

GABRIELA MARCASSO

**Estudo de caso da falha de um motor diesel 9.0l John Deere de uma colhedora de
cana de açúcar John Deere 3522 2l**

Guaratinguetá - SP

2017

GABRIELA MARCASSO

**Estudo de caso da falha de um motor diesel 9.0l John Deere de uma colhedora de
cana de açúcar John Deere 3522 2l**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho
de curso de Graduação em Engenharia Mecânica
da Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista,
como parte dos requisitos para obtenção do
diploma de Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

Coorientador: Eng. Esp. Tiago Soares da Silva

Guaratinguetá - SP

2017

M313e	Marcasso, Gabriela Estudo de caso da falha de um motor diesel 9,0L John Deere de uma colhedora de cana de açúcar John Deere 3522 2L / Gabriela Marcasso – Guaratinguetá, 2017. 68 f : il. Bibliografia: f. 65-68 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins Coorientador: Eng. Esp. Tiago Soares da Silva 1. Motor diesel. 2. Usinas. 3. Manutenção. I. Título

CDU 621.436


Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

Gabriela Marcasso

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Orientador UNESP-FEG

Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI
UNESP-FEG

Eng. Me. EVERTON COELHO DE MEDEIROS
UNESP-FEG

Novembro de 2017

Principalmente aos meus pais família e amigos
que compreenderam minha ausência

AGRADECIMENTOS

Nenhum trabalho é feito sozinho, deste modo, agradeço a todos os envolvidos de alguma forma nesse trabalho em especial aos que seguem:

Ao meu orientado *Prof. Dr. Marcelo Sampaio* que com toda paciência me orientou durante a estruturação e escrita deste trabalho meu coorientador Eng. Esp. Tiago Soares da Silva que me motivou e guiou durante a idealização e levantamento de dados.

Aos meus colegas: Lucas Henrique Santana que me ajudou na elaboração dos relatórios preliminares que deram origem a esse trabalho ao Marcelo Sandoval Bernardo, ao Rafael Gonçalves Oliveira e ao Guilherme Carvalho do Carmo pelos ensinamentos e ajuda de todos os dias.

Aos meus amigos que me acompanharam durante os anos de faculdade e as minhas amigas de infância que sempre me apoiaram.

Aos meus pais e familiares que nunca me deixaram desistir.

RESUMO

Manutenção é a totalidade das ações técnicas e administrativas que tem como objetivo manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar as funções requeridas, no entanto, as tarefas de manutenção devem incluir ações de apoio como o tratamento de falhas. O tratamento de falhas é de suma importância para o estabelecimento de contramedidas para bloqueá-las de modo que as mesmas falhas não voltem a ocorrer fazendo com que as equipes de manutenção entrem em um ciclo vicioso de apenas substituir peças e retirar sintomas. Para o tratamento adequado das falhas o registro e análise da mesma deve ser realizado buscando encontrar suas causas fundamentais. Em uma usina do ramo sucroenergético que depende da cana de açúcar para a produção de todos seus produtos, a falta dessa matéria prima pode causar sérios danos a produção, tornando a colhedora de cana de açúcar um equipamento de principal importância. Dentre os componentes desse equipamento o de maior custo é o motor diesel. Este trabalho tem como objetivo realizar a análise de falha de um motor diesel de uma colhedora John Deere modelo 3522 duas linhas para encontrar a causa raiz e propor um plano de ação bloqueá-la.

PALAVRAS-CHAVE: Motor Diesel. Análise de Falha. Setor Sucroenergético.

ABSTRACT

Maintenance is the totality of activities and actions technical or administrative which main object is to restore an item to a state in which it can perform, and function as required. Nevertheless, maintenance chores must contain support tasks as failure treatment. The failure treatment is of main importance to establish actions to block failure so that the maintenance team doesn't enter in a vicious circle where only symptoms are treated and parts are substituted. To hold a proper failure treatment the failures must be registered to find the root cause. In a sucroenergetic mill which relays in sugarcane as a feedstock to all production items, the lack of it may cause serious damages to its production making the sugarcane harvester a machinery of main importance. Among the components of this machinery the most expensive one is the diesel engine. This work aims to study and analyze the failure of a diesel engine of a John Deere sugarcane harvester model 3522 two lines to determine the root cause and to propose a plan of action to block- it.

KEYWORDS: Diesel Engine. Failure Analysis. Sucroenergetic mill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Motor diesel John Deere 9L.....	17
Figura 2 – Colhedora de cana de açúcar.....	18
Figura 3 – Esquema de uma colhedora de cana de açúcar	19
Figura 4 – Dimensões gerais de uma colhedora de cana de açúcar.....	20
Figura 5 – Motor de combustão interna	21
Figura 6 – Motor de combustão interna (2).....	22
Figura 7 –Etapas do Motor de Quatro Tempos	23
Figura 8 – Possíveis Configurações de Motores	24
Figura 9 – Principais partes do motor.....	25
Figura 10 – Bielas e Casquilho.....	25
Figura 11 – Biela e Casquilho	26
Figura 12 – Teste de <i>Blow-By</i>	29
Figura 13 – Desgaste Abrasivo.....	33
Figura 14 – Desgaste Corrosivo	33
Figura 15 – Desgaste por rolamento.....	34
Figura 16 – Desgaste por deslizamento.....	34
Figura 17 – Etapas da Fratura Dúctil.....	35
Figura 18 –Superfície Fratura Frágil	36
Figura 19 – Curva Tensão Deformação para Materiais Frágeis e Dúcteis.....	36
Figura 20 – Superfície de Fratura por Fadiga.....	37
Figura 21 – Diagrama de Ishikawa.....	38
Figura 22 – Motor após falha	43
Figura 23 – Motor após falha (2).....	43
Figura 24 – Abertura do cárter	52
Figura 25 – Peças que falharam.....	53
Figura 26 – Peças que falharam (2).....	53
Figura 27 – Cabeçote.....	53
Figura 28 – Bielas e pistões.....	54
Figura 29 – Bloco do motor.....	54
Figura 30 – Camisa do cilindro onde o bloco rompeu	54

Figura 31 – Ranhuras nos casquilhos	55
Figura 32 – Deformação plástica nos casquilhos	55
Figura 33 – Biela com Lascamentos.....	56
Figura 34 – Superfície de fratura do parafuso	56
Figura 35 – Superfície de fratura da biela	57
Figura 36 – Marcas no mancal da biela	57
Figura 37 – Parafuso da Biela.....	58
Figura 38 – Camisas do Bloco.....	58
Figura 39 – Pistões	59
Figura 40 – Diagrama de Ishikawa realizado	61
Figura 41 – Árvore de falhas	62
Figura 42 – Sequência dos fatos	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do motor da colhedora John Deere 3522 2L.....	27
Tabela 2 – Procedimento do Teste de <i>Blow-By</i>	28
Tabela 3 – Descrição e quantidade de ocorrências desde o início da safra.....	44
Tabela 4 – Especificações do lubrificante SAE 15W40.....	45
Tabela 5 – Especificações limite para análise de óleo.....	45
Tabela 6 – Histórico de coleta e análise de lubrificante no motor	46
Tabela 7 – Horas apontadas por tarefa no sistema motor.....	49
Tabela 8 – Manutenções corretivas no motor.....	51
Tabela 9 – Custos do reparo	59
Tabela 10– Lucro cessante	60
Tabela 11 – Falhas no processo e planos de ação.....	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução da colheita mecanizada no centro-sul.....	18
Gráfico 2 –Análise de óleo recomendado e realizado	46
Gráfico 3 –Concentração de contaminantes no óleo lubrificante.....	48
Gráfico 4 –Horas de Manutenção Corretiva por sistema	50
Gráfico 5 –Horas de manutenção corretiva do motor.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATR – Açúcar total retornável

ÚNICA – União da Indústria de Cana de Açúcar

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

FTA – *FaultTreeAnalysis*

Visc - Viscosidade

LISTA DE SÍMBOLOS

mg KOH/g – miligramas de hidróxido de potássio por grama de óleo

N - Newton

kW – KiloWatts

lb.ft – pé-libra força

°C – Grau Celsius

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	INTRODUÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	JUSTIFICATIVA	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	COLHEITA MECANIZADA DE CANA DE AÇUCAR	18
2.2	COLHEDORA DE CANA - JOHN DEERE 3522L	19
2.3	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	20
2.3.1	A Invenção do Motor Diesel	22
2.3.2	Termodinâmica do Motor Diesel	23
2.3.3	Construção do Motor Diesel	23
2.3.4	Sistema de Lubrificação	26
2.3.5	Motor Diesel JOHN DEERE – Especificações e Manutenção	27
2.4	LUBRIFICAÇÃO	29
2.4.1	Funções da Lubrificação em Motores Diesel	29
2.4.2	Tipos de Óleo Lubrificante	30
2.4.3	Análise de Óleo	31
2.5	ANÁLISE DE FALHA	31
2.5.1	Desgastes	32
2.5.2	Fraturas	34
2.6	FERRAMENTAS DA QUALIDADE	38
2.6.1	Ishikawa	38
2.6.2	Árvore de Falhas	39
3	ESTUDO DE CASO	40
3.1	INFORMAÇÕES PRELIMINARES	40
3.2	ETAPAS DA ELABORAÇÃO DE UM RELATÓRIO DE ANÁLISE DE FALHAS	40
4	RESULTADOS	43
4.1	INFORMAÇÕES BÁSICAS DA FALHA	43
4.2	INFORMAÇÕES DO EQUIPAMENTO	44

4.3	HISTÓRICO DE ANÁLISE DE LUBRIFICANTE	45
4.4	HISTÓRICO DE MANUTENÇÃO	49
4.4.1	Histórico de Manutenção Preventiva	49
4.4.2	Histórico de Manutenção Corretiva	50
4.5	ANÁLISE DOS COMPONENTES QUE FALHARAM	52
4.6	ANÁLISE DE CUSTO DA FALHA	59
4.6.1	Análise de custo de reparo	59
4.6.2	Análise de Lucro Cessante	60
4.7	Ishikawa	60
4.8	ÁRVORE DE FALHAS	61
4.9	SEQUENCIA LÓGICA DOS FATOS	63
4.10	PLANO DE AÇÃO	63
5.	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Segundo Chiaguri (2010) o início do cultivo da cana de açúcar no Brasil se deu no século XVI quando os portugueses o iniciaram com objetivo de ocuparas terras brasileiras para não as perder para os espanhóis e franceses, foram construídos então os primeiros engenhos de cana de açúcar.

Hoje o complexo brasileiro de usinas sucroenergéticas possui 394 unidades com autorização da ANP para produção de etanol, 373 operam de acordo com o Ministério da Agricultura, 180 aderiram ao compromisso nacional para aperfeiçoar as condições de trabalho e 43 são certificadas pelo Bonsucro (NOVA CANA, 2017).

No ano de 2016 o complexo sucroenergético foi o terceiro item mais exportado pelo agronegócio brasileiro totalizando lucro U\$11,34 bilhões e a estimativa de produção de cana de açúcar para a safra atual (safra 2017/2018) é de 647,6 milhões de toneladas com uma área colhida estimada em 8,84 milhões de hectares (CONAB, 2017).

Desde o início do cultivo da cana de açúcar no Brasil o método utilizado para a colheita era o corte manual, antes do qual é usual queimar a cana de açúcar para facilitar a operação. No entanto, com a aprovação da lei estadual N11.241 de 19 de setembro de 2002, que estabeleceu prazos para a eliminação da queima da cana de açúcar ocorreram uma série de mudanças no setor. Foi assinado em 2007 pela Secretaria do Meio Ambiente e Agricultura e Abastecimento pela União da Indústria de Cana de Açúcar (ÚNICA) e pela Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul um protocolo denominado Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético Paulista a partir do qual foi estabelecido um cronograma para a eliminação da queima da cana de açúcar e com a ampliação da colheita mecanizada (TORQUATO, DE JESUS, ZORZO, 2015)

O corte de cana mecanizado faz uso de diversos equipamentos, no entanto, o equipamento principal é a colhedora de cana de açúcar.

A parada inesperada desse equipamento devido a uma falha gera elevado prejuízo devido ao custo de reparo e ao lucro cessante. Deste modo estudar as falhas para prevê-las é de suma importância.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é estudar a falha ocorrida em um motor diesel John Deere 9L de uma colhedora de cana John Deere modelo 3325 2L, conforme mostrado na Figura 1, e estabelecer possíveis ações para evitar recorrência.

Figura 1 –Motor diesel John Deere 9L



Fonte: Autoria Própria (2017)

1.3 JUSTIFICATIVA

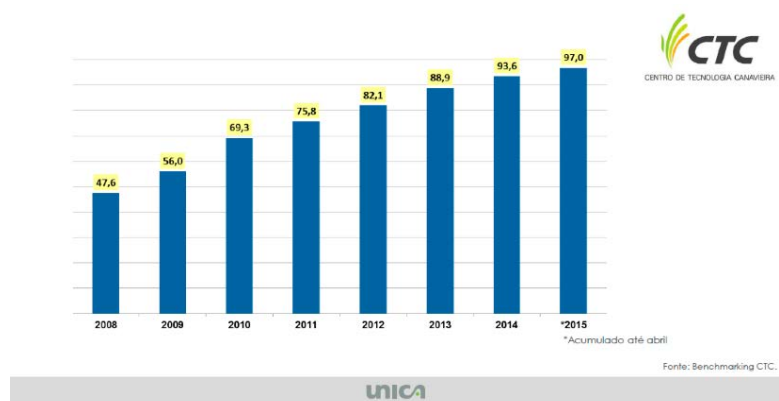
Em uma indústria produtora de etanol, açúcar e bioenergia a colheita de cana é fundamental garantir a produção, deste modo, a parada inesperada de uma colhedora impacta diretamente na produção, ocasionando perdas não apenas devido a gastos inesperados com componentes, mas também devido ao lucro cessante. Desta forma, é muito importante evitar esse tipo de falha.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COLHEITA MECANIZADA DE CANA DE AÇUCAR

Desde a aprovação da Lei estadual N11.241 de 19 de setembro de 2002 que estabelece prazos para a eliminação da queima da cana de açúcar e a ratificação do Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético Paulista em 2007 (TORQUATO, et al) é estimado que os índices de mecanização da colheita cresceram de 47% em 2008 para 97% em 2015 como mostra o Gráfico 1 (NOVA CANA, 2017).

Gráfico 1–Evolução da colheita mecanizada no centro-sul



Fonte: Nova Cana (2017)

O principal equipamento utilizado para a realização da colheita mecanizada da cana de açúcar (Figura 2) é a colhedora de cana de açúcar, sendo este um equipamento considerado de prioridade e elevado custo e cuja parada impactam diretamente na produção industrial podendo até mesmo cessá-la ocasionando perdas devido a lucro cessante e ao elevado custo de reparo.

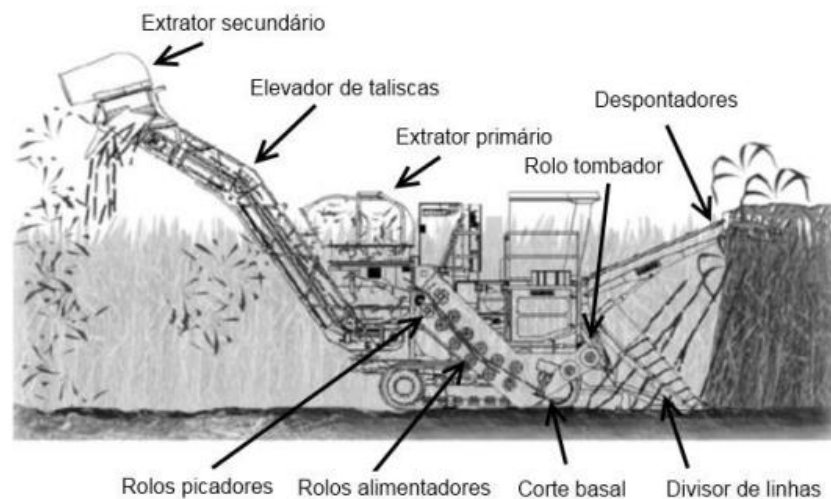
Figura 2– Colhedora de cana de açúcar



Fonte: John Deere (2017)

O processo do corte da cana se inicia pelo corte das ponteiros pelos desapontadores, em seguida os divisores de linha e os rolos tombadores conduzem a matéria prima para o corte basal, os colmos então são direcionados pelos rolos alimentadores até os rolos picadores onde são cortados em rebolos de 30 a 40 cm. Os rebolos são depositados no cesto e por meio da ação do extrator primário as impurezas são removidas por exaustão de ar que é promovida por uma hélice giratória. Por fim a cana picada é conduzida pelo elevador de taliscas até o extrator secundário para uma segunda retirada de impureza e então são descarregadas em transbordos (VOLTARELLI, 2015). O esquema das colhedoras de açúcar é em geral como segue na Figura 3.

Figura 3– Esquema de uma colhedora de cana de açúcar



Fonte: Voltarelli (2015)

2.2 COLHEDORA DE CANA -JOHN DEERE 3522L

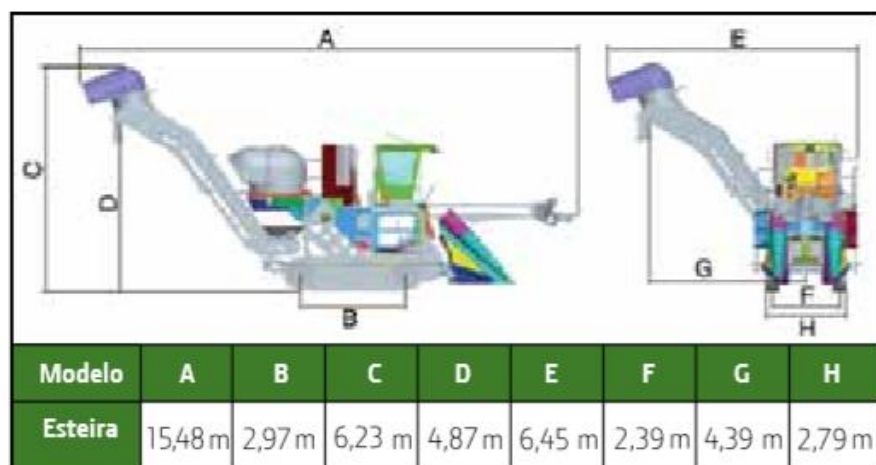
A colhedora de cana John Deere 3522 2L (Figura 3) é um equipamento capaz de colher duas linhas de cana com espaçamento de até 1,10m, essa medida de bitola faz com que o equipamento possa trabalhar em áreas mais inclinadas, evitando tombamentos.

O equipamento foi projetado para atender diversas áreas do Brasil, para isso possui controle integrado da altura do corte de base proporcionando corte de base rente ao solo. Essa configuração reduz o abalo da soqueira, além disso, possui sistema automático de flutuação dos divisores de linha que acompanha as irregularidades do solo e reduz os esforços de carga na estrutura da colhedora.

Essa colhedora possui motor e sistema hidráulico de auto desempenho, tendo bombas e motores de pistão exclusivos para cada sistema. O consumo de combustível é reduzido devido ao uso do *FieldCruise* (que realiza ajuste automático da rotação do motor de acordo com o nível de carga) e de uma função inteligente do extrator primário que reduz as rotações quando o elevador está desligado.

A facilidade de operação da máquina é garantida através de monitoramento digital nos displays de comando no qual é possível realizar gestão das funções de colheita, motor e códigos de falha além de auxiliar nas operações noturnas. As velocidades de operação podem ser limitadas para definir a melhor condição de produtividade. E as dimensões gerais do equipamento são como segue na Figura 4.

Figura 4– Dimensões gerais de uma colhedora de cana de açúcar

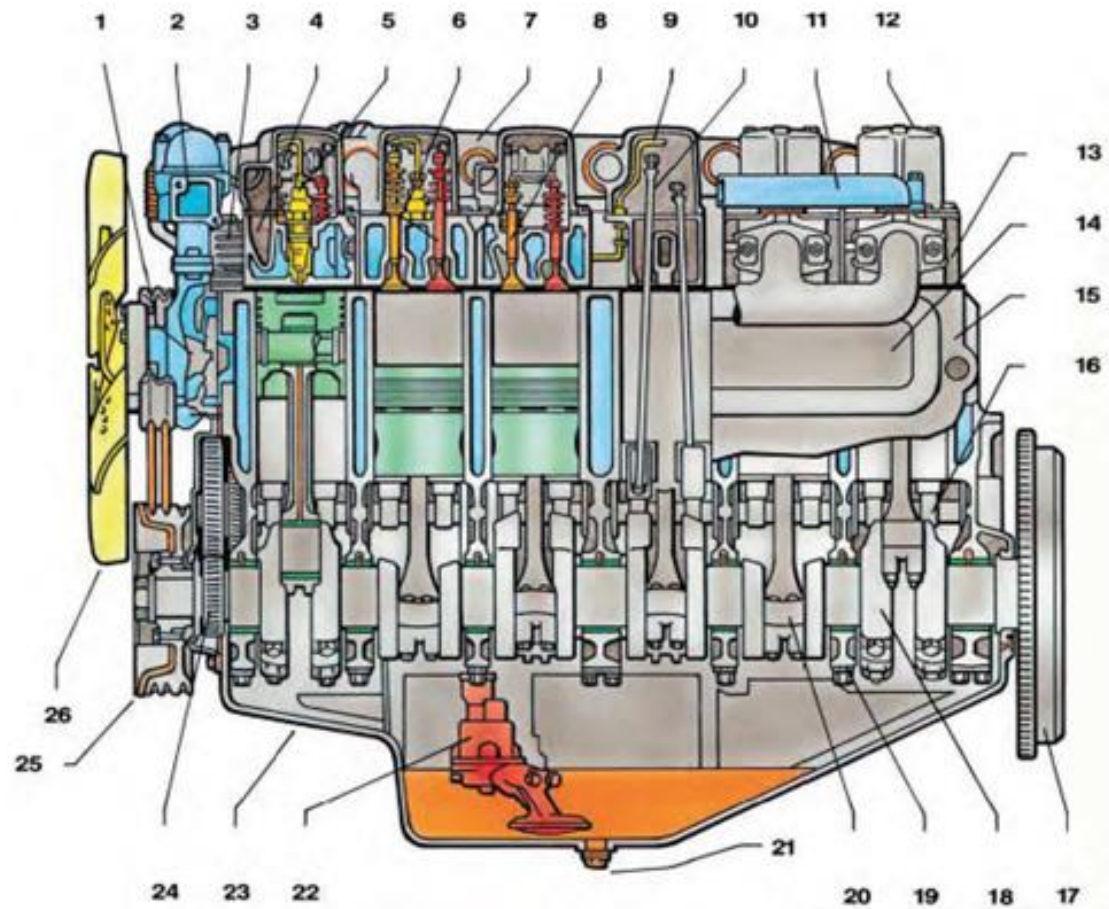


Fonte: John Deere (2017)

2.3 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

O motor de combustão interna é uma máquina térmica que transforma energia térmica em energia mecânica útil, sendo a energia térmica proveniente da combustão de uma mistura de combustível e comburente. O comburente é, na maior parte das máquinas, o ar (Martins, 2011). Essa máquina possui os componentes como segue na Figura 5 e Figura 6.

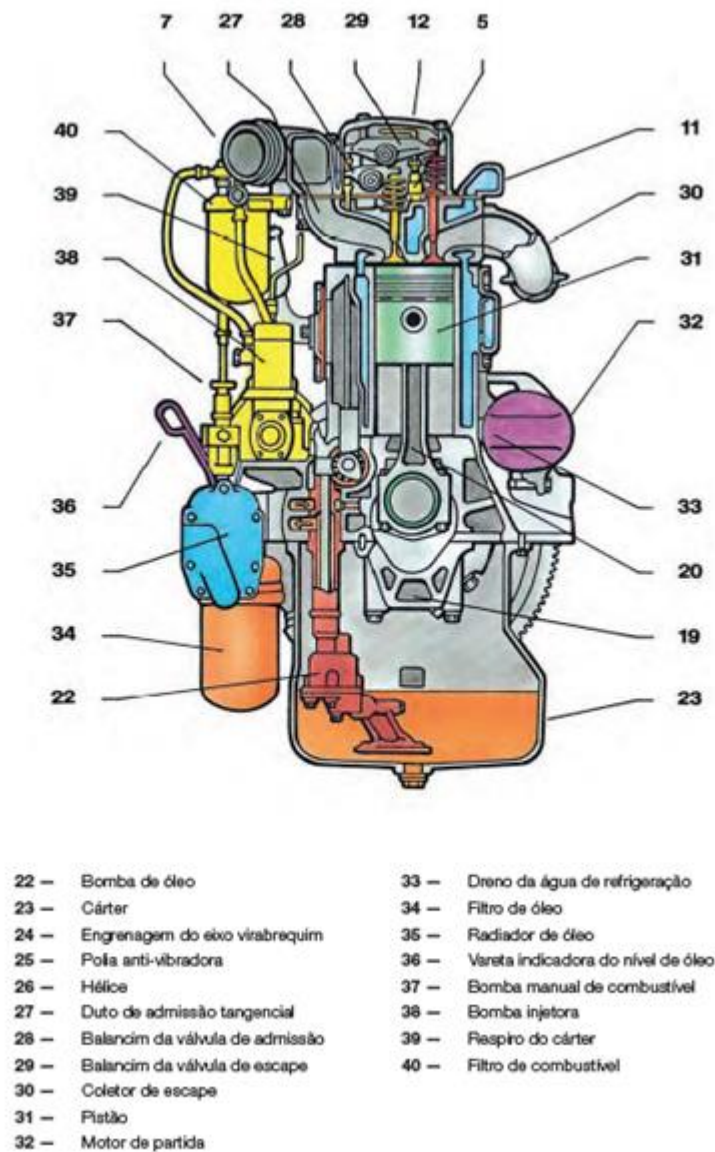
Figura 5– Motor de combustão interna



- | | |
|---|--|
| 01 – Bomba-d'água | 11 – Duto de saída de água de refrigeração |
| 02 – Termostato da água de refrigeração ou válvula termostática | 12 – Tampa de válvula |
| 03 – Compressor de ar | 13 – Cabeçote |
| 04 – Duto de admissão | 14 – Tampa lateral do bloco |
| 05 – Elco injetor | 15 – Bloco do motor |
| 06 – Válvula de escape | 16 – Eixo comando de válvulas |
| 07 – Coletor de admissão | 17 – Volante |
| 08 – Válvula de admissão | 18 – Eixo virabrequim |
| 09 – Linha de injeção de combustível | 19 – Capa do mancal principal |
| 10 – Vareta de válvula | 20 – Biela |
| | 21 – Bujão de escoamento do óleo do cárter |

Fonte: Mahle (2016)

Figura 6– Motor de combustão interna (2)



Fonte: Mahle (2016)

2.3.1 A Invenção do Motor Diesel

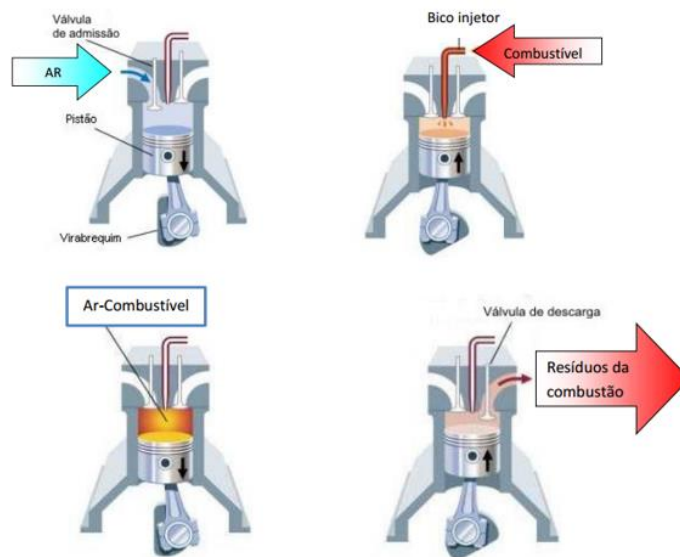
A invenção do motor a diesel ocorreu no século XIX, e foi uma das invenções que mais impactou a sociedade. Esse tipo de motor é utilizado em automóveis, motos, caminhões, locomotivas, navios, para produzir eletricidade, movimentar máquinas, cortar relva ou árvores.

O motor a diesel foi pioneiramente desenvolvido por dois ingleses e um alemão William Priestman em 1885, Herbert Stuart em 1890 e Emil Capitaine 1985, no entanto, estes motores não funcionavam a pressão constante, foi Rudolf Diesel que em 1893 propôs o ciclo a pressão constante. Essa tecnologia passou a ser comercializada apenas em 1898 por M.A.N Krupp que teve grandes problemas com a manutenção dessas máquinas (Martins, 2011).

2.3.2 Termodinâmica do Motor Diesel

Um motor a diesel é um motor de quatro tempos, a Figura 6 mostra as quatro etapas de funcionamento do mesmo. No primeiro tempo ocorre a aspiração do combustível para o interior do cilindro do motor, em seguida ocorre a compressão (segundo tempo). A ignição e a queima da mistura ocorrem no terceiro tempo. Por fim, no quarto tempo o embolo expulsa de dentro do cilindro os gases resultantes da queima abrindo a válvula de descarga realizando o curso de descarga (Obert, 1950).

Figura 7: Etapas do Motor de Quatro Tempos

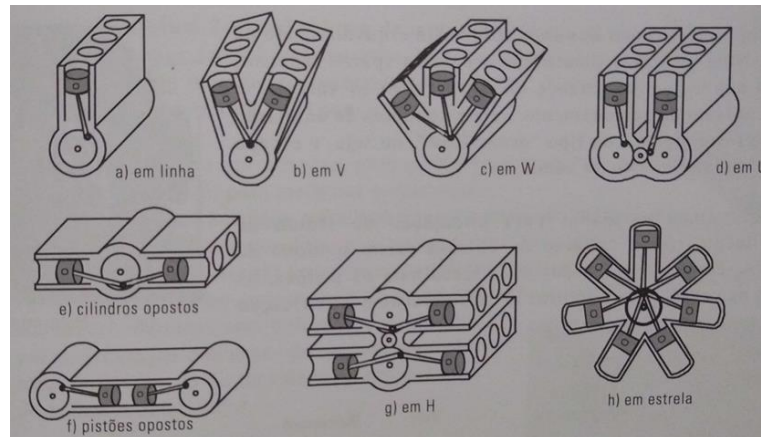


Fonte: Varela & Santos (2010)

2.3.3 Construção do Motor Diesel

Existem diferentes configurações de motores, ou seja, os cilindros podem se posicionar de diversos modos como mostrado na Figura 9.

Figura 8: Possíveis Configurações de Motores



Fonte: Martins (2011)

Um motor de combustão interna é composto estruturalmente por bloco, cabeçote e cárter. Essa estrutura deve ser suficientemente rígida para suportar as elevadas pressões e velocidades atingidas pela máquina (Martins 2011). Além disso, o motor possui válvulas, eixo de cames (controle de válvulas), cilindro, árvore de manivelas, pistão, biela, câmara de combustão como mostra na Figura 9.

O pistão possui anéis de seguimento que ficam fixados em ranhuras, esses anéis têm como função realizar a vedação impedindo a passagem dos gases de compressão e de cinzas para o cárter com isso os mesmos mantem a pressão constante sobre a cabeça do pistão.

O espaço entre o cabeçote e a cabeça do pistão, é a câmara de combustão, cavidade na qual ocorre a combustão da mistura de combustível (diesel) e comburente (ar). As válvulas são as responsáveis por controlar a entrada e saída de gases do cilindro, essas válvulas são controladas pelo eixo de cames.

O eixo de cames tem um came para cada válvula e recebe o movimento da árvore de manivelas que possui um flange em sua extremidade posterior para o acoplamento do volante do motor e um eixo para a transmissão de rotação em sua extremidade anterior. A rotação é transmitida ao eixo de comando de válvulas, podendo ser diretamente engrenado ou através de corrente/correia.

O cilindro é o furo do bloco do motor, no qual o pistão se movimenta linearmente, percorrendo sempre a mesma distância, chamada de curso (distância entre o ponto morto superior e ponto morto inferior). O cilindro é aberto nas extremidades e pode possuir uma peça chamada camisa colocada no furo do bloco, enquanto o pistão é fechado na parte superior e aberto na parte inferior.

Figura 9: Principais partes do motor



Fonte: Varella & Santos (2010)

O componente responsável por transmitir o movimento do pistão para a árvore de manivelas se chama biela. As bielas são fixadas em mancais móveis ou mancais de biela. Para que não ocorra contato direto entre a biela e o eixo virabrequim e evitar o desgaste do eixo são utilizados casquilhos ou bronzinas entre as duas partes como indicado na Figura 10.

Figura 10: Biela e Casquilho



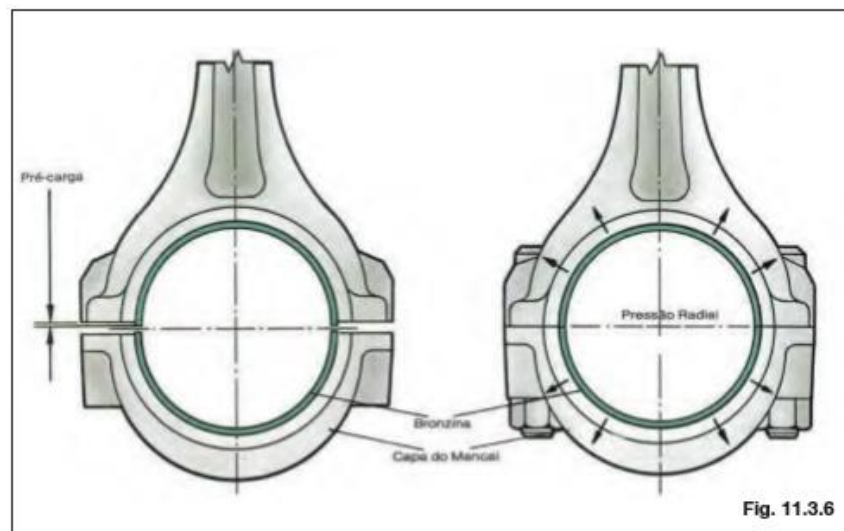
Fonte: Varella & Santos (2010)

Para exercerem seu papel efetivamente os casquilhos devem trabalhar encaixados em seu alojamento de maneira fixa. O dimensionamento do casquilho deve ser tal que esse elemento trabalhe sobre pressão (diâmetro do alojamento maior que diâmetro das bordas do casquilho) e quando encaixado as bordas devem se sobressair ligeiramente do alojamento para que no momento no qual os parafusos forem apertados as faces de partição entrem em contato

criando uma pressão radial que garante o contato da parte externa do casquilho com o alojamento o que é de suma importância para que ocorra a dissipação de calor necessária como ilustra a Figura 11.

Entre o eixo e o casquilho deve haver uma película de óleo para garantir a dissipação do calor, deste modo os casquilhos devem ser projetados para garantir a maior espessura de óleo possível compatível com o sistema de lubrificação da máquina. (MAHLE, 2016)

Figura 11– Biela e Casquilho



Fonte: Mahle (2016)

2.3.4 Sistema de Lubrificação

Segundo Varella & Santos (2010) existem quatro principais sistemas em um motor: sistema de alimentação, injeção, arrefecimento e lubrificação. O sistema de alimentação tem como responsabilidade alimentar o motor com ar e combustível. O sistema de arrefecimento controla as temperaturas do motor retirando o excesso de calor para garantir a integridade do mesmo e o sistema de injeção é o sistema que faz o controle através de sensores as variáveis do sistema de alimentação.

O sistema de lubrificação distribui óleo entre as partes do motor para que a lubrificação seja realizada. O óleo lubrificante no motor a diesel fica armazenado no cárter do motor e a circulação do mesmo pode ser por salpico ou por pressão.

No sistema por salpico a bomba de óleo o bombeia através de uma galeria principal sob pressão, o mesmo é então direcionado para a árvore de manivelas, eixo de cames e eixo balancins e para as calhas de salpico. A lubrificação dos pistões, pinos e bielas bem como da parte de cima dos cilindros é realizada pela pulverização do óleo que escapa dos eixos.

O sistema de lubrificação sob pressão possui: reservatório de óleo, bomba de óleo, galerias, filtro de óleo, válvula de alívio, manômetro e radiador de óleo. Nesse sistema, o óleo é pressurizado a uma pressão que normalmente varia entre 15 a 40 psi, mas que em alguns casos pode chegar a 65 psi.

Esse óleo pressurizado passa através dos mancais do eixo da árvore de manivelas, dos cames, balancins. Os pinos dos pistões são lubrificados por galerias existentes nas bielas, a parte superior dos cilindros, bem como a parte superior dos pistões é lubrificada por óleo proveniente de furos existentes nas conexões das bielas com os pinos dos pistões e a parte inferior das paredes dos cilindros e dos pistões é lubrificada pelo óleo pulverizado proveniente de orifícios situados na conexão das árvores de manivelas com as bielas.

2.3.5 Motor Diesel JOHN DEERE – Especificações e Manutenção

O motor da colhedora de cana de açúcar John Deere 3522 2L tem as especificações tais como seguem na Tabela 1. O custo desse componente é em média 140 mil reais.

Tabela 1– Especificações do motor da colhedora John Deere 3522 2L

Motor / Fabricante.....	John Deere
Tipo.....	6090H
Saída.....	Com turbocompressor e intercooler ar-ar
Nº de cilindros.....	6
Cilindrada.....	9 L
Potência na rotação nominal.....	251 kW (342 cv)
Rotação Nominal do Motor.....	2100 rpm
Reserva de torque.....	30%
Torque máximo.....	1400 N-m (314.7 lb.-ft.) ± 5%
Rotação de torque máximo.....	1600 rpm
Tipo de bomba de injeção.....	Trilho comum de alta pressão
Fabricante / Modelo.....	Denso / HPCR 4
Motor de partida / Fabricante.....	Denso
Ventilador de arrefecimento do motor	
Sentido de rotação.....	Reversível
Atuação.....	Alimentado pelo motor hidráulico

Fonte: John Deere (2017)

Segundo a norma NBR 5462-1994 manutenção é a totalidade das ações técnicas e administrativas que tem como objetivo manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar as funções requeridas.

Para a manutenção do motor John Deere 91 segundo manual do equipamento as seguintes tarefas devem ser realizadas:

- Primeiras 100 horas: Troca de óleo do motor e filtros (óleo, combustível – pré-filtro, primário e final)
- 250 horas: Troca de óleo do motor e filtros (óleo, combustível – pré-filtro, primário e final)
- 500 horas: Substituição do filtro primário do motor, drenagem do tanque de combustível e limpeza do filtro de malhas e do filtro de sucção, teste de pressão do sistema de arrefecimento do motor
- 1500 horas: Substituição do filtro secundário do motor
- 2000 horas: Ajuste de válvula do motor
- 3000 horas: Troca do líquido de arrefecimento do motor e substituição dos termostatos
- 4500 horas:
- Substituição do amortecedor do virabrequim do motor

Além disso, para um diagnóstico mais assertivo para falhas do motor, devem ser utilizadas duas ferramentas adicionais: teste de *Blowby* e *Service Advisor*. O *Service Advisor* se trata de um software de telemetria capaz de resgatar os códigos de falhas do equipamento e realizar diversos testes de diagnóstico. O teste de *blow-by* é o teste de pressão do cárter. Esse teste deve ser realizado para averiguar a integridade do motor em relação a trincas. O procedimento para realização do teste de blowby está indicado na Tabela 2 e na Figura 12.

Tabela 2– Procedimento do Teste de *Blow-By*

1. Funcione o motor e acione:	RPM máxima do extrator primário Hélice do extrator secundário Funções de colheita Correntes do elevador Corte de pontas
2. Acelere o motor em 2200 RPM até atingir temperatura de trabalho (80-83°C).	
3. Desligue todas as funções.	
4. Deixe o motor em marcha - lenta por aprox. 2 minutos.	
5. Desligue o motor.	
6. Bloquei as funções de colheita	
7. Remova o filtro de ar primário.	
8. Instale a Régua de coluna d'água - Figura 12	

Fonte: Autoria Própria (2017)

Figura 12– Teste de *Blow-By*

Fonte: John Deere (2017)

Para que o resultado de satisfatório a leitura máxima aceitável é de 50,4 mm, para valores acima o motor está com vazamento de compressão para o cárter e é necessário retirar o cabeçote e verificar se há trinca ou furos em um ou mais dos pistões.

2.4 LUBRIFICAÇÃO

Definida como o fenômeno da redução de atrito entre duas superfícies em movimento relativo pela introdução de uma substância entre as partes a função básica da lubrificação é fazer com que o movimento ocorra com o mínimo de aquecimento, ruído e desgaste. O lubrificante pode ser sólido (ex. grafita), ou fluido e a película do mesmo deve ser maior que a soma da altura das rugosidades das partes. (CARRETEIRO; MOURA, 1998). Em motores de combustão interna a diesel a lubrificação é realizada por óleo lubrificante, deste modo o capítulo será focado nessa categoria.

2.4.1 Funções da Lubrificação em Motores Diesel

Segundo Kimura (2010) a lubrificação depende de diversos fatores como: geometria, rugosidade, carga, pressão, temperatura, velocidade de rolamento e escorregamento, condições ambientais, propriedades físicas e químicas do lubrificante e composição do material. Deste modo, a lubrificação pode ser realizada de diferentes formas e suas funções

em um motor são: reduzir atrito, refrigerar, limpar, proteger contra corrosão e vedar a câmara de combustão.

A redução de atrito é importante, pois reduz o desgaste reduzindo consequentemente quebras de componentes, ela se dá devido a película fina de óleo que impede o contato direto das partes que se movimentam relativamente. Essa película também é um meio de transporte de calor e partículas provenientes da combustão. O calor é transferido das peças para o óleo através da convecção, o óleo é então transportado para o sistema de arrefecimento onde o calor é dissipado, além de transportar as partículas até o filtro de óleo onde a mesma é retida evitando incrustações no cárter.

Devido corrosão de materiais os componentes podem perder partículas de metais que podem provocar desgastes abrasivos, deste modo é importante que os óleos lubrificantes possuam aditivos anti-desgaste e anticorrosivos. É também função do lubrificante realizar a vedação da câmara de combustão (KIMURA, 2010).

2.4.2 Tipos de Óleo Lubrificante

Existem quatro tipos de lubrificantes na categoria de óleos: óleo mineral, óleo graxo (orgânico), óleo composto e óleo sintético (CARRETEIRO, 1998).

- Óleos Minerais: são obtidos pelo refino do petróleo e podem ser compostos da série parafínica (alcanos) ou da série naftênica (cicloparafinas).
- Óleos Graxos: são compostos orgânicos podendo ser vegetais ou animais, foi o primeiro tipo de lubrificante utilizado pelo homem, no entanto atualmente está em desuso devido ao fato de se tornarem ácidos ou corrosivos pelo uso.
- Óleos Compostos: mistura entre óleos minerais e óleos orgânicos (até 30%) com o objetivo de conferir maior oleosidade ou facilidade de emulsão.
- Óleos Sintéticos: obtidos por síntese química, são desenvolvidos para suportar condições adversas são subclassificações em cinco categorias: ésteres de ácidos dibásicos, ésteres de organofosfatos, ésteres de silicatos, silicones compostos de ésteres de poliglicol.

2.4.3 Análise de Óleo

Para atestar a qualidade e a uniformidade de óleos lubrificantes existem algumas características físicas e químicas de suma importância, dentre estas estão: viscosidade, ponto de fulgor, TBN e teste de chapa quente, sendo a importância de cada uma tal qual segue:

- Viscosidade: é a propriedade mais importante dos óleos lubrificantes, sendo viscosidade definido como a resistência ao escoamento apresentada pelos fluidos. A viscosidade adequada a aplicação é de suma importância para garantir a lubrificação.
- TBN: número de base total determina a alcalinidade do lubrificante, deve ser utilizado como indicador da presença de desgaste corrosivo. (LAGO, 2007)
- Ponto de fulgor de um óleo é a menor temperatura na qual o vapor desprendido pelo mesmo na presença do ar inflama, o conhecimento dessa propriedade mostra as temperaturas de trabalho na qual o óleo pode trabalhar (CARRETEIRO, 1998).
- Chapa Quente: o ensaio de crepitação em chapa aquecida é utilizado para verificar a presença de água nas amostras de óleo.

As análises de óleo também são utilizadas como uma ferramenta para a realização de manutenções preventivas. Através da mesma é possível verificar a concentração de elementos como: cálcio, ferro, cobre chumbo, alumínio, sílica, molibdênio e porcentagem de fuligem. Dentre esses, elevada concentração de ferro, alumínio, cobre estanho, cromo e zinco são relacionados a desgastes de componentes, enquanto, boro, molibdênio, cálcio, fósforo fazem parte da composição dos aditivos, deste modo, a partir desses resultados é possível intervir antes que o equipamento venha a falhar (FERNANDES, 2012).

2.5 ANÁLISE DE FALHA

Segundo Xenus (2004), as atividades de manutenção devem ser mais abrangentes do que as necessárias apenas para manter as condições de operação, para que ocorra uma gestão eficiente da manutenção é necessário que sejam colocadas em prática algumas funções de apoio dentre as quais está o tratamento de falha dos equipamentos.

Segundo a norma NBR 5460 -1994 falha pode ser definida como o término da capacidade de um item em desempenhar a função requerida levando a diminuição total ou parcial da capacidade de uma peça, máquina ou componente de exercer sua função levando o

item a um estado de indisponibilidade, ou seja, falha são todos os eventos que implicam na parada do equipamento.

Após a detecção da falha, medidas corretivas devem ser tomadas a fim de remover o sintoma, no entanto, removendo apenas o sintoma não se trata a causa raiz da ocorrência, uma vez não tratada a causa raiz a falha volta a ocorrer e se inicia um ciclo vicioso.

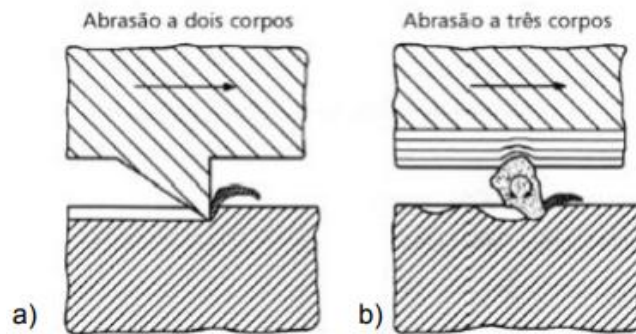
Deste este modo, após remover os sintomas das falhas a mesma deve ser registrada analisada e contramedidas para a recorrência da mesma devem ser tomadas para bloquear que a causa raiz da falha implique em outras falhas, para isso são utilizados conhecimentos de análise da falha mecânica e ferramentas da qualidade.

2.5.1 Desgastes

Desgaste pode ser definido como a perda progressiva de material, e existem quatro principais tipos de desgaste: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fadiga e desgaste corrosivo, enquanto oxidação, erosão, erosão por cavitação e impacto, que muitas se tratam de mecanismos marginais que na realidade não são mecanismos de desgaste (RABINOWICZ, 1995).

- Desgaste adesivo: ocorre devido ao fato das superfícies em contato não serem lisas (microscopicamente), nesses pontos existe pressão concentrada e aquecimento devido ao atrito o que torna favorável à micro soldagem. Quando aplicada força de cisalhamento nessa região soldada ocorre a transferência de material de uma superfície a outra.
- Desgaste abrasivo: acontece quando partículas de um material é pressionado contra um objeto de menor dureza. Pode ser de dois corpos quando existe envolve apenas duas superfícies em contato e movimento relativo se atritam uma em relação a outra como indicado na figura 13(a) ou de três corpos, quando envolve partículas lisas se movimentado entre dois corpos como na figura 13(b).

Figura 13: Desgaste Abrasivo



Fonte: Egito (2017)

- Desgaste corrosivo: é a degradação de matérias devido a interação do mesmo com o ambiente.

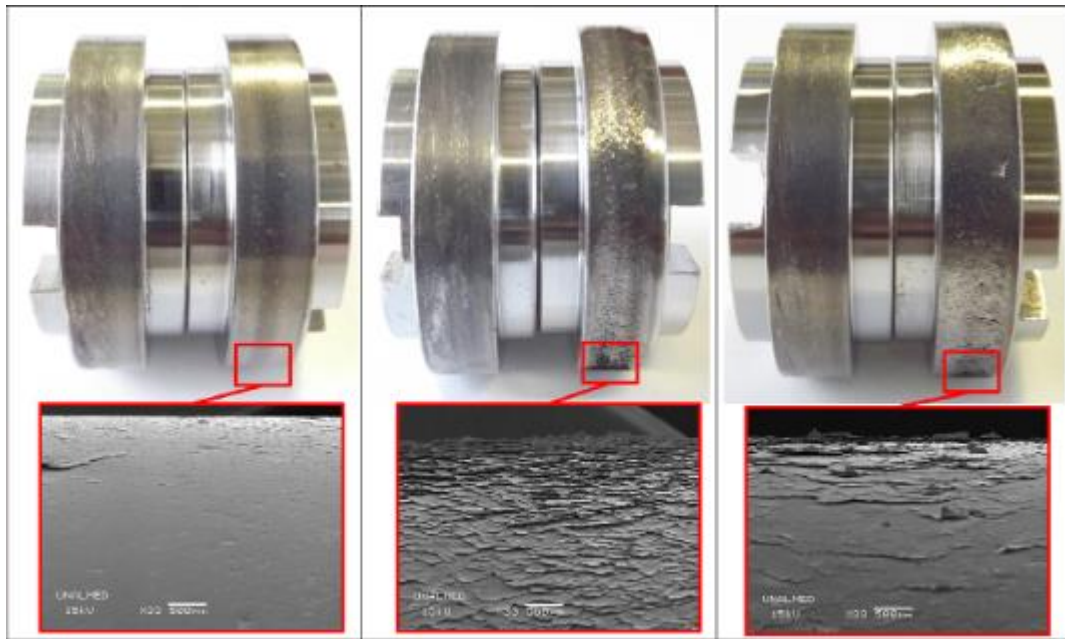
Figura 14– Desgaste Corrosivo



Fonte: Piovesana e Ferreira (2016)

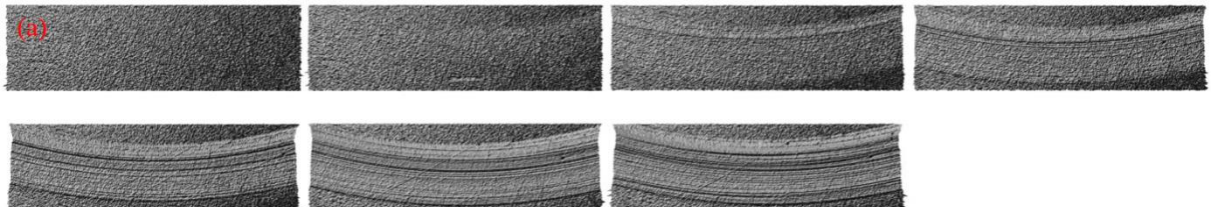
- Desgaste por fadiga: é o desgaste gerado após a aplicação de tensões cíclicas. Podendo ser proveniente de condições desgaste por rolamento ou deslizamento. O desgaste por rolamento a carga está na direção perpendicular à superfície causando flexão, as trincas se iniciam na subsuperfície e crescem fazendo com que ocorra desprendimento de grandes pedaços de material (lascamento) como na Figura 15. Já no desgaste por deslizamento a carga está na direção do deslizamento ocasionando perda de material superficial como segue na Figura 16.

Figura 15: Desgaste por rolamento



Fonte:Maya-Johnson, et al (2017)

Figura 16: Desgaste por deslizamento



Fonte:Hu (2017)

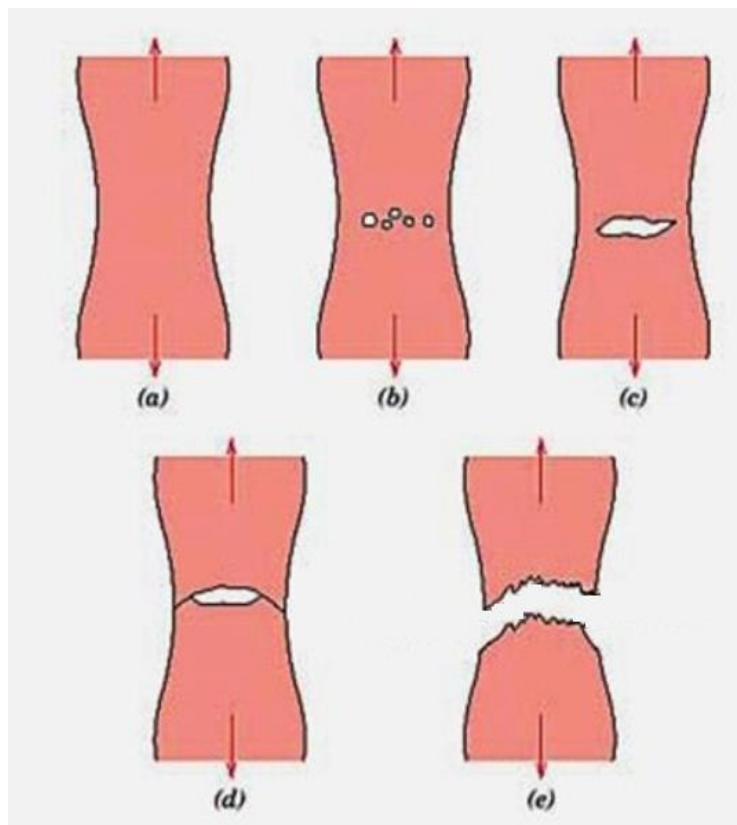
2.5.2 Fraturas

Fratura é a separação de um corpo em duas ou mais partes em função de um esforço mecânico imposto. Segundo Dieter (1981), para que se faça um bom projeto é necessário ter-se conhecimento dos tipos mais comuns de falhas que podem ocorrer e suas relações com as cargas, dimensões e parâmetros do material do componente.

Os dois tipos principais de fratura que podem ocorrer em metais são a fratura dúctil e a frágil. O que diferencia as duas é a capacidade do material suportar deformações plásticas (Callister, 1981). Existe ainda um terceiro tipo de fratura, a fadiga, que ocorre quando o material é submetido à tensões cíclicas. Independentemente do tipo, o processo de fratura está sempre associado a duas etapas: formação e propagação da trinca.

- **Fratura Dúctil:** a principal característica desse tipo de fratura é a grande quantidade de deformação plástica que há nas vizinhanças da trinca antes de ocorrer a ruptura. É um processo relativamente lento em função da propagação estável da trinca. A fratura dúctil costuma ocorrer em etapas, como se pode observar na Figura 14, primeiramente há um empescoçamento do material (Figura 14a), que é a redução da espessura na direção transversal à aplicação da carga, em seguida começam a surgir pequenos vazios no interior do material (Figura 14b), esses vazios coalescem dando início à trinca (Figura 14c), que aumenta e se propaga (Figura 14d) havendo, finalmente a fratura final (Figura 14e). Em função dessa deformação e lenta propagação de trinca, a superfície de fratura costuma ser rugosa e opaca.

Figura 17: Etapas da Fratura Dúctil



Fonte: Callister, (2008)

- **Fratura Frágil:** Ao contrário da anterior, a fratura frágil praticamente não apresenta deformação antes da ruptura, ocorrendo de forma repentina e abrupta. A superfície de fratura praticamente não possui sinal de deformação plástica,

sendo brilhante e com poucas rugosidades, como pode ser observado na Figura 15.

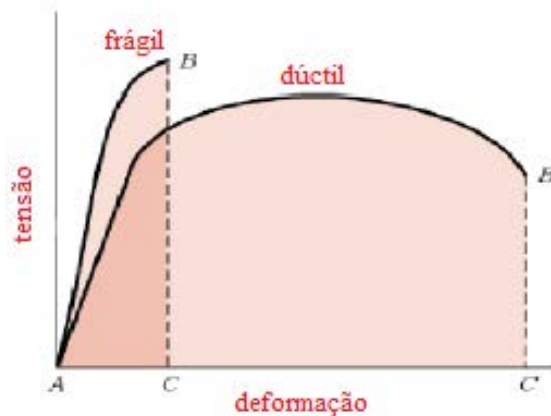
Figura 18: Superfície Fratura Frágil



Fonte: Callister, (2008)

A fratura dúctil é quase sempre preferida em relação a frágil, pois, com a deformação plástica do material, existe um aviso de que este irá se romper, havendo tempo de tomar alguma providência, enquanto a frágil ocorre sem nenhum aviso. Além disso, também em função da deformação plástica, é necessária uma maior quantidade de energia para que a fratura ocorra. Isso pode ser observado na Figura 15, que representa a curva de tensão deformação de um material frágil e um material dúctil, onde a área abaixo da curva representa a energia absorvida até a fratura.

Figura 19: Curva Tensão Deformação para Materiais Frágeis e Dúcteis



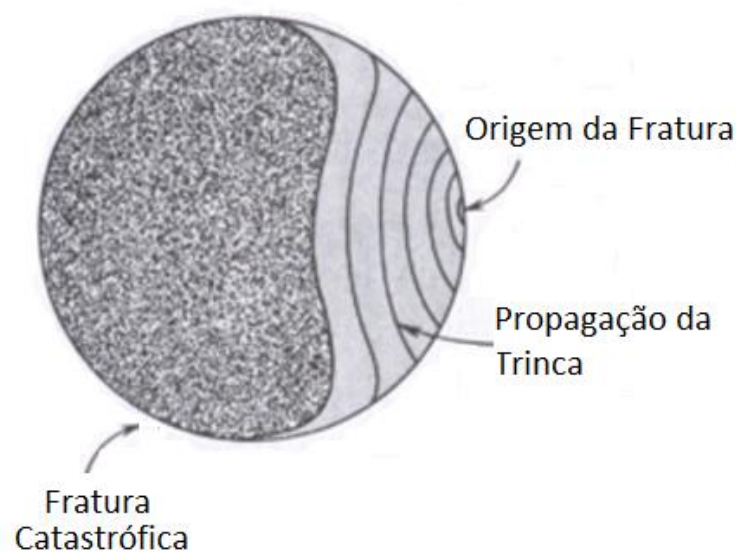
Fonte: Callister, (2008)

- **Fadiga:** É o tipo de fratura que ocorre em estruturas sujeitas a tensões dinâmicas. Segundo Dieter (1981), um metal submetido a uma tensão cíclica romperá a uma tensão inferior àquela necessária para provocar uma fratura por carga estática.

A fadiga é um dos principais temas abordados na mecânica da fratura por ser o fenômeno que mais provoca falhas em componentes de engenharia. Isso ocorre principalmente, pois a fadiga é um fenômeno que acontece sem nenhum sinal óbvio e por ser muitas vezes difícil de ser previsto, podendo ser originado por uma simples vibração no componente ou até por uma corrente de ar passando pela estrutura, por exemplo.

O fenômeno ocorre em três etapas, sendo a primeira e geralmente mais demorada a nucleação da trinca, que se dá normalmente na superfície do material em algum concentrador de tensão como um pite, um risco, um ponto de solda etc. A partir da nucleação da trinca, começa a haver um aumento da falha a cada ciclo de carga aplicado, essa etapa é conhecida como propagação da trinca. A terceira e última etapa é a ruptura final do material, que ocorre quando a trinca já se propagou o suficiente para que a seção útil restante do material não seja suficiente para suportar mais um ciclo. Na figura 16, está representado o esquema de uma superfície de fratura por fadiga, onde podem ser observadas as três etapas do fenômeno.

Figura 20 - Superfície de Fratura por Fadiga



Fonte: Piovesana, e Ferreira (2016)

2.6 FERRAMENTAS DA QUALIDADE

2.6.1 Ishikawa

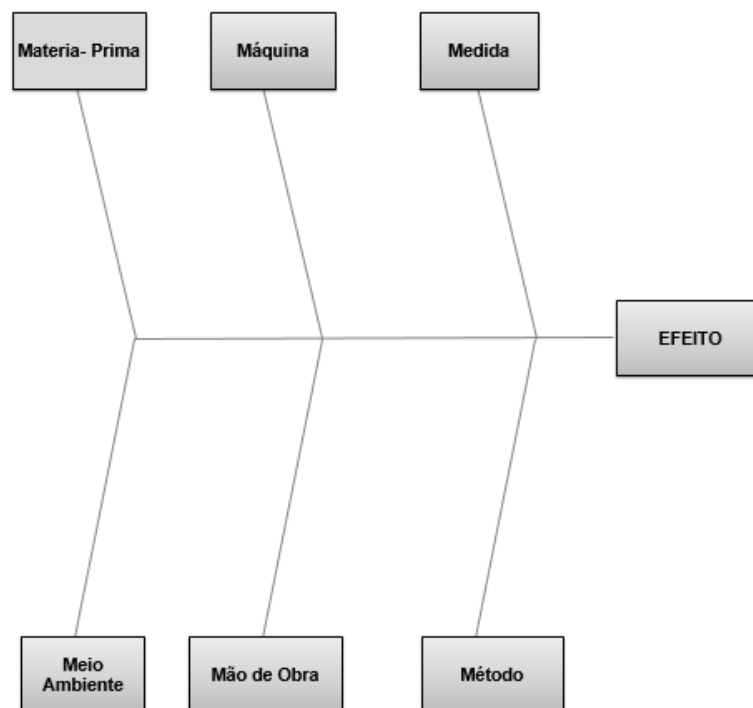
Segundo Campos (1992) o controle do processo é a essência do gerenciamento em todos os níveis hierárquicos da empresa. Uma empresa é caracterizada por um processo que é subdividido em diversos processos.

Segundo Werkema (1995 apud MARIANI, 2015), um processo é uma combinação de vários elementos como equipamentos, insumos, métodos ou procedimentos, condições ambientais, pessoas, informações do processo ou medidas, que tem como objetivo a fabricar um bem ou o fornecer de um serviço.

Para que haja entendimento do controle do processo é necessário que haja compreensão da relação entre causa e efeito. O efeito é todo resultado final (acontecimento) e a causa são os meios que influenciaram no resultado final.

É muito comum que exista confusão entre os dois e para que isso não ocorra foi criado o “diagrama de causa e efeito” ou “diagrama de espinha de peixe” ou ainda “diagrama de Ishikawa”.

Figura 21:Diagrama de Ishikawa



Fonte: Campos (1992)

Esse diagrama é dividido em famílias e tem a função de agrupar e explorar as possíveis causas que deram origem a um efeito específica. As famílias de agrupamento são: matéria prima, máquina, medida, meio ambiente, mão de obra e método.

2.6.2 Árvore de Falhas

Enquanto o método de Ishikawa fornece uma visão global na avaliação de falhas, a chamada árvore de falhas, ou FTA (sigla em inglês para *FaultTreeAnalysis*), é utilizada para uma visão mais detalhada do ocorrido. O método foi desenvolvido pela *Bell Laboratories*, em 1962 e aprimorada em seguida pela Boeing. Atualmente é uma análise bastante difundida entre as companhias, sendo inclusive requisito em algumas áreas para certificação de produtos.

Conforme descrito por Ericson (1999), a FTA é uma ferramenta para analisar, esquematizar e estimar a trajetória de uma falha dentro de um sistema. Basicamente, o método traduz o comportamento de sistemas complexos através de regras e símbolos simples, gerando um diagrama visual e um modelo lógico, que permite avaliar a confiabilidade do sistema e estabelecer relações de causa e efeito dentro dele.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 INFORMAÇÕES PRELIMINARES

Este estudo de caso é decorrente de uma falha em um motor a diesel de uma colhedora de cana John Deere 3522 2L de uma usina produtora de etanol, açúcar e bioenergia localizada na região de Piracicaba. Essa usina faz parte de uma das empresas do setor energético mais competitivas do mundo e possui diversas unidades espalhadas pelo Brasil. Todas as informações utilizadas nesse estudo foram coletadas durante o estudo de caso realizado na empresa.

3.2 ETAPAS DA ELABORAÇÃO DE UM RELATÓRIO DE ANÁLISE DE FALHAS

As etapas do estudo para identificação da falha e elaboração de plano de ação estão explicadas abaixo e fazem parte do procedimento adotado pela empresa na qual o estudo foi realizado.

1) Informações básicas da falha:

A primeira etapa deve ser realizada em campo através de entrevista com os principais envolvidos e presentes no momento da falha. Se possível, realizar essa etapa imediatamente após a ocorrência da falha.

- O que aconteceu: Identificar o componente que ocasionou a parada da máquina e qual foi a falha.
- Como aconteceu: identificar se o equipamento apresentava sinais de que viria a falhar e se houve operação incorreta que favoreceu a falha.
- Onde e Quando aconteceu: identificar local e hora da falha e possíveis fatores ambientais que podem ter influenciado na mesma.
- Códigos de Falha Ativos: realizar download de códigos de falha ativos nos equipamentos, os códigos de falha indicam anomalias no sistema durante a operação.

As etapas dois, três e quatro são etapas de levantamento de informações que geralmente estão armazenadas no sistema de controle de manutenção, abastecimento e lubrificação.

2) Informações do Equipamento:

- Horas/Km trabalhados: é importante saber o horímetro ou quilometragem do equipamento e do componente que veio a falhar para identificar se a falha foi prematura ou se o mesmo já havia passado da sua vida útil.
- Modelo: identificar o modelo e possível histórico da falha para que seja possível apurar possíveis falhas de projeto que afetam toda a frota e que requer acionamento do fabricante.
- Função: identificar a função do equipamento para verificar a severidade e a importância da operação para o processo produtivo ao qual pertence.

3) Histórico de Análise de lubrificante:

- Alterações na análise de lubrificantes: pode indicar desgaste de componentes ou contaminações externas que podem ter contribuído ou ocasionado a falha.

4) Histórico de Manutenção:

- Última manutenção preventiva: verificar se existe pendência de realização dos planos de manutenções preventivos, ou mesmo se as manutenções foram integralmente cumpridas. Verificar materiais aplicados, caso necessário verificar a procedência dos materiais (genuínos, originais, paralelos).
- Histórico de manutenções corretivas (quantidade de intervenções e horas aplicadas nas intervenções): verificar se o sistema do componente que falhou sofreu intervenções corretivas antes da falha. Verificar materiais aplicados, caso necessário verificar a procedência dos materiais (genuínos, originais, paralelos).

5) Análise dos componentes que falharam:

- Acompanhar desmontagem: Se possível/necessário acompanhar a desmontagem do componente que falhou, para verificar o estado interno do mesmo
- Análise de Falha: realizar análise de falha nos componentes que falharam, identificando fratura e desgastes apresentados pelos componentes.

6) Análise de custo da falha:

- Custo de reparo: deve ser levantado custo de reparo com base no preço médio dos componentes
- Lucro cessante: para equipamentos classe A, como no caso da colhedora o lucro cessante deve ser calculado com base no preço médio de ATR (açúcar total retornável – variável pela qual se mede o valor da cana de açúcar) e na quantidade de cana colhida por hora.

7) *Brainstorm* – Ishikawa:

- Levantar possíveis motivos para a falha: Analisar as informações reunidas e indicar possíveis causas para a ocorrência.

8) Árvore de Falhas

9) Sequência lógica dos fatos

- Estabelecer qual foi a sequência lógica que levou a ocorrência da falha

10) Plano de Ação

- Elaborar ações que venham a bloquear as causas raiz.

4 RESULTADOS

4.1 INFORMAÇÕES BÁSICAS DA FALHA

4.1.1 O que, quando e onde

Durante a operação de corte de cana mecanizado em uma fazenda situada no interior do estado de São Paulo, nas últimas horas de operação do terceiro turno, as seis horas e quarenta minutos da manhã, o motor de uma colhedora de cana de açúcar veio a falhar.

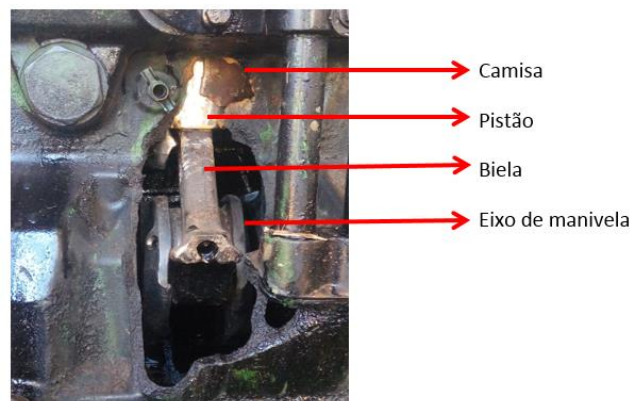
Segundo relatos do operador, o equipamento operou durante o turno sem demonstrar quaisquer anomalias ou indícios de que viria a falhar. No momento da falha o operador relata que escutou um grande estrondo vindo do motor, após o qual parou de operar imediatamente. Quando o motor foi retirado do equipamento, o mesmo se encontrava como exibido pelas Figuras 21 e 23.

Figura 22– Motor após falha



Fonte: Autoria Própria (2017)

Figura 23– Motor após falha (2)



Fonte: Autoria própria (2017)

A falha ocorrida no motor fez com que ocorresse quebra do bloco, biela, expondo eixo de manivela, pistão e partes da camisa. Deste modo, para que o equipamento pudesse continuar a operar o motor foi imediatamente substituído. O *download* dos códigos de falha do equipamento foi feito junto a substituição do motor, Tabela 3.

Como mostra a tabela o equipamento emitiu 398 ocorrências de códigos de falha desde o início da safra até o momento da falha, indicando anomalia no equipamento.

Tabela 3– Descrição e quantidade de ocorrências desde o início da safra

Nome	Nº de Ocorrências
Voltagem da bateria abaixo do limite inferior.	5
SPN 522363 - FMI 2	5
Falha na linha de entrada da direção do sensor que mede a velocidade rotacional do motor direito.	3
Movimento no volante detectado com o veículo em estacionamento.	18
Sinal do Acelerador Analógico Primário Fora da Faixa Baixa	68
Acelerador Analógico Primário Inibido	66
Sinal de Água no Combustível Fora da Faixa Alta	4
Sinal de Água no Combustível Fora da Faixa Baixa	45
Sinal de Temperatura do Ar do Coletor Extremamente Alta	1
Sinal de Temperatura do Ar do Coletor Ligeiramente Alta	4
Sinal de Temperatura do Ar do Coletor Moderadamente Alta	2
Nível do Líquido de Arrefecimento Extremamente Baixo	12
Pressão do Trilho de Combustível não Desenvolvida	2
Interruptor de Desligamento Externo Ativado	6
Incompatibilidade entre a Pressão Real do Trilho de Combustível e a Desejada	37
Temperatura do reservatório hidráulico	15
Motor em Condição de Redução de Potência	2
Nível baixo de óleo hidráulico	23
Nível baixo de óleo hidráulico -corte de base desativado	17
Tensão de Alimentação do Sensor 3 Fora da Faixa Baixa	35
Pressão do Motor do Corte de Base	28
Total de Ocorrência	398

Fonte: Autoria Própria (2017)

4.2 INFORMAÇÕES DO EQUIPAMENTO

A colhedora de cana em questão é uma colhedora John Deere 2235 2L que opera na colheita de cana mecanizada, já tendo sido transferida duas vezes entre unidades e atualmente se encontra em uma unidade situada na região de Piracicaba.

Esse equipamento iniciou a safra no dia 09/04/2017, onze dias antes da falha, com 16.828 horas de trabalho. Nesses onze dias o equipamento operou 144 horas, em média 13,09 horas por dia. O motor que veio a falhar, no entanto, possuía apenas 5.471 horas de trabalho (sendo que a vida útil esperada do componente é por volta de 12000 horas) quando falhou, e não existe elevada recorrência desse tipo de falhas nesse modelo de motor.

4.3 HISTÓRICO DE ANÁLISE DE LUBRIFICANTE

O lubrificante utilizado no motor é o SAE 15W40 da Mobil e possui as seguintes especificações evidenciadas na Tabela 4.

Tabela 4– Especificações lubrificante SAE 15W40

Properties		Method	Shell Rimula RT4 L 15W-40 (CJ-4)
Categoria de Viscosidade			15W-40
Viscosidade Cinemática	@40°C mm²/s	ASTM D445	118
Viscosidade Cinemática	@100°C mm²/s	ASTM D445	15,5
Índice de Viscosidade		ASTM D2270	139
Densidade	@15°C kg/l	ASTM D4052	0,883
Cinzas Sulfatadas	%	ASTM D874	1,0 max
Número Básico Total (TBN)	mg KOH/g	ASTM D2896	10,6
Ponto de Fulgor (COC)	°C	ASTM D92	227
Ponto de Fluidez	°C	ASTM D97	-33

Fonte: Shell (2017)

As especificações limites para a análise de óleo do mesmo em ppm são as mostradas na Tabela 5.

Tabela 5– Especificações limite para análise de óleo

SAE 15W40		
Categoria	Mínimo	Máximo
Ca	0,00	4000,00
Cu	0,00	50,00
Fe	0,00	120,00
Cr	0,00	10,00
Pb	0,00	50,00
Ni	0,00	10,00
Al	0,00	30,00
Si	0,00	30,00
Sn	0,00	10,00
Mo	0,00	85,00
Visc 40	98,60	133,40
Chapa	0,00	0,00
% Fuligem	0,00	2,50
TBN	6,18	18,56

Fonte: Autoria Própria (2017)

Foi levantado o histórico de coleta e análise de lubrificante do motor, realizados de acordo com a norma reguladora ABNT NBR 14066, Tabela 6.

Tabela 6– Histórico de coleta e análise de lubrificante no motor

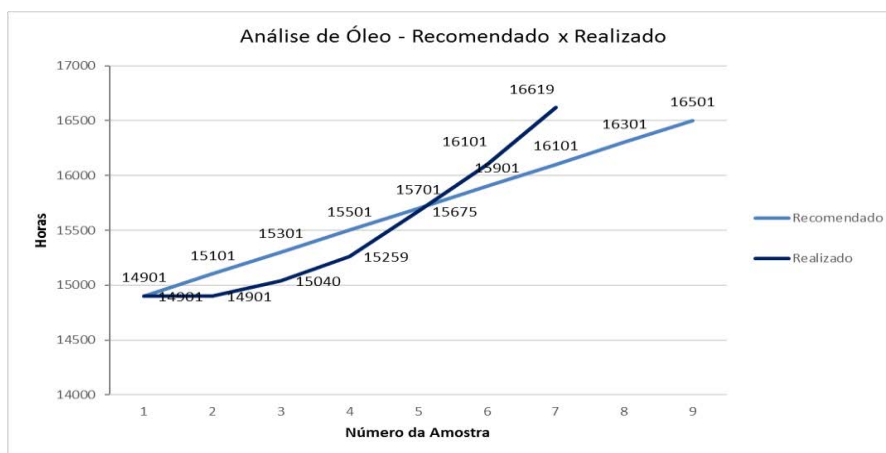
Data	30/05/2016	08/06/2016	01/07/2016	01/08/2016	30/08/2016	30/09/2016	27/11/2016
Tipo (A/T)	T	T	A	T	T	A	A
Hora	14.901,00	14.901,00	15.040,00	15.259,00	15675	16.101,00	16.619,00
Ca	1.566,00	1.359,00	1.385,00	1.236,00	1418	1.047,00	1.462,00
Fe	72	71	30	57	76	68	179,000*
Cu	9	11	4	8	5	6	15
Pb	1	4	4	0	11	5	110,000*
Al	2	7	3	19	9	1	9
Si	33,000*	69,000*	6	27	25	21	17
Mo	29	38	19	43	79	75	75
Visc.40°C	106,9	107,6	99,000*	102,3	102,7	105,1	161,600*
Chapa Quente	0	0	0	0	0	0	0
Fulgor °C							218
% Fuligem	0,4	0,3	0,1	0,2	0,7	0,4	1,3
TBN	8,97	7,81	7,86	7,03	8,14	6,070*	8,3

Fonte: Autoria Própria (2017)

Observando a Tabela 6 é possível observar que não existe análise da safra atual, isso se deve ao fato do equipamento até o momento da falha ter trabalhado apenas 144 horas. No entanto, observando as análises realizadas na safra passada (Tabela 6) é possível identificar falta de periodicidade tanto de troca, como de análise de lubrificante.

Segundos os planos de manutenção em vigência devem ser que se realizadas análises de óleo a cada 200 horas e as trocas a cada 400 horas, no entanto os intervalos entre as análises começam com 0 hora e o último intervalo é de 518 horas. O Gráfico 2 mostra o realizado versus o recomendado acerca das análises de óleo.

Gráfico 2– Análise de óleo recomendado e realizado



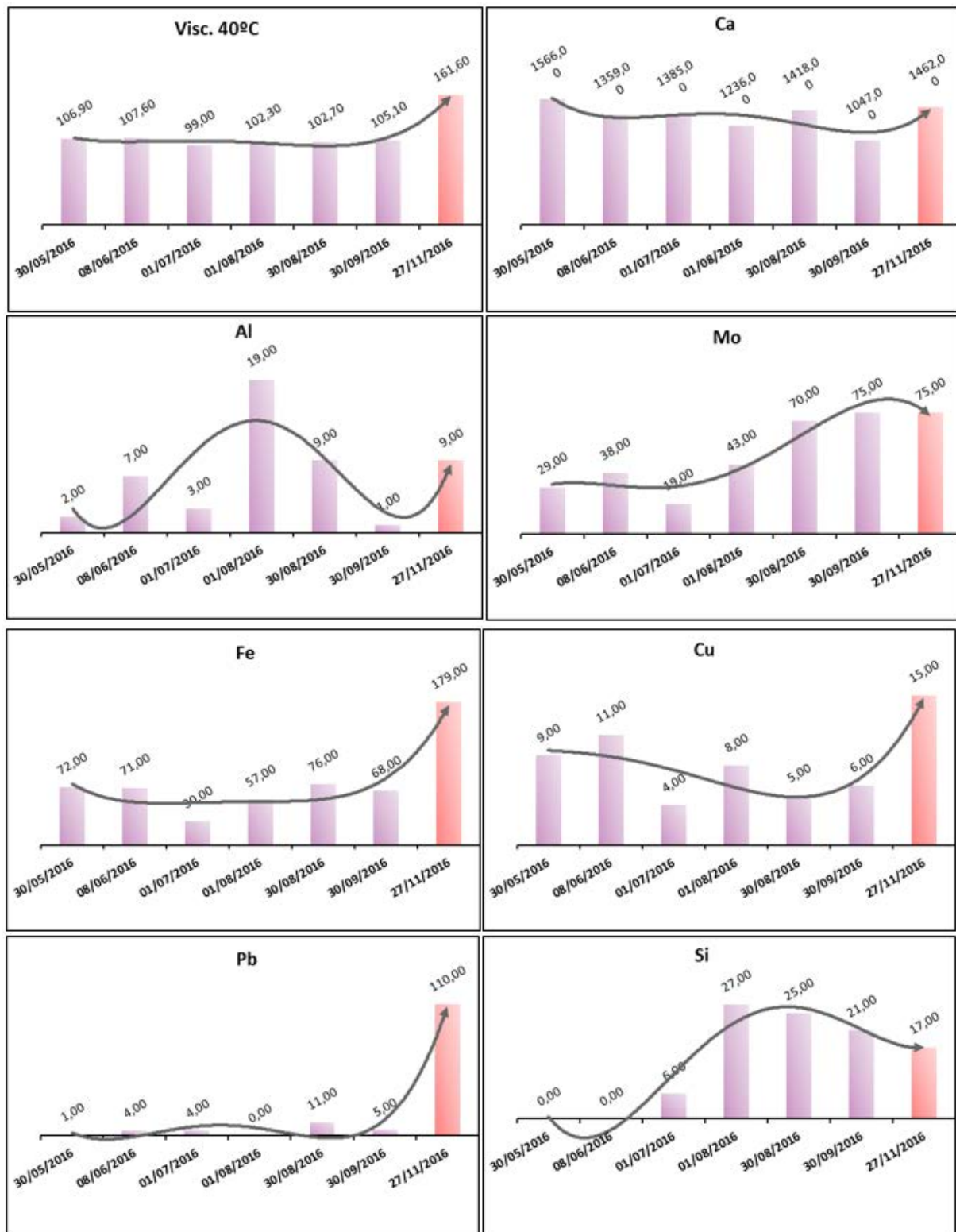
Fonte: Autoria Própria (2017)

O Gráfico mostra que se fosse seguida a periodicidade correta de trocas e análises deveriam ter sido realizadas cinco trocas e quatro análises durante a safra 2016'2017, quando na realidade foram realizadas quatro trocas e 3 análises tendo assim deixado de ser realizada uma troca e uma análise o que indica não conformidade nos processos de manutenção.

Os resultados das análises foram plotados em gráficos de tendência para melhor visualização da evolução da concentração dos contaminantes no óleo lubrificante, Gráfico 3a e 3b.

Os gráficos indicam que as concentrações dos contaminantes apresentaram forte elevação na amostra coletada no dia 27/11/2016 após a qual deveria ter havido uma intervenção para substituição dos componentes que sofreram desgaste, no entanto não existe registro ou evidencia da mesma.

Gráfico 3 – Concentração de contaminantes no óleo lubrificante em ppm.



Fonte: Autoria Própria (2017).

4.4 HISTÓRICO DE MANUTENÇÃO

4.4.1 Histórico de Manutenção Preventiva

A última manutenção preventiva realizada no equipamento foi a manutenção preventiva de entressafra (reforma do equipamento que ocorre entre dezembro e março) foram aplicadas cerca de 2.695 horas entre produtivas (efetivamente aplicada em serviços mecânicos) e improdutivas, sendo que 1.669,75 horas foram produtivas para um planejamento de 930 horas. Das horas efetivamente executadas, 113 foram apontadas em tarefas do sistema motor, aproximadamente 26 horas a menos do que o previsto para a realização das atividades daquele sistema, Tabela 7, o que pode indicar um desvio no processo.

Tabela 7– Horas apontadas por tarefa no sistema motor.

	Descrição		Tarefa		Descrição		Horas Previstas	Horas
MOTOR	Verificar / Testar	Verifique a existência de códigos ativos, funcionamento (ronco) do motor diesel	Alimentação				0,50	0,50
	Verificar / Testar	Realizar inspeção no motor: verificar sinais de vazamento de óleo, combustí	Bloco e cabeçote				0,01	1,67
	Verificar / Testar	Realizar teste de pressão de gases no cárter: BlowBy	Bloco e cabeçote				0,01	0,02
	Verificar / Testar	Realizar teste de compressão teórico via Service Advisor e verificar códigos	Subsistema Elétrico				0,30	0,33
	Fazendo Pedido de Peças	Verificar condições dos coxins do motor. Aproveitar peças se necessário	Subsistema de amortecimen				0,01	0,83
	Fazendo Pedido de Peças	Verificar junto ao PCM a necessidade de troca dos Dampers. Se necessário ap	Volante e acoplamentos				0,01	0,83
	Verificar / Testar	Verificar condição das polias, ruído nos acoplamentos, contaminação entre m	Volante e acoplamentos				0,50	0,50
	Fazendo Pedido de Peças	Realizar inspeção o sub sistema elétrico do motor. Aproveitar peças	Subsistema Elétrico				1,30	1,50
	Desmontar	Retirar componente do subsistema elétrico do motor se necessário	Subsistema Elétrico				10,00	3,83
	Montar	Instalar componente do subsistema elétrico do motor	Subsistema Elétrico				27,00	9,50
	Verificar / Testar	Verificar condições das tubulações, existência de pontos de contaminação do	Admissão				3,00	3,00
	Revisar	Realizar troca de componentes do motor diesel conforme necessário	Admissão				15,00	22,50
	Revisar	Realizar troca de filtros do motor diesel	Alimentação				1,00	5,50
	Trocar	Realizar troca de componentes filtro de combustível do motor	Alimentação				2,00	3,00
	Calibrar	Regular válvulas do cabeçote do motor	Bloco e cabeçote				6,00	10,50
	Verificar / Testar	Verificar condição do rotor e carcaça da bomba d'água do motor diesel	Bloco e cabeçote				3,00	3,50
	Revisar	Realizar troca de componentes do subsistema de arrefecimento do motor conf	Subsistema de amortecimen				12,50	15,00
	Desmontar	Verificar condições das tubulações, existência de trincos ou sinais de vaza	Subsistema de escape				6,00	11,50
	Revisar	Realizar troca de componentes do subsistema de escape do motor conforme ne	Subsistema de escape				2,00	3,00
	Revisar	Realizar troca de filtros e óleo lubrificante do motor	Subsistema lubrificação				0,70	1,00
	Verificar / Testar	Verificar existência de vazamentos, condição da vareta de óleo do motor	Subsistema lubrificação				0,30	1,00
	Revisar	Realizar troca de componentes do volante e acoplamentos do motor conforme	Volante e acoplamentos				48,00	17,00
	Total						139,14	116,01

Fonte: Autoria Própria (2017).

As durações mostradas pela Tabela 8 são provenientes de apontamentos realizados pelos mecânicos. Os mesmos ao realizar a tarefa devem anotar sua duração e abastecer o sistema.

Buscando os materiais aplicados no subsistema motor o único encontrado foi óleo lubrificante SAE 15W40, não foi aplicado filtro no motor. O custo total da manutenção de entressafra, considerando todos os materiais aplicados no equipamento foi de R\$ 42.111,71.

Analisando as horas aplicadas nas tarefas de manutenção de entressafra e os materiais aplicados na mesma é possível perceber diversas não conformidades. Foram gastas cinco horas e meia com troca de filtro do motor diesel, no entanto na lista de peças aplicadas não existe filtro, além disso foram gastas vinte e duas horas com trocas de componentes do motor

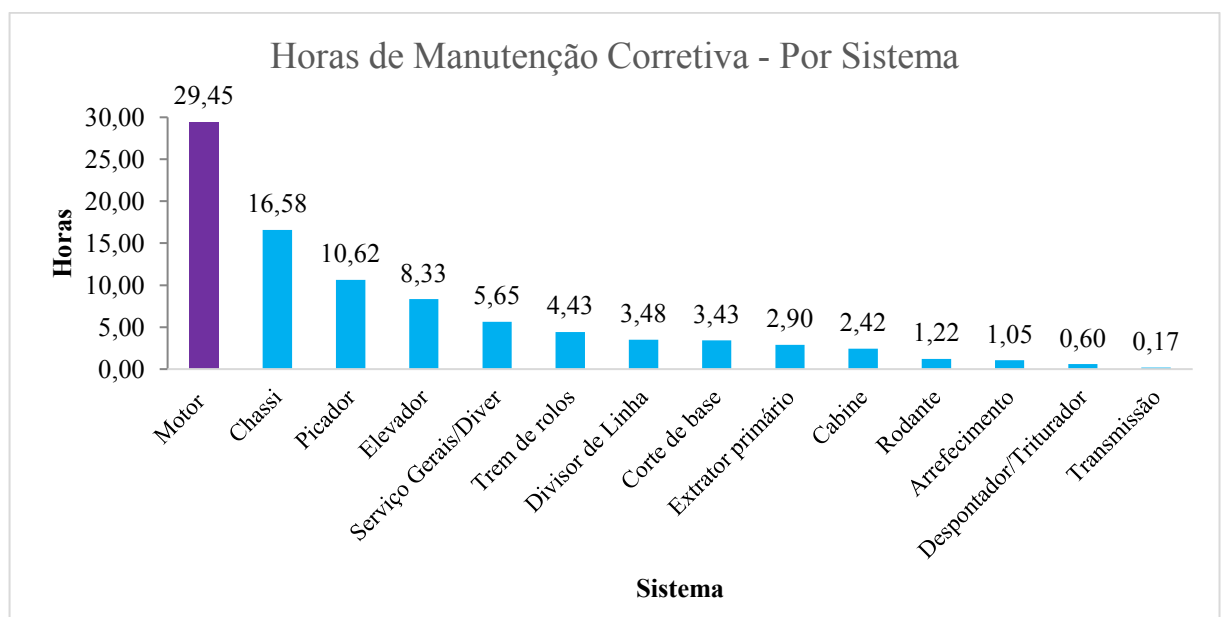
diesel sendo que também não existem nenhum componente aplicado a esse sistema na lista de peças.

Pelos apontamentos também pode-se concluir que o teste de blow-by não foi realizado uma vez que o tempo de apontamento da tarefa é extremamente baixo e ao requerer evidências da realização do mesmo, essas não existiam. Mesmo com a existência de óleo lubrificante, e deste ser o óleo adequado para o equipamento, a ocorrência da troca na entressafra pode ser questionada devido ao estado do mesmo ao desmontar o motor.

4.4.2 Histórico de Manutenção Corretiva

Foi levantado também o histórico de manutenção corretiva da safra incluindo o dia da quebra. No total, somam-se quarenta e duas intervenções cujas horas aplicadas são distribuídas por subsistema como mostra o Gráfico 4.

Gráfico 4- Horas de Manutenção Corretiva por sistema



Fonte: Autoria Própria (2017)

O tempo total de intervenções corretivas do Gráfico 4 é de 90,36 horas em 11 dias de safra, isso quer dizer que aproximadamente 34,09% do tempo de safra o mesmo passou em manutenção corretiva, mesmo após a manutenção preventiva de entressafra. Pode-se observar que, devido à falha, o subsistema com mais horas de intervenção é o do motor (29,45 horas). As intervenções realizadas em manutenções corretivas nesse sistema seguem na Tabela 9.

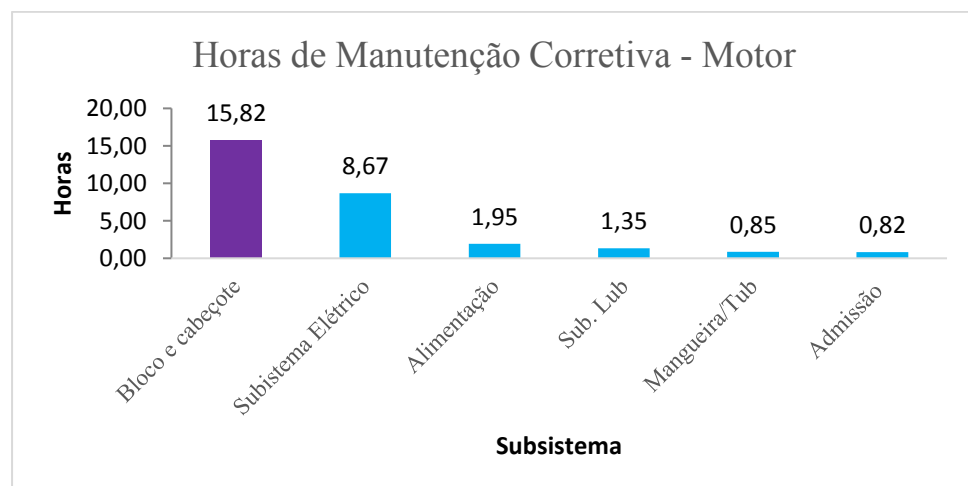
Tabela 8– Manutenções corretivas no motor

Classe de Manutenção	Motivos de Entrada	Operação	Sistema Veicular	Subsistema Veicular	Observações
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Verificar / Testar	Motor	Subsistema lubrificação	
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Revisar	Motor	Mangueira/Tubulações	
Abastecimento/Lubrificação	LUBRIFICAÇÃO	Verificar / Testar	Motor	Subsistema lubrificação	
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Verificar / Testar	Motor	Alimentação	
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Verificar / Testar	Motor	Alimentação	
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Abastecer	Motor	Alimentação	
Abastecimento/Lubrificação	LUBRIFICAÇÃO	Lavar / Limpar	Motor	Radiador de Água	
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Coletar	Motor	Subsistema lubrificação	Coleta não enviada para análise
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Coletar	Motor	Subsistema lubrificação	Coleta não enviada para análise
Abastecimento/Lubrificação	LUBRIFICAÇÃO	Verificar / Testar	Motor	Subsistema lubrificação	
Abastecimento/Lubrificação	LUBRIFICAÇÃO	Remontar	Motor	Subsistema lubrificação	
Preventiva Sistema	PREVENTIVA (MANFRO)	Verificar / Testar	Motor	Admissão	
Abastecimento/Lubrificação	ABASTECIMENTO	Remontar	Motor	Subsistema lubrificação	
Abastecimento/Lubrificação	ABASTECIMENTO	Verificar / Testar	Motor	Subsistema lubrificação	
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Revisar	Motor	Admissão	Baixa de aditivo para radiador
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Trocar	Motor	Bloco e cabeçote	O.S da Falha do motor
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Trocar	Motor	Bloco e cabeçote	
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Trocar	Motor	Bloco e cabeçote	
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Trocar	Motor	Bloco e cabeçote	
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Revisar	Motor	Subistema Elétrico	
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Revisar	Motor	Subistema Elétrico	
Corretiva	QUEBRA DO EQUIPAMENT	Revisar	Motor	Subistema Elétrico	

Fonte: Autoria Própria (2017)

Analisando a Tabela 8 é possível observar que houve duas coletas de lubrificante, no entanto foi verificado que as mesmas nunca chegaram ao laboratório para análise. Além disso, muito embora o operador tenha alegado que a máquina trabalhava sem demonstrar quaisquer sinais de que viria a falhar podemos observar ainda na Tabela 8 que aproximadamente uma hora antes da falha houve remonta de liquido arrefecedor, o que indica que a máquina estava com aquecimento excessivo. As vinte e nove horas e quarenta e cinco minutos aplicadas no sistema motor se distribuem por subsistema como segue no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Horas de manutenção corretiva do motor



Fonte: Autoria Própria (2017)

O gráfico mostra que a falha do componente é responsável por 24,49 horas das 29,45 horas de manutenção corretivas aplicadas no sistema motor.

4.5 ANÁLISE DOS COMPONENTES QUE FALHARAM

4.5.1 Abertura do Motor

Após a substituição do motor no equipamento o mesmo foi transportado para a oficina onde o óleo do cárter foi drenado e o mesmo foi aberto, Figura 24. Durante a drenagem do óleo lubrificante foi observado que o mesmo apresentou alteração da cor e viscosidade alterada, tendo se tornado uma espécie de graxa.

Figura 24– Abertura do Carter



Fonte: Autoria Própria (2017)

As peças que falharam foram encontradas no cárter do motor, Figuras 25 e 26. Em seguida foram removidos o cabeçote, Figura 27, as bielas e os pistões, Figura 28, do bloco, Figura 29, a camisa do cilindro onde o bloco rompeu saiu junto ao pistão do mesmo, Figura 30.

Figura 25 – Peças que falharam



Fonte: Autoria Própria (2017)

Figura 26–Peças que falharam (2)



Fonte: autoria própria (2017)

Figura 27 - Cabeçote



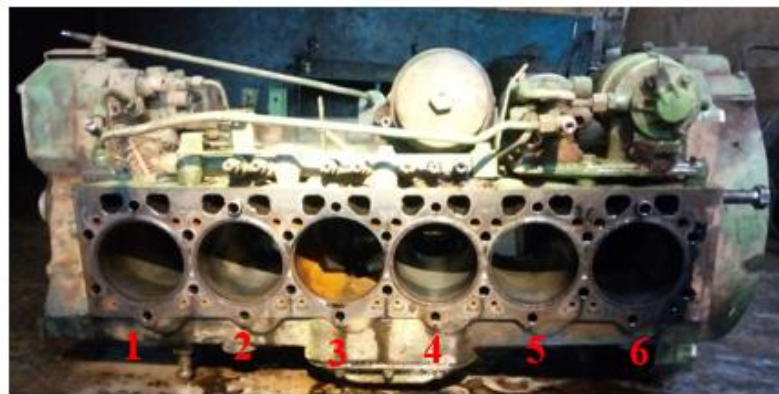
Fonte: Autoria Própria (2017)

Figura 28– Bielas e pistões



Fonte: Autoria Própria (2017)

Figura 29–Bloco do motor



Fonte: Autoria Própria (2017)

Figura 30– Camisa do cilindro onde o bloco rompeu



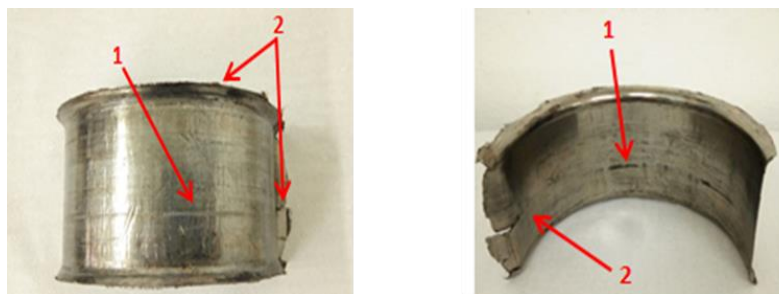
Fonte: Autoria Própria (2017)

4.5.2 Análise de Falha dos Componentes

Foi realizada análise de falha nos casquilhos, bielas, mancal da biela, parafuso e cilindro.

- Casquilhos: É possível observar ranhuras no sentido longitudinal em seu interior o mesmo pode ser observado na parte externa da peça. Porém, em duas direções: longitudinal e transversal, com características de desgaste abrasivo. As bordas da peça sofreram deformação plástica e diminuição significativa da sua espessura, saindo de aproximadamente 2,0 mm para 1,2 mm, causando folga entre o eixo de manivela e bronzina. Figura 31,

Figura 31–Ranhuras nos casquilhos



1 – Ranhuras longitudinais.
2 – Deformações plásticas nas bordas.

Fonte: Autoria Própria (2017)

Observa-se as mesmas características de desgaste abrasivo, contudo, o casquilho sofreu severa deformação plástica, Figura 32.

Figura 32– Deformação plástica nos casquilhos



1 – Ranhuras longitudinais.
2 – Deformações plásticas nas bordas.

Fonte: Autoria Própria (2017)

- Biela: uma parte da biela que se rompeu, após o choque entre essa peça e o bloco do motor. A partir disso, ocorreu “lascamento” do material em uma das partes do mancal da biela, devido à folga existente entre o eixo de manivela e a bronzina. Figura 33.

Figura 33– Biela com “Lascamentos”

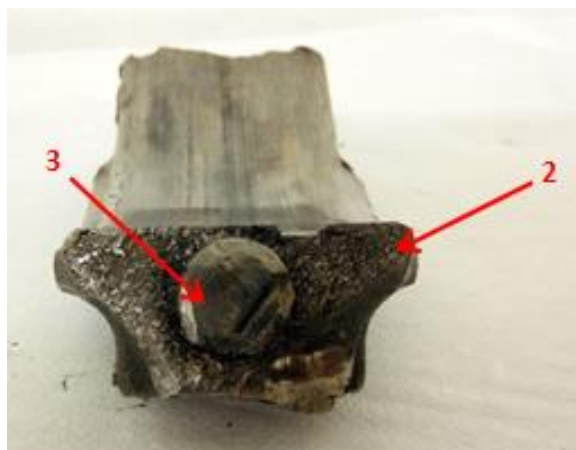


1 – Lascamentos nas bordas

Fonte: Autoria Própria (2017)

- Na região de ruptura do parafuso não pode ser observado o seu mecanismo de fratura, devido à deformação ocorrida na região fraturada, como pode ser observada na Figura 34.

Figura 34– Superfície de fratura do parafuso

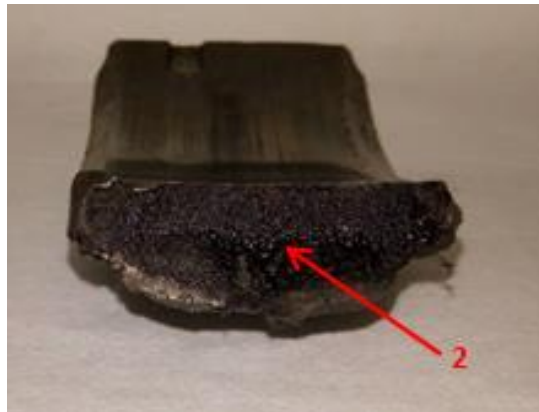


2 – Superfície rugosa.
3 – Superfície do parafuso

Fonte: Autoria Própria (2017)

Na parte fraturada da biela, encontraremos uma fratura frágil, identificada pela superfície rugosa e sem estricção ocasionada devido a um possível movimento radial e choque com o eixo virabrequim, após a quebra do parafuso, Figura35.

Figura 35– Superfície de fratura da biela



2 – Superfície rugosa.

Fonte: Autoria Própria (2017)

- Mancal da biela: são observados os mesmos riscos e ranhuras na superfície interna que foram apresentados nas bronzinas. Além disso, ela apresenta algumas marcas características de ação de impacto como mostra a Figura 36.

Figura 36– Marcas no mancal da biela



2 – Marcas de impacto.

3 – Ranhuras longitudinais.

4 – Superfície rugosa.

Fonte: Autoria Própria (2017)

- Parafusos da Biela: é possível identificar que eles sofreram esforço de flexão, devido a deformação apresentada contribuindo assim para a geração de uma fratura por sobrecarga. A propagação da trinca se iniciou através dos filetes de rosca, que se tratam de concentradores de tensão, Figura 37.

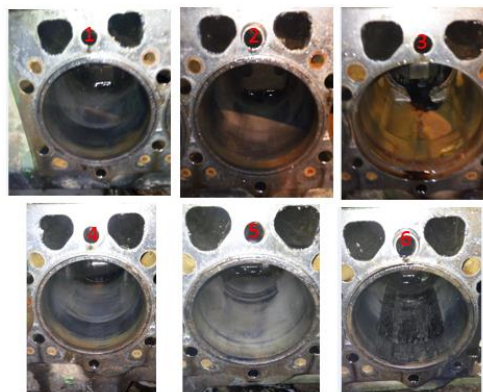
Figura 37– Parafuso da biela



Fonte: autoria própria (2017)

- Cilindro: todas as camisas do bloco (Figura 38) possuem marcas de desgaste abrasivo e de falta de lubrificação, no entanto a sexta camisa apresenta tais características de forma mais acentuada. A terceira camisa saiu ao tirar o pistão e apresenta as mesmas características, além de ter fraturado devido ao impacto como indicado na Figura 38.

Figura 38– Camisas do bloco



Fonte: Autoria Própria (2017)

- Pistões: Dos seis pistões, o terceiro, o quarto e o quinto apresentam o anel de seguimento rompido o que pode ter contribuído para o aumento de cinzas no óleo lubrificante levando o mesmo ao estado no qual foi encontrado como indicado na Figura 39.

Figura 39– Pistões



Fonte: Autoria Própria (2017)

4.6 ANÁLISE DE CUSTO DA FALHA

4.6.1 Análise de custo de reparo

Os custos de reparo iniciais do motor foram calculados sem contar o custo da mão de obra como mostra a tabela 9.

Tabela 9– Custos do reparo iniciais

Descrição	Custo
KIT PISTÃO E ANÉIS	R\$ 22.708,62
BLOCO MOTOR PARCIAL	R\$ 38.847,28
CABEÇOTE COMPLETO JD - 9.0L	R\$ 17.563,35
BOMBA D'AGUA	R\$ 871,32
BOMBA ÓLEO COMPLETA	R\$ 1.278,00
JUNTA CABEÇOTE	R\$ 160,00
JUNTA CARTER	R\$ 58,90
Total	R\$ 81.487,47

Fonte: Autoria Própria (2017)

A tabela traz um custo de reparo de R\$ 58.776,85 reais considerando que será necessário substituir o bloco do motor o cabeçote completo e a junta do mesmo a bomba de água e a junta do cárter.

4.6.2 Análise de Lucro Cessante

Foi calculado o lucro cessante para o tempo total de corretivas que o equipamento sofreu, bem como para o tempo de corretiva no sistema motor e do tempo de corretiva devido a falha do componente como exposto na Tabela 11.

Tabela 10– Lucro cessante

Classe de Manutenção	Horas Paradas	TC/Hora	TC Total	ATR/TC	Preço ATR	Total
Corretiva	90,36	40,00	3614,40	124,56	R\$ 0,68	R\$ 306.142,57
Corretiva - Motor	29,45	40,00	1178,00	124,56	R\$ 0,68	R\$ 99.777,54
Falha do Motor	15,82	40,00	632,80	124,56	R\$ 0,68	R\$ 53.598,67

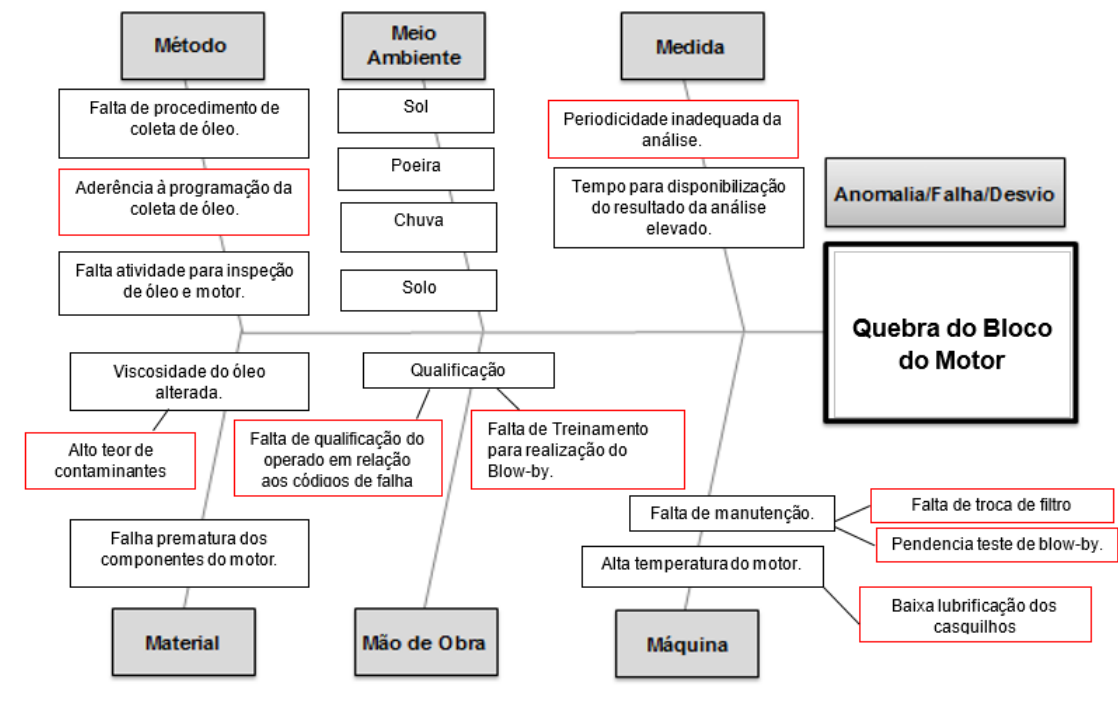
Fonte: Autoria Própria (2017)

Como é possível observar na Tabela 11, o lucro cessante devido a parada do equipamento é elevado, sendo que, considerando apenas as horas corretivas sofridas pelo equipamento devido a quebra gerou um lucro cessante de R\$ 53.598,67. Somando o lucro cessante com o custo de reparo o custo da quebra total pode ser estimado em R\$ 135.085,47.

4.7 Ishikawa

Analisando todos os dados, foi realizado um *brainstorm* e o diagrama de Ishikawa elaborado, Figura 40.

Figura 40– Diagrama de Ishikawa Realizado



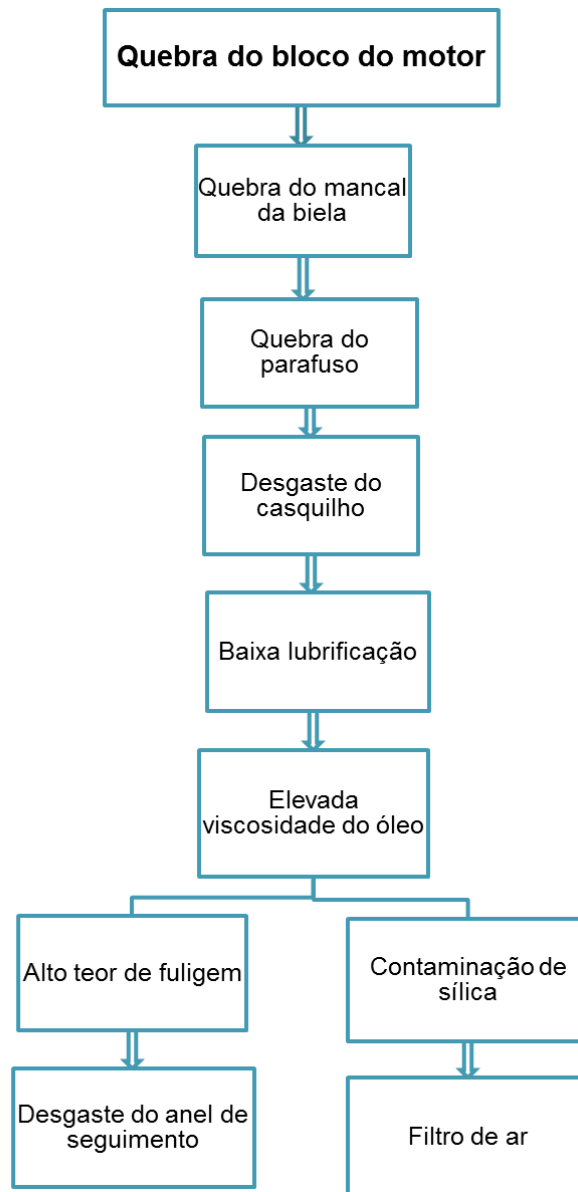
Fonte: Autoria Própria (2017)

Chegou-se à conclusão que as principais causas que levaram à falha foi a baixa aderência a programação da coleta de óleo que leva à periodicidade inadequada da análise, o alto teor de contaminantes do lubrificante, a falta de treinamento tanto do operador que continuou a operar o equipamento mesmo com códigos indicando a falha, além das não conformidades de manutenção de entressafra (pendencia de teste de *blow-by* e falta de troca de filtro). Todos esses fatores levaram à baixa lubrificação dos casquilhos que foi o que efetivamente levou à quebra.

4.8 ÁRVORE DE FALHAS

Conclui-se então que a árvore de falhas da quebra do motor é tal qual segue na Figura 41.

Figura 41– Árvore de Falhas



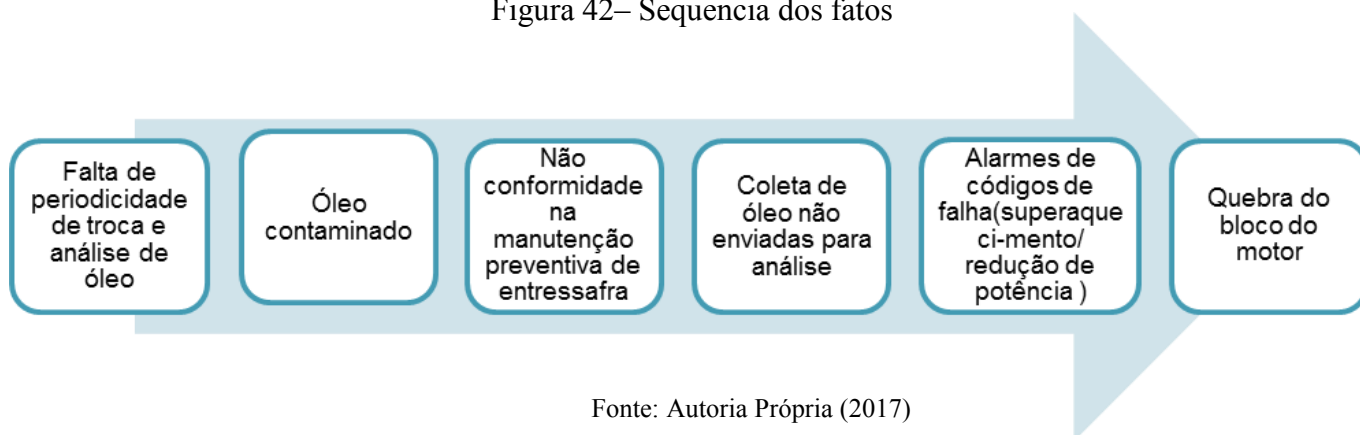
Fonte: Autoria Própria (2017)

Como podemos observar na Figura 41, a quebra do bloco do motor começou com o alto teor de fuligem (falta de troca de filtro) e contaminação de sílica (devido ao desgaste/quebra de anéis de seguimento). Esses fatores fizeram com que a viscosidade do lubrificante fosse elevada ocasionando baixa lubrificação e consequentemente desgaste do casquilho seguido por quebra do parafuso e do mancal que levou a falha no bloco do motor.

4.9 SEQUÊNCIA LÓGICA DOS FATOS

A sequência lógica dos fatos, ou seja, os fatos que se precederam a quebra e foram relevantes para a ocorrência da mesma são explicitados na Figura 42.

Figura 42– Sequencia dos fatos



Fonte: Autoria Própria (2017)

Os fatos relevantes que precederam a quebra do motor foram: falta de periodicidade de troca e análise de óleo durante a safra 2016’2017 que levaram o motor a trabalhar com óleo contaminado, não conformidades na manutenção preventiva de entressafra (principalmente troca de filtro de óleo), coletas que foram realizadas, mas não foram enviadas para o laboratório e diversos alarmes de código de falha.

4.10 PLANO DE AÇÃO

O plano de ação foi elaborado buscando aprofundar o conhecimento sobre a falha e bloqueá-la como indicado na Tabela 11.

Tabela 11– Falhas no processo e planos de ação

CAUSAS FUNDAMENTAIS PRIORIZADAS	AÇÃO
Periodicidade inadequada da análise.	Elaborar mapa de 52 semanas de coleta de lubrificante
Falta de envio de análise	Elaborar formulário de coleta e envio
Falta de aderência à programação da coleta e troca de óleo.	Realizar estudo sobre processos de troca e coleta de óleo para entender deficiências do processo
Falta de aderência à programação da coleta e troca de óleo.	Medir aderência à programação da coleta e envio das amostras semanalmente
Falta de acompanhamento dos resultados das análises	Criar painel das condições - painel que mostra as análises pendentes e resultados plotados em gráficos para melhor visualização
Falta de acompanhamento dos resultados das análises	Monitorar os níveis de contaminantes presentes nas análises de óleo

Fonte: Autoria Própria (2017)

5. CONCLUSÃO

O estudo de falhas que impactam a disponibilidade física de equipamentos é fundamental para encontrar a causa raiz dessas falhas e bloqueá-la. Para realizar o estudo do motor diesel modelo 9.0L da colheira John Deere 3522 2L que falhou no dia 20/04/2016, 10 dias após ter iniciado a safra, com apenas 144 horas de trabalho e levou à quebra do bloco do motor expondo camisa, pistão, biela e eixo de manivela, foi levantado o histórico de análise de lubrificante, histórico de manutenção corretivo e manutenções preventivas e pode-se concluir que os cuidados básicos com componente falhado já vinham sendo negligenciados desde a safra anterior.

Concluiu-se que a falha ocorreu devido à falta de lubrificação que fez com que ocorresse superaquecimento levando ao travamento do sistema. A ineficiência da lubrificação ocorreu devido a elevada viscosidade do óleo lubrificante causada pela entrada de fuligem devido a danificação dos anéis de seguimentos. Além disso a contaminação do óleo lubrificante por silício que fez com que ocorressem desgastes que levaram a folga nos casquilhos. Deste modo o plano de ação se concentrou em sanar as não conformidades e prevenir recorrência estabelecendo as ações que seguem:

- Elaborar mapa de 52 semanas
- Elaborar formulário de envio das amostras, bem como definir datas fixas de envio.
- Realizar estudo sobre processos de troca e coleta de óleo para entender deficiências do processo
- Medir aderência à programação da coleta e envio das amostras semanalmente
- Criar painel das condições - painel que mostra as análises pendentes e resultados plotados em gráficos para melhor visualização
- Monitorar os níveis de contaminantes presentes nas análises de óleo

REFERÊNCIAS

- A EERICSON C. **Fault Tree Analysis**. Disponível em: <<http://www.cs.ufc.edu/~hlugo/cop4331/ericson-fta-tutorial.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2017
- CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 236, 237, 239 p. 8ª Ed., São Paulo: Editora LTC, 2008.
- CAMPOS, V. F. **TQC - Controle da qualidade Total (No Estilo Japonês)**. Belo Horizonte: Ufmg, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais: Fundação Christiano Ottoni, 1992. 229 p.
- CARRETEIRO, R. P; MOURA, Carlos R. S. **Lubrificantes e Lubrificação**. São Paulo: Makron Books, 1998. 493 p.
- CHIAGURI, A B. **Uma análise da evolução da área plantada da cana de açúcar no estado de São Paulo, nos últimos 10 anos**. 2010. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Economia, Unesp: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Araraquara, 2010.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v. 1 – Brasília: Conab, 2013- v.
- DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**, 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981. P. 344.
- EGITO, G. M. P. **Avaliação da resistência ao desgaste do metal de solda gtaw reforçado por carbonetos de titânio**. 2017. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2017.
- FERNANDES, F. R. **Ensaio com amostras de óleos lubrificantes, como ferramenta auxiliar no desenvolvimento de novos motores de combustão interna**: revisão sistemática da literatura. 2012. 61 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2012. Disponível em: <<http://maua.br/files/monografias/ensaio-com-amostras-de-oleos-lubrificantes-como-ferramenta-auxiliar-no-desenvolvimento-de-novos-motores-de-combustao-interna.pdf>>. Acessado em: 20 maio 2017.
- HU, S. **The bi-Gaussian theory to understand sliding wear and friction**. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X17301998>>. Acessado em: 25 maio 2017
- JOHN DEERE. **Manuais, Guias Rápidos e Publicações**. Disponível em: <<https://www.deere.com.br/pt/peças-e-serviços/manuais-e-treinamento/manuais/>>. Acessado em: 20 maio 2017.
- KIMURA, R. K. **Uso da técnica de análise de óleo lubrificante em motores diesel estacionários, utilizando-se misturas de biodiesel e diferentes níveis de contaminação do**

lubrificante. 2010. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2010.

LAGO, D. F. **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante**. 2007. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2007.

MAHLE. **Manual técnico curso Mahle metal leve motores de combustão interna**. Disponível em <<http://www.mahle-aftermarket.com/media/local-media-latin-america/download-center/technical-materials/2016-04-19-manual-curso-demotores-2016-2.pdf>>. Acessado 23 maio 2017

MARIANI, C. A. **Método PDCA e ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos industriais: Um Estudo de Caso**. Disponível em <<http://www.revistas.usp.br/rai/article/view/79051>>. Acessado em 24 maio 2017

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. Porto: Publindústria, 2011. 437 p.

MAYA-JOHNSON, S; SANTA, J. F; TORO, A. **Dry and lubricated wear of rail steel under rolling contact fatigue - Wear mechanisms and crack growth**. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164816304732>>. Acessado em: 25 maio 2017.

NOVA CANA. **As usinas de açúcar e etanol do Brasil**. Disponível em <<https://www.novacana.com/usinas-brasil/>>. Acessado em: 27 maio 2017

OBERT, E. F. **Motores de combustão interna**. Porto Alegre: Globo, 1971. 681p.

PIOVESANA, G. R; FERREIRA, F. G. **Análise de fadiga e corrosão em dutos submarinos**. 2016. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2016.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. 2. ed. New York: John Willey and Sons, 1995.

SHEEL. **Sheel Rimula RT4 L 15W-40**. Disponível em <http://www.brazmax.com.br/painel/principal/arquivos/produto_1372954487_RIMULA_RT4_L.pdf>. Acessado em: 23 maio 2017

TORQUATO, S. A.; JESUS, K. R. E.; ZORZO, C. R. B. **Inovações no sistema de produção de cana-de-açúcar: uma contribuição do Protocolo Agroambiental para a região de Piracicaba, Estado de São Paulo**. 2015. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/ftpiea/publicacoes/ie/2015/tec03-0415.pdf>>. Acessado em: 27 maio 2017.

VARELA & SANTOS. **Noções básicas de motores diesel**, 2010. 67p. Disponível em <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Literatura/No%E7%F5es%20B%E1licas%20de%20Motores%20Diesel.pdf>. Acessado em 20 abril 2017

VOLTARELLI, M. A. **Ferramentas da qualidade na colheita mecanizada de cana-de-açúcar**. 2015. 131 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias Campus de Jaboticabal, Jaboticabal, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/126624>>. Acessado em: 20 maio 2017.