oscilantes.

Sua função principal é a distribuição de óleo pressurizado, proveniente do subsistema de direcionamento de fluxo, para o sistema de movimentação admitindo movimento. O fluxograma da figura 4.3 mostra o diagrama organizacional do equipamento com destaque para o subsistema estudado.

Figura 4.3: Diagrama organizacional do equipamento com destaque para o subsistema de distribuição com autorrecolhimento.



A fronteira do subsistema e os fluxos que passam por ela estão representados no diagrama da figura 4.4, onde, os componentes representam o nível de profundidade da análise. Como ele é bi-simétrico, ou seja, componentes idênticos e com mesmas funções para ambos os lados e para ambas as posições, foi analisado somente o lado esquerdo (LE) na posição 1. Os componentes podem ser vistos no apêndice 1 (B e C).

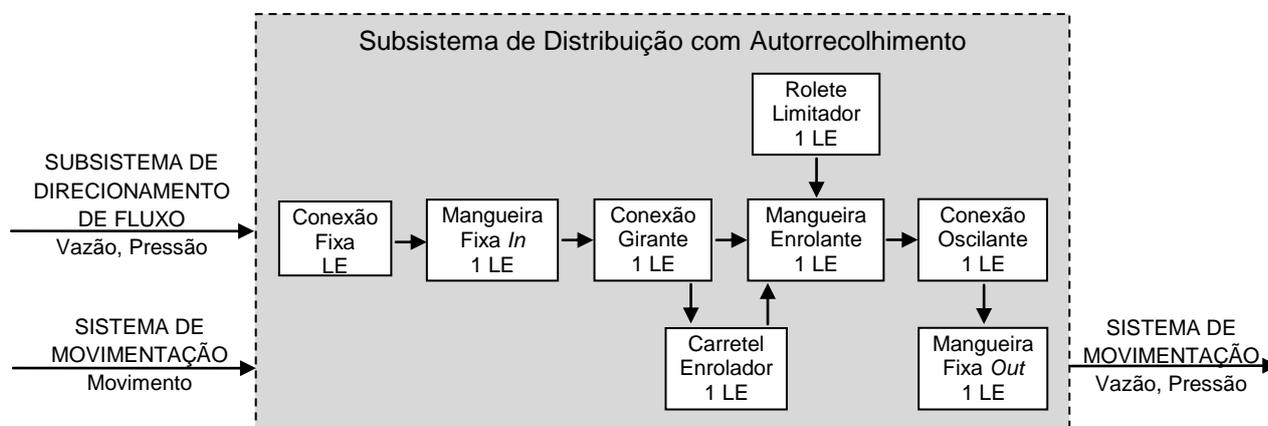


Figura 4.4: Fronteira, fluxos e componentes do subsistema de distribuição com autorrecolhimento.

Selecionados o sistema e o subsistema objetos do estudo e definidas as suas fronteiras, o próximo passo foi a identificação das funções, primárias e secundárias, exercidas por seus componentes, bem como das falhas funcionais, as quais devem ser evitadas mediante a manutenção. A quantidade de funções e falhas funcionais é mostrada na tabela 4.1, e também podem ser vistas com mais detalhes nas planilhas FMEA dos apêndices 4 e 5.

De acordo com Siqueira, 2009, as funções devem ainda ser priorizadas e somente aquelas nas quais suas falhas funcionais impactam na segurança, meio ambiente, operação e economia, continuam sob análise. Nesse caso, todas as funções identificadas se enquadram em um ou mais dos casos descritos.

Tabela 4.1: Funções e falhas funcionais.

Sistema ou Subsistema	Funções	Falhas Funcionais
Controle (LE)	11	16
Distribuição com Autorrecolhimento (1, LE)	10	15

Esta etapa respondeu as questões 1 e 2 propostas pela MCC.

#### 4.2. ETAPA 2 – ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E EFEITOS

Com as funções e as falhas funcionais conhecidas, o próximo passo foi a identificação dos modos de falha prováveis de ocorrer ou que já ocorreram, bem como dos efeitos decorrentes. Para isso foram utilizadas as informações contidas no histórico de falhas do equipamento, na documentação do fabricante, na bibliografia e nos relatos da equipe envolvida na análise.

Esse procedimento conhecido como FMEA é largamente utilizado pela indústria, principalmente pelos departamentos de projeto e processo. Para a MCC trata-se de uma ferramenta auxiliar fundamental.

Em geral, um equipamento pode ter milhares de modos de falha, um sistema ou subsistema centenas e um componente dezenas. Como a seleção das tarefas de manutenção é gerenciada ao nível do modo de falha, o nível de profundidade da análise adotado na etapa 1 foi o dos componentes.

De acordo com Moubray, 2000, os efeitos descrevem o que acontece quando ocorre um modo de falha. O reconhecimento deles é importante para que a equipe de análise decida se vai ficar evidente para o operador, se vai apresentar riscos à segurança, ao meio ambiente, de que forma impactará no equipamento, na produção e o que deve ser feito para corrigir o modo de falha.

Sabendo-se desses detalhes, foram atribuídos valores numéricos para a severidade do efeito, assim como, para a probabilidade de ocorrência e para a possibilidade de detecção de cada modo de falha. Com os valores numéricos encontrados foi feita uma avaliação do risco, calculado através da equação 4.1.

$$\text{Risco} = \text{Severidade} \times \text{Ocorrência} \times \text{Detecção} \quad (4.1)$$

onde os valores para a severidade, ocorrência e detecção são mostrados, respectivamente, nas tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 do apêndice 3.

Por convenção da equipe de análise, baseado no software Reliasoft RCM ++<sup>®</sup> 4, os modos de falha foram classificados em desprezíveis ( $\text{risco} < 32$ ), indesejáveis ( $32 \leq \text{risco} < 100$ ) e intoleráveis ( $\text{risco} \geq 100$ ). As quantidades de modos de falha encontrados, classificados por risco, são mostradas na tabela 4.2. Eles podem ser vistos com mais detalhes nas planilhas FMEA dos apêndices 4 e 5.

Tabela 4.2: Modos de falha classificados por risco.

Sistema ou Subsistema	Desprezíveis	Indesejáveis	Intoleráveis
Controle (LE)	12	13	0
Distribuição com Autorrecolhimento (1, LE)	10	36	0

Os 49 modos de falha classificados como indesejáveis foram submetidos às próximas etapas. Os desprezíveis, como o próprio nome diz, foram desprezados.

Esta etapa respondeu as questões 3 e 4 propostas pela MCC.

#### 4.3. ETAPA 3 – IDENTIFICAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS DAS FALHAS

Realizada a etapa do FMEA, o próximo passo foi no sentido de responder a 5ª questão proposta pela MCC: “*qual a importância de cada falha?*”. A resposta dessa pergunta é fundamental para a realização da etapa 4. Para Moubray, 2000, se as consequências da falha forem muito sérias, esforços consideráveis devem ser feitos para preveni-la, ou ao menos, diminuir ou eliminar suas consequências.

De acordo com Siqueira, 2009, a consequência de cada falha será função dos efeitos produzidos. Dessa forma, os efeitos identificados na etapa 2 foram categorizados em função de suas respectivas falhas funcionais e modos de falha, segundo os seguintes critérios: visibilidade para o operador, impactos da falha na segurança, na operação do equipamento e na economia do processo.

Foi usado um diagrama lógico disponível no software Reliasoft RCM ++<sup>®</sup> 4, com algumas adaptações e que pode ser visto no anexo 1. A quantidade de efeitos encontrados bem como a categorização de cada um pode ser vista na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Efeitos e respectivas categorizações.

<b>Sistema ou Subsistema</b>	<b>ES</b>	<b>EO</b>	<b>EE</b>	<b>OS</b>	<b>OO</b>	<b>OE</b>
Controle (LE)	0	0	0	3	11	0
Distribuição com Autorrecolhimento (1, LE)	2	2	0	0	0	1

onde ES é evidente de segurança, EO evidente operacional, EE evidente econômico, OS oculto de segurança, OO oculto operacional e OE é oculto econômico.

Com a identificação das consequências das falhas, através da categorização de seus efeitos, percebeu-se a importância do sistema e do subsistema analisados. As falhas dos dois além de impactar na operação do equipamento, como previsto na etapa 1, podem impactar também na economia do processo e principalmente na segurança do operador.

No sistema de controle, a maior parte dos efeitos está relacionada com a operação do equipamento. No subsistema de distribuição com autorrecolhimento os efeitos estão relacionados com a operação e com a segurança do operador, apesar de não ter nenhum registro histórico de acidente. Esse fato está vinculado à função principal do subsistema, que é a distribuição de óleo pressurizado, com agravante por estar localizado fisicamente a uma altura de 7,2 m, sobre o operador.

#### 4.4. ETAPA 4 – SELEÇÃO DE TAREFAS APLICÁVEIS E EFETIVAS

De acordo com Siqueira, 2009, para ser aplicável, uma tarefa de manutenção deve garantir um dos seguintes objetivos: prevenir modos de falha, reduzir a taxa de deterioração, detectar a evolução de falhas, descobrir falhas ocultas, suprir necessidades e consumíveis do processo, reparar o item após a falha ou ainda, diminuir os efeitos e consequências das falhas.

Para que seja efetiva, a tarefa de manutenção deve atender simultaneamente os seguintes critérios: ser aplicável tecnicamente, ser viável com os recursos disponíveis, produzir os resultados esperados, ser executável a um intervalo razoável ou ainda, diminuir a probabilidade de falha com impacto sobre segurança.

O processo de seleção das tarefas aplicáveis e efetivas está condicionado às consequências das falhas encontradas na etapa anterior, bem como a um diagrama de decisão que leva em consideração os critérios mencionados nos dois últimos parágrafos. Para este trabalho foi utilizado o diagrama de decisão proposto por Zaions, 2003, com algumas modificações e adaptado ao software Reliasoft RCM ++<sup>®</sup> 4. O diagrama pode ser visto no anexo 2.

Para o uso do diagrama de decisão é importante conhecer, quando possível, o modelo de confiabilidade do componente relativo ao modo de falha que se deseja evitar bem como o comportamento da taxa de falha em relação ao tempo.

Conforme identificado na etapa 2, 49 modos de falha foram considerados como passíveis de gerenciamento pelas tarefas de manutenção propostas pela MCC. Porém três deles, os que mais se repetiram no histórico de falhas, foram submetidos a uma análise estatística. Os modos de falha analisados estão relacionados na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Modos de falha submetidos à análise estatística.

Sistema ou Subsistema	Componente	Modo de Falha
Controle (LE)	Controle Remoto	Mau contato na conexão do <i>joystick</i> com a placa
Distribuição com Autorrecolhimento (1, LE)	Carretel Enrolador	Mola quebrada por fadiga
Distribuição com Autorrecolhimento (1, LE)	Mangueira Enrolante	Rachada por fadiga

No caso do controle remoto, ocorreram seis registros do modo de falha mau contato na conexão do *joystick* com a placa no mesmo controle, para os quais foram gerados os modelos de confiabilidade e da taxa de falha. Utilizando o software Reliasoft Weibull ++<sup>®</sup> 7, foram calculados os parâmetros para uma distribuição de probabilidade Weibull:  $\beta = 0,82$  e  $\eta = 561,2$ . A Figura 4.5 mostra as curvas determinadas.

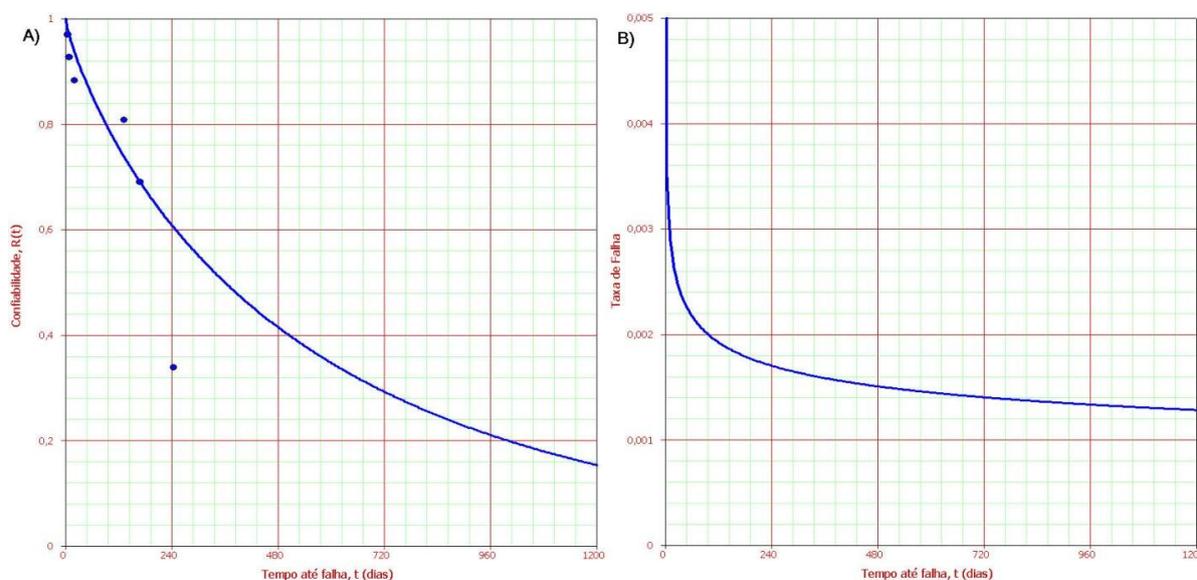


Figura 4.5: Modelos: A) de confiabilidade e B) da taxa de falha para o modo de falha mau contato na conexão do *joystick* com a placa.

Analisando os parâmetros e as curvas obtidas, verifica-se que a confiabilidade do controle para o modo de falha mau contato do *joystick* com a placa teve uma queda inicial acentuada, diminuindo depois (figura 4.5 A). Nesse caso a probabilidade de falha também diminuiu no decorrer do tempo, fato justificado pelo comportamento da taxa de falha (figura 4.5 B), que é semelhante ao da figura 3.1 F.

O mecanismo de falha correspondente pode ser definido como mortalidade infantil, onde ocorre uma perda brusca da capacidade funcional no início da vida do item [Siqueira, 2009]. As causas prováveis que podem explicar esse mecanismo são: operação incorreta, manutenção desnecessária, manutenção excessiva, entre outras.

Segundo Moubray, 2000, a MCC sugere que problemas de mortalidade infantil sejam resolvidos normalmente por ações únicas imediatas. Nesse caso, o tipo de tarefa mais recomendada seria o reparo funcional. Entretanto, o controle e o receptor são vitais para o funcionamento do sistema e do equipamento e a sugestão proposta foi de uma tarefa de reprojeto, a qual estabelece a implementação de uma redundância para os mesmos. Na prática serão instalados controles e respectivos receptores reservas, os quais podem funcionar a qualquer momento em caso de falha dos que estiverem em operação, e aumentarão a confiabilidade do sistema e do equipamento.

No caso do carretel enrolador, de um total de quatro itens presentes no equipamento, três falharam sendo um deles reincidente e outro continua funcionando sem falhar, em relação ao modo de falha mola quebrada por fadiga. Caso semelhante foi observado para a mangueira enrolante, para um total de quatro, três apresentaram o modo de falha rachada por fadiga sendo uma reincidente e outra continua funcionando sem falhar.

Coincidentemente ou não, as falhas das mangueiras ocorreram nas mesmas posições dos carretéis que falharam. Os modelos de confiabilidade e da taxa de falha, para o carretel enrolador e para a mangueira enrolante, foram gerados e colocados no mesmo gráfico para facilitar a análise.

Para o modo de falha mola quebrada por fadiga e mediante a aplicação do software Reliasoft Weibull ++<sup>®</sup> 7, foram determinados os parâmetros  $\beta = 2,8$  e  $\eta = 665,3$  da distribuição de probabilidade Weibull. Já para o modo de falha mangueira rachada por fadiga, os parâmetros foram  $\beta = 3,1$  e  $\eta = 653,3$ . A Figura 4.6 mostra as curvas encontradas.

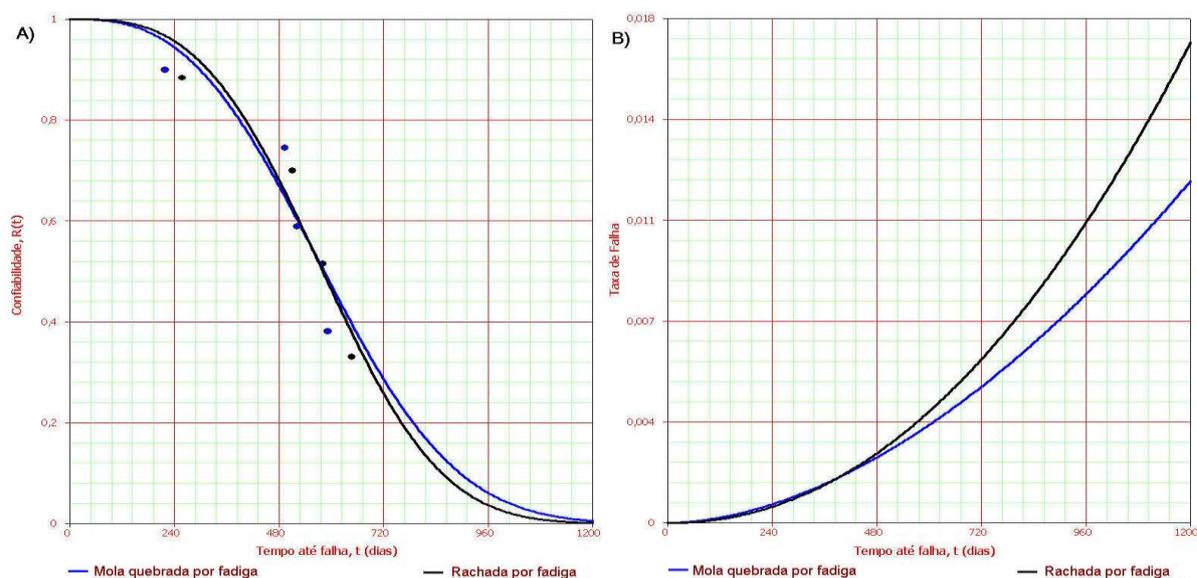


Figura 4.6: Modelos: A) de confiabilidade e B) das taxas de falha para os modos de falha mola quebrada por fadiga e mangueira rachada por fadiga.

Analisando os valores dos parâmetros e as curvas obtidas, verifica-se que as confiabilidades do carretel e a da mangueira, para os modos de falha analisados, mantêm-se constantes por um período de aproximadamente 50 dias (conhecido como vida mínima) e depois caem (figura 4.6 A). Nesse caso a probabilidade de falha aumenta no decorrer do tempo, mas nenhum ponto caracteriza o fim da vida útil. Esse fato é justificado pelo comportamento das taxas de falha (figura 4.6 B), que são semelhantes ao da figura 3.1 C.

O mecanismo de falha correspondente pode ser definido como desgaste por fadiga, onde ocorre uma diminuição gradativa do número de ciclos necessários para a falha, geralmente em componentes que operam em regime alternativo de carga [Siqueira, 2009].

Nas falhas por fadiga geralmente têm-se o  $\beta = 2$ , entretanto valores para o parâmetro próximos de três também podem caracterizar o mecanismo [Moubray, 2000]. Um

fato que pode justificar o valor encontrado está no baixo número de dados utilizados na análise, uma vez que se a amostra fosse muito maior o valor do parâmetro poderia convergir para dois.

Ainda segundo Moubray, 2000, a falha por fadiga é causada por esforço cíclico e a relação entre esforço (S) e o número de ciclos (N) é dada pela curva S-N. Se a curva S-N for conhecida, pode-se prever a vida do componente com grande exatidão para uma dada amplitude de esforço cíclico.

Como as curvas S-N para a mola do carretel e para a mangueira submetida ao enrolamento não estavam disponíveis, e admitindo também que os esforços aos quais estão submetidas podem variar, foi adotado como critério para a seleção das tarefas uma confiabilidade mínima de 95 %.

Dessa forma, para o modo de falha mola quebrada por fadiga foi selecionada uma tarefa de substituição preventiva, com base no tempo em que ela funciona com confiabilidade igual ou superior aos 95 %. A justificativa da tarefa selecionada está no fato de a mola ser montada dentro de um alojamento, impossibilitando de verificá-la visualmente.

No caso do modo de falha mangueira rachada por fadiga, foi selecionada uma tarefa de inspeção preditiva. A justificativa para esta tarefa está no fato de que a mangueira fica exposta, sendo fácil inspecioná-la. O tempo de funcionamento transcorrido com confiabilidade igual ou superior aos 95 % caracteriza o início da falha potencial, da mesma forma o intervalo P-F (falha potencial → falha funcional) foi estimado calculando a probabilidade condicional posterior.

Para os modos de falha conexão de entrada frouxa e conexão de saída frouxa, comuns às mangueiras, foi selecionada uma tarefa de inspeção funcional, a fim de encontrar a falha depois da ocorrência e que não é evidente para o operador. A justificativa da tarefa selecionada está no fato de que as conexões são fáceis de inspecionar, bem como de verificar se estão ou não cumprindo a função de manter a estanqueidade de óleo.

Por fim, para os modos de falha cilindro travado por excesso de aperto e porca de fixação do cilindro frouxa foi selecionada uma tarefa de alteração de procedimento de manutenção, a qual especifica o torque de aperto que deverá ser respeitado toda vez que a manutenção intervir na conexão oscilante e na conexão girante, diminuindo assim a probabilidade de ocorrência dos modos de falha.

As tarefas selecionadas gerenciarão 24 dos 49 modos de falha indesejáveis. Os 25 indesejáveis restantes e os 22 desprezíveis receberão tarefas de manutenção corretiva ou reparo funcional, as quais não foram especificadas. As tarefas selecionadas podem ser vistas na tabela 4.5.

Esta etapa respondeu as questões 6 e 7 propostas pela MCC.

#### 4.5. ETAPA 5 – DEFINIÇÃO DA PERIODICIDADE DAS TAREFAS

Realizada a etapa anterior, o próximo passo foi no sentido de responder a 8ª questão proposta pela MCC, ou seja, a definição da frequência com que as tarefas periódicas serão executadas. Alguns autores sugerem métodos estatísticos e teorias complexas, como é o caso de Siqueira, 2009. Para esse trabalho foi adotada uma linha mais simples e prática, sugerida por Zaians, 2003 e Moubray, 2000.

A confiabilidade mínima de 95 % adotada na etapa anterior garante o que é chamado de *vida segura*, onde praticamente “todos” os componentes sobrevivem e que pode ser vista na figura 4.7. Ela é recomendada para modos de falha que possuem taxas de falha semelhantes ao da figura 3.1. C (desgaste por fadiga) e que pode impactar na segurança, caso da mangueira enrolante. O conceito foi estendido também para o modo de falha mola quebrada por fadiga, mesmo que o efeito deste não impacte na segurança.

Assim foi definido o período de substituição preventiva para a mola do carretel, com o auxílio do software Weibull ++<sup>®</sup> 7, da mesma forma que foi definido o tempo para o início da inspeção preditiva da mangueira submetida ao enrolamento. No apêndice 6 (A e B) podem ser vistos os resultados fornecidos pelo software. Já o intervalo de inspeção foi definido

dividindo-se o intervalo P-F por dois, pois segundo Siqueira, 2009, ele deve ser tal que sejam realizadas pelo menos duas inspeções durante o intervalo P-F, mostrado no apêndice 6 (C).

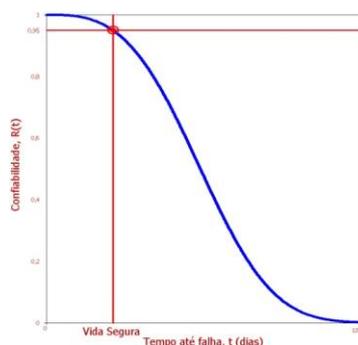


Figura 4.7: Limite estabelecido para a vida segura.

Segundo Zaions, 2003, quando não se dispõe de informações em histórico para determinar estatisticamente a periodicidade das tarefas de manutenção, a única opção é determiná-las através da opinião de especialistas. A técnica é estritamente empírica, entretanto ela pode ser melhorada futuramente. Dado o intervalo de inspeção inicial, a partir do momento em que é feita a inspeção e não é constatada a falha ou a degradação, o intervalo é incrementado em 10 % e assim sucessivamente até que seja detectada. Nesse momento regride-se 10 % e fixa-se esse como o intervalo ótimo.

A periodicidade da tarefa de inspeção funcional, da estanqueidade de óleo nas conexões, foi definida então através do método descrito no parágrafo anterior.

Finalmente, as tarefas de manutenção estabelecidas por este trabalho, propostas através da MCC, estão relacionadas no plano de manutenção da tabela 4.5.

Tabela 4.5: Plano de manutenção proposto através da MCC.

Tarefa	Periodicidade	Componentes
IF – Inspeção visual de estanqueidade de óleo nas conexões das mangueiras	90 dias	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mangueira enrolante</li> <li>• Mangueira fixa <i>in</i></li> <li>• Mangueira fixa <i>out</i></li> </ul>
SP – Substituição da mola	230 dias	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carretel enrolador</li> </ul>
IP – Inspeção visual da condição superficial externa	Início: 250 dias Intervalo: 30 dias	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mangueira enrolante</li> </ul>
AP – Verificação do torque de aperto do parafuso que fixa o conjunto	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conexão oscilante</li> <li>• Conexão girante</li> </ul>
R – Implementação de redundância	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controle remoto</li> <li>• Receptor</li> </ul>

#### 4.6. ETAPA 6 – COMPARAÇÃO DAS TAREFAS DO PLANO EXISTENTE COM AS PROPOSTAS ATRAVÉS DA MCC

As tarefas do plano de manutenção existente, que possuem relação com o sistema de controle e o subsistema de distribuição com autorrecolhimento estudados, estão listadas na tabela 4.6.

A primeira diferença que pode ser percebida é que o plano de manutenção existente está focado no estado do equipamento, com o objetivo de mantê-lo. Pela MCC, o foco da manutenção deve ser a preservação da(s) função(ões) com o objetivo de preservá-las.

Outra diferença encontrada é o fato de não ter sido usada a análise estatística para o reconhecimento do mecanismo de falha, bem como para a definição das tarefas e das periodicidades das tarefas do plano existente.

Tabela 4.6: Plano de manutenção existente.

<b>Tarefa</b>	<b>Periodicidade</b>
Reaperto de todas as conexões	30 dias
Inspeção de funcionamento dos carretéis enroladores	90 dias
Inspeção das condições das mangueiras enrolantes	30 dias
Testar funcionamento dos botões do controle	90 dias

O controle remoto é vital para o funcionamento do equipamento, pois a maior parte dos efeitos de suas falhas tem impacto sobre a operação, como mencionado na etapa 3. Portanto se algum dos botões não estiver funcionando, provavelmente o sistema de controle e o equipamento ficarão inoperantes. Assim, testar o funcionamento dos botões pode ser considerada uma tarefa não efetiva.

Por último, através da MCC constatou-se a necessidade de se estabelecer tarefas não periódicas com o objetivo de eliminar modos de falha (penúltima tarefa do plano proposto), bem como criar redundâncias para aumentar a confiabilidade do sistema e do equipamento (última tarefa listada na tabela 4.5).

## 5. CONCLUSÕES

Primeiramente, com a realização do presente trabalho, percebeu-se que a aplicação da metodologia da MCC permite um grande aprendizado a respeito de manutenção e principalmente dos objetos em estudo, proporcionado a todos que participam da análise. Contudo, ela é relativamente complexa e trabalhosa. Por isso é aconselhada somente para os equipamentos, sistemas e componentes importantes, sendo que ela própria fornece métodos para selecioná-los.

Como a manutenção é gerenciada ao nível do modo de falha, através da utilização do FMEA foi possível selecionar os que realmente são importantes para o funcionamento do equipamento, através dos riscos associados a eles bem como de seus efeitos. Esse é o primeiro ponto de vantagem em relação à manutenção estabelecida de forma empírica, que se preocupa igualmente com todos os modos de falha.

Para combater os modos de falha, através da MCC foram selecionadas tarefas aplicáveis e efetivas, através do diagrama lógico de decisão de tarefas e com base nas consequências das falhas. Esse é o segundo ponto de vantagem em relação à manutenção estabelecida empiricamente, que muitas vezes estabelece tarefas sem considerar a efetividade das mesmas ou as consequências que se deseja evitar.

A distribuição de Weibull forneceu os modelos de confiabilidade e os comportamentos das taxas de falha em relação ao tempo, dos modos de falha estudados. Através disso, foi possível conhecer o comportamento no decorrer do tempo e estabelecer períodos para execução das tarefas com confiabilidade pré-determinada. Esse é o terceiro ponto de vantagem da MCC.

Tudo isso resultou, do ponto de vista prático, no produto principal da aplicação da metodologia: o plano de manutenção para o equipamento, objetivo e bem estruturado, com justificativas fundamentadas tecnicamente para todas as tarefas.

O plano proposto está em análise pela Engenharia de Manutenção, que o aprovará ou não. Dessa forma, a questão ponto de partida para o presente trabalho levantada no capítulo 1 fica parcialmente respondida. A influência do plano proposto, sobre os indicadores apresentados no capítulo 2, será medida futuramente caso seja implementado.

Por fim, fica como sugestão de continuidade do trabalho a aplicação nos outros sistemas do equipamento, bem como em outros equipamentos da empresa. Como sugestão de melhoria, fica a mudança da base de tempo utilizada no estudo, de dias corridos para ciclos de montagens realizadas e assim as periodicidades das tarefas ficarão mais próximas da realidade, visto que a produção do equipamento não é constante.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “**NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**”. Rio de Janeiro, 1994. 37 páginas.

Fogliato, F. S.; Ribeiro, J. L. D. “**Confiabilidade e Manutenção Industrial**”. Elsevier, 2009.

Kardec, A.; Nascif, J. “**Manutenção – Função Estratégica**”. Qualitymark, 1999.

Lafracia, J. R. B. “**Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**”. Qualitymark, 2001.

Moreira, J. C. “**Aplicação do Método RCM às Linhas de Muito Alta Tensão da REN**”. Dissertação de Mestrado em Manutenção Industrial, Universidade do Porto – Portugal, 2005.

Moubray, J. “**Manutenção Centrada em Confiabilidade**”. Aladon, Ed. Brasileira, 2000.

Saur. “**Sistema para Montagem de Pneus em Tratores - Manual de Operação e Manutenção**”. Saur Equipamentos S. A., 2008.

Siqueira, I. P. “**Manutenção Centrada na Confiabilidade – Manual de Implementação**”. Qualitymark, 1ª Reimpressão, 2009.

Viana, H. R. G. “**Planejamento e Controle da Manutenção**”. Qualitymark, 2009.

Zaions, D. R. “**Consolidação da Metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade em Uma Planta de Celulose e Papel**”. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

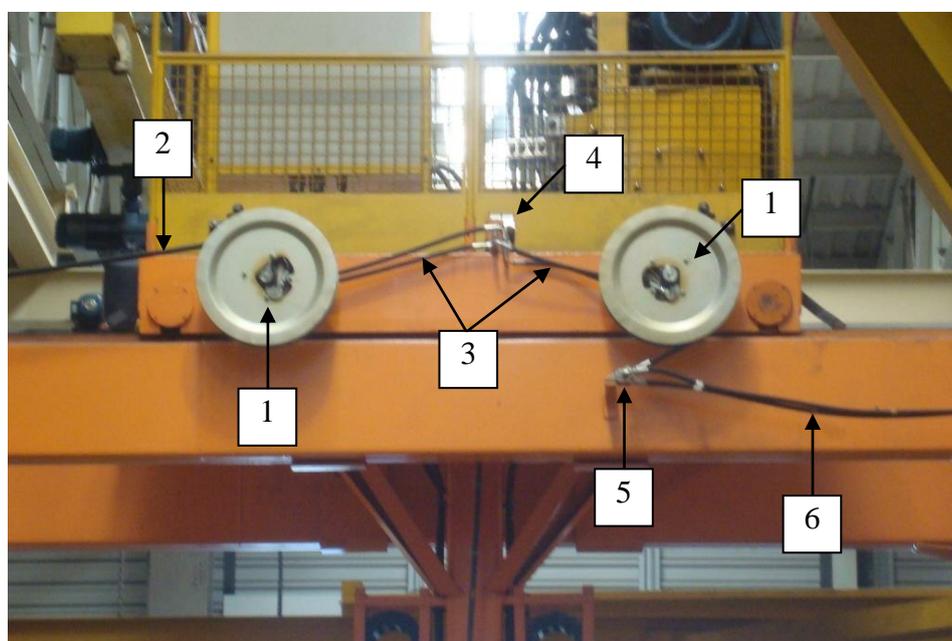
Cunha, J. T. “**Projeto Piloto de Implantação da Manutenção Centrada em Confiabilidade em uma Usina Siderúrgica**”. 2005. 32 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

Norton, R. L. “**Projeto de Máquinas – Uma Abordagem Integrada**”. Bookman, 2ª Ed., 2007.

APÊNDICE 1 – Fotos do equipamento e dos componentes estudados.

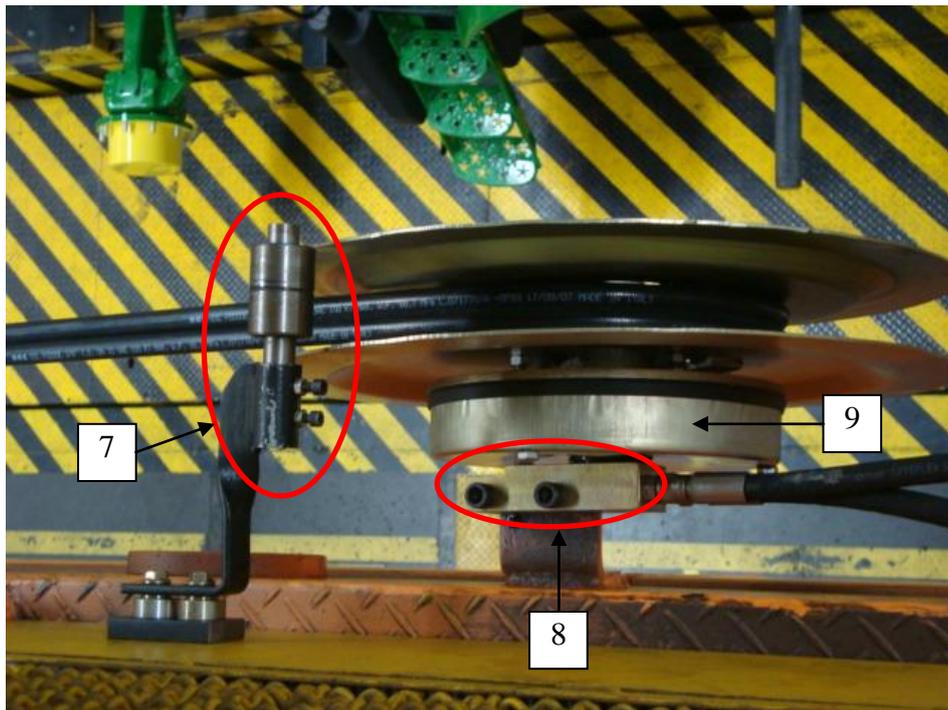


A) Máquina de montar pneus (Saur, 2008).



B) Componentes do subsistema de distribuição com autorrecolhimento.

- |                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| 1) Carretel enrolador  | 4) Conexão fixa       |
| 2) Mangueira enrolante | 5) Conexão oscilante  |
| 3) Mangueira fixa in   | 6) Mangueira fixa out |



C) Componentes do subsistema de distribuição com autorrecolhimento.  
 7) Rolete limitador                      8) Conexão girante  
 9) Alojamento da mola



D) Principal componente do sistema de controle: o controle remoto.

## APÊNDICE 2 – Características técnicas do equipamento (adaptado de Saur, 2008).

### 2.1 – Características da estrutura:

Dimensões: Comprimento (X): 10800 mm  
Largura (Y): 9700 mm (mínimo) / 14600 mm (máximo)  
Altura (Z): 7200 mm

Capacidade: 15000 kg

### 2.2 – Características individuais para cada lado (LE e LD):

Potência: 30 CV  
Tensão de força: 380 V  
Tensão de comando: 24 V  
Volume de óleo do reservatório: 350 l  
Pressões: Avança ou recua (Y): 150 bar  
Desloca esquerda ou direita (X): 60 bar  
Sobe (Z): 100 bar  
Desce (Z): 40 bar  
Giro direito ou esquerdo (Z): 80 bar  
Giro direito ou esquerdo (Y): 80 bar  
Inclina frente ou trás: 80 bar  
Abre garra: 60 bar  
Fecha garra: 150 bar  
Capacidade: 2000 kg  
Abertura da garra: 680 a 2200 mm  
Altura (do piso ao centro da garra): 500 a 1500 mm  
Giro (eixo Z): 360° (contínuos)  
Giro (eixo Y): 360° (contínuos)

### 2.3 – Capacidade de produção: acima do desempenho desejado (até 03/12/2010).

APÊNDICE 3 – Valores usados para a severidade do efeito, probabilidade de ocorrência e possibilidade de detecção.

Tabela 3.1: Severidade do efeito (adaptado de Siqueira, 2009).

Valor	Severidade	Dano Ambiental	Dano Pessoal	Impacto Operacional
10 9	Catastrófico	Grande	Mortal	Total
8 7	Crítico	Significante	Grave	Parcial
6 5	Marginal	Leve	Leve	Leve
4 3	Mínimo	Aceitável	Insignificante	Aceitável
2 1	Insignificante	Inexistente	Inexistente	Inexistente

Tabela 3.2: Probabilidade de ocorrência (adaptado do software Reliasoft RCM ++<sup>®</sup> 4).

Valor	Descrição: o modo de falha ocorre
10	a cada hora
9	a cada turno
8	a cada dia
7	a cada semana
6	a cada mês
5	a cada 3 meses
4	a cada 6 meses
3	a cada ano
2	a cada 2 anos
1	a cada 5 anos

Tabela 3.3: Possibilidade de detecção (adaptado de Siqueira, 2009).

Valor	Descrição: o modo de falha é
10 9	totalmente oculto
8 7	detectável apenas por desligamento
6 5	detectável por ensaio funcional
4 3	detectável por inspeção operacional
2 1	detectável por procedimento operacional

APÊNDICE 4 – Planilha FMEA do sistema de controle (fornecida pelo software Reliasoft RCM ++<sup>®</sup> 4).

Nome do Item	Falha	Efeito	S	Modo de Falha	O	D	R
Função							
<b>Controle Remoto (LE e LD)</b>							
Enviar um sinal de comando ao receptor para deslocamento da garra no eixo X (esquerda/direita), em uma das cinco posições de velocidade, quando solicitado pelo operador	Não envia nenhum sinal de comando quando solicitado	A garra não desloca para esquerda/direita, equipamento parado. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	6	Mau contato na conexão do joystick com a placa do controle	6	2	72
	Envia um sinal de comando mesmo quando não solicitado	A garra desloca para esquerda/direita sem a solicitação do operador, podendo haver uma colisão ou colocar em risco a segurança do operador. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	8	Joystick travado	1	1	8
Enviar um sinal de comando ao receptor para inclinação da garra (frente/trás), em uma das cinco posições de velocidade, quando solicitado pelo operador	Não envia nenhum sinal de comando quando solicitado	Equipamento operante com restrição, pode não ser possível pegar o pneu ou posicioná-lo corretamente para montagem. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	6	Suporte da bateria do controle quebrado	3	3	54
	Envia um sinal de comando mesmo quando não solicitado	A garra avança ou recua sem a solicitação do operador, podendo haver uma colisão ou colocar em risco a segurança do operador. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	8	Joystick travado	1	1	8
Enviar um sinal de comando ao receptor para deslocamento da garra no eixo Y (avanço/recuo), em uma das cinco posições de velocidade, quando solicitado pelo operador	Não envia nenhum sinal de comando quando solicitado	A garra não avança ou recua, equipamento parado. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	6	Suporte da bateria do controle quebrado	3	3	54
	Envia um sinal de comando mesmo quando não solicitado	A garra avança ou recua sem a solicitação do operador, podendo haver uma colisão ou colocar em risco a segurança do operador. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	8	Joystick travado	1	1	8
Enviar um sinal de comando para o giro da garra em torno do eixo horizontal (Y) no sentido horário/anti-horário, em uma das cinco posições de velocidade, quando solicitado pelo operador	Não envia nenhum sinal de comando quando solicitado	A garra não gira em torno do eixo horizontal, equipamento parado. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	6	Mau contato na conexão do joystick com a placa do controle	6	2	72
	Envia um sinal de comando mesmo quando não solicitado	A garra gira sem a solicitação do operador, podendo haver uma colisão. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	8	Joystick travado	1	1	8
Enviar um sinal de comando para a subida/descida da garra (eixo Z), em uma das cinco posições de velocidade, quando solicitado pelo operador	Não envia nenhum sinal de comando quando solicitado	A garra não sobe/desce, equipamento parado. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	6	Suporte da bateria do controle quebrado	3	3	54
	Envia um sinal de comando mesmo quando não solicitado	A garra sobe/desce sem a solicitação do operador, podendo haver uma colisão. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	8	Joystick travado	1	1	8
Enviar um sinal de comando para o giro da garra em torno do eixo vertical (Z) no sentido horário/anti-horário, em uma das cinco posições de velocidade, quando solicitado pelo operador	Não envia nenhum sinal de comando quando solicitado	A garra não gira em torno do eixo vertical, equipamento parado. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	6	Mau contato na conexão do joystick com a placa do controle	6	2	72
	Envia um sinal de comando mesmo quando não solicitado	A garra gira sem a solicitação do operador, podendo haver uma colisão. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	8	Joystick travado	1	1	8
Enviar um sinal de comando para ligar o equipamento	Não envia um sinal de comando quando solicitado	O equipamento não liga. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	6	Suporte da bateria do controle quebrado	3	3	54
	Envia um sinal de comando mesmo quando não solicitado	O equipamento não liga. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	8	Joystick travado	1	1	8
Enviar um sinal de comando para a parada de emergência do equipamento	Não envia um sinal de comando quando solicitado	O equipamento não liga. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	6	Suporte da bateria do controle quebrado	3	3	54
	Envia um sinal de comando mesmo quando não solicitado	O equipamento não liga. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	8	Joystick travado	1	1	8
Enviar um sinal de comando para abrir/fechar a garra	Não envia um sinal de comando para abrir/fechar a garra quando solicitado	Não é possível pegar o pneu, equipamento parado. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	6	Suporte da bateria do controle quebrado	3	3	54
	Envia um sinal de comando mesmo quando não solicitado	O equipamento não liga. Tempo para substituição do controle pelo reserva: 2 horas.	8	Joystick travado	1	1	8
<b>Receptor (LE e LD)</b>							
Receber os sinais de comando do controle, quando ele estiver dentro do perímetro de trabalho do equipamento	Não recebe os sinais	Sistema inoperante, equipamento parado (mesmo que um lado esteja funcionando). Tempo para substituição do controle e do receptor: 2 horas.	6	Cristal receptor queimado	1	7	42
				Placa queimada	1	7	42
Transmitir os sinais para o sistema de comando, em forma de sinal digital de tensão	Não transmite os sinais para o sistema de comando	Sistema inoperante, equipamento parado (mesmo que um lado esteja funcionando). Tempo para substituição do controle e do receptor: 2 horas.	6	Fonte do receptor queimada	2	7	84
				Cristal do receptor com frequência errada	1	7	42

onde S é a severidade do efeito, O é a probabilidade de ocorrência, D é a possibilidade de detecção e R é o risco.

APÊNDICE 5 – Planilha FMEA do subsistema de distribuição com autorrecolhimento (fornecida pelo software Reliasoft RCM ++<sup>®</sup> 4).

Nome do Item	Falha	Efeito	S	Modo de Falha	O	D	R
Função							
<b>Mangueira Enrolada Dupla (1 e 2, LE e LD) (4)</b>							
Conduzir óleo a uma pressão máxima de 150 bar, proveniente da conexão giratória para a conexão oscilante e vice-versa	Não conduz óleo	Equipamento inoperante, o motor hidráulico não realizará a sua função, não haverá avanço/recuo da garra. Tempo para reparo: 2 horas.	6	Obstruída por sujeira	1	8	48
	Não suporta a pressão de 150 bar	Equipamento inoperante, haverá um grande vazamento de óleo podendo ocasionar algum acidente com o operador. O motor hidráulico não realizará a sua função, não haverá avanço/recuo da garra. Tempo para reparo: 2 horas.	6	Dobrada	3	1	18
Deteriorada internamente por ação química				1	8	48	
Ressecada por alta temperatura				1	7	42	
Gasta por abrasão				1	7	42	
Permitir o enrolamento no carretel (flexibilidade), com diâmetro mínimo de volta de 200 mm	Não permite o enrolamento até o diâmetro mínimo	Equipamento inoperante, a mangueira ficará solta e não será possível a realização de movimentos pelo sistema de movimentação. Tempo para reparo: 2 horas.	6	Ressecada por alta temperatura	1	7	42
				Rachada na conexão de entrada por fadiga	1	7	28
Manter a estanqueidade de óleo	Não mantem a estanqueidade	Equipamento operante, porém haverá vazamento de óleo de pequenas proporções. Tempo para reparo: 1 hora.	4	Rachada na conexão de saída por fadiga	2	7	56
				Rachada por fadiga	3	7	84
				Conexão de entrada frouxa	2	8	64
				Conexão de saída frouxa	2	8	64
<b>Carretel Enrolador (1 e 2, LE e LD) (4)</b>							
Enrolar ou liberar a mangueira hidráulica dupla, quando o sistema de	Não enrola ou libera 3 m de mangueira	Equipamento inoperante, a mangueira ficará solta e não será possível a realização de movimentos pelo sistema de movimentação. Tempo para	6	Mola do carretel quebrada por fadiga	2	8	96
				Flange deformada ou torta	2	3	36
<b>Roleta Limitador (1 e 2, LE e LD) (4)</b>							
Impedir que a mangueira saia fora do canal de enrolamento do carretel	Possibilita que a mangueira saia fora do carretel	Equipamento inoperante, a mangueira ficará solta e não será possível a realização de movimentos pelo sistema de movimentação. Tempo para reparo: 2 horas.	6	Desregulado	2	5	60
<b>Conexão Oscilante (1 e 2, LE e LD) (4)</b>							
Distribuir óleo a uma pressão máxima de 150 bar, proveniente da mangueira enrolada dupla para a mangueira fixa out, possibilitando uma movimentação de giro entre elas de até 180 °	Não distribui óleo	Equipamento inoperante, o motor hidráulico não realizará a sua função, não haverá avanço/recuo da garra. Tempo para reparo: 2 horas.	6	Obstruída por sujeira	1	8	48
	Não possibilita o giro	Equipamento operante, porém poderá haver o enganchamento da mangueira e um possível rompimento da mesma, ocasionando um grande vazamento de óleo e um possível acidente com o operador. Tempo para reparo: 2 horas.	6	Vedação do bloco de conexão gasta	2	8	96
Manter a estanqueidade de óleo	Não mantem a estanqueidade	Equipamento operante, porém haverá vazamento de óleo de pequenas proporções. Tempo para reparo: 1 hora.	4	Porca de fixação do cilindro frouxa	2	7	56
				Cilindro gasto	1	8	32
				Retentor do cilindro girante gasto	1	8	32
				Trincada	1	8	32
<b>Conexão Fixa (LE e LD) (2)</b>							
Distribuir óleo a uma pressão máxima de 150 bar, proveniente da mangueira de direcionamento de fluxo para a mangueira fixa in	Não distribui óleo	Equipamento inoperante, o motor hidráulico não realizará a sua função, não haverá avanço/recuo da garra. Tempo para reparo: 2 horas.	6	Obstruída por sujeira	1	8	48
Manter a estanqueidade de óleo	Não mantem a estanqueidade	Equipamento operante, porém haverá vazamento de óleo de pequenas proporções. Tempo para reparo: 1 hora.	4	Trincada	1	8	32
<b>Conexão Girante (1 e 2, LE e LD) (4)</b>							
Distribuir óleo a uma pressão máxima de 150 bar, proveniente da mangueira enrolada dupla para a mangueira fixa out, possibilitando o giro ilimitado	Não distribui óleo	Equipamento inoperante, o motor hidráulico não realizará a sua função, não haverá avanço/recuo da garra. Tempo para reparo: 2 horas.	6	Obstruída por sujeira	1	8	48
	Não possibilita o giro	Equipamento operante, porém poderá haver o enganchamento da mangueira e um possível acidente com o operador. Tempo para reparo: 2 horas.	6	Cilindro travado por excesso de aperto	2	8	96
Manter a estanqueidade de óleo	Não mantem a estanqueidade	Equipamento operante, porém haverá vazamento de óleo de pequenas proporções. Tempo para reparo: 1 hora.	4	Rolamento travado	1	8	48
				Vedação do bloco de conexão gasta	2	7	56
				Cilindro gasto	2	8	64
				Retentor do cilindro girante gasto	2	8	64
				Trincada	1	8	32
<b>Mangueira Fixa Dupla In (1 e 2, LE e LD) (2)</b>							
Conduzir óleo a uma pressão máxima de 150 bar, proveniente da conexão oscilante para o sistema de movimentação e vice-versa	Não conduz óleo	Equipamento inoperante, o motor hidráulico não realizará a sua função, não haverá avanço/recuo da garra. Tempo para reparo: 2 horas.	6	Obstruída por sujeira	1	10	60
	Não suporta a pressão de 150 bar	Equipamento inoperante, haverá um grande vazamento de óleo podendo ocasionar algum acidente com o operador. O motor hidráulico não realizará a sua função, não haverá avanço/recuo da garra. Tempo para reparo: 2 horas.	6	Dobrada	1	1	6
Deteriorada internamente por ação química				1	8	48	
Ressecada por alta temperatura				1	7	42	
Rachada na conexão de entrada por fadiga				1	7	28	
Manter a estanqueidade de óleo	Não mantem a estanqueidade	Equipamento operante, porém haverá vazamento de óleo de pequenas proporções. Tempo para reparo: 1 hora.	4	Rachada na conexão de saída por fadiga	1	7	28
				Rachada por fadiga	1	7	28
				Conexão de entrada frouxa	2	8	64
				Conexão de saída frouxa	2	8	64
<b>Mangueira Fixa Dupla Out (1 e 2, LE e LD) (2)</b>							
Conduzir óleo a uma pressão máxima de 150 bar, proveniente da conexão oscilante para o sistema de movimentação e vice-versa	Não conduz óleo	Equipamento inoperante, o motor hidráulico não realizará a sua função, não haverá avanço/recuo da garra. Tempo para reparo: 2 horas.	6	Obstruída por sujeira	1	10	60
	Não suporta a pressão de 150 bar	Equipamento inoperante, haverá um grande vazamento de óleo podendo ocasionar algum acidente com o operador. O motor hidráulico não realizará a sua função, não haverá avanço/recuo da garra. Tempo para reparo: 2 horas.	6	Dobrada	1	1	6
Deteriorada internamente por ação química				1	8	48	
Ressecada por alta temperatura				1	7	42	
Rachada na conexão de entrada por fadiga				1	7	28	
Manter a estanqueidade de óleo	Não mantem a estanqueidade	Equipamento operante, porém haverá vazamento de óleo de pequenas proporções. Tempo para reparo: 1 hora.	4	Rachada na conexão de saída por fadiga	1	7	28
				Rachada por fadiga	1	7	28
				Conexão de entrada frouxa	2	8	64
				Conexão de saída frouxa	2	8	64

onde S é a severidade do efeito, O é a probabilidade de ocorrência, D é a possibilidade de detecção e R é o risco.

## APÊNDICE 6 – Cálculos (realizados pelo software Reliasoft Weibull ++® 7).

Entrada Requerida pelo Usuário	
Confiabilidade Requerida	0,95

Resultados	
Tempo	230,5237

Calcular Fechar

A) Período para substituição preventiva da mola do carretel.

Entrada Requerida pelo Usuário	
Confiabilidade Requerida	0,95

Resultados	
Tempo	251,1827

Calcular Fechar

B) Intervalo de tempo para o início da inspeção preditiva da mangueira enrolante.

Entrada Requerida pelo Usuário	
Tempo Inicial da Missão	250
Tempo Adicional da Missão	60

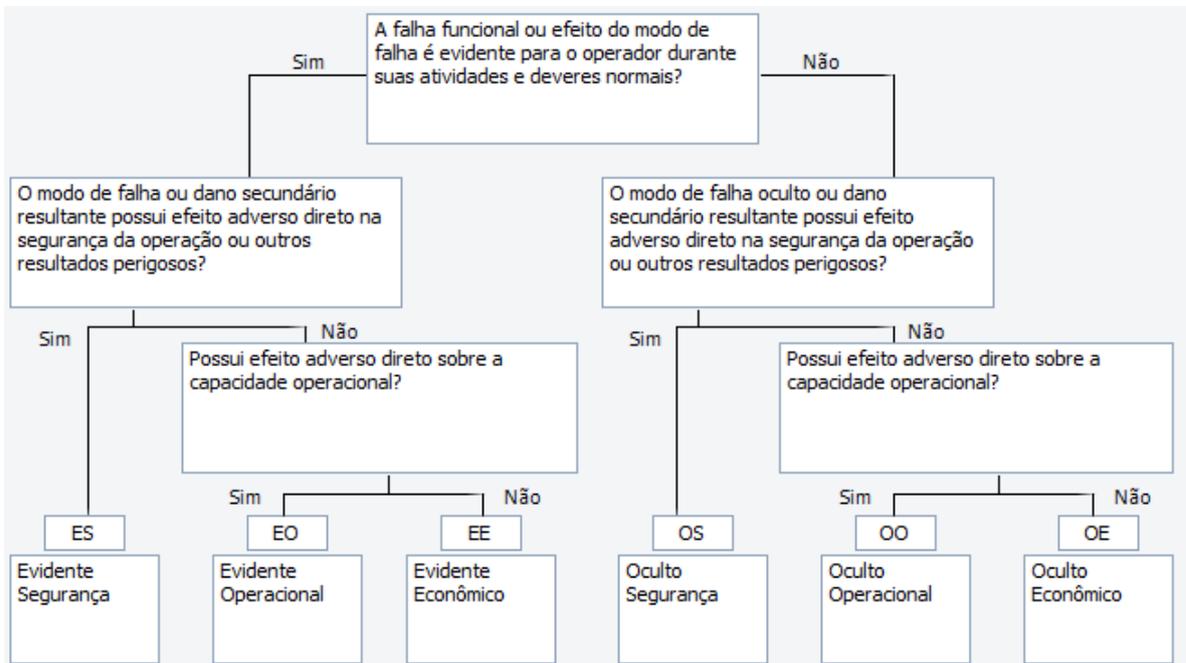
  

Resultados	
Confiabilidade Cond.	0,9531

Calcular Fechar

C) Intervalo P-F para o modo de falha rachada por fadiga.

ANEXO 1 – Diagrama lógico de categorização do efeito (adaptado do software Reliasoft RCM ++<sup>®</sup> 4).



ANEXO 2 – Diagrama lógico de decisão para a seleção de tarefas de manutenção (adaptado de Zaians, 2003).

