

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIELLE DA SILVEIRA PIMENTEL

**ANÁLISE DE FALHA DE MOTOR DIESEL DE COLHEDORA DE
CANA DE AÇÚCAR JOHN DEERE 9.0L**

SÃO CARLOS
2022

GABRIELLE DA SILVEIRA PIMENTEL

**ANÁLISE DE FALHA DE MOTOR DIESEL DE COLHEDORA DE
CANA DE AÇÚCAR JOHN DEERE 9.0L**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de São Carlos, para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce
Shiki

SÃO CARLOS
2022



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 13/2022/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

GABRIELLE DA SILVEIRA PIMENTEL


ANÁLISE DE FALHA DE MOTOR DIESEL DE COLHEDORA DE CANA DE AÇÚCAR JOHN DEERE 9.0L

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 30 de abril de 2022

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Sidney Bruce Shiki
Membro da Banca 1	Gustavo Franco Barbosa
Membro da Banca 2	Renato Afonso Rocatelli 



Documento assinado eletronicamente por **Sidney Bruce Shiki, Docente**, em 30/04/2022, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Franco Barbosa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/04/2022, às 11:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **0665163** e o código CRC **F693A68A**.

23112.011458/2022-46

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

[‘Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.’- Walter S. Landor]

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Keli e Roger, que consideraram minha conquista desde o início da graduação como se deles fossem, me mostrando o melhor caminho durante toda a trajetória e incentivando sempre a dar o melhor de mim, independente de onde eu estivesse.

Agradeço, também, ao meu namorado Rafael Ferreira, que nunca me deixou desistir diante de alguma dificuldade e me deu apoio nos momentos em que mais precisei para trilhar minha jornada até aqui e fazendo com que eu fosse uma pessoa cada vez mais confiante da minha capacidade.

Agradeço aos meus familiares: meu irmão Juninho (meu exemplo de perseverança), tia Dri e tio Marco (meu exemplo de resiliência e amparo), vó Arlete e vô Edson (meu exemplo de amor incondicional) por me fornecerem a base familiar, estrutura de apoio e carinho, amparando mesmo de longe.

Agradeço ao meu orientador Bruce, pela paciência e suporte durante graduação, iniciação científica e trabalho de conclusão de curso. Seus conselhos e ensinamentos foram fundamentais para minha formação e construção de ideais em ambientes, até mesmo, fora da faculdade. Obrigada por suas instruções. Além do mais, agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar pela consolidação e construção dos conhecimentos necessários para minha vida profissional.

Todo esse processo não seria o mesmo sem poder compartilhar de momentos de muitas alegrias e algumas dificuldades com os meus amigos: Joyce, Perbone, Poka, Juan, e outros, que fizeram tudo ser mais leve e feliz. Vou levar vocês para o resto da vida. Além disso, minha grande amiga Andreza, que me ensinou em pouco tempo muito sobre a vida. Em especial, as minhas irmãs que a faculdade me deu: Mascote, Ogata, Amanda, inspiração diária de mulheres fortes e um dos maiores e melhores presentes, demonstrando diariamente como é o verdadeiro significado de amizade e apoio.

Gostaria de dedicar também a minha equipe de Engenharia (Frederico, Luís Felipe, Renato e Andreza) que me auxiliou durante todo o meu processo de primeira entrada no mercado de trabalho, me mostrando as dificuldades sem deixarem de segurarem na minha mão, até mesmo durante a elaboração desse trabalho.

Por fim, gostaria de dedicar essa finalização de ciclo ao meu amado pai, que já não se encontra presente fisicamente comigo. Essa conquista foi realizada pensando todos os dias da minha vida em você e espero que se sinta orgulhoso da sua filha assim como eu tenho orgulho de você como meu pai. Essa vitória é nossa. Obrigada pelos 20 anos me mostrando o que é ter um pai, amigo e verdadeiro e eterno herói em uma única pessoa.

RESUMO

Entende-se por manutenção automotiva o conjunto de técnicas e processos responsáveis por possibilitarem que um maquinário execute suas funções pelas quais foi designado. A análise de falhas de equipamentos agrícolas em empresas suco energéticas é uma estratégia que auxilia na redução de custo com perdas e/ou danos de peças, já que, uma vez conhecido o problema ou as possíveis causas raízes, é possível traçar planos de ação para evitar e que o mesmo ocorra futuramente. Contudo, para ser assertivo, é preciso investigar os vários componentes que compõem o sistema mecânico analisado. No presente trabalho de conclusão de curso, foi feito o estudo da falha de um dos componentes primordiais para o funcionamento de uma colhedora: o motor a diesel. A investigação terá o objetivo de identificar as causas mais frequentes de falhas desse motor e prevenir a repetição desse fato em outras peças. Para isso, a análise será feita baseada na identificação dos componentes danificados do motor, identificação de impurezas no óleo lubrificante utilizado, bem como no histórico de manutenções preventivas e corretivas já realizadas. Para reunir e organizar as informações em prioridade, e fazer a gestão do estudo de modo propositivo, a ferramenta de gestão conhecida como diagrama de Ishikawa ou espinha de peixe será usada. Ao final do estudo, espera-se encontrar o motivo que levou o motor a falha, bem como identificar lacunas que até então não eram averiguadas e se tornaram um problema para o bom funcionamento do motor, para, posteriormente, ser traçado planos de ação mais assertivos na programação do componente em questão.

Palavras-chave: Análise de Fálha. Manutenção. Motor.

ABSTRACT

Automotive maintenance is understood as the set of techniques and processes responsible for enabling a machinery performs its designated functions. Analysis of agricultural equipment failures in juice energy companies, such as Raízen, is a strategy that helps to reduce the cost of loss and/or damage to parts, since, once the problem is known, it is possible to draw up action plans to prevent it from occurring in the future. However, to be assertive, it is necessary to investigate the various components that make up the analyzed mechanical system. In this course conclusion work, the failure study of one of the key components for the operation of a harvester will be made: the diesel engine. The investigation will aim to identify the most frequent causes of failure of this engine and prevent the repetition of this fact in other parts. For this, the analysis will be based on the identification of damaged engine components, identification of impurities in the used lubricating oil, as well as the history of preventive and corrective maintenance already carried out. To gather and organize the information in priority, and to manage the study in a purposeful way, the Ishikawa management tool will be used. At the end of the study, it is expected to find the reason that caused the engine to fail, as well as to identify the GAP's or gaps that until then were not investigated and became a problem for the proper functioning of the engine, so that plans can be drawn up later. assertive actions in the programming of the component in question.

Keywords: Failure Analysis. Maintenance. Motor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de uma Colhedora de Cana.	22
Figura 2 – Componentes de uma colhedora de cana-de-açúcar picada	24
Figura 3 – Vista frontal da colhedora de cana-de-açúcar picada	24
Figura 4 – Vista interna do elevador da colhedora de cana-de-açúcar picada	25
Figura 5 – Fluxos de massa e energia em um motor de combustão interna	26
Figura 6 – Cabeçote, bloco e cárter do motor	27
Figura 7 – Componentes do cabeçote do motor	27
Figura 8 – Vista das Válvulas de Comando	28
Figura 9 – Bloco do Motor	29
Figura 10 – Curso do Pistão	29
Figura 11 – Partes do Pistão	30
Figura 12 – Biela	30
Figura 13 – Virabrequim	31
Figura 14 – Cárter	31
Figura 15 – 4 tempos do motor alternativo	32
Figura 16 – Sincronismo de funcionamento dos pistões	33
Figura 17 – Desgaste por Rolamento	36
Figura 18 – Desgaste por Deslizamento	36
Figura 19 – Representação Gráfica do Diagrama de Ishikawa	38
Figura 20 – Medidas base de uma colhedora de cana Modelo CH670 E CH570	41
Figura 21 – Motor Diesel e local dos principais elementos químicos	44
Figura 22 – Cabeçote do motor diesel	46
Figura 23 – Vista inferior do cabeçote com válvulas montadas e com válvulas removidas	47
Figura 24 – - Vista da área inferior do cabeçote referente ao 1°, 2° e 3° cilindro	48
Figura 25 – Vista da área inferior do cabeçote referente ao 4°, 5° e 6° cilindro respectivamente	48
Figura 26 – Medições de recessão de válvulas	49
Figura 27 – Injetores de combustível (detalhe de amassamento da ponta do 5° injetor e fratura da ponta do 6° injetor de combustível)	50
Figura 28 – Injetores de combustível (detalhe de amassamento da ponta do 5° injetor e fratura da ponta do 6° injetor de combustível)	50
Figura 29 – Conjunto de molas do cabeçote	51
Figura 30 – Eixo conjunto de balancins	51
Figura 31 – Conjunto de varetas (detalhe da fratura na ponta e empeno da vareta de acionamento do balancim de escape do 5° cilindro)	52

Figura 32 – Conjunto de tuchos (detalhe do desgaste do 9° tucho - acionamento do balancim de escape do 5° cilindro)	52
Figura 33 – Eixo comando de válvulas (detalhe do desgaste no 9° ressalto referente a abertura/fechamento das válvulas de escape do 5° cilindro)	53
Figura 34 – Conjunto de pistões (detalhe para a fratura na bucha do pino do pistão do 5° cilindro)	53
Figura 35 – Pistões do 5° e 6° cilindro	54
Figura 36 – Conjunto de camisas (detalha nas camisas do 5° e 6° cilindro)	54
Figura 37 – Conjunto de bielas (detalhe para o desgaste acentuado na bucha do olhal da biela do 2° cilindro	55
Figura 38 – Bronzinas dos mancais móveis	55
Figura 39 – Bronzinas dos mancais fixos (detalha para coloração anormal da bronzina do 6° mancal fixo e desgaste abrasivo na bronzina do 7° mancal fixo)	56
Figura 40 – Eixo virabrequim (detalhe do desgaste abrasivo no 7° mancal fixo)	56
Figura 41 – Diagrama de Ishikawa para o motor falhado	57
Figura 42 – Análise dos 5 porquês	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações gerais do motor e frota do equipamento.	43
Tabela 2 – Histórico de análise de óleo do motor com respectivos componentes em partes por milhão - ppm	43
Tabela 3 – Manutenções Corretivas feitas no motor no início da safra até o momento atual	45
Tabela 4 – Teste dos bicos injetores	46
Tabela 5 – Plano de Ação para mitigação de falha.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PMS	Ponto Morto Superior
PMI	Ponto Morto Inferior
MANFRO	Planejamento e Controle de Manutenção de Frotas
ppm	Parte por Milhão
TBN	Total Base Number
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
ANP	Agência Nacional de Petróleo
MCE	Motor de Combustão Externa
MCI	Motor de Combustão Interna
MTF-I	Métodos Técnicas e Ferramentas para Inovação
FRACAS	Relatório de Falhas, Análise e Ações Corretivas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Transição da mecanização no processo de colheita da cana	23
2.2	Colhedora de cana-de-açúcar	23
2.3	Motor de Combustão Interna	26
2.3.1	Componentes do MCI	26
2.3.1.1	Cabeçote	27
2.3.1.1.1	Válvulas, eixo de comando de válvulas e eixo dos balancins.	28
2.3.1.2	Bloco	28
2.3.1.2.1	Cilindro	29
2.3.1.2.2	Pistão	29
2.3.1.2.3	Biela	30
2.3.1.2.4	Árvore de Manivelas, Virabrequim ou Girabrequim	31
2.3.1.3	Cárter	31
2.3.2	Motor Diesel	32
2.3.3	Sistema de Lubrificação	33
2.3.3.1	óleo Lubrificante	33
2.3.4	Combustível para Motor Diesel	34
2.3.5	Desgaste	35
2.4	Ferramentas de Qualidade de Projetos	36
2.4.1	Método dos 5 Porquês	36
2.4.2	Diagrama de Ishikawa	37
2.4.3	<i>Brainstorming</i>	38
2.4.4	Metodologia RFRACAS	38
2.5	Conceitos de Manutenção	39
3	METODOLOGIA	41
4	RESULTADOS	43
4.1	Informações Básicas Iniciais	43
4.2	Histórico de Manutenções	43
4.2.1	Manutenção Preditiva	43
4.2.1.1	Análise dos laudos de óleo lubrificante	43
4.2.2	Manutenção Corretiva	45
4.3	Descrição Detalhada da Peritagem do Motor	46
4.3.1	Avaliação externa do cabeçote do motor diesel	46
4.3.2	Avaliação inferior do cabeçote do motor diesel	47

4.3.3	Medições de recessão de válvulas	49
4.3.4	Avaliação dos bicos injetores de combustível	49
4.3.5	Avaliação do conjunto de válvulas de admissão e escape	50
4.3.6	Avaliação do conjunto de molas do cabeçote	51
4.3.7	Avaliação do Eixo conjunto de balancim	51
4.3.8	Avaliação das varetas de comando do balancim de admissão	52
4.3.9	Avaliação do conjunto de tuchos	52
4.3.10	Avaliação do eixo comando de válvulas	53
4.3.11	Conjunto de pistões	53
4.3.12	Conjunto de camisas	54
4.3.13	Conjunto de bielas	55
4.3.14	Bronzinas dos mancais móveis	55
4.3.15	Bronzinas dos mancais fixos	56
4.3.16	Eixo Virabrequim	56
4.4	<i>Análise de Falha</i>	56
4.4.1	Diagrama de Ishikawa	57
4.4.2	Metodologia dos 5 Porquês	57
4.5	Plano de Ação	59
5	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

O complexo sucroenergético caracterizado pela capacidade de produção de energia limpa em larga escala, tem grande relevância no Brasil. Diante disso, o etanol de cana-de-açúcar e a bioenergia gerada com base no bagaço da cana são grandes destaques na pauta de exportação. Em 2020 o setor teve participação nacional de 9,9% na economia (US\$9,9 bilhões), quarto setor mais representativo do país (ORBOLATO et al.,). Segundo estudo da CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento, (2021), na safra 2020/21, o Brasil foi responsável pela produção de 654,5 milhões de toneladas de cana destinados à produção de 41,2 milhões de toneladas de açúcar e 29,7 bilhões de litros de etanol. A cana-de-açúcar no Brasil destinada ao setor sucroenergético tem uma área e produção total estimada para a safra 2021-2022 de 8,48 milhões de hectares.

Para atender tamanha demanda, a mecanização no campo tem um papel fundamental na busca de uma produtividade cada vez maior e, apesar da vasta diversidade de equipamentos encontrados, tendo em vista a colheita como um dos principais processos do campo, a colhedora de cana se torna um ponto de destaque. Segundo (NEVES et al., 2009), a velocidade de operação e a eficiência de campo são variáveis de grande influência no desempenho operacional e econômico da colheita mecanizada de cana. Posto isso, a passagem do corte manual para o mecanizado ampliou os horizontes para a colheita mecanizada. Tal passagem foi enfatizada com a assinatura do Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético Paulista, em 2007, que visava a eliminação da queima dos canaviais em áreas mecanizáveis até 2014 e em áreas não mecanizáveis até 2017 (TORQUATO; JESUS; ZORZO, 2015). Esse protocolo tinha como objetivo eliminar alguns danos causados pela colheita manual, já que durante esse processo a palha da cana era queimada, trazendo riscos para os moradores do entorno, exaustão física do trabalhador e danos ambientais.

Contudo, diante do novo cenário, algumas preocupações começam a aparecer. Com a introdução da mecanização, a manutenção do maquinário se torna um fator primordial para o processo, já que o tempo de parada não programado interfere diretamente na estimativa/meta calculada para colheita. Logo, a manutenção auxilia na definição dos planos de metas, na implementação de medidas otimizadoras e na avaliação de resultados (BANCHI; LOPES; ROCCO, 2009).

Em usinas sucroalcooleiras, o período de safra é caracterizado pela operação e a entressafra, a manutenção. Para que as colhedoras mantenham um alto nível de rendimento operacional durante a safra, é necessário reduzir o tempo de indisponibilidade mecânica, evitando-se possíveis quebras e manutenções corretivas (BANCHI et al., 2012). Em complemento a manutenção de reforma que ocorre na entressafra, durante a safra ocorrem as paradas de manutenção preventiva e corretiva, realizadas majoritariamente no campo. A manutenção das colhedoras tem como objetivo aumentar a disponibilidade de frota, visto que amplia sua faixa de uso e prolonga vida do equipamento. Para se ter essa disponibilidade, é importante que se conheça a real e a possível carga horária da atividade

operacional disponível (SANTANNA, 2020).

Na figura 1 é possível observar a ilustração, em vista traseira e frontal, de uma colhedora de cana.

Figura 1 – Ilustração de uma Colhedora de Cana.



(a) Vista traseira de uma Colhedora.



(b) Vista frontal de uma Colhedora.

1.1 Objetivos

Diante disso, tem-se que o presente trabalho tem como objetivo geral trazer uma análise de um dos sistemas mais críticos da colhedora: motor a Diesel. Tal criticidade vem do fato do mesmo possuir um valor extremamente alto em uma troca não programada e sua pane¹ faz com que a disponibilidade do equipamento se reduza, já que a disponibilidade física do equipamento é a porcentagem de tempo que o equipamento está disponível para operar menos as horas de manutenção que ele sofreu. Ou seja, manutenção não programadas prejudicam toda a logística planejada da empresa.

Para isso, os objetivos específicos a serem abordados contemplam:

- Identificar quais os componentes mais críticos que influenciam no trabalho do motor durante operação da máquina em campo e ver o motivo inicial da falha².
- Analisar falhas estruturais, desgaste e defeitos³ dos componentes do motor
- Detalhar o acompanhamento de análise de óleos retiradas periodicamente do motor, bem como as impurezas presentes e suas associações aos possíveis desgastes.
- Analisar e acompanhar a gestão de manutenção preventiva e realizada no motor, associando a suas condições de operação e correlacionar com possíveis desgastes.
- Encontrar os pontos falhos durante o processo de inspeção/manutenção do motor;
- Encontrar a causa raiz e traçar planos de ação mais assertivos para evitar futuras falhas pelos mesmos motivos.

¹Estado de um item em falha.

²Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida. Depois da falha o item tem uma pane.

³Quaisquer desvio de uma característica de um item em relação a seus requisitos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Transição da mecanização no processo de colheita da cana

Segundo estudo de 2008 de Goldemberg, Nigro e Coelho (2008), em todo o Estado de São Paulo 56% da energia consumida vem de fontes renováveis, e 38% dessa energia vem da cana-de-açúcar. O uso do etanol de cana permitiu que o estado reduzisse a participação do petróleo na matriz energética estadual de 60% para 33% nos últimos 30 anos. Logo, é notória a importância de tal matéria prima visando desenvolvimento de um país agroenergético.

No processo desde a o plantio até a transformação da matéria prima, um dos processos produtivos que mais recebe destaque é o da colheita. Contudo, tal etapa passou por grandes modificações desde o início do plantio de canaviais com viés econômico. Anteriormente, o processo era realizado de forma manual e, atualmente, o cenário teve uma mudança com a introdução de maquinários que automatizam o processo de colheita da cana. Isso se deve ao fato de que, por mais que a indústria da cana seja um Sistema de produção sustentável de energia a partir da biomassa (reduzindo a taxa de liberação de CO₂ com a substituição de gasolina por etanol e de óleo combustível por bagaço) alguns problemas foram atraídos com a expansão de tal economia.

Entre esses problemas destaca-se a prática da queima anteriormente à colheita da cana-de-açúcar, usual na maioria dos países produtores. Os motivos principais para a utilização da queima da palha de cana antes de se efetuar o corte manual são: a segurança do trabalhador, o aumento do rendimento do corte, a melhoria no cultivo e em novos plantios e a eliminação de impurezas (RONQUIM, 2010).

Em 2002, foi aprovada a Lei N. 11.241, de 19 de setembro de 2002 (BRASIL, 2002). A mesma estipula que a eliminação da queima nos canaviais deveria ser de forma gradativa, de forma que tenha prazo final em 2021 para áreas que já possuíam uma colheita realizada por maquinários que automatizam o processo e em 2031 para áreas não mecanizáveis, ou seja, de colheita manual.

Dessa maneira, com a implementação da colheita mecanizada, tem-se a redução significativa de problemas com a queimada, além de uma evolução positiva na eficiência econômica, já que a capacidade produtiva da máquina é muito maior. Enquanto um trabalhador braçal consegue colher em torno de 7 toneladas por dia, a máquina tem a possibilidade de colher mais de 800 toneladas. Ainda pelo viés econômico, pesam outros fatores, entre eles o custo de produção, que é de 20% a 25% maior em usinas que colhem a cana manualmente

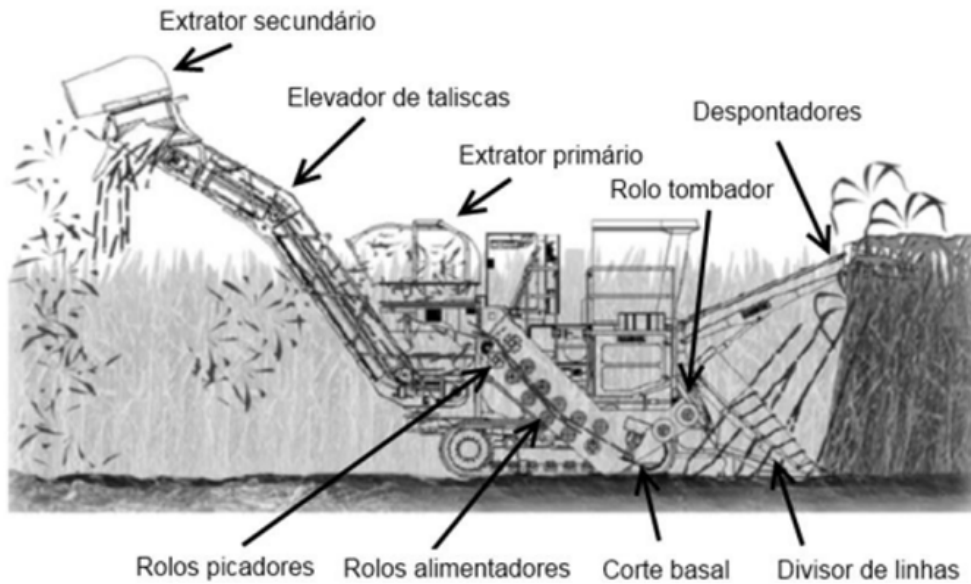
2.2 Colhedora de cana-de-açúcar

Se tratando do processo de colheita mecanizada, tem-se o principal maquinário responsável pela execução dessa atividade: a colhedora.

Para o processo de colheita de cana, a colhedora possui sistemas únicos, com a função desde retirada da cana até o processo em que ela é cortada. Nas Figuras 2, 3 e 4,

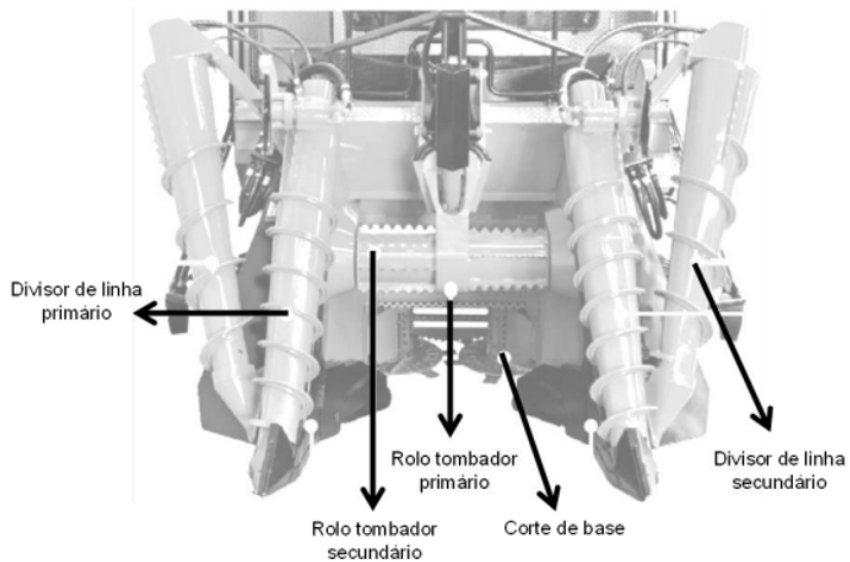
temos a ilustração de tais principais sistemas.

Figura 2 – Componentes de uma colhedora de cana-de-açúcar picada



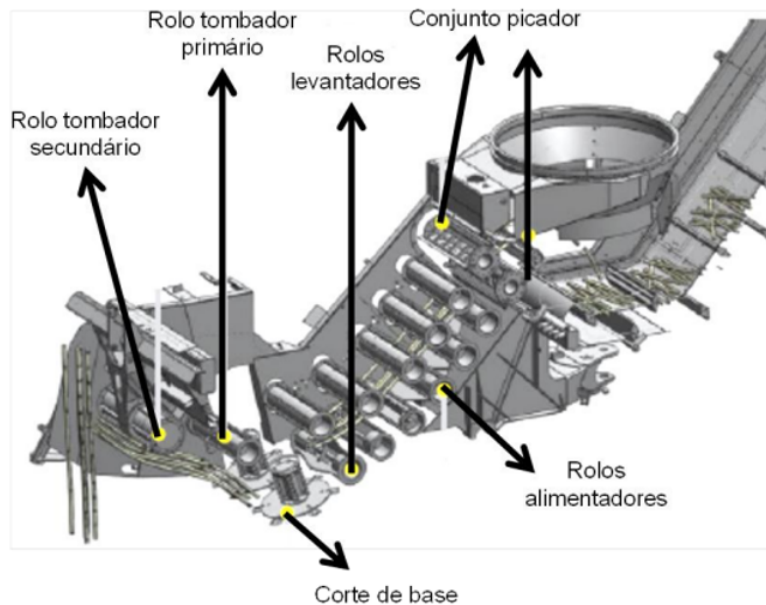
Fonte: Voltarelli (2015)

Figura 3 – Vista frontal da colhedora de cana-de-açúcar picada



Fonte: SANTAL (2010)

Figura 4 – Vista interna do elevador da colhedora de cana-de-açúcar picada



Fonte: SANTAL (2010)

Diante disso, os sistemas, em ordem cronológica, para a realização do corte da cana, são:

- Despontador: Responsável por remover o excesso de palha que se encontra na parte superior da cana, sem utilização para o produto final.
- Divisor de linha: espaçador de forma a englobar a linha a ser seguida para a colheita. São formados por 4 rolos. Os dois internos rotacionam de forma a jogar a cana da linha para dentro da colhedora e, os dois outros externos, rotacionam de forma a jogar a cana que não se encontra na linha a ser colhida para as laterais de fora.
- Rolo tombador: após a cana passar pelo divisor de linha, o rolo tombador possui a função de tombar a cana para o interior da máquina direcionando para o disco de corte, a fim de continuar o processo com a mesma deitada.
- Corte basal ou Disco de Corte: possui a função de cortar a cana pelo impacto das facas de corte presentes nele.
- Rolos alimentadores ou transportador: conduzem as canas inteiras até o local onde são fracionados.
- Rolo Picador: constituído pelos rolos ou facões picadores, para haver o fracionamento da cana.
- Extrator Primário e Secundário: funciona com hélices internas que giram de forma a retirar, por aspiração, impurezas vegetais e minerais.

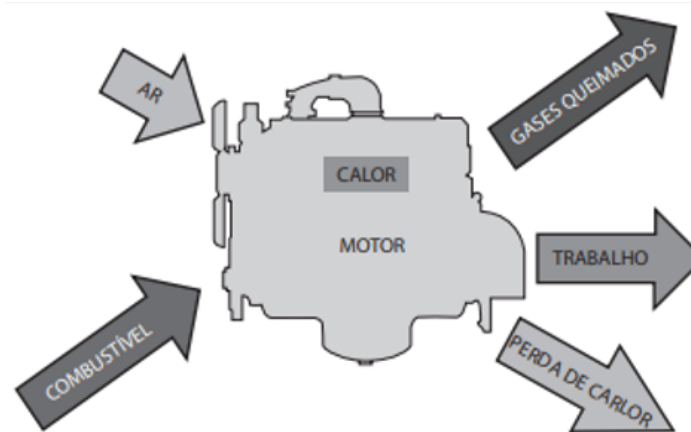
- Elevador de taliscas: funciona apenas para transporte, com uma esteira, de forma a levar a cana ao topo do elevador e, posteriormente, passar a cana do processo para o caminhão responsável pelo transporte do produto até as usinas.

Analisando a colhedora de forma mais específica, tem-se que o motor a Diesel é um dos sistemas mais importantes, sendo considerado o "trem de força" da máquina, juntamente com a transmissão. Assim, como nos carros, o motor é o responsável pela geração do movimento do equipamento, ou seja, sem ele não há operação. Sua manutenção programada (pré-estabelecida) não costuma gerar altos custos, porém, uma manutenção ocasionada por falha operacional ou falta de programação pode gerar custos exorbitantes, uma vez que os componentes internos começam a desgastar e falhar, prejudicando a disponibilidade da máquina. Logo, seu estudo se torna de suma importância para impedir gastos não orçados.

2.3 Motor de Combustão Interna

Máquinas térmicas são dispositivos que permitem transformar calor em trabalho (BRUNETTI, 2018). Esse calor pode ser obtido de diferentes fontes: combustão, energia elétrica, energia atômica, entre outras. A figura 5 ilustra de forma simplificada um motor de combustão interna com seus respectivos fluxos de entrada e saída.

Figura 5 – Fluxos de massa e energia em um motor de combustão interna



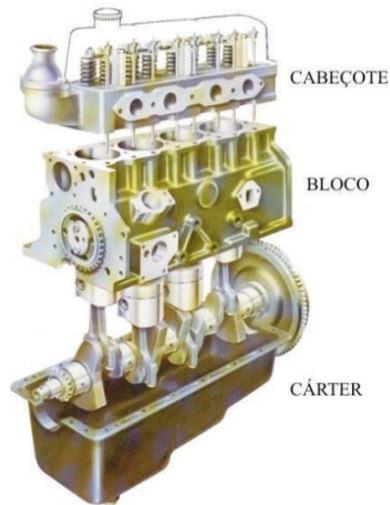
Fonte: Brunetti (2018)

A classificação dos motores pode ser de duas formas: motores de combustão interna (MCI) ou motores de combustão externa (MCE). Para o MCI, a obtenção de trabalho é realizada de tal forma que o Fluxo Ativo (FA) participa diretamente da combustão. Entende-se por FA a substância pela qual sofre a sequência de processos realizados para a obtenção do trabalho. Já para o MCE, a combustão de processa externamente ao FA.

2.3.1 Componentes do MCI

O motor de combustão interna pode ser dividido em 3 principais parte, sendo elas ilustradas na 6.

Figura 6 – Cabeçote, bloco e cárter do motor



Fonte: VARELLA e SANTOS (2010)

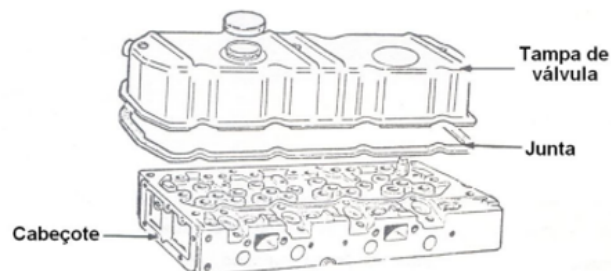
Além disso, pode-se sub dividir tais partes da seguinte forma:

- Cabeçote
 - Válvulas, eixo de comando de válvulas e eixo dos balancins
- Bloco
 - Cilindro, pistão, biela e virabrequim
- Cárter

2.3.1.1 Cabeçote

O cabeçote é a parte que fecha o bloco na parte superior do motor por intermédio de parafusos. Normalmente é fabricado com o mesmo material do bloco. Entre o bloco e o cabeçote existe uma junta de vedação (LUZ, 2013), vide figura 7.

Figura 7 – Componentes do cabeçote do motor



Fonte: (LUZ, 2013)

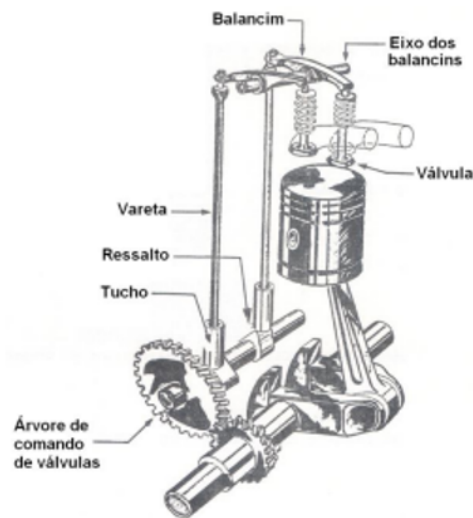
2.3.1.1.1 Válvulas, eixo de comando de válvulas e eixo dos balancins.

As válvulas são as responsáveis por possibilitar que a mistura ar + combustível aconteça, de forma que a válvula de admissão é a de entrada de ar e a de escape é de saída dos gases.

O acionamento ocorre por meio do sistema de comando de válvulas, de forma que o movimento do virabrequim é transmitido ao eixo de comando de válvulas, por um engrenamento, conforme ilustrado na Figura 8. Após isso, o eixo árvore transmite o movimento para a vareta, já que a árvore de manivelas possui um ressalto ou came para cada válvula. As varetas ligam-se ao eixo dos balancins, acionando as válvulas. A abertura e o fechamento das válvulas estão diretamente ligados com o movimento do pistão e com o ponto de injeção, de modo a possibilitar o perfeito funcionamento do motor.

As engrenagens da distribuição podem ter uma relação de 1:2, o que significa que cada rotação da árvore de manivelas corresponde a meia rotação da árvore de comando de válvulas. (LUZ, 2013). Na figura 8 tem-se a vista amplificada nas válvulas do comando.

Figura 8 – Vista das Válvulas de Comando



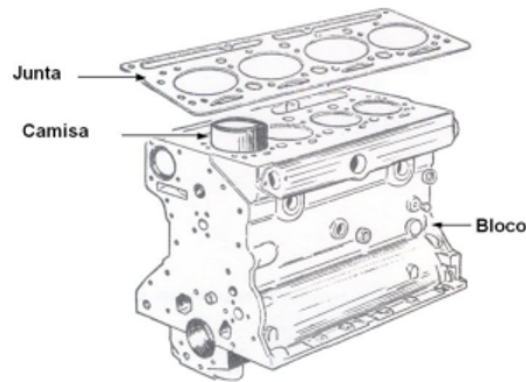
Fonte: (LUZ, 2013)

2.3.1.2 Bloco

O bloco é a parte central e maior do motor, sustentando as demais. Nesta estão localizados os cilindros, por onde irá percorrer o pistão do motor. Em sua maioria são feitos de ferro fundido, mas podem ser adicionados outros materiais a fim de melhorar as propriedades.

Alguns blocos possuem tubos removíveis que formam as paredes dos cilindros, chamadas de “camisas”. Estas camisas podem ser “úmidas” ou “secas”, conforme entrem ou não em contato com a água de refrigeração do motor (LUZ, 2013). A figura 9 traz a ilustração de um bloco de motor.

Figura 9 – Bloco do Motor



Fonte: (LUZ, 2013)

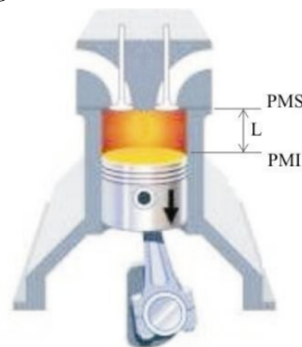
2.3.1.2.1 Cilindro

O cilindro é um furo no bloco aberto nas extremidades por onde irá correr o pistão. A fim de evitar desgaste do atrito dessas peças é colocado uma peça denominada camisa. Ela é normalmente fundida com o bloco do qual faz parte integrante (VARELLA; SANTOS, 2010).

2.3.1.2.2 Pistão

O pistão é o componente que se movimenta através do movimento de expansão dos gases, sendo fechado na parte superior e aberto na inferior. Seu movimento é linear, e a distância percorrida é sempre a mesma e recebe o nome de curso. O curso é caracterizado como sendo a distância entre o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI) do pistão, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Curso do Pistão



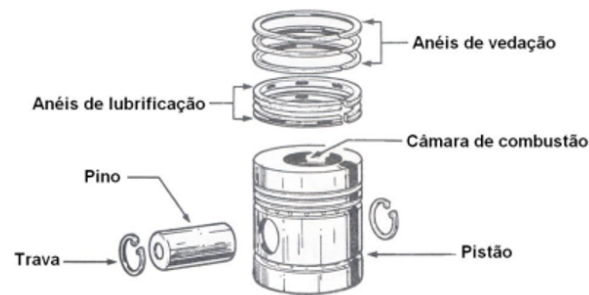
Fonte: (VARELLA; SANTOS, 2010)

Sua composição é normalmente, de ligas de alumínio (VARELLA; SANTOS, 2010). Nele, encontram-se dois tipos de anéis:

- anéis de vedação: estão mais próximos da parte superior (cabeça) do pistão e tem a função de impedir a passagem dos gases oriundos da compressão e os queimados para o cárter, de forma a manter a pressão constante sobre a cabeça do pistão.
- anéis de lubrificação: estão localizados na parte inferior do pistão e têm a finalidade de lubrificar e raspar o excesso de óleo que fica na parede do cilindro, levando-o para o cárter.

O pistão liga-se à biela através de um pino, o qual normalmente é fabricado com aço cementado (VARELLA; SANTOS, 2010). N figura 11 é possível identificar todos os componentes de um pistão de forma mais clara.

Figura 11 – Partes do Pistão

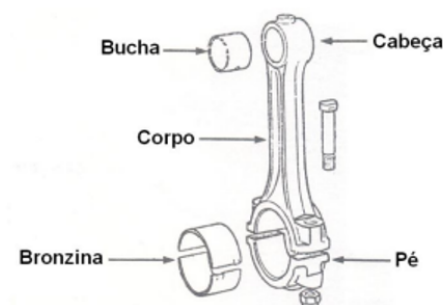


Fonte: (LUZ, 2013)

2.3.1.2.3 Biela

É a parte do motor que liga o pistão ao virabrequim e sua função é transmitir o movimento linear do pistão para a árvore de manivelas. Divide-se em três partes: cabeça, corpo e pé, conforme 12.

Figura 12 – Biela



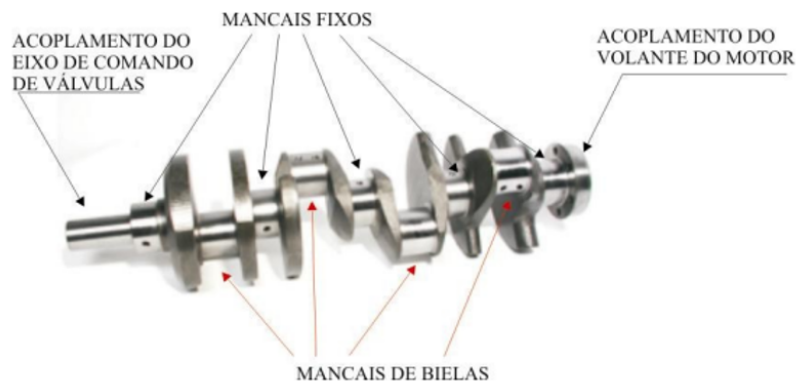
Fonte: (LUZ, 2013)

A cabeça é presa ao pistão pelo pino e o pé está ligado ao virabrequim através de um material chamado casquilho ou bronzina que servem para evitar desgaste do virabrequim. Entre a bronzina e o eixo existe uma folga por onde circula óleo lubrificante. O descrito acima é possível de identificar na figura 12.

2.3.1.2.4 *Árvore de Manivelas, Virabrequim ou Girabrequim*

Á árvore de manivelas possui na sua extremidade posterior um flange para acoplamento do volante do motor e na extremidade anterior um eixo para transmissão de rotação ao eixo de comando de válvulas. São normalmente fabricadas em aço ou aço fundido. A figura 13 ilustra árvore de manivelas de um motor de quatro cilindros.

Figura 13 – Virabrequim



Fonte: (VARELLA; SANTOS, 2010)

2.3.1.3 *Cárter*

O cárter é a parte inferior do motor e sua função é ser um depósito de óleo lubrificante do motor.

Figura 14 – Cárter



Fonte: (VARELLA; SANTOS, 2010)

2.3.2 Motor Diesel

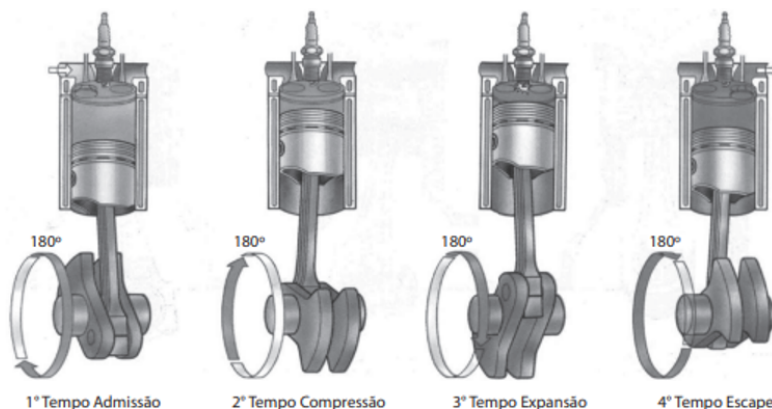
O Motor Diesel é um motor de combustão interna inventado no final do século XIX, com o objetivo de produzir energia mecânica, a partir de energia química armazenada nos combustíveis (LOURENÇO, 2010). Além de ser um MCI, ele recebe também a classificação de motor alternado, já que seu trabalho é obtido pelo movimento oscilatório de um pistão, transformado em rotação contínua por um sistema biela-manivela ((BRUNETTI, 2018)).

O motor diesel pode ser dividido entre dois ou quatro tempos. Denomina-se “tempo” o movimento do pistão de subida ou descida para realizar a função desde o início da admissão até a exaustão dos gases.

Afirma-se que uma combustão é rica quando a razão ar/combustível produz uma grande quantidade de monóxido de carbono, ou seja, quando há mais combustível injetado do que ar. Já nas misturas pobres, temos uma quantidade de ar maior que de combustível, ocasionando a produção de óxidos de nitrogênio.

A operação de um motor diesel 4 tempos pode ser dividida conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – 4 tempos do motor alternativo



Fonte: (BRUNETTI, 2018)

- Admissão: Nessa etapa, o pistão se desloca do PMS ao PMI. Por meio desse movimento, ocorre uma pressão negativa de tal forma a forçar o ar a entrar através da válvula de admissão, que está aberta.
- Compressão: Com as válvulas de admissão e escape fechadas, o pistão sobe. O ar admitido é comprimido até ocupar o volume da câmara de combustão. Devido a tal confinamento, o ar se aquece. Ao final de tale tapa, o bico injeto injeta o óleo diesel no interior da câmara e esse, em contato com o ar aquecido, se inflama, iniciando a combustão.

- **Expansão ou Combustão:** Com o início da combustão, o pistão começa a descer, devido a força de expansão dos gases queimados. Tal força é transmitida ao virabrequim, por intermédio do pistão e biela, levando a rotação do motor. Essa é a única etapa que produz energia. As demais consomem parte dessa energia.
- **Exaustão ou escape:** Com a válvula de escape aberta e a de admissão fechada, após a expansão, o pistão sobe, a fim de eliminar os gases queimados durante a etapa anterior.

Na figura 16 tem-se a relação da rotação com o ciclo operacional de cada um dos 4 cilindros.

Figura 16 – Sincronismo de funcionamento dos pistões

	0°	180°	360°	540°	720°
1	Expansão	Escape	Admissão	Compressão	
2	Escape	Admissão	Compressão	Expansão	
3	Compressão	Expansão	Escape	Admissão	
4	Admissão	Compressão	Expansão	Escape	

Ciclos do motor

Fonte: (BRUNETTI, 2018)

2.3.3 Sistema de Lubrificação

O sistema de lubrificação tem como função distribuir o óleo lubrificante entre as partes móveis do motor com objetivo de diminuir o desgaste, o ruído e auxiliar no arrefecimento do motor. Nos motores diesel de quatro tempos o óleo lubrificante é armazenado no cárter do motor. O fluxo de óleo é feito sob pressão através de galerias existentes no motor.

2.3.3.1 óleo Lubrificante

O óleo lubrificante é um fluido utilizado no sistema de lubrificação de motores e em sistemas de transmissão de tratores. É um produto extremamente importante para o processo, já que utilizado de forma incorreta prejudique o funcionamento ideal do motor. Óleos com viscosidade maior que a correta, por exemplo, não conseguem penetrar nas folgas, deixando de executar a lubrificação. Já óleos com viscosidade inferior escorrem entre as folgas e não realizam a lubrificação.

Dentre as funções a serem desempenhadas por eles, podemos citar, Segundo (VARELLA; SANTOS, 2010):

- Redução do atrito entre partes de ficam em contato.

- Agentes de limpeza, já que retiram particulados de metais que se formam durante o funcionamento do motor.
- Refrigeram o motor, retirando o excesso de calor.
- Proporcionam uma diminuição de ruído do Sistema.
- Impedem a passagem dos gases da câmara de combustão para o cárter, completando a vedação entre os anéis do pistão e a parede do cilindro.
- Amortecem os choques e as cargas entre os mancais.

2.3.4 Combustível para Motor Diesel

Dentre os combustíveis utilizados em motor diesel podemos citar: óleo diesel, biodiesel e álcool. Dentre eles, o óleo diesel é o mais utilizado em motores diesel. O mesmo é constituído principalmente por carbono, hidrogênio e pequenas concentrações de enxofre, nitrogênio e oxigênio.

Segundo (VARELLA; SANTOS, 2010), em termos de qualidade do óleo, alguns pontos são fundamentais para sua análise, sendo eles:

- Pureza: caracterizado pelo teor de água e sedimentos presentes no óleo diesel, provenientes do transporte e armazenamento inadequados do combustível. Seu excesso causa desgaste no motor, já que a água causa corrosão dos bicos injetores, combustão imperfeita e promove a formação de partículas de ferrugem. Os limites máximos previstos pela ANP (Agência Nacional do Petróleo) para presença de água e sedimentos no óleo diesel é de 0,05% em volume, isto é, para cada 50 ml de diesel o máximo permitido de água e sedimentos é 0,025 ml.
- Contagem de Partículas: Pesquisa e quantifica a presença de contaminantes no óleo diesel. Detecta tanto partículas metálicas como não metálicas inclusive sujeiras de fontes externas como, por exemplo, sílica.
- Densidade: É a relação entre massa e volume de óleo diesel a temperatura de 20°C, expressa em g/cm³. Dessa forma, variações na densidade tem influência direta na massa de combustível injetado, visto que a bomba injetora controla a injeção em função da variação do volume.
- Viscosidade: é caracterizada como sendo a resistência ao escoamento do óleo diesel em orifício padrão. Valores baixos de viscosidade acarretam desgaste excessivo e vazamentos na região de alimentação do motor (bomba e bicos injetores). Já para valores altos, tem-se um maior esforço da bomba injetora e atomização inadequada do combustível pelos bicos injetores.

- Número de Cetano: mede a qualidade de ignição do diesel e tem influência direta na partida do motor e no seu funcionamento sob carga. Fisicamente, o número de cetano se relaciona diretamente com o retardo da ignição do motor de modo que, quanto menor o número de cetano maior será o retardo da ignição. Conseqüentemente, maior será a quantidade de combustível que permanecerá na câmara sem queimar no tempo certo (PINHEIRO, 1998).
- Ponto de Fulgor: 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; MOURA, 1998).

Um ponto importante a ser destacado é que, além de todos os parâmetros citados anteriormente, no óleo há valores aceitáveis no que se refere a presença de cálcio, ferro, cobre, chumbo, alumínio, sílica, molibdênio e porcentagem de fuligem. Essa faixa ideal de aceite é um dos métodos utilizados para realizar manutenções preventivas quando eles começam a fugir dos valores ideais.

2.3.5 Desgaste

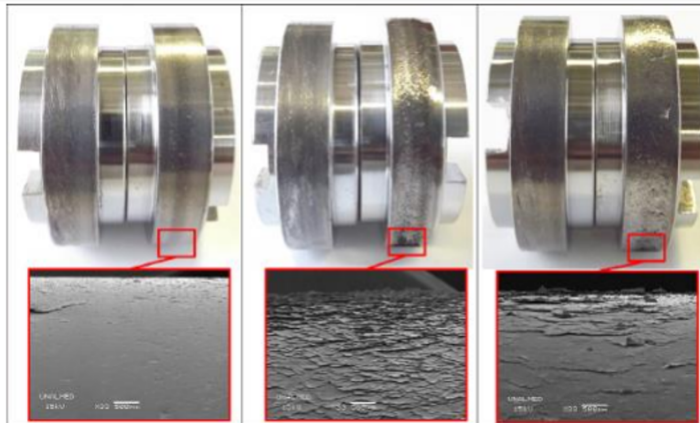
O desgaste é a perda progressiva ou remoção de material de uma ou ambas as superfícies em contato como resultado do movimento relativo entre eles (KUMAR; SEN, 2014). O mesmo é resultado na maioria das vezes, da ação mecânica, (oxidação, corrosão e outros processos químicos são exceções desta regra), portanto, o processo de desgaste depende, inicialmente, do processo de atrito (ZMITROWICZ, 2006).

Os principais tipos de desgaste podem ser divididos em:

- Desgaste adesivo: ocorre durante a ação combinada da adesão entre as asperezas e do movimento de deslizamento de duas superfícies em contato, gerando uma deformação plástica severa nas asperezas. Posteriormente ocorre um desprendimento de fragmentos de material da superfície mais macia, que são aderidos e transferidos para a superfície mais dura até serem convertidos em resíduos de desgaste. A transferência de material é o fenômeno que distingue o desgaste adesivo dos outros mecanismos de desgaste (RABINOWICZ; TANNER, 1966).
- Desgaste Abrasivo: quando partículas de um material são pressionadas contra outras partículas de dureza diferente. Nesse processo, a superfície mais dura acaba por deixar sulcos na superfície de menor dureza.
- Desgaste Corrosivo: quando ocorre a degradação de materiais devido a interação do mesmo com o ambiente.
- Desgaste por fadiga: gerado após submissão de tensões cíclicas, sejam por rolamento ou deslizamento. No caso do rolamento, a carga é aplicada na direção perpendicular à superfície, levando ao início das trincas na superfície, que crescem e faz com que

ocorra o desprendimento de grandes pedaços de material. No caso do deslizamento, a carga é aplicada na direção do deslizamento, levando a perda de material superficial. Tais exemplos são ilustrados nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Desgaste por Rolamento



Fonte: (MAYA-JOHNSON; SANTA; TORO, 2017)

Figura 18 – Desgaste por Deslizamento



Fonte: (HU et al., 2017)

2.4 Ferramentas de Qualidade de Projetos

As ferramentas de qualidade de um projeto nada mais são do que técnicas que utilizadas com a finalidade de definir, mensurar, analisar e propor soluções para os problemas que interferem no bom desempenho dos processos de trabalho (CARLOS, 2014). Além de conseguir agrupar as informações de forma mais clara, elas tornam o processo de tomada de decisão mais assertivo, de forma a se obter um foco a ser atacado para o problema encontrado.

Logo, elas se tornam de extrema importância para o processo de caracterização de falha do motor, já que trazem consigo, além de tratativas, qualidade para os planos de ação de forma a mitigar os problemas.

2.4.1 Método dos 5 Porquês

Essa metodologia foi desenvolvida no sistema Toyota de Produção, conhecido como *Lean Manufacturing* ou Produção Enxuta, na década de 80, na fábrica de automóveis da Toyota. O pioneiro de tal ação foi Taiichi Ono, pai do Sistema de Produção Toyota.

A técnica é simples, porém efetiva no processo de busca pela causa raiz do problema. Ela consiste em, após identificação do problema, perguntar o porque da ocorrência. Assim que uma resposta de um porquê for dada, deve-se perguntar novamente o “por quê”, já que é essa associação de perguntar e responder os “porquês” que leva a raiz do problema. De acordo com Weiss (2012), apesar de ter o nome de “5 porquês”, pode-se utilizar menos ou mais, de acordo com a necessidade que o problema exige da investigação. O autor ainda descreve de uma maneira mais simplificada os passos a serem seguidos para aplicação da metodologia, sendo eles:

1. Inicie a análise com a afirmação da situação que se deseja entender, ou seja, deve-se iniciar com o problema.
2. Pergunte por que a afirmação anterior é verdadeira.
3. Para a razão descrita que explica por quê a afirmação anterior é verdadeira, pergunte por quê novamente.
4. Continue perguntando por que até que não se possa mais perguntar mais por quês.
5. Ao cessar as respostas dos por quês significa que a causa raiz foi identificada.

2.4.2 Diagrama de Ishikawa

Para que haja entendimento por completo de uma causa raiz, é necessário entender todos os processos contemplados anteriormente ao período de falha. De acordo com (MARIANI, 2005), processo é a 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.

Nesse entendimento do processo, a relação de causa e efeito se torna imprescindível. Entende-se como efeito todo o resultado final, ou seja, consequência da causa. Já a causa é o meio que influenciou no resultado final do processo. Diante disso, o “diagrama de causa e efeito” ou “diagrama de espinha de peixe” ou até mesmo “diagrama de Ishikawa” busca reunir todas essas informações de forma clara e visual.

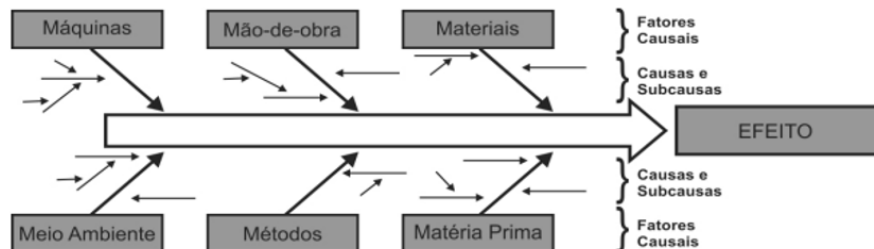
Segundo Junior (2010), o diagrama pode ser elaborado seguindo os seguintes passos:

- Determinar o problema;
- Relatar sobre as possíveis causas;
- Construir o diagrama agrupando as causas em “6M” (Método, Matéria-prima, Mão-de-obra, Máquinas, Medida, Meio Ambiente);
- Analisar o diagrama, a fim de identificar as causas verdadeiras;

- Correção do problema.

A figura 19 mostra esquematicamente como é representado o Diagrama de Ishikawa.

Figura 19 – Representação Gráfica do Diagrama de Ishikawa



Fonte: (CUATRECASAS, 2010)

2.4.3 *Brainstorming*

O *Brainstorming* foi desenvolvido formalmente em 1957 por Osborn, o qual argumentou que este MTF-I (métodos técnicas e ferramentas para inovação) aumenta a qualidade e a quantidade das ideias geradas pelos membros do grupo (PAULUS; DZINDOLET, 1993), ou seja, nada mais é do que uma ferramenta que visa estimular o encontro da causa raiz, estimulando o pensamento criativo, de forma a produzir um efeito total maior do que aquele produzido por esforços individuais. Por meio dele, é possível envolver diversos membros, até mesmo interdisciplinares, no processo de solução do problema.

Posto isso, torna-se uma ferramenta de qualidade extremamente importante, já que, ao reunir interdisciplinaridade, é possível conseguir mais informações sobre o problema, bem como ser mais assertivo no encontro da causa raiz do problema.

2.4.4 Metodologia RFRACAS

O Relatório de Falhas, Análise e Ações Corretivas (RFACAS), é um sistema de circuito fechado usado para melhorar a confiabilidade de um produto, serviço, processo ou aplicativo de software. O “circuito fechado” em um FRACAS refere-se à sistemática pela qual todos os problemas relatados são abordados, garantindo que, nenhuma falha ou incidente sejam perdidos.

Segundo pesquisas da RAC (*Reliability Analysis Center*) dos Estados Unidos o sistema FRACAS é apontado como (OLIVEIRA, 2007):

”A técnica ou tarefa de confiabilidade mais fundamental e importante entre todas as outras tarefas de acordo com grandes empresas de tecnologia altamente impactadas pelos requisitos de confiabilidade. A importância do FRACAS é indiscutível na indústria aeroespacial e de defesa, sendo base para a formação outros sistemas com os mesmos fundamentos, sendo ainda mais abrangente e atencioso as técnicas de priorização e análise.”

Falando de análise de falha de motor, RFRACAS se torna uma ferramenta muito utilizada para elaborar o processo como um todo, ou seja, reúne todas as informações,

desde o *brainstorming*, coleta de dados e análise da causa raiz, fechando o ciclo de falha analisando e concluindo o processo com uma ação mitigatória.

2.5 Conceitos de Manutenção

No que tange a manutenção, é importante abordar alguns conceitos que são utilizados de forma corriqueira. Dentre os mais importantes, podemos citar (VIANA, 2002):

- **Manutenção Corretiva:** manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a colocar um item em condições de executar uma função requerida, ou seja, é a intervenção necessária imediatamente para evitar graves consequências aos instrumentos de produção, à segurança do trabalhador ou ao meio ambiente.
- **Manutenção Preventiva:** classificado como todo serviço de manutenção realizado em máquinas que não estejam em falha, estando com isto em condições operacionais ou em estado de zero defeito. Logo, são serviços efetuados em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios prescritos, destinados a reduzir a probabilidade de falha, desta forma proporcionando bom andamento das atividades produtivas.
- **Manutenção Preditiva:** são tarefas de manutenção preventiva que visam acompanhar a máquina ou as peças, por monitoramento, por medições ou por controle estatístico e tentam prever a proximidade da ocorrência da falha. O objetivo de tal tipo de manutenção é determinar o tempo correto da necessidade da intervenção mantenedora, com isso evitando desmontagens para inspeção, visando a utilização de um componente até o máximo de sua vida útil.
- **Manutenção Programa:** manutenção executada de acordo com um programa preestabelecido.
- **Manutenção Planejada:** manutenção organizada e efetuada com previsão e controle. A manutenção preventiva sempre é planejada, enquanto a manutenção corretiva pode ou não ser planejada.
- **Pane:** é um estado de um item em falha.
- **falha:** término da capacidade de um item desempenhar a função requerida. Depois da falha o item tem um pane.
- **Defeito:** Qualquer desvio de uma característica de um item em relação a seus requeridos.

A parada inesperada desse equipamento devido a uma falha gera elevado prejuízo devido ao custo de reparo dos componentes danificados e ao lucro cessante. Entende-se por lucro cessante o tanto, em R\$, que o equipamento deixou de entregar de cana durante

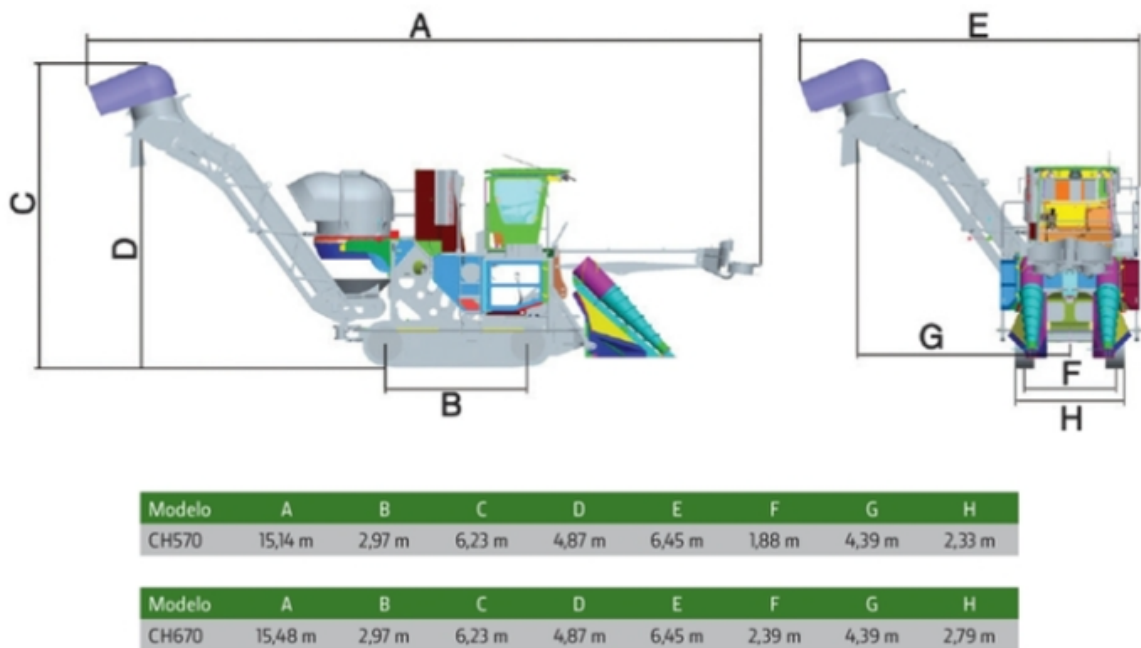
o tempo de parada. Deste modo, estudar as falhas para prevê-las se torna fundamental para o processo.

3 METODOLOGIA

Para a elaboração do relatório de análise de falhas é necessário seguir uma ordem cronológica de forma a analisar o problema para chegar em sua causa raiz e evitar que o mesmo ocorra novamente. Todas as informações mostradas foram coletadas durante o estudo realizado em uma empresa de bioenergia, na Unidade em Brotas.

O maquinário analisado trata-se de uma colhedora John Deere 9L CH670 específica, cujo número de frota para reconhecimento pela empresa é 18800. Seu modelo é ilustrado na Figura 20, bem como com suas respectivas medidas padrão para esse tipo de colhedora. Os dois modelos mais comuns no mercado desse tipo de maquinário são: CH670 e CH570. O primeiro diz respeito a colhedora denominada duas linhas, onde o espaçamento é alternado entre as linhas de cana, variando entre 0,9 m e 1,5 m. No segundo caso temos um colhedora com seus sistemas alinhados de tal forma que suas medidas são para a colheita em uma linha, ou seja, onde o espaçamento é denominado simples, distante 1,5m entre linhas.

Figura 20 – Medidas base de uma colhedora de cana Modelo CH670 E CH570



Fonte: Catálogo John Deere, 2006

Diante disso, acompanhar e gerenciar a vida dessas colhedoras, bem como dos equipamentos que a compõe se tornam pontos chave para um bom planejamento e cumprimento das demandas, de modo a evitar paradas inesperadas durante a operação. A análise do presente trabalho focou-se em um motor 9L de uma colhedora de cana-de-açúcar 2 linhas.

Posto isso, as etapas seguidas foram:

1. Coleta de informações básicas como: data, número de série do equipamento, local da

falha e sintomas observados durante o momento da falha abrupta.

2. Levantamento do histórico das manutenções realizadas no equipamento durante o período posterior a falha. Nessa etapa, as informações são retiradas do sistema de controle e manutenção da empresa, denominado MANFRO. Nele, são extraídos os seguintes pontos:
 - a) Manutenção Preditiva com a análise dos laudos de óleo lubrificante: verifica-se se os laudos anteriormente emitidos de forma a ver possíveis anomalias. Estas, por sua vez, podem ser sinais de desgaste de componentes ou contaminação externa, podendo auxiliar no processo de falha.
 - b) Manutenção Corretiva: Verifica-se se o equipamento em questão sofreu alguma manutenção corretiva não programada e em qual componente e/ou sistema o mesmo foi realizado.
3. Descrição detalhada da peritagem dos componentes do motor, de forma que:
 - a) Seja acompanhado o processo de desmontagem do motor.
 - b) Análise dos componentes do motor, identificado quais estão danificados e sinais de desgastes apresentados.
4. Utilização das ferramentas de qualidade. Tais ferramentas foram escolhidas pois são muito utilizadas no processo de tentativa de encontrar a causa raiz ou possíveis causas no processo de análise de falha:
 - a) *Brainstorming*: reunião das ideias para levantamento de possíveis causas para falha. Ao final, é necessário verificar quais das ideias serão levadas adiante baseado no processo visto dos itens 2, 3 e 4.
 - b) Análise de Causa: etapa tal responsável por levar adiante os pontos que fazem sentido do *brainstorming* e elaborar o Diagrama de Ishikawa e Método dos 5 Porquês. Ao final dessa etapa, a causa raiz tem que estar clara.
5. Plano de ação para mitigar a causa raiz.

Seguindo os passos acima mencionados, espera-se conseguir elaborar, de forma clara, uma análise do motor investigado, dado seu histórico de funcionamento até o momento de sua falha. Ao final, com os dados compilados utilizando as ferramentas de gestão, um plano de ação para mitigar tal problema será elaborado.

4 RESULTADOS

4.1 Informações Básicas Iniciais

Durante a operação de colheita mecanizada em uma fazenda situada no interior do estado de São Paulo, no início da operação do primeiro turno, por volta das dez horas e trinta minutos da noite, o motor de uma colhedora de cana de açúcar veio a falhar. Segundo informações do condutor da máquina, durante início da operação a máquina mostrou alguns sinais de perda de potência vindo, logo em seguida, parar abruptamente.

A partir disso, foram recolhidas as informações iniciais para início da análise informadas na tabela 1.

Tabela 1 – Informações gerais do motor e frota do equipamento.

Informações Gerais	
Data	09/03/2022
N° de frota	18800
Modelo	John Deere 3522 2L Colhedora
N° série do motor	J06090B011497
Horas trabalhadas do motor	2905 horas
Descrição inicial da falha	Motor travou e apresentou água no óleo

Seguindo o procedimento padrão em caso de falhas em motores, eles foram enviados para a central de reforma para a desmontagem, localizada na Unidade da usina em Barra Bonita.

4.2 Histórico de Manutenções

4.2.1 Manutenção Preditiva

4.2.1.1 Análise dos laudos de óleo lubrificante

Na Tabela 2 é possível identificar o histórico de análise de óleo do motor danificado.

Tabela 2 – Histórico de análise de óleo do motor com respectivos componentes em partes por milhão - ppm

Data	Na	TBN	Al	Fe	Cr	Si	Fuligem	Visc. 40°C	Visc. 100°C
Limite de referência	4*	50*	9*	61*	3*	24*	0*	109*	14,3*
16/12/2021	1	16,55	4	105	1	22	1,2	108,3	10,55
30/12/2021	1	14,35	4	21	1	27	1	107,4	10,12
14/01/2022	0	8,26	15	96	1	3	0,4	110,2	12,72
28/01/2022	2	9,72	0	11	1	12	0,1	103,3	13,97
10/02/2022	3	9,98	14	87	0	30	1,1	109,1	15,26
25/02/2022	4	6,84	5	127	2	22	0,7	119,5	17,43
08/03/2022	7	11,78	13	39	2	37	1,7	116,3	17,73
20/03/2022	8	11,15	3	16	0	22	0,8	120,2	20,88

Nela, contemplam-se as datas referentes a tais análises, bem como o limite de referência que indica o valor máximo que se pode obter de cada um dos elementos analisados nessa amostra. Os valores dos elementos químicos destacados estão todos em

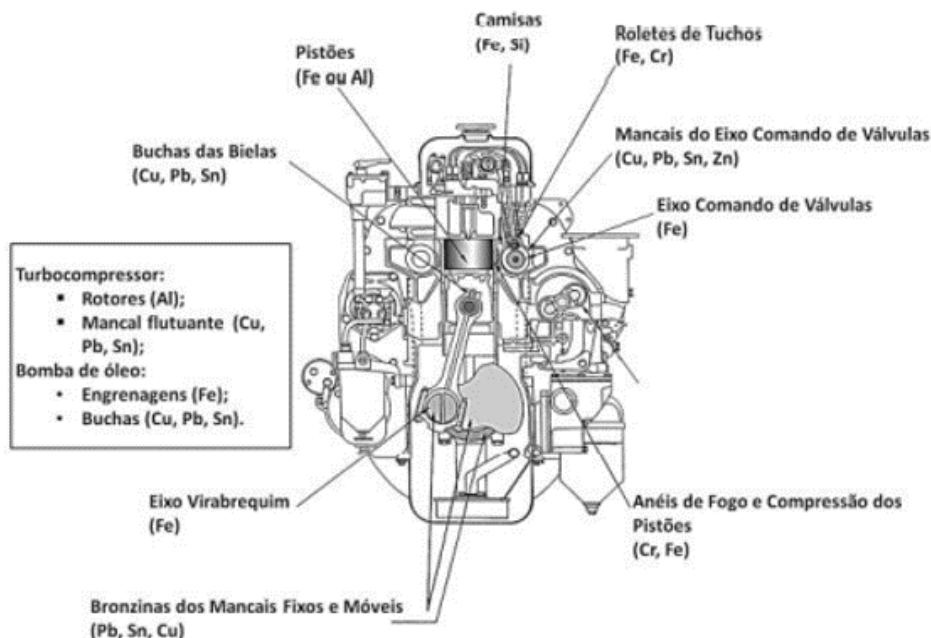
partes por milhão (ppm) e os dados de base de referência são fornecidos pelo laboratório da central de análise de óleo da empresa de bioenergia em questão.

A viscosidade encontra-se acima do normal para o óleo 15W40, tanto para temperatura de 40°C e 100°C, conforme valores de limite de referência evidenciados pela Tabela 2. Esse fator, aliado com a presença de sódio é grande indício do início de queima de líquido arrefecedor na câmara de combustão do motor diesel.

TBN, *Total Base Number*, é um indicador responsável por mensurar a quantidade de ácido expresso em miligrama de hidróxido de potássio por grama de óleo (mg KOH/g) necessário para neutralizar todos os componentes alcalinos presente em lubrificantes para motores de combustão, ou seja, tem a função de neutralizar os sub-produtos ácidos gerados durante a combustão, devida a presença de enxofre no diesel de forma a evitar corrosão dos componentes internos. Observou-se que o mesmo estava dentro do limite de referência indicado pela Tabela 2.

Na figura 21 é possível observar os principais elementos químicos que compõe algumas partes do motor. Tal relação é importante já que é possível associar os elementos encontrados na análise de óleo com o local que, provavelmente, eles vieram devido a possíveis desgastes.

Figura 21 – Motor Diesel e local dos principais elementos químicos



Fonte: Autoria Própria , 2022

Como é possível observar na Figura 21, em nenhum dos compartimentos do motor tem-se a presença de sódio. Isso se deve à característica de que o mesmo se encontra

apenas no líquido de arrefecimento do motor. Logo, sua presença na análise indica que houve a passagem de líquido de arrefecimento para a câmara de combustão. Isso prejudica o funcionamento do pistão, já que líquidos são de difícil compressão, diferentemente da mistura combustível e ar, ocasionando danos aos cilindros, pistões, hastes e outros compartimentos.

4.2.2 Manutenção Corretiva

Foi analisado o histórico de Manutenções Corretivas no motor, no período do início da Safra 21^o22, que corresponde a Abril de 2021, até o momento atual. Posto isso, o histórico de tais manutenções é ilustrado na Tabela ??.

Tabela 3 – Manutenções Corretivas feitas no motor no início da safra até o momento atual

Sistema	Sub-sistema	Tarefa	Descrição
motor	sub sistema de escape	montar	tubagem do escapamento soltou
motor	sub sistema de escape	reapertar	hélice do radiador pegando na tubagem
motor	sub sistema de escape	trocar	solda no primário
motor	radiador de água	verificar/testar	verificar a parte elétrica
motor	sub sistema elétrico	verificar/testar	verificar a parte elétrica
motor	sub sistema de escape	verificar/testar	estouro do cano de descarga do escapamento e sincronizar facão
motor	sub sistema de escape	trocar	braçadeira da turbina
motor	turbina	verificar/testar	travou esteira do elevador
motor	alimentação	trocar	problemas no ar condicionado
motor	bloco e cabeçote	verificar/testar	verificar excessivo na temperatura da água
motor	bomba d'água	trocar	verificar aumento de temperatura do motor
motor	sistema elétrico	trocar	verificar aumento de temperatura do motor
motor	mangueira/tubulação	verificar/testar	verificar motor/ perdendo força
motor	turbina	trocar	-
motor	admissão	trocar	perdendo potência
motor	alimentação	trocar	perdendo potência
motor	intercooler	verificar/testar	perdendo potência
motor	sub sistema elétrico	verificar/testar	perdendo potência
motor	turbina	verificar/testar	perdendo potência

Nessa tabela é possível identificar quando o equipamento teve que parar e sofrer manutenções que não estavam programadas. O apontamento de tais informações é feito no sistema Manfro e é possível identificar o sistema¹, sub sistema², tarefa a ser realizada para sanar o problema e descrição do motivo pelo qual foi necessário ocorrer tal manutenção.

¹conjunto de estruturas, inter relacionáveis, que atuam com o objetivo comum de dar suporte e/ou executar ações de manter ou reparar algo.

²conjunto de seções ou componentes necessários para a ação e funcionamento do sistema.

É possível observar que as últimas paradas corretivas indicam já a perda de potência do motor, bem como o sub sistema prejudicado antes do pane.

4.3 Descrição Detalhada da Peritagem do Motor

Iniciando o processo, foi analisada inicialmente o teste dos bicos injetores. Esses componentes possuem um valor padrão ideal de quantidade de combustível a ser injetada, sendo o limite da válvula de injeção no intervalo de 86 - 105 mL e da válvula de retorno com máximo de 50 mL. Se esse valor difere muito do ideal, ocorre uma maior ou menor combustível de gases, prejudicando o processo de combustão. Para a Tabela 4 inj. indica injeção e ret. indica retorno.

Tabela 4 – Teste dos bicos injetores

1° Cilindro		2° Cilindro		3° Cilindro		4° Cilindro		5° Cilindro		6° Cilindro	
Inj.	Ret.	Inj.	Ret.	Inj.	Ret.	Inj.	Ret.	Inj.	Ret.	Inj.	Ret.
90	36	90	35	92	70	92	50	X	X	X	X

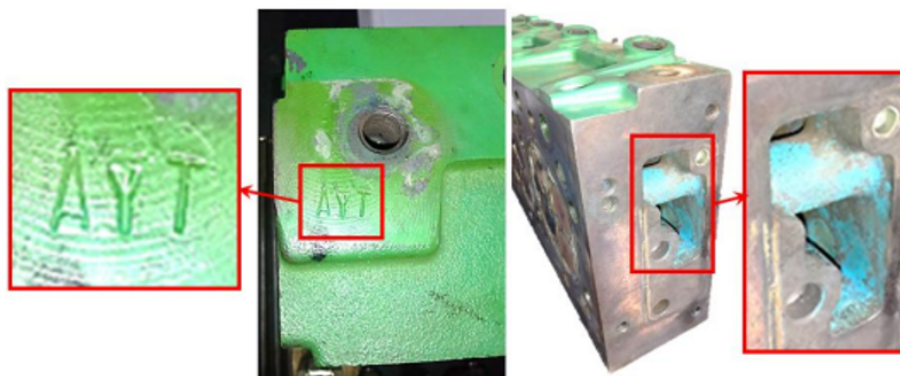
Para o teste de injeção dos bicos, o tempo de injeção foi de 1050 ms à 40°C. A análise dos bicos injetores indicam que os bicos do 3º e do 4º cilindros estavam não conformes, originando fuga de diesel para o retorno pela parte interna do injetor, devido à desgaste interno. Já para a análise dos bicos do 5º e do 6º cilindros, eles estavam não conformes, sem restrição de injeção, originando fuga direta de diesel para a camisa. Logo, não foi possível mensurar seu valor.

Passada essa etapa, iniciou-se a desmontagem do motor de forma a identificar a causa raiz do problema. Foi feita uma sequência lógica de etapas de desmontagem, desde a carcaça externa até os componentes internos.

4.3.1 Avaliação externa do cabeçote do motor diesel

No que diz respeito a parte externa do cabeçote, foi encontrado marcação “AYT”, vide Figura 22, não existente em cabeçotes novos.

Figura 22 – Cabeçote do motor diesel

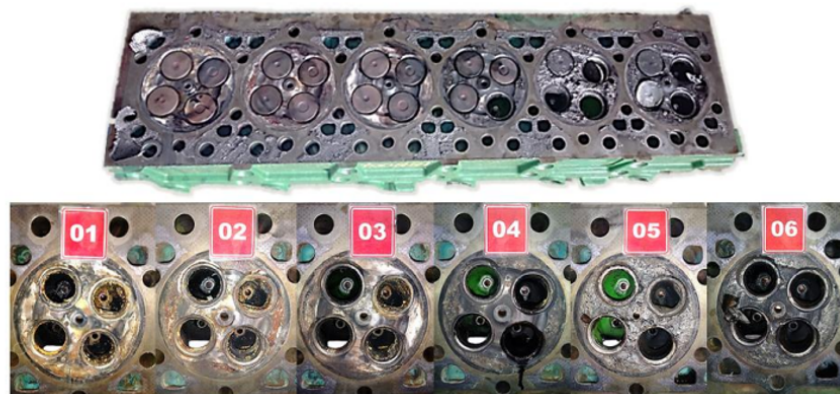


Além disso, notou-se pintura realizada internamente dentro das galerias de líquido arrefecedor (cor azul), admissão e escape (cor verde). A marcação é um indício de que o mesmo passou por reforma, já que, quando reformado, a empresa terceira marca a estrutura do motor de forma a identificar, por meio do código, quando o serviço foi realizado. Um motor sem reforma também não possui pintura nas galerias.

4.3.2 Avaliação inferior do cabeçote do motor diesel

No passo seguinte, foi dado início ao processo de desmontagem dos componentes internos do motor. O primeiro foi o cabeçote, indicado na figura 23.

Figura 23 – Vista inferior do cabeçote com válvulas montadas e com válvulas removidas



Fonte: Autoria Própria, 2022

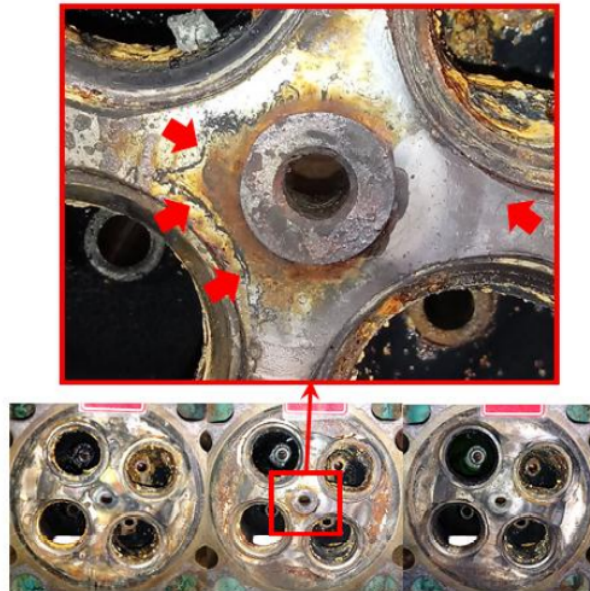
Durante desmontagem, foram identificadas avarias no cabeçote, sendo elas:

1. Vestígios da queima de líquido arrefecedor (caracterizada por superfícies embranquecidas e presença de oxidação) no 1º, 2º e 3º cilindro.
2. Válvula de admissão quebrada no 4º cilindro.
3. Válvulas de admissão/escape quebradas no 5º cilindro com marcas de impacto superficial na face do cabeçote e afundamento de material.
4. Válvulas de admissão/escape quebradas no 6º cilindro com marcas de impacto superficial na face do cabeçote e afundamento de material com fragmento de válvula presa a superfície.
5. Detalhe das trincas presentes entre válvulas de escape e admissão no cabeçote do 2º cilindro.
6. Identificação de quebra das 4º, 5º e 6º válvulas do cilindro devido ao impacto mecânico contra pistão/cabeçote
 - a) 4º cilindro – Quebra de uma válvula de admissão e leves danos na face da câmara de combustão.

- b) 5° cilindro – Quebra de uma válvula de escape e duas de admissão com danos severos à superfície da câmara de combustão, área da ponta do injetor de combustível e face de uma válvula de escape.
- c) o 6° cilindro - Quebra de duas válvulas de admissão, empeno de uma válvula de escape, área da ponta do injetor de combustível afundada e fragmento de válvula preso na superfície da câmara de combustão.

As avarias referentes ao 1°, 2° e 3° cilindro estão identificadas na figura 24. Já as referentes ao 4°, 5° e 6° cilindro estão na figura 25.

Figura 24 – - Vista da área inferior do cabeçote referente ao 1°, 2° e 3° cilindro



Fonte: Autorial Própria, 2022

Figura 25 – Vista da área inferior do cabeçote referente ao 4°, 5° e 6° cilindro respectivamente

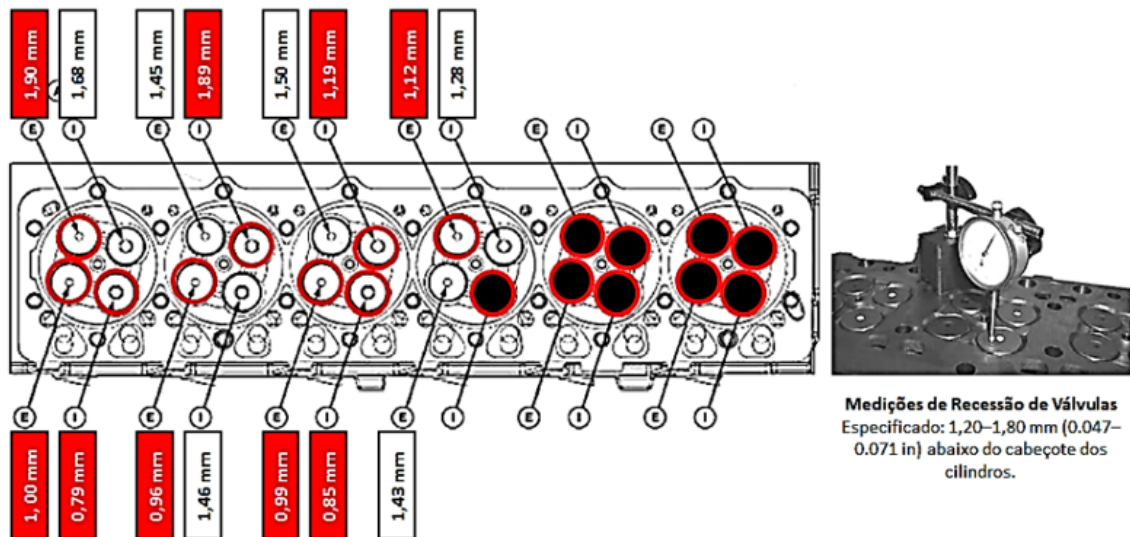


Fonte: Autorial Própria, 2022

4.3.3 Medições de recessão de válvulas

Em todos os cilindros existem sedes de válvulas com medidas irregulares conforme ilustrado na Figura 26, visto que o valor padrão é entre 1,20-1,80mm.

Figura 26 – Medições de recessão de válvulas



Fonte: Autoria Própria, 2022

Como visto na Figura 25 houveram quebras de válvulas devido impacto mecânico contra pistão/cabeçote e essas encontram-se em preto na Figura 26 pois não foi possível realizar o teste nelas.

Nesse teste, é utilizado um relógio comparador para medir o corpo da válvula e aparte do cabeçote logo ao lado da válvula. A diferença de altura corresponde a recessão indicada. As válvulas são responsáveis por controlar a entrada de ar e diesel para que ocorra a combustão. No caso de folga, pode-se ter uma mistura pobre (mais ar que o necessário), não ocorrendo a combustão correta, influenciando diretamente na potência de funcionamento do motor. Já para o caso de tal avaria levar a uma mistura rica (mais diesel que o necessário), tem-se sempre “sobra” de combustível que não é queimado. Dessa forma, em algum momento de compressão o motor pode vir a estourar os tuchos e falhar abruptamente o motor.

4.3.4 Avaliação dos bicos injetores de combustível

Retirado os 6 bicos injetores, foram encontrados os seguintes pontos:

1. 5° injetor – Amassamento da ponta do injetor de combustível devido à impactos sucessivos na face da câmara de combustão.
2. 6° injetor – Fratura frágil devido a impacto na face da câmara de combustão na região de assentamento da ponta do injetor de combustível.

Na Figura 27 foram destacadas as avarias encontradas de forma a elucidar melhor o descrito.

Figura 27 – Injetores de combustível (detalhe de amassamento da ponta do 5° injetor e fratura da ponta do 6° injetor de combustível)



Fonte: Autoria Própria, 2022

4.3.5 Avaliação do conjunto de válvulas de admissão e escape

As válvulas foram avaliadas e encontrou-se anomalias entre conjuntos do 1°, 2° e 3° cilindro no que diz respeito a formação de canais de desgaste na face de assentamento das válvulas com as sedes no cabeçote de forma alternada. Além disso, conjuntos de válvulas do 4°, 5° e 6° cilindro possuíam empenamento e fraturas visíveis devido a impactos provocados contra fragmentos e pistões na própria câmara de combustão, conforme mostra Figura 28.

Figura 28 – Injetores de combustível (detalhe de amassamento da ponta do 5° injetor e fratura da ponta do 6° injetor de combustível)



Fonte: Autoria Própria, 2022

4.3.6 Avaliação do conjunto de molas do cabeçote

Na Figura 29 é possível identificar o conjunto de molas desmontadas e agrupadas de acordo com os 6 cilindros. As molas referentes às válvulas do 1°, 2°, 3°, 4°, 5° e 6° cilindro apresentaram-se em condições normais, ou seja, sem sinais de desgaste, fraturas e oxidações.

Figura 29 – Conjunto de molas do cabeçote

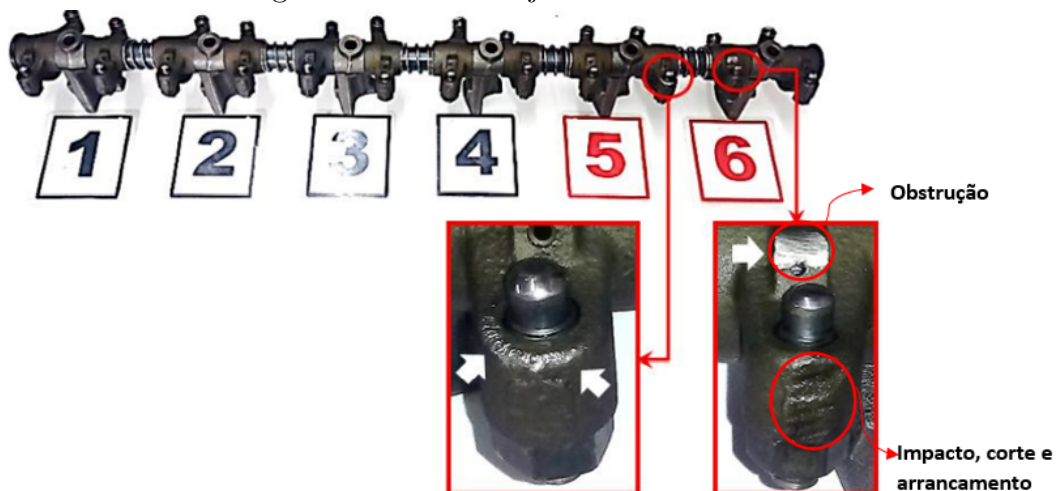


Fonte: Autoria Própria, 2022

4.3.7 Avaliação do Eixo conjunto de balancim

Partindo para a próxima análise, na Figura 30 é possível identificar o eixo do conjunto de balancim.

Figura 30 – Eixo conjunto de balancins



Fonte: Autoria Própria, 2022

Os balancins do 1°, 2°, 3° e 4° cilindros apresentaram-se em condições normais. Já no balancim de admissão do 5° cilindro foi evidenciado marcas de impacto próximo a base da face inferior do parafuso prisioneiro de ajuste.

O balancim de escape do 6° cilindro foi encontrado com marcas de impacto, além de corte superficial (devido à cisalhamento), arrancamento de material e obstrução do canal de lubrificação na região do parafuso prisioneiro de ajuste.

4.3.8 Avaliação das varetas de comando do balancim de admissão

A vareta de comando do balancim de admissão do 5º cilindro foi encontrada com empenamento devido à impacto e com desfiguração da face de contato com o parafuso de ajuste do respectivo balancim conforme mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Conjunto de varetas (detalhe da fratura na ponta e empeno da vareta de acionamento do balancim de escape do 5º cilindro)

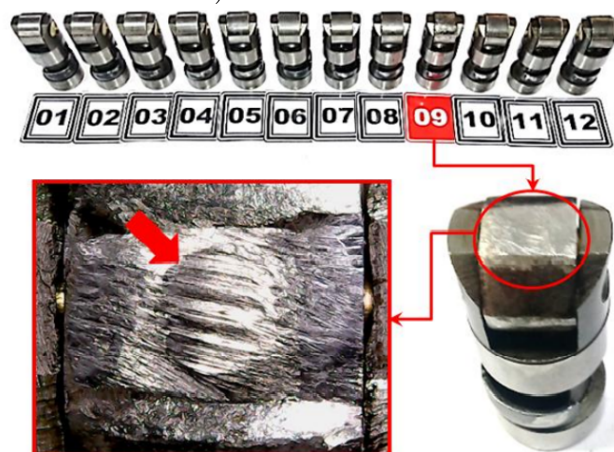


Fonte: Autoria Própria, 2022

4.3.9 Avaliação do conjunto de tuchos

Na Figura 32 é possível notar o desgaste apresentado no tucho n° 9, referente ao acionamento das válvulas de escape do 5º cilindro.

Figura 32 – Conjunto de tuchos (detalhe do desgaste do 9º tucho - acionamento do balancim de escape do 5º cilindro)



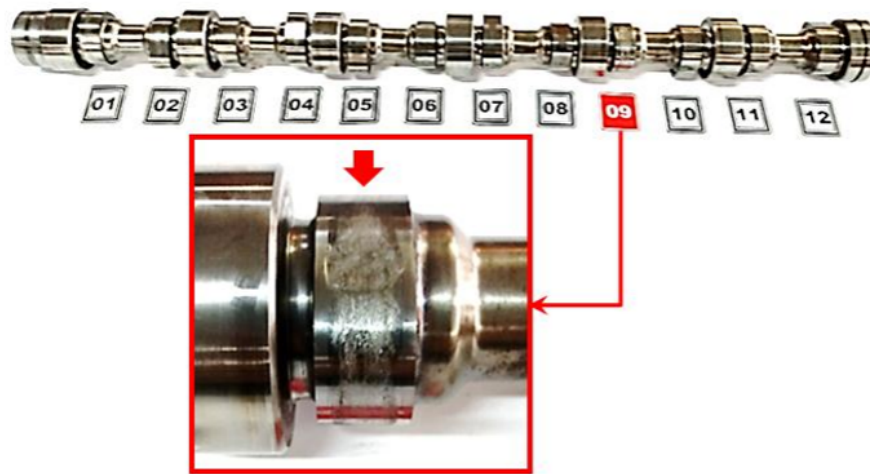
Fonte: Autoria Própria, 2022

Há também, detalhe na superfície do rolete mostrando que antes do desgaste adesivo por arraste entre as superfícies ocorreu impacto severo ocasionando afundamento superficial na forma arredondada (incomum para o desgaste de arraste contra o ressalto do eixo comando de válvulas).

4.3.10 Avaliação do eixo comando de válvulas

Avaliando o eixo do comando de válvulas, notado na Figura 33, identificou-se desgaste adesivo devido à alta tensão de contato na superfície do ressalto n° 9, referente ao comando das válvulas de escape do 5° cilindro.

Figura 33 – Eixo comando de válvulas (detalhe do desgaste no 9° ressalto referente a abertura/fechamento das válvulas de escape do 5° cilindro)



Fonte: Aatoria Própria, 2022

4.3.11 Conjunto de pistões

Os pistões desmontados são ilustrados na Figura 34.

Figura 34 – Conjunto de pistões (detalhe para a fratura na bucha do pino do pistão do 5° cilindro)



Fonte: Aatoria Própria, 2022

Sobre esses componentes, os referentes ao 1°, 2° e 3° cilindro possuíam parte superior da coroa embranquecida, além de oxidação leve, algo que evidencia a queima de líquido arrefecedor na câmara de combustão previamente mencionada. O pistão do 4° cilindro teve poucas marcas na superfície da câmara de combustão. O pistão do 5° cilindro foi observado com marcas severas de impacto e bucha do pino com fratura frágil devido à impacto. Por último, o pistão do 6° cilindro apresentava marcas severas de impacto.

Na figura 35 é possível identificar com maior riqueza de detalhe os desgastes dos pistões do 5° e 6° cilindro.

Figura 35 – Pistões do 5° e 6° cilindro



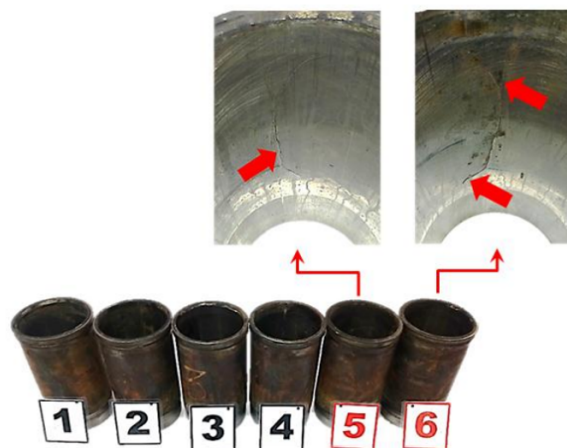
Fonte: Autoria Própria, 2022

Verificou-se que o pistão do 5° cilindro possuía furo passante com fragmento de válvula emperrada na superfície da coroa na câmara de combustão com marcas severas e amassamentos devido impacto por fragmentos de válvulas. O pistão do 6° cilindro possuía marcas severas e amassamentos devido à impacto por fragmentos de válvulas.

4.3.12 Conjunto de camisas

As camisas desmontadas são apresentadas na Figura 36.

Figura 36 – Conjunto de camisas (detalha nas camisas do 5° e 6° cilindro)



Fonte: Autoria Própria, 2022

As camisas do 1°, 2°, 3° e 4° cilindro apresentavam aspecto interno normal para a condição de desgaste devido à uso, mas as paredes externas estavam oxidadas devido à aparente utilização de água bruta ou fluido aditivo com concentração incorreta de glicol. As camisas do 5° e 6° cilindro foram encontradas com presença de trincas internas e paredes externas oxidadas.

4.3.13 Conjunto de bielas

As buchas das bielas encontravam-se em condições normais de desgaste, com exceção da bucha do olhal da biela do 2° cilindro. O desgaste irregular sugere algum tipo de degradação na lubrificação do 2° cilindro. Isso foi possivelmente consequência da queima de líquido arrefecedor devido à trinca nessa região do cabeçote evidenciada anteriormente. As bielas e suas buchas são ilustradas na Figura 37.

Figura 37 – Conjunto de bielas (detalhe para o desgaste acentuado na bucha do olhal da biela do 2° cilindro)



Fonte: Autoria Própria, 2022

4.3.14 Bronzinas dos mancais móveis

Bronzinas dos mancais móveis encontravam-se em condições normais, ou seja, desgastes relacionados apenas ao uso, podendo ser observado na Figura 38.

Figura 38 – Bronzinas dos mancais móveis



Fonte: Autoria Própria, 2022

4.3.15 Bronzinas dos mancais fixos

Foi percebida coloração escura na bronzina do 6° mancal e desgaste abrasivo entre dois corpos na bronzina do 7° mancal fixo, ambos indicados na Figura 39.

Figura 39 – Bronzinas dos mancais fixos (detalha para coloração anormal da bronzina do 6° mancal fixo e desgaste abrasivo na bronzina do 7° mancal fixo)



Fonte: Autoria Própria, 2022

4.3.16 Eixo Virabrequim

Foi encontrado desgaste abrasivo entre dois corpos no 7° mancal fixo do eixo virabrequim, conforme ilustrado Figura 40.

Figura 40 – Eixo virabrequim (detalhe do desgaste abrasivo no 7° mancal fixo)



Fonte: Autoria Própria, 2022

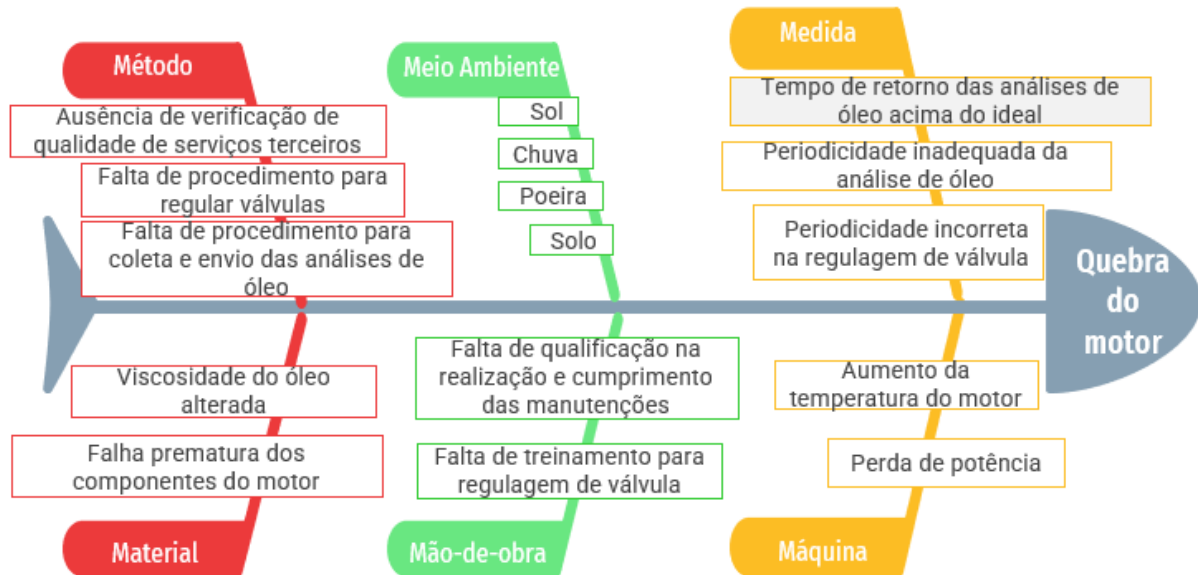
4.4 Análise de Falha

Analisando todos os dados, foi realizado um *Brainstorming* e reunido todas as possíveis causas para o problema. Após exclusão dos itens que não faziam sentido, obteve-se como resultado a elaboração das Metodologias de Qualidade descritas em seguir.

4.4.1 Diagrama de Ishikawa

Analisando todos os dados, foi elaborado o diagrama de Ishikawa para o motor com avarias.

Figura 41 – Diagrama de Ishikawa para o motor falhado



Fonte: Autoria Própria, 2022

De acordo com a Figura 41, baseado no método 6M de Ishikawa reuniram-se possíveis fatores críticos para ocorrência de falha do motor. Dentre as hipóteses levantadas, pode-se citar que, uma das possíveis causas raízes se encontra como sendo a falta de procedimentos para regulagem de válvulas, alteração no valor da viscosidade do óleo e falha prematura dos componentes do motor. Tal conclusão se deve pelo fato de que os outros fatores influenciam na aceleração do processo de desgaste do motor, porém eles são consequências das possíveis causas raízes. Logo, com a metodologia dos 5 Porquês, objetiva-se detalhar o real motivo de falha.

4.4.2 Metodologia dos 5 Porquês

Diante do *Brainstorming* realizado, foi elaborado os 5 porquês. Essa metodologia entra como processo auxiliador do encontro da causa raiz, juntamente com o Diagrama de Ishikawa já construído.

A Figura 42 ilustra um resumo da análise elaborada, de forma que, os pontos que possam ser as causas raízes estão na coluna das hipóteses e as respostas dos porquês consequentes estão nas suas respectivas colunas abaixo.

Figura 42 – Análise dos 5 porquês



Fonte: Autoria Própria, 2022

Diante dos levantamentos feitos, foi possível identificar realmente qual seria a real causa raiz, bem como as secundárias. Logo, a análise final trouxe consigo o seguinte panorama:

1. Recessão de válvulas com medidas irregulares (causa raiz): retifica de forma incorreta, ocasionando operação das válvulas durante muito tempo com recessão irregular.
2. Alta viscosidade do óleo (causa secundária): ocasionada como consequência da recessão de válvulas. item válvula do 5º cilindro apresenta fratura que aparenta ser a inicial (causa secundária): ocasionada como consequência da recessão de válvulas.
3. Percentual normal de fuligem durante a vida útil do motor diesel (causa secundária): ocasionada devido as trincas na região do cilindro. O mesmo apresentou problema como consequência da recessão de válvulas.

4.5 Plano de Ação

Por fim, após todos os dados compilados e encontrada a causa raiz, o plano de ação vem de forma a tentar mitigar o problema para a empresa. Dessa forma, a Tabela 5 elucida o elaborado diante da causa encontrada.

Tabela 5 – Plano de Ação para mitigação de falha.

<i>O que?</i>	<i>Como?</i>
Divulgar os problemas apresentados em função da aplicação de cabeçote retificado.	boletim de informações técnicas
Aplicação de cabeçotes e/ou peças avaliadas somente pela Central de Reforma da empresa e prestadores de serviço da Central de Reforma com garantia de qualidade do processo de reforma/recuperação bem como dos serviços prestados.	Reunião de alinhamento interno com supervisores para padronização da decisão

Um ponto a ser levado em consideração é que os pontos listados no plano de ação são monitorados dentro de uma plataforma integrativa da empresa, de forma que seja estabelecido datas e responsáveis pelo acompanhamento. A gestão é feita de forma a ser acompanhada pelos engenheiros da área e tem impacto direto nos indicadores de supervisores e disponibilizada para visualização de quaisquer outras unidades da empresa, de forma a não centralizar o conhecimento e problema em apenas um local.

5 CONCLUSÃO

Após análise técnica dos fatos evidenciados podemos deduzir que a causa mais provável da falha do motor diesel ocorreu devido ao longo tempo de operação com recessão de válvulas irregular, geração anormal de (material abrasivo), variações de viscosidade acima no normal (devido a contaminação por fuligem e queima de líquido arrefecedor – ocasionado pelas trincas na região do 2° cilindro).

Os fatores mencionados aceleraram desgaste e aumento de temperatura nos cilindros, provocando:

- fratura da válvula de admissão do 5° cilindro.
- impacto e fratura na coroa do pistão do 5° cilindro ponta do injetor.
- quebra da bucha do pino de pistão do 5° cilindro.
- trinca da camisa do 5° cilindro.
- colisão e fratura da válvula de escape do 5° cilindro.
- deformação/empeno da vareta de escape do 5° cilindro.
- impacto/arraste do 9° tucho contra o ressalto de admissão do eixo comando de válvulas provocando desgaste.

Como consequência dos fatos mencionados, em paralelo ocorreram os demais eventos: fraturas das válvulas de admissão e escape do 4° e 6° cilindro, trinca da camisa do 6° cilindro e fratura da ponta do injetor do 6° cilindro.

Diante dos fatos apresentados, é necessário perceber muito mais do que relatos sobre o estado do motor falhado. A sistemática envolvida na análise de falha contempla um modelo no qual é possível cercar várias variáveis que podem ocasionar o seu mal funcionamento, desde análises preventivas, preventivas e corretivas. Logo, é de suma importância a centralização de tais dados e o apontamento correto das manutenções realizadas, já que as mesmas impactam diretamente nas análises, sinalizando pontos falhos.

Além do mais, a elaboração de um relatório de falhas proporciona um processo de melhoria contínua para a empresa, já que o mesmo tem como objetivo evitar que os erros encontrados virem recorrentes, de forma a objetivar maiores disponibilidades para o maquinário e, conseqüentemente, maior ergonomia no processo de colheita de cana no que diz respeito a um sistema tão importante e de alto valor agregado para o planejamento orçamentário da empresa.

REFERÊNCIAS

- BANCHI, A. et al. Análise de reforma de colhedoras de cana-de-açúcar. **Revista AgriMotor**, v. 75, p. 40–43, 2012.
- BANCHI, A.; LOPES, J. R.; ROCCO, G. C. Estudo da eficiência de disponibilidade mecânica em frotas agrícolas. **Agrimotor** (47), p. 10–12, 2009.
- BRASIL. **Lei 11241/02 | Lei nº 11.241**. Governo do Estado de São Paulo, 2002. Disponível em: <<https://governo-sp.jusbrasil.com.br/legislacao/94008/lei-11241-02>>. Acesso em: 01.03.2022.
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna-Vol. 1**. [S.l.]: Editora Blucher, 2018.
- CARLOS, H. Ferramentas de qualidade. 2014.
- CARRETEIRO, R. P.; MOURA, C. R. **Lubrificantes e lubrificação**. [S.l.]: Makron, 1998.
- CUATRECASAS, L. **Lean management, la gestión competitiva por excelencia: implementación Progresiva en 7 etapas Editorial Profit**. [S.l.]: Barcelona, 2010.
- GOLDEMBERG, J.; NIGRO, F.; COELHO, S. Bioenergia no estado de são paulo: Situação atual. **Perspectivas, Barreiras e Propostas/–São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo**, 2008.
- HU, S. et al. The bi-gaussian theory to understand sliding wear and friction. **Tribology International**, Elsevier, v. 114, p. 186–191, 2017.
- JUNIOR, C. Aplicação da ferramenta da qualidade (diagrama de ishikawa) e do pdca no desenvolvimento de pesquisa para a reutilização dos resíduos sólidos de coco verde. **INGEPRO–Inovação, gestão e produção**, v. 2, n. 9, p. 104–112, 2010.
- KUMAR, S.; SEN, S. Selection of the material on the basis of wear and friction in journal bearing. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 3, n. 9, 2014.
- LOURENÇO, Á. D. M. Otimização de sistema de pós-tratamento de gases deescape do tipo catalisadores seletivos em motores diesel. **Campinas, SP:[sn]**, 2010.
- LUZ, M. L. G. S. D. **Motores a Combustão Interna**. [S.l.: s.n.], 2013.
- MARIANI, C. A. Método pdca e ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos industriais: um estudo de caso. **RAI-Revista de Administração e Inovação**, Universidade de São Paulo, v. 2, n. 2, p. 110–126, 2005.
- MAYA-JOHNSON, S.; SANTA, J. F.; TORO, A. Dry and lubricated wear of rail steel under rolling contact fatigue-wear mechanisms and crack growth. **Wear**, Elsevier, v. 380, p. 240–250, 2017.
- NEVES, J. et al. Carvalho filho, sm colheita mecanizada: desempenho operacional e econômico em cana sem queima prévia. 2000. 108 f. dissertação (mestrado em. **DESEMPENHO OPERACIONAL DE UMA COLHEDORA EM CANA CRUA NA REGIÃO**

DA GRANDE DOURADOS-MS, Universidade Federal da Grande Dourados, v. 28, n. 4, p. 16, 2009.

OLIVEIRA, S. M. d. **A gestão de programas de desenvolvimento: aplicação de confiabilidade, manutenibilidade e segurança**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.

ORBOLATO, C. C. et al. Avaliação do financiamento rural sobre o custo de produção e a viabilidade financeira em sistemas de criação de bovinos de corte.

PAULUS, P. B.; DZINDOLET, M. T. Social influence processes in group brainstorming. **Journal of personality and social psychology**, American Psychological Association, v. 64, n. 4, p. 575, 1993.

PINHEIRO. **Departamento de Engenharia Mecânica UFMG**. Belo Horizonte, MG, 1998. Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/liquidos/diesel/diesel.ht>>. Acesso em: 01.03.2022.

RABINOWICZ, E.; TANNER, R. Friction and wear of materials. **Journal of Applied Mechanics**, v. 33, n. 2, p. 479, 1966.

RONQUIM, C. C. Queimadas na colheita da cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos. **Embrapa Territorial-Documentos (INFOTECA-E)**, Campinas, SP: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010., 2010.

SANTAL. **Catálogo da colhedora de cana-de-açúcar S5010 VT**. Ribeirão Preto, SP, 2010. Disponível em: <<http://www.santal.com.br/produtos/s5010/>>. Acesso em: 01.03.2022.

SANTANNA, A. M. G. Disponibilidade mecânica de colhedoras de cana-de-açúcar: efeitos do tempo de uso na gestão da manutenção. Universidade Federal de São Carlos, 2020.

TORQUATO, S. A.; JESUS, K. R. E. de; 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. **Embrapa Meio Ambiente-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, Informações Econômicas, São Paulo, v. 45, n. 2, 2015., 2015.

VARELLA, C. A. A.; SANTOS, G. d. S. Noções básicas de motores diesel. **Apontamentos de Aula. UFRJ**, 2010.

VIANA, H. R. G. **PCM-Planejamento e Controle da manutenção**. [S.l.]: Qualitymark Editora Ltda, 2002.

VOLTARELLI, M. A. Ferramentas da qualidade na colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2015.

WEISS, A. E. **Key business solutions: essential problem-solving tools and techniques that every manager needs to know**. [S.l.]: Pearson UK, 2012.

ZMITROWICZ, A. Wear patterns and laws of wear—a review. **Journal of theoretical and applied mechanics**, v. 44, n. 2, p. 219–253, 2006.