



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Recife

Coordenação Acadêmica do Curso Superior em Engenharia Mecânica

Bacharelado em Engenharia Mecânica

JOSÉ THIAGO DE LIMA BARROS

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DA QUALIDADE E DE ANÁLISE DE DADOS
DE TELEMETRIA: UM ESTUDO DE CASO EM ESCAVADEIRA HIDRÁULICA**

Recife

2025

JOSÉ THIAGO DE LIMA BARROS

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DA QUALIDADE E DE ANÁLISE DE DADOS
DE TELEMETRIA: UM ESTUDO DE CASO EM ESCAVADEIRA HIDRÁULICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Coordenação da Graduação do Curso Superior
do Bacharelado Engenharia Mecânica, do Insti-
tuto Federal de Ensino, Ciência e Tecnologia de
Pernambuco, como requisito para obtenção de
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa

Recife

2025

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Danielle Castro da Silva CRB4/1457

B277a
2025

Barros, José Thiago de Lima

Aplicação de ferramentas da qualidade e de análise de dados de telemetria: um estudo de caso em escavadeira hidráulica. / José Thiago de Lima Barros. --- Recife: O autor, 2025.

97f. il. Color.

Trabalho de Conclusão (Curso Superior Tecnológico em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Pernambuco, Recife, 2025.

Inclui Referências.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Antônio Ochoa Villa.

1. Engenharia mecânica. 2. Telemetria. 3. PDCA. 4. Escavadeiras. I. Título. II. Villa, Alvaro Antonio Ochoa (orientador). III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 620.1

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DA QUALIDADE E DE ANÁLISE DE DADOS
DE TELEMETRIA: UM ESTUDO DE CASO EM ESCAVADEIRA HIDRÁULICA**

Trabalho Aprovado. Recife - Pernambuco, 01/12/2025.

Prof. Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa

Prof.^a Dr.^a Kamila Fernanda Ferreira da Cunha Queiroz

Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa

Recife

2025

Para todos, que assim como eu, possuem uma curiosidade quase infinita sobre o mundo e as coisas.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão, para todos que me ajudaram ao longo desses anos de graduação, pela resiliência e manutenção em uma formação complexa que é a Engenharia Mecânica e a conclusão dessa jornada de aprendizado e amadurecimento.

Aos meus Pais, Pedro e Patrícia Barros. Pela paciência e suporte nessa jornada. Por me apoiarem e incentivarem desde sempre ao estudo e a educação, e o meu irmão, Pedro Leite que vi nascer e ajudei a cuidar. A minha avó Nice que sempre foi uma segunda mãe para mim.

Ao meu orientador, Professor Alvaro Ochoa, pelo suporte, orientação e conhecimento compartilhado nas Disciplinas de Transferência de Calor I e II, que foram parte da base teórica para o presente trabalho, esperando que o mesmo possa contribuir para a comunidade científica e industrial como um todo.

Ao IFPE e ao SENAI-PE por terem sido as duas escolas para o mundo STEM.

Ao amigo Wellington Quintão, engenheiro internacional de soldagem, com quem tive vários aprendizados sobre métodos de soldagem, controle estatístico de processos, metodologias de análises de dados e técnicas de experimentos avançados.

Ao amigo Júlio César Medeiros, especialista em produtividade de máquinas pesadas, pelas informações acerca desses equipamentos de construção e mineração. Conhecimentos esses que me ajudaram na construção desse projeto, buscando a melhoria e a performance desses equipamentos tão importantes para a o desenvolvimento do Brasil.

Por fim, gostaria de agradecer aos amigos, em especial a Nathália, Lyalisson, Vitor e Lucas, que me acompanharam desde o início dessa jornada, e aos demais colegas de graduação, de trabalho, pelo tempo, auxílio e convivência.

“Não se gerencia o que não se mede, não se mede o que não se define, não se define o que não se entende, e não há sucesso no que não se gerencia.”

- William Edwards Deming

RESUMO

Em processos industriais, ferramentas de gestão da qualidade são utilizadas para garantir eficiência. A utilização de estatística industrial juntamente com dados de sistemas de controle e telemetria, ajudam engenheiros na tomada de decisões, com objetivo de se obter qualidade do produto ou melhoria de indicadores. Técnicas como o PDCA (Planejar, Executar, Checar e Agir) estruturam uma implementação de melhoria de maneira robusta. Para o presente trabalho, um processo será melhorado com uso dessas ferramentas. Em uma escavadeira hidráulica, que atua com carregamento de minério, dados telemáticos serão analisados. Uma ação de melhoria contínua com uso do PDCA será implementada, de forma a impactar em três aspectos fundamentais da operação: Consumo, performance e sustentabilidade. Após implementação, foi possível realizar uma redução do custo de consumo de combustível de um equipamento em cerca de R\$ 2.646,00, anualmente, onde, com a expansão da melhoria para a frota de escavadeiras, a economia pode chegar em até R\$ 31.752,00 por ano. Outro aspecto foi a redução do tempo de ciclo da operação que foi reduzido em até 51,04% após implementação da melhoria do processo. Por fim, também foi possível reduzir em média, 2,03% a taxa de emissões do equipamento entre as fases de adoção e implementação do procedimento proposto.

Palavras-Chave: Telemetria; PDCA; Dados; Qualidade, Escavadeiras.

ABSTRACT

In industrial processes, quality management tools are used to ensure efficiency. The use of industrial statistics together with data from control and telemetry systems helps engineers in decision-making, with the objective of achieving product quality or improving performance indicators. Techniques such as PDCA (Plan, Do, Check, and Act) provide a robust structure for implementing improvements. In the present study, a process is improved using these tools. Telemetry data from a hydraulic excavator operating in ore loading are analyzed. A continuous improvement action using the PDCA cycle is implemented to impact three fundamental aspects of the operation: consumption, performance, and sustainability. After implementation, it was possible to reduce the annual fuel consumption cost of a single piece of equipment by approximately R\$ 2.646,00. With the expansion of the improvement to the equipment fleet, savings can reach R\$ 31.752,00 per year. Another outcome was the reduction in the operation cycle time, which decreased by up to 51.04% after the implementation of the process improvement. Finally, it was also possible to achieve an average reduction of 2.03% in the equipment's emission rate between the adoption and implementation phases of the proposed procedure.

Keywords: Telemetry; PDCA; Data; Quality; Excavators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Publicações de Estudos Sobre Equipamentos Fora de Estrada x Veículos de Estrada	21
Figura 2 – Publicações de Artigos Sobre Escavadeiras	22
Figura 3 – Publicações Sobre Redução de Consumo De Combustível em Máquinas e Equipamentos Pesados	22
Figura 4 – Elementos Químicos nas Emissões de Motores a Diesel.....	25
Figura 5 - Aumento Percentual de Consumo (Ne) x Eficiência Operacional Em Máquinas de Construção (η)	26
Figura 6 – Fator de Emissões de NOx por Modos de Trabalho Equipamentos de Construção	27
Figura 7 – Publicações Anuais Sobre Telemetria Aplicada Na Agricultura	28
Figura 8 – Histogramas de Tempo Ciclo de Escavadeiras	29
Figura 9 – Carta de Controle de Tempo Ciclo de Escavadeiras	30
Figura 10 – Ciclo Diesel	32
Figura 11 - Torque X Rotação – Motores Otto e Diesel	33
Figura 12 - Motor a Diesel.....	35
Figura 13 - Diesel S10 (Esquerda) e Diesel S500 (Direita)	36
Figura 14 - Escavadeira Hidráulica	41
Figura 15 - Volume de Caçamba de Escavadeiras	42
Figura 16 - Ciclo PDCA	47
Figura 17 - Escavadeira Analisada	48
Figura 18 - Etapas 1 e 2 do Ciclo - Fase PLAN	49
Figura 19 - Etapas 3 e 4 do Ciclo - Fase PLAN	50
Figura 20 – Ciclo PDCA.....	52
Figura 21 - HITACHI - Maintenance PRO ®	55
Figura 22 – Dados Tabelados.....	55
Figura 23 - Curva de Torque x Potência – Motor Escavadeira	60
Figura 24 – Corpo de Bombas de Deslocamento Variável	62
Figura 25 - Motor 6 Cilindros Analisado.....	62
Figura 26 - Análise de Dados de Produção – JASP	63
Figura 27 – Fluxo de Carregamento	66

Figura 28 - Tempo Médio Ocioso – em 60 Minutos	68
Figura 29 - Tempo Médio Carregando – em 60 Minutos	68
Figura 30 - Tempo Médio Girando – em 60 Minutos.....	69
Figura 31 - Média de Tempo Trabalhado em 60 Min x Consumo de Combustível em 60 minutos	69
Figura 32 - Média de Tempo Trabalhado em 60 Min x Emissões de Kg de CO2e em 60 minutos	70
Figura 33 - Pressão Média no Sistema Hidráulico.....	70
Figura 34 - Potência Utilizada x Taxa de Consumo de Combustível	71
Figura 35 – Distribuição de Potência, em kW – Fase Plan.....	72
Figura 36 – Distribuição de Pressões das Bombas, em MPA – Fase Plan.....	72
Figura 37 – Distribuição de Potência, em kW – Fase Do	73
Figura 38 – Distribuição de Pressões das Bombas, em MPA – Fase Do	73
Figura 39 – Distribuição de Potência, em kW – Fase Check	74
Figura 40 – Distribuição de Pressões das Bombas, em MPA – Fase Check.....	74
Figura 41 - Reposicionamento da Máquina - Fase Do/Check.....	76
Figura 42 – Distribuição de Tempo de Ciclo - Fase PLAN/DO.....	77
Figura 43 – Distribuição de Tempo de Ciclo - Fase DO/CHECK.....	77
Figura 44 – Eficiência da Escavadeira e Proporção de Tempo Não Ocioso e Ocioso	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Considerações da Análise.....	56
Tabela 2 - Amostragem de Produção.....	58
Tabela 3 - Distribuição dos Dados de Telemetria por Fase	61
Tabela 4 – Estatísticas de Carga no Motor – Fase PLAN	72
Tabela 5 – Estatísticas de Carga no Motor – Fase DO	73
Tabela 6 – Estatísticas de Carga no Motor – Fase CHECK.....	75
Tabela 7 - Estatística Descritiva – Fase PLAN.....	76
Tabela 8 - Estatística Descritiva – DO/CHECK	76
Tabela 9 - Correlação – Fase PLAN	79
Tabela 10 - Correlação - DO/CHECK.....	79
Tabela 11 – Teste de Shapiro - Wilk	81
Tabela 12 – Teste T Para Amostras Dependentes	81
Tabela 13 - Comparativo – Operação - PLAN X CHECK.....	83
Tabela 14 - Comparativo – Performance em 60 Minutos - PLAN X CHECK.....	84
Tabela 15 - Comparativo – Taxas de Consumo – Durante e Depois da Implementação da Padronização – DO X CHECK.....	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais Máquinas e Equipamentos Fora de Estrada.....	24
Quadro 2 - Comparativo Químico do Óleos Diesel	37
Quadro 3 - Análise de Métodos e Desperdícios	51
Quadro 4 - Variáveis Analisadas do Motor x Operação	54
Quadro 5 - Características do Motor Analisado.....	61
Quadro 6 – Ajuste de Utilização	65

LISTA DE ABREVIATURAS

CAN	Controller Area Network
CEP	Controle Estatístico de Processos
CI	Compression Ignition
DTC	Diagnostic Trouble Code
ECU	Electronic Control Unit
EGR	Exhaust Gas Recirculation
ISO	International Organization for Standardization
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Informação
NRMM	Non Road Mobile Machinery
OBD	On-Board Diagnostics
PM	Massa de Partículas
PMI	Ponto Morto Superior
PMS	Ponto Morto Inferior
PN	Número de Partículas
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
POP	Procedimento Operacional Padrão
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos
SI	Spark Ignition

LISTA DE SIMBOLOS

$R\$$	Real brasileiro
$\%DFE$	Percentual de Disponibilidade Física
HT	Tempo Total de Horas em Trabalho Efetivo
HP	Tempo Total de Horas em Parada
TDC	Total de Carregamentos
IT	Tempo Planejado para Operação
TC	Tempo de Ciclo Por Carregamento
d_{oper}	Dias Operacionais
$\overline{h_{liqu}}$	Média de Horas de Operação por Dia
$\overline{h_{car}}$	Média de Tempo por Ciclo
$\%FE$	Fator de Enchimento da Caçamba
Q_w	Volume de Carregamento da Caçamba
P_{es}	Peso Específico do Material
C_{max}	Massa Máxima Admissível de Carregamento
T_{ce}	Tempo de Ciclo da Escavadeira
\dot{m}_f	Taxa Mássica de Consumo de Combustível
$E_{CO_{2e}}$	Quantidade de Emissões de Dióxido de Carbono Equivalente
n	Número de Amostras
s	Desvio Padrão Amostral
σ	Desvio Padrão Populacional
\bar{x}	Média Amostral
B	Erro Máximo
z_{α}	Valor Crítico de Confiança

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivos Gerais	18
1.2.2 Objetivos Específicos	18
1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	19
2 ESTADO DA ARTE	21
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
3.1 CICLOS DE COMBUSTÃO	31
3.2 COMPONENTES MOTORES A DIESEL	34
3.3 COMBUSTÍVEL.....	35
3.4 SISTEMAS DE GERENCIAMENTO E PÓS-TRATAMENTO	38
3.5 ESCAVADEIRAS HIDRÁULICAS	40
3.5.1 Disponibilidade Física do Equipamento	41
3.5.2 Total de Carregamentos	42
3.5.3 Fator de Enchimento da Caçamba	42
3.5.4 Tempo de Ciclo da Escavadeira	43
3.5.5 Taxa de Consumo de Combustível	44
3.5.6 Quantidade de Emissões de Dióxido de Carbono Equivalente	44
3.6 PDCA	45
4 METODOLOGIA	48
4.1 PROCESSO DE CARREGAMENTO.....	49
4.2 AMOSTRAGEM	53
4.2.1 Amostragem de Dados Operacionais	56
4.2.2. Amostragem de Dados do Motor	59

4.3 MATEMÁTICA COMPUTACIONAL.....	63
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	64
5.1 PADRONIZAÇÃO – FASE DO.....	64
5.2 RESULTADOS DOS EFEITOS OPERACIONAIS.....	67
5.2.1. Análise de Dados de Telemetria	67
5.2.2 Análise de Dados de Operação.....	75
5.2.3 Análise Operacional Final.....	82
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	86
6.1. CONCLUSÕES FINAIS.....	86
6.2. TRABALHOS FUTUROS	88
REFERÊNCIAS.....	89
ANEXOS.....	95

1 INTRODUÇÃO

A escavadeira hidráulica é um dos equipamentos mais comuns em engenharia. Sua aplicação é diversificada, sendo utilizada em diversos setores industriais como mineração, agricultura, energia etc.

Segundo um levantamento realizado pela Associação Brasileira de Tecnologia de Construção e Mineração, entre 2022 e 2024, estima-se que 27 mil escavadeiras foram adquiridas no território nacional (Sobratema, 2025, p. 32). Em um relatório de 2025 sobre a frota de máquinas pesadas do Brasil, a estimativa de representação de escavadeiras na frota nacional é de 39% (Modor, 2025).

No Brasil, a estimativa da propulsão de equipamentos de construção é de aproximadamente 91% a motores a combustão interna, em sua maioria, motores a diesel (Modor, 2025). A depender da aplicação, uma escavadeira pode consumir até 36 litros de diesel a cada hora de trabalho (Caterpillar, 2022). Um consumo de combustível fora da especificação, como sintoma, representa falhas mecânicas ou operacionais (Armac, 2022).

As escavadeiras modernas são constituídas de sistemas de controle que auxiliam o funcionamento do motor para reduzir consumo de combustível. Atrelado a interface de pós-tratamento de emissões, esses equipamentos, atualmente, possuem sistemas de telemetria. Honório et al. (2024) relata que para as organizações que possuem frota de equipamentos, utilizar a telemetria para acompanhar é vital para reduzir riscos operacionais e melhorar as condições de atuação.

Segundo a Armac (2022), o uso adequado do monitoramento de dados pode melhorar uma operação, reduzir o consumo, e minimizar um dos principais indicadores de perda operacional de máquinas e equipamentos que é a ociosidade. O tempo ocioso é definido como o tempo que o equipamento fica parado sem realizar alguma atividade ou ação, mas com o motor em funcionamento, principalmente em regimes de baixa rotação.

O impacto sobre a utilização alta do equipamento em regime ocioso é a redução da eficiência do motor e o aumento da poluição. Para Rapanello (2025), o monitoramento dessa variável é importante pois o tempo ocioso pode representar até 15% do consumo total de combustível em uma frota.

Além do tempo ocioso impactar negativamente no processo produtivo, o motor a combustão interna sobre períodos muitos longos de baixa rotação e ociosidade tem sua vida útil reduzida (Rapanello, 2025). No contexto das emissões, o Departamento de Energia dos Estados Unidos, em 2015, estimou que cerca de 30 milhões de toneladas de dióxido de carbono eram geradas por ano apenas devido ao funcionamento de motores em ociosidade (DOE, 2015).

Mesmo com a adesão de tecnologias de propulsão como motores elétricos, tal sistema demanda uma infraestrutura considerável das cidades para se tornarem viáveis em larga escala, o que gerará um tempo considerável para uma eletrificação completa da frota (Durieux, 2022). O cenário se torna mais complexo, principalmente, quando se trata de ambientes agrícolas, canteiros de obras, ou minas que se encontram fora das grandes cidades, onde existe a demanda de escavação e carregamento.

A variabilidade da aplicação de escavadeiras requer abordagens individuais de análises (Armac, 2025). Apesar disso, segundo Honório et al. (2024, p. 3), uma abordagem geral é possível desde que seja estruturada e fundamentada por meio de dados e análises.

Com isso, o presente trabalho se propõe a desenvolver uma análise metodológica e padronização, aplicado em escavadeiras hidráulicas, e replicável a diferentes tipos de máquinas industriais, com objetivo de investigar aspectos do processo da qual está inserida, utilizando dados de performance do motor e da operação a fim de resolver um problema de desperdício de combustível e ociosidade. Para isso, os dados de telemetria são utilizados e analisados por meio de técnicas estatísticas e com uso da ferramenta de melhoria contínua, o PDCA.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em um cenário de necessidade de aumento de infraestrutura, juntamente com o volume de frota crescente, redução de custos e preocupações acerca de questões ambientais, justifica-se definir uma metodologia de análise desses equipamentos, utilizando técnicas industriais robustas, a fim de poder impactar positivamente na redução dos custos da frota nacional.

Considerando um equipamento que opere cerca de 9 horas por dia, ao longo de um período de mês, uma escavadeira de porte médio pode consumir 3600 litros de diesel (Psu, 2024). Com preço médio do diesel por litros no Brasil de R\$ 6,00 (Petrobrás, 2025), a operação de um equipamento pode custar mais de R\$ 20 mil reais. Esse custo expandido para uma frota de até 10 equipamentos, o custo total de operação chega a R\$ 200 mil reais de combustível.

É nesse contexto que o uso de ferramentas da qualidade, como o PDCA e técnicas estatísticas podem garantir a padronização e a produtividade do processo produtivo de escavadeiras, em uma frota de várias máquinas, impactando nos custos do processo.

Vicente (2021) relata que o uso da técnica do PDCA é amplamente utilizado na indústria para melhoria contínua, definindo o PDCA como ferramenta universal, uma vez as quatro etapas distintas permitem quem o processo de implementação de melhoria aconteça de forma padrão. Atrelar essa técnica com o acompanhamento telemático de frota, torna-se necessário principalmente em um período de necessidade de otimização de custos, eficiência energética e redução de emissões de poluentes.

1.2 OBJETIVOS

Nessa seção, os objetivos da qual o trabalho irá atender serão definidos.

1.2.1 Objetivos Gerais

Analisar, com uso do PDCA, estatística e telemetria, os impactos da aplicação de uma escavadeira hidráulica a diesel antes e depois de uma melhoria operacional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir o fluxo de análise com o ciclo PDCA, juntamente com as variáveis de estudo da escavadeira. Coletar e organizar dados de telemetria;

- Analisar as métricas de operação, determinando quais variáveis tem maior impacto na utilização do equipamento e gerar uma proposta de procedimento operacional padrão para o equipamento;
- Validar o modelo proposto em um período posterior a fase de aplicação do procedimento operacional, comparando de consumo de combustível, pós padronização;
- Publicar os resultados obtidos dessa implementação em workshop, congressos ou outros.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho de conclusão de curso está estruturado em capítulos que visam abranger o projeto proposto do início ao fim.

O capítulo 1, a introdução, tem como objetivo, inserir o leitor a problemática e ao cenário atual que o trabalho deseja atuar, tratando do cenário de redução de emissões no Brasil atrelada à questão do consumo eficiente de combustível. Além de apresentar os objetivos gerais e específicos para o projeto, junto com a estrutura do trabalho.

O capítulo 2, que é o estado da arte, é uma síntese dos estudos mais recentes, encontrados, acerca dos motores a diesel, normativas e análises de eficiência de motores e combustíveis.

O capítulo 3 da fundamentação teórica, terá a revisão literária do tema, retratando os artigos, e livros, que serviram para fundamentar o trabalho proposto. Também terá toda a base teórica que servirá ao leitor para entender acerca do tema proposto, e fundamentar o projeto.

O capítulo 4, que é a metodologia, tem como objetivo, estruturar as ações para o trabalho proposto, com foco em atender os objetivos gerais e específicos do trabalho, estruturados no método de melhoria contínua, o PDCA (plan, do, check, act).

O capítulo 5, são os resultados obtidos das análises geradas na metodologia, bem como o foco no modelo de procedimento operacional proposto, como a validação dele.

O capítulo 6 são as conclusões obtidas acerca do trabalho desenvolvido, bem como as observações e propostas para futuros trabalhos a serem gerados com base no tema proposto.

Por fim, nas referências, temos referências utilizadas no trabalho, utilizadas para fundamentação, para consultas futuras do leitor.

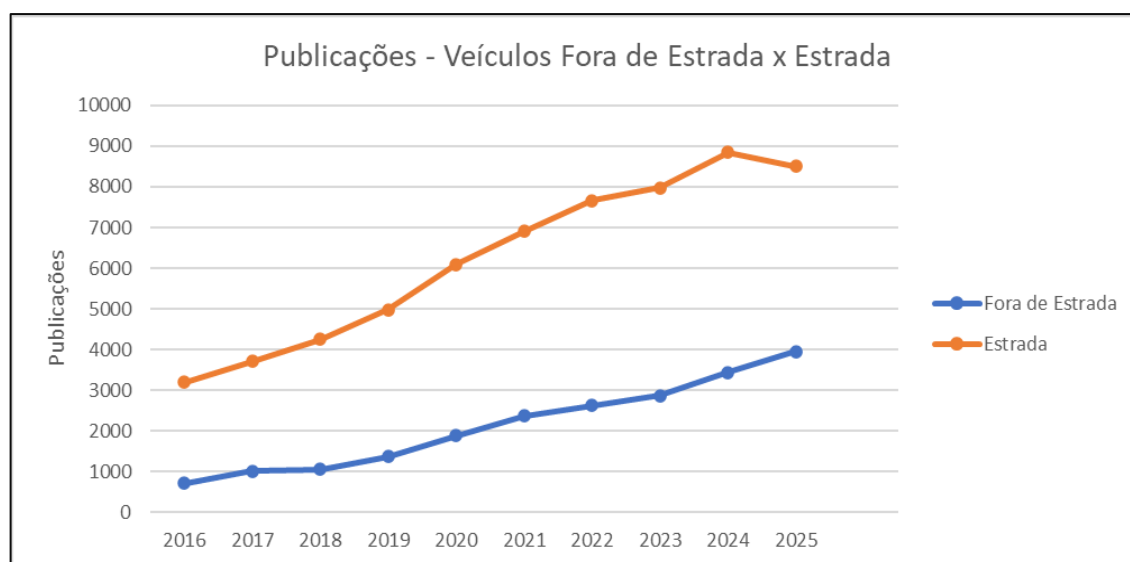
2 ESTADO DA ARTE

O presente capítulo discutirá, referências encontradas sobre o escopo tratado no projeto, e que serviram para a construção do estudo.

Durante o processo de avaliação do estado da arte, uma lacuna observada, citada em comum aos artigos lidos, é de que equipamentos não rodoviários são menos pesquisados que equipamentos rodoviários. Apesar disso, as pesquisas sobre esses dispositivos, no cenário acadêmico, têm crescido ao longo de uma década.

Segundo a plataforma Dimensions Analytics (Figura 1), no período entre 2016 e 2025, foram geradas, mais de 28 mil publicações, em língua inglesa, sobre esses maquinários, com mais de 750 mil citações. Estudos sobre escavadeiras, tem crescido também ao longo da década. Dimensions cataloga cerca de 31 mil publicações foram geradas sobre esse tipo de equipamento e mais de 420 mil citações sobre o tema (Figura 2).

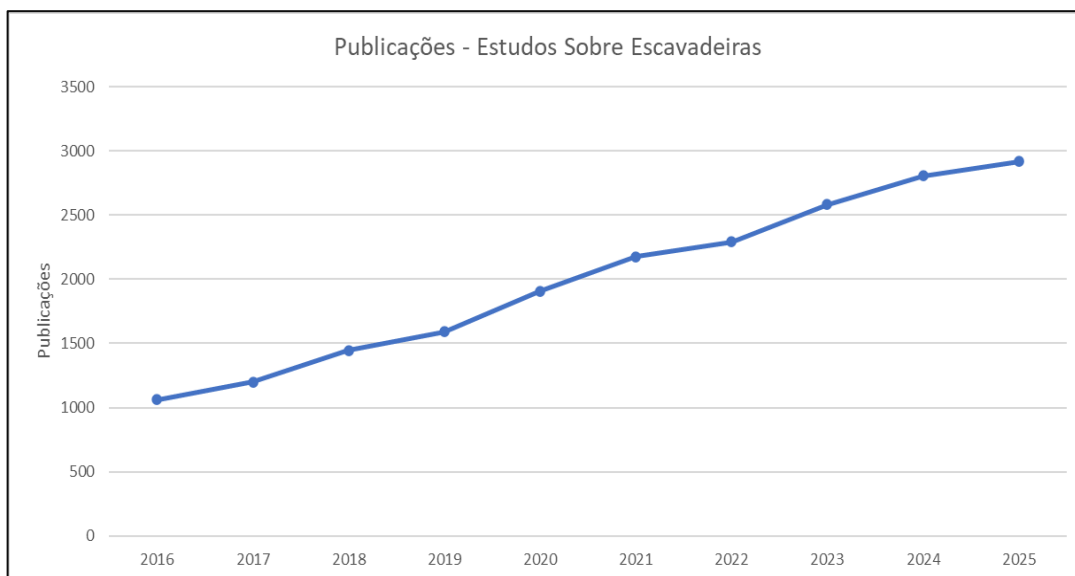
Figura 1 – Publicações de Estudos Sobre Equipamentos Fora de Estrada x Veículos de Estrada



Fonte: Adaptado de Dimensions (2025)

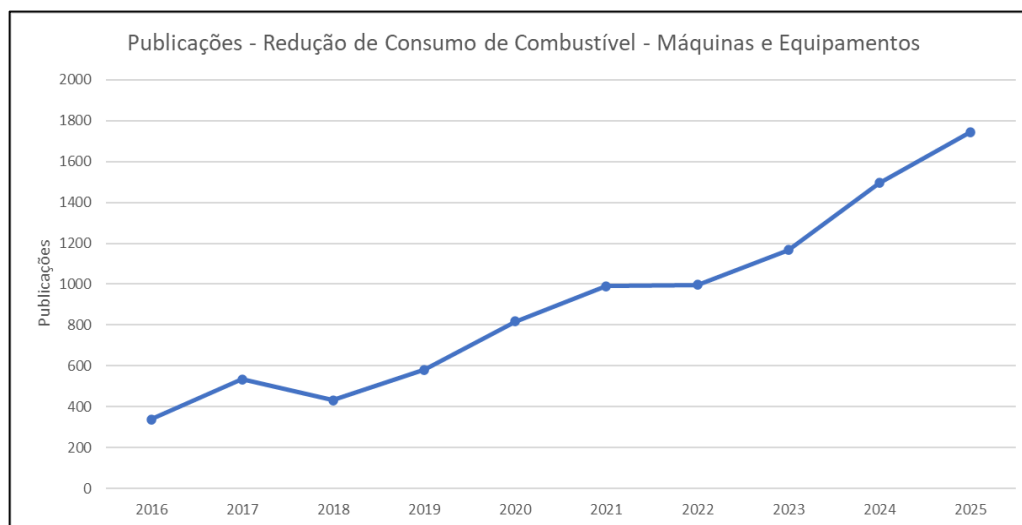
O cenário se assemelha quando se avalia estudos sobre consumo de combustível entre equipamentos fora de estrada. O buscador utilizado reporta 12 mil publicações sobre o tema, especificamente tratados sobre equipamentos fora de estrada, gerando 345 mil citações dos artigos (Figura 3).

Figura 2 – Publicações de Artigos Sobre Escavadeiras



Fonte: Adaptado de Dimensions (2025)

Figura 3 – Publicações Sobre Redução de Consumo De Combustível em Máquinas e Equipamentos Pesados



Fonte: Adaptado de Dimensions (2025)

Hagan et al. (2023) escreveu um artigo sobre emissões, regulamentações e consumo de equipamentos fora de estrada. A autora define que, ao estudarmos equipamentos não rodoviários (Quadro 1), existem uma variabilidade de aplicações que podem existir, e realizar o monitoramento desses equipamentos, devido a essa variabilidade, pode ser um fator de complexidade.

Avaliando em termos históricos, o artigo assume que os estudos acerca dos níveis de emissões desses equipamentos iniciaram mais precisamente no início dos anos 90.

Hagan et al. (2023) cita um estudo realizado pelo Escritório Federal da Suíça para Assuntos do Meio Ambiente, onde a pesquisa destaca que equipamentos fora de estrada triplicaram o consumo de combustível entre 1980 e 2015, e as análises de tendência mostram que os valores de esse valor sejam aumentados em até 20% até 2050.

Dados de análises mais antigas são mais escassos. O artigo avalia que, em comparação com os veículos rodoviários, as regulamentações acerca desses equipamentos foram desenvolvidas em atraso em relação aos equipamentos rodoviários.

É interessante notar que, segundo a autora, as emissões em veículos à passeio têm decrescido em proporção considerável em relação aos níveis de emissões de equipamentos não rodoviários, o que pode gerar uma superação desses em relação ao anterior. A decorrência desse crescimento se dá principalmente pela expansão urbana com o aumento das demandas de construção civil e infraestrutura nas cidades, entretanto, as reduções de material particulado reduziram entre 2005 e 2010, cerca de 28% como resultados das normas específicas para esses equipamentos que foram criadas no cenário Europeu, endurecendo padrões de produção e uso como adequação de sistemas de catalisação e filtragem de partículas.

O impacto dos motores desses equipamentos, que em sua maioria, são a diesel, acerca dos níveis de poluição nas cidades é motivo de debate e de legislações específicas para essa forma de equipamento ao redor do mundo. Atualmente, os níveis de emissões são determinados por meio de concentrações de partículas de elementos químicos responsáveis pelos efeitos da chuva ácida, estufa e dos danos à camada de ozônio.

Em combustão, as emissões geradas resultam em particulados desses elementos que estão presentes na atmosfera, como oxigênio (O₂), dióxido de carbono (CO₂), água e vapor (H₂O) e nitrogênio (N₂) (Figura 4), porém, existem também os particulados que são gerados no processo que são responsáveis pelo efeitos nocivos à saúde e ao meio ambiente como os hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (Nox), óxidos de enxofre (SOx) e pelo material particulado que resulta das combustões incompletas, como a fuligem (Braum, 2004).

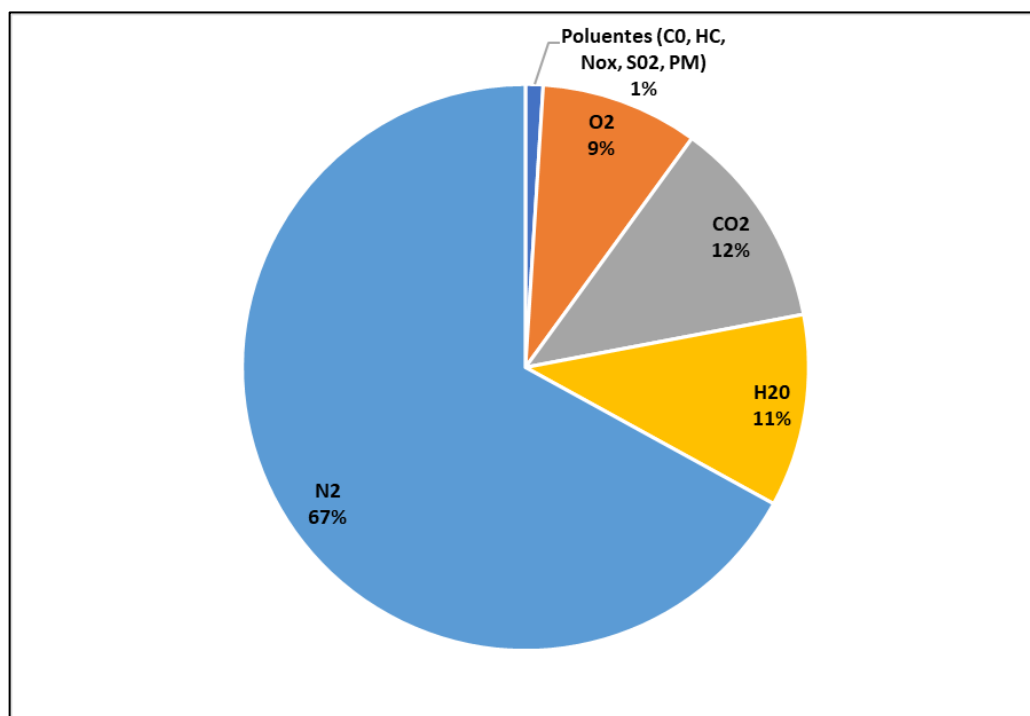
Outro aspecto dentro da própria análise de Hagan et al. (2023) é a comparação das emissões entre equipamentos agrícolas e equipamentos de construção, como escavadeiras.

Em termos de avaliação, os equipamentos possuem similaridades, uma vez que demonstram gerarem os mesmos produtos no processo de combustão como os Nox e material articulado. Esses, sendo maior produzidos, segundo a autora, em equipamentos agrícolas em relação aos equipamentos de construção, porém, os equipamentos de construção favorecem em maior produção de emissões de dióxido de carbono (CO₂).

Quadro 1 - Principais Máquinas e Equipamentos Fora de Estrada

Agricultura	Construção	Logística	Energia
Colheitadeiras	Escavadeiras	Locomotivas	Geradores
Tratores Agrícolas	Carregadeiras	Embarcações	Turbinas a Vapor
Drones	Tratores de Esteira	Aviões	
Plantadeiras	Motoniveladoras	Veículos OR	

Fonte: Hagan et al (2023). Adaptado pelo Autor.

Figura 4 – Elementos Químicos nas Emissões de Motores a Diesel

Fonte: Adaptado de Sharma (2019)

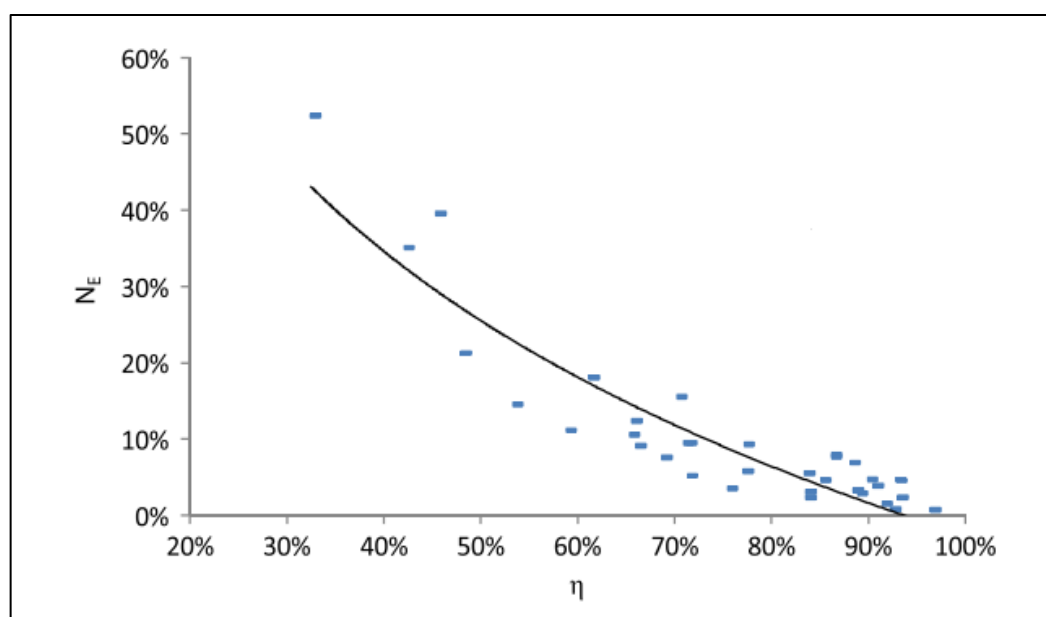
Lewis et al. (2013) avalia os efeitos da ociosidade no consumo de combustível em equipamentos de construção, comparando 34 tipos de equipamentos, entre eles, escavadeiras.

Lewis et al. (2013) retrata a dificuldade de se comparar equipamentos de construção devido à ausência de dados públicos. Segundo o autor, os estudos mais antigos sobre os equipamentos de construção em relação ao uso de combustível nos efeitos das emissões, foram conduzidos, principalmente, pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), sendo essa, uma das principais regulamentadoras de motores a combustão para equipamentos de construção e agricultura.

Segundo Lewis, a redução da eficiência operacional resulta em um consumo horário menor (ou seja, em litros ou galões por hora), porém, gera-se aumento do consumo total e das emissões devido a decorrência da redução da produtividade. Matematicamente, o autor equaciona percentual de combustível extra consumido em relação da eficiência operacional do equipamento. A análise indicou uma relação inversa entre os dois aspectos analisados. Um equipamento mais eficiente

operacionalmente, ou seja, com baixa ociosidade, tem uma performance melhor em relação ao equipamento menos eficiente (Figura 5).

Figura 5 - Aumento Percentual de Consumo (N^E) x Eficiência Operacional Em Máquinas de Construção (η)



Fonte: Lewis et al. (2013)

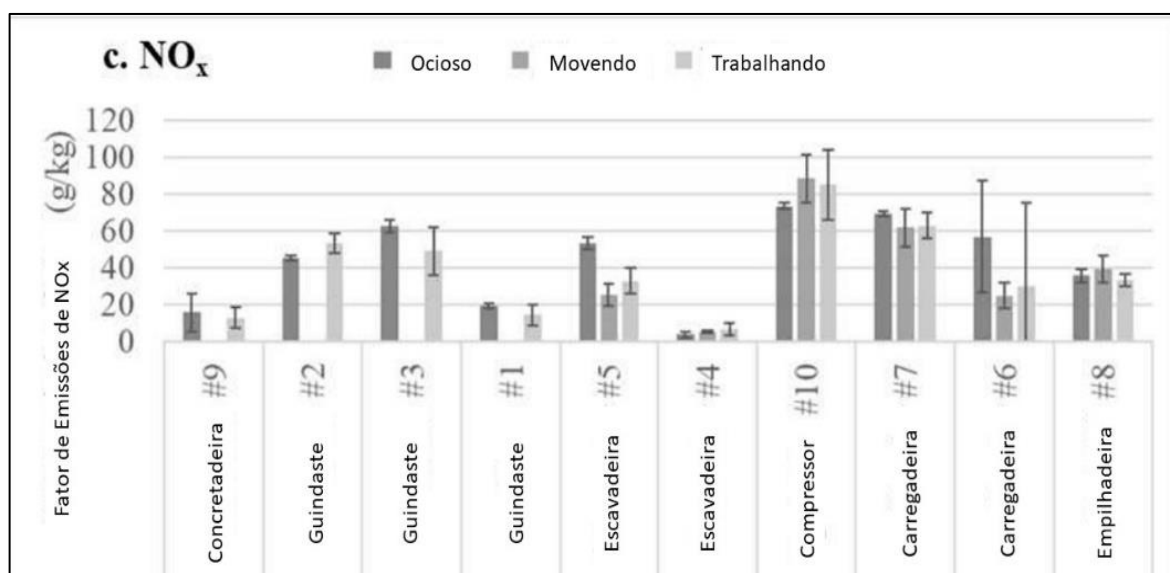
Tu et al. (2021) realizou uma comparação em diferentes equipamentos de construção em relação a geração de poluentes. Um aspecto interessante sobre o estudo, de Tu, é o comparativo do efeito da ociosidade em termos de emissões. Mesmo em diferentes motores, com níveis de homologações diferentes, o regime de motor em baixa rotação foi o que mais gerou particulados de elementos químicos nocivos (Figura 6).

O estudo de Tu et al. (2021) mostrou que, em média, motores que atuam em modo ocioso geram 43% mais emissões de poluentes que se movendo e 34% do que trabalhando. O problema está no aspecto da combustão incompleta gerada no motor em regimes de baixa rotação Tu et al. (2021, pg. 8).

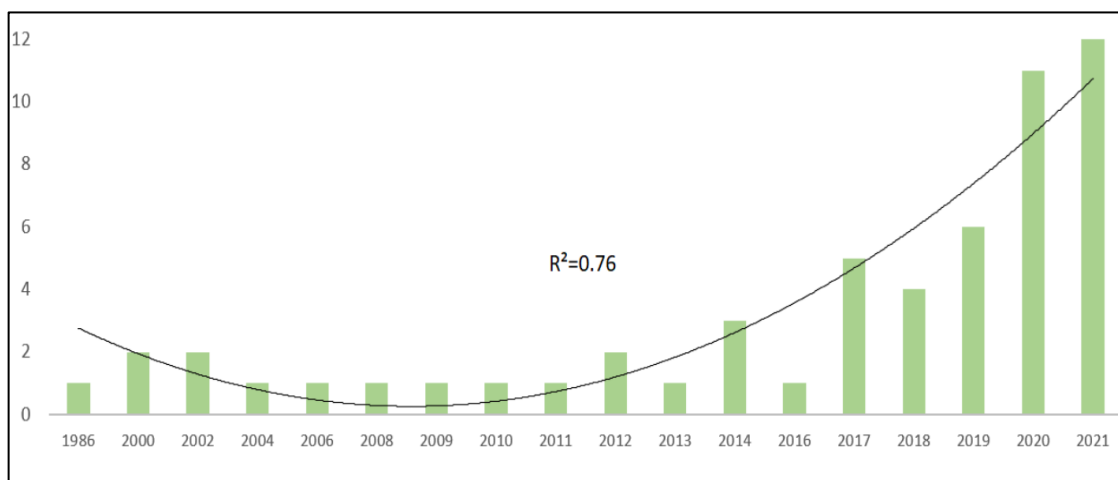
Tu et al. (2021), Hagan et al. (2023) e Lewis et al. (2013) retrataram bem os efeitos poluidores e consumidores dos equipamentos de construção. Tu e Hagan demonstraram que, equipamentos de construção com motores a diesel, favorecem as emissões de geração de dióxido de carbono e óxido de nitrogênio como poluentes. Lewis mostra o efeito da eficiência operacional para reduzir o consumo e a geração de poluentes durante o funcionamento de equipamentos de construção.

A utilização de telemetria como ferramenta para avaliar os aspectos produtivos e de emissão para equipamentos fora de estrada é fundamental para o gerenciamento desses dispositivos. Marques et al. (2022) realizou um estudo bibliométrico de publicações sobre telemetria aplicada a máquinas e equipamentos na agricultura, e retratou que o interesse sobre essa ferramenta vem crescendo ao longo dos anos (Figura 7). Entre 2016 e 2021, o interesse no assunto gerou um aumento de mais de 200% de publicações encontrados na plataforma Scopus da editora holandesa Elsevier.

Figura 6 – Fator de Emissões de NO_x por Modos de Trabalho Equipamentos de Construção



Fonte: Adaptado de Tu et al. (2021)

Figura 7 – Publicações Anuais Sobre Telemetria Aplicada Na Agricultura

Fonte: Adaptado de Marques et al. (2022)

Durante a pesquisa de referenciais teóricos, foi observado que o interesse em telemetria, está se expandindo também em equipamentos de construção, apesar de estar mais difundida no cenário agrícola. A aplicação em agricultura, de telemetria, impacta principalmente no mapeamento de terrenos, informações ambientais de terrenos, solo, climatologia e outros aspectos do ambiente para auxiliar agricultores no processo de produção.

Mahamedi et al. (2021) retrata que a utilização dessa ferramenta com escavadeiras, possibilita o controle da produtividade. O custo operacional de equipamentos representa um dos principais custos em um projeto de construção.

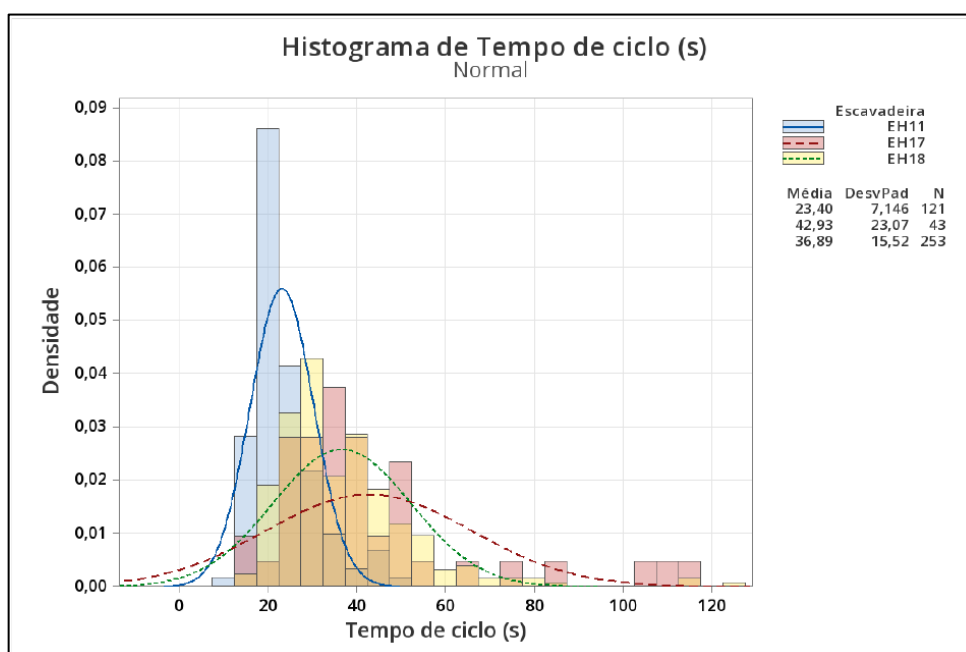
Atrelado a isso, Mahamedi et al. (2021) utiliza aprendizagem de máquina para automatizar o processo de mensuração de indicadores de produtividade. Utilizando essa técnica, segundo o autor, foi possível treinar um modelo com acurácia de 96% para reconhecimento de dados de movimentação, como aceleração, giro e deslocamento. Com o uso de modelos de aprendizagem, o autor avalia ser possível a metodologia ser aplicada em diferentes operações de escavadeiras e replicada em atividades de carregamento.

Souza e Longhini (2022) e Vaz Filho (2024) também fizeram estudos sobre produtividade de escavadeiras aplicando telemetria e estatística. Em uma frota aplicada na indústria de celulose, Souza e Longhini (2022) desenvolveram um sistema de telemetria com uso de IoT para substituir um sistema de controle manual de produtividade de uma frota de equipamentos de construção.

Por meio da aplicação desse sistema, foi possível ter ganho de produtividade dos equipamentos impactados em mais de 1%. Com o sistema de telemetria, foi possível realizar o aumento do volume de dados acerca da frota de equipamentos. Também foi possível realizar uma otimização da utilização da frota, gerando uma economia de aproximadamente R\$ 15 mil reais mensalmente.

Vaz Filho (2024) utilizou controle estatístico de processos para realizar um controle de produtividade de escavadeiras aplicada a uma mineração de calcário. O autor analisou os tempos ciclos de escavadeiras (Figura 8) (Figura 9). Esse tempo, segundo o autor, é crítico para operação devido a ser o um indicador de eficiência.

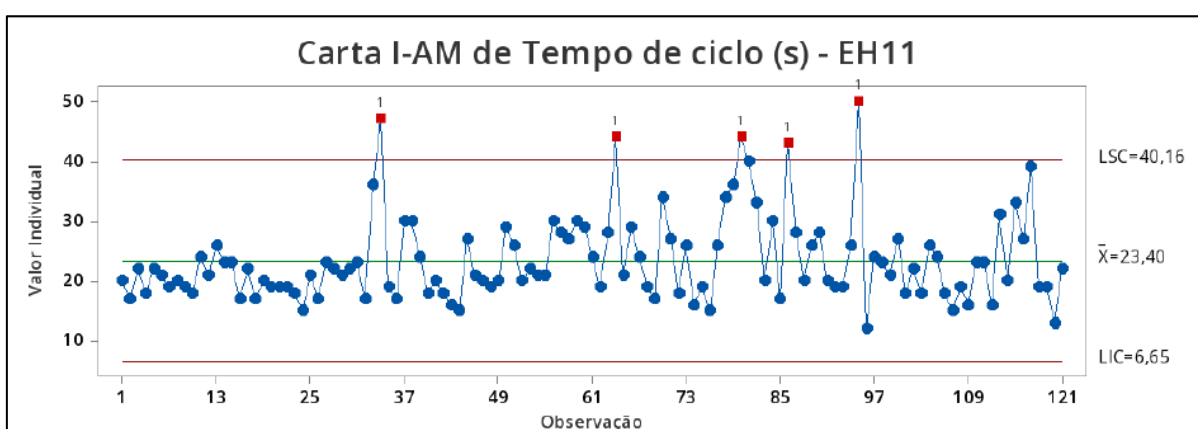
Figura 8 – Histogramas de Tempo Ciclo de Escavadeiras



Fonte: Vaz Filho (2024)

Com a utilização de carta de controle (Figura 9) e curvas de distribuição, foi possível identificar os tempos ciclos das escavadeiras analisadas e identificar quais apresentavam maior e menor produtividade da frota analisada. O autor sugere o uso de uma estatística mais aprofundada, atrelada a uma análise usando uma metodologia de melhoria contínua e o uso de telemetria é como ferramenta para extração de dados e melhorar a produtividade dos equipamentos em operação de carregamento.

Figura 9 – Carta de Controle de Tempo Ciclo de Escavadeiras



Fonte: Vaz Filho (2024)

De maneira geral, a análise bibliográfica demonstrou que os aspectos de produtividade e de performance das escavadeiras e dos equipamentos de construção são avaliados de maneira separada aos de sustentabilidade.

A utilização de telemetria como ferramenta de controle e gerenciamento se mostra promissora, e unir essas ferramentas ao que existe de moderno em aspectos computacionais, como o uso de inteligência artificial ou a utilização de software estatísticos para análise, permite a engenheiros extrair o que existe de melhor nesses equipamentos.

Analisando as lacunas encontradas durante a análise bibliográfica, o presente trabalho buscará realizar uma análise de produtividade, performance e sustentabilidade com base na seguinte pergunta: **Como melhorar a utilização de um equipamento de construção, avaliando os aspectos de produtividade e eficiência, de maneira sustentável, utilizando a telemetria do equipamento?**

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo a seguir, irá tratar os aspectos teóricos básicos que fundamentam os objetos de estudo do presente trabalho, onde têm-se as informações sobre os motores a combustão, com foco nos motores a diesel e sobre as escavadeiras hidráulicas.

3.1 CICLOS DE COMBUSTÃO

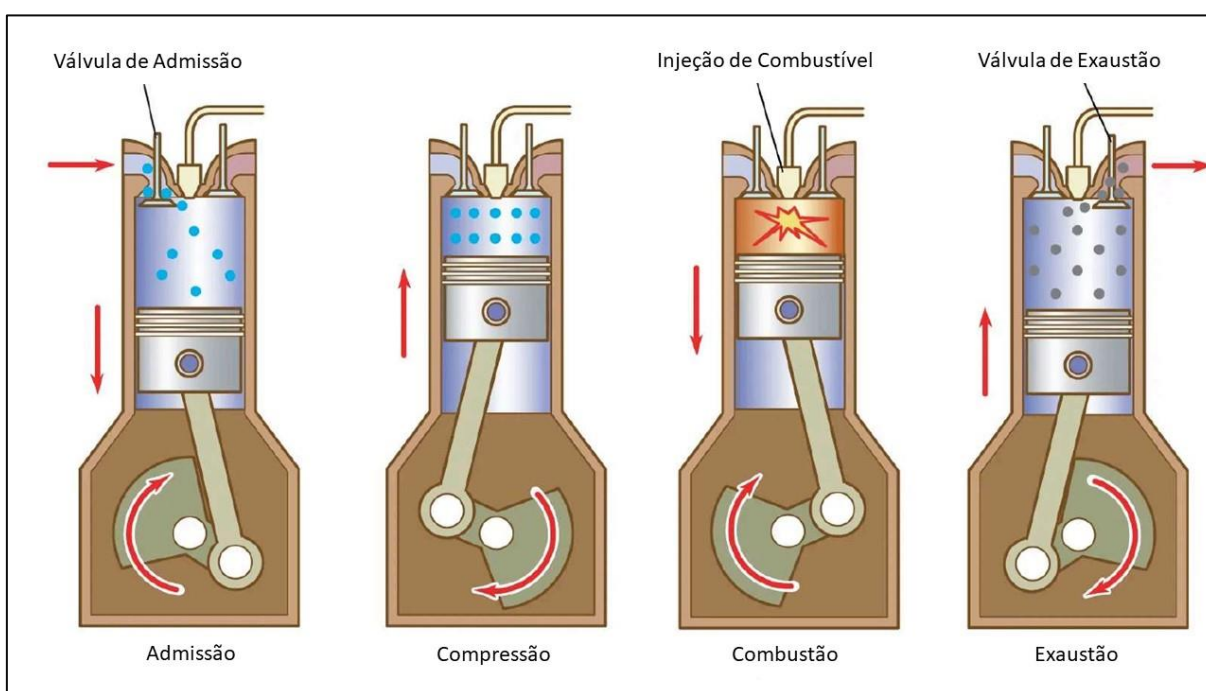
Os motores a combustão são dispositivos capazes de gerar movimento, por meio de um processo de conversão de energia química em energia térmica. O processo, chamado de ciclo termodinâmico (Çengel, 2012), induz uma reação de queima em uma fonte de energia química, que é o combustível, e esse, por meio de adição de calor, gera um processo de expansão de gases dentro de um ambiente fechado, o que gera a movimentação de algum mecanismo. Com o tempo, os motores passaram a gerar torque e velocidade angular com maior intensidade.

Atualmente, os principais motores presentes no mercado, sejam de veículos ou de equipamentos, possuem a construção baseada em dois principais ciclos termodinâmicos: os ciclos Otto e Diesel (Figura 10). Os motores a ignição gerada a faísca e motores a ignição gerada a combustão espontânea (Brunetti, 2018), tem como principal diferença, a maneira como o calor é induzido dentro do processo de explosão.

Os motores a centelha possuem a fonte geradora de calor, um arco elétrico gerado por meio de um eletrodo dentro da câmara de combustão. Durante o processo, uma mistura de ar e combustível, adentra na câmara de combustão durante a abertura de uma válvula, enquanto um cilindro está sobre uma posição onde o volume é máximo. Ligado a um eixo, a cada 180° de giro, uma fase do ciclo acontece, onde o combustível é comprimido por um pistão, o arco é gerado dentro da câmara de combustão, os gases se expandem, gerando trabalho mecânico, e por fim, os gases gerados do efeito da explosão são expelidos para fora da câmara de combustão.

Os motores a Diesel utilizam um processo diferente para gerar trabalho. Durante a compressão do ar que entra dentro das câmaras de combustão, o mesmo chega a ser comprimido até 5 megapascal em motores que não existe turbocompressores. Em motores com turbocompressores, o ar dentro da câmara de combustão pode chegar até 11 MPa (Bosch, 2014).

Figura 10 – Ciclo Diesel



Fonte: Adaptado de Enciclopédia Britânica.

Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/diesel-engine#/media/1/162716/19423>.

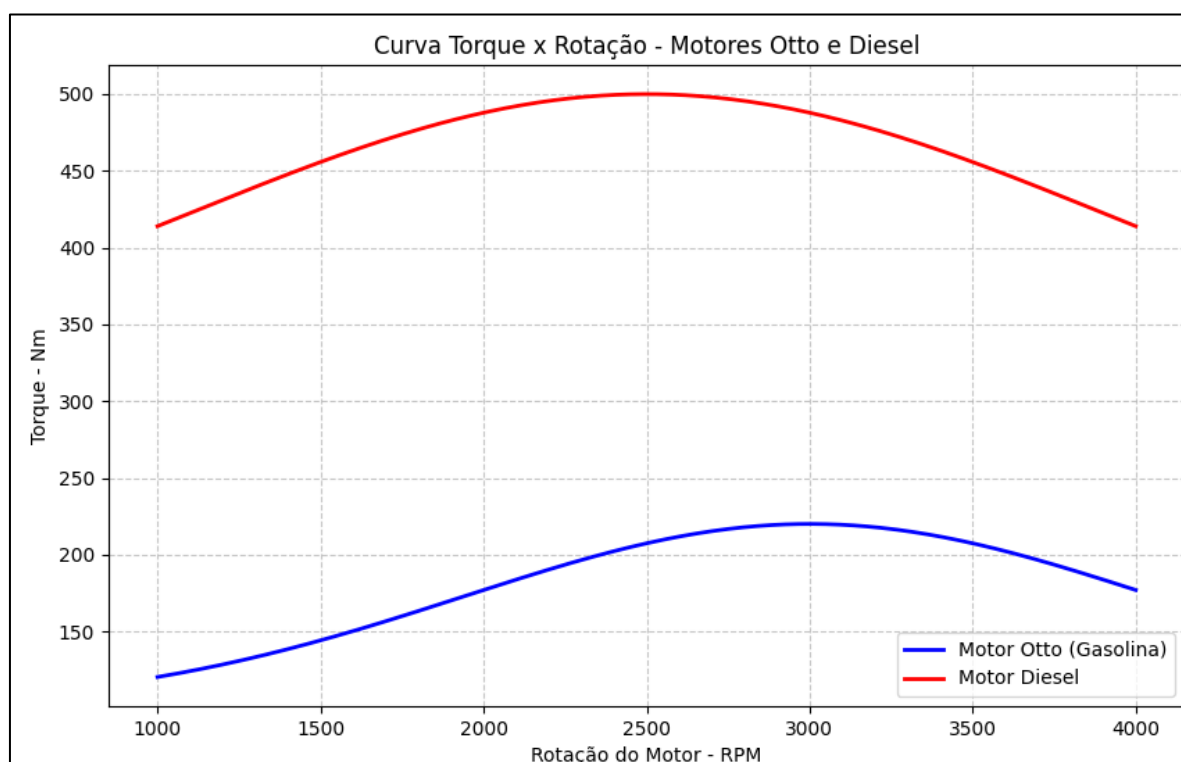
Acesso em 2 de outubro de 2025.

Um aspecto importante em motores a combustão é a taxa de compressão. Brunneti (2014, p. 31), define que essa grandeza é a relação entre o volume máximo dentro da câmara de combustão, quando o pistão se encontra Ponto Morto Inferior (PMI), e o volume reduzido durante o processo (PMS). Isso implica a dizer que quanto menor a relação entre os volumes, menor é a pressão interna gerada durante o processo de combustão.

Em motores a diesel, essa grandeza pode chegar a uma proporção de 21:1, o que indica um fator de compressão muito alto, sendo esse, o principal motivo para a ignição espontânea da mistura ar e combustível nesse motor e o fator de aplicabilidade de ambos os motores.

Para efeito comparativo da relação de torque e rotação, os motores a diesel atingem alto torque em baixa velocidade tendo naturalmente uma queda o aumento das rotações dos motores devido ao fator de compressão (Figura 11). Os motores a gasolina possuem capacidade de gerar maior velocidade em baixa rotação. Equipamentos de construção se beneficiam de utilizarem motores a diesel. Esses equipamentos operam em regimes de operação de carregamento, escavação e transporte. Volumes de materiais que podem chegar a toneladas de carregamento por hora. A necessidade de força em baixas rotações com a existência do motor a diesel, torna possível a operação desses tipos de equipamentos.

Figura 11 - Torque X Rotação – Motores Otto e Diesel



Fonte: Adaptado de Brunneti (2014)

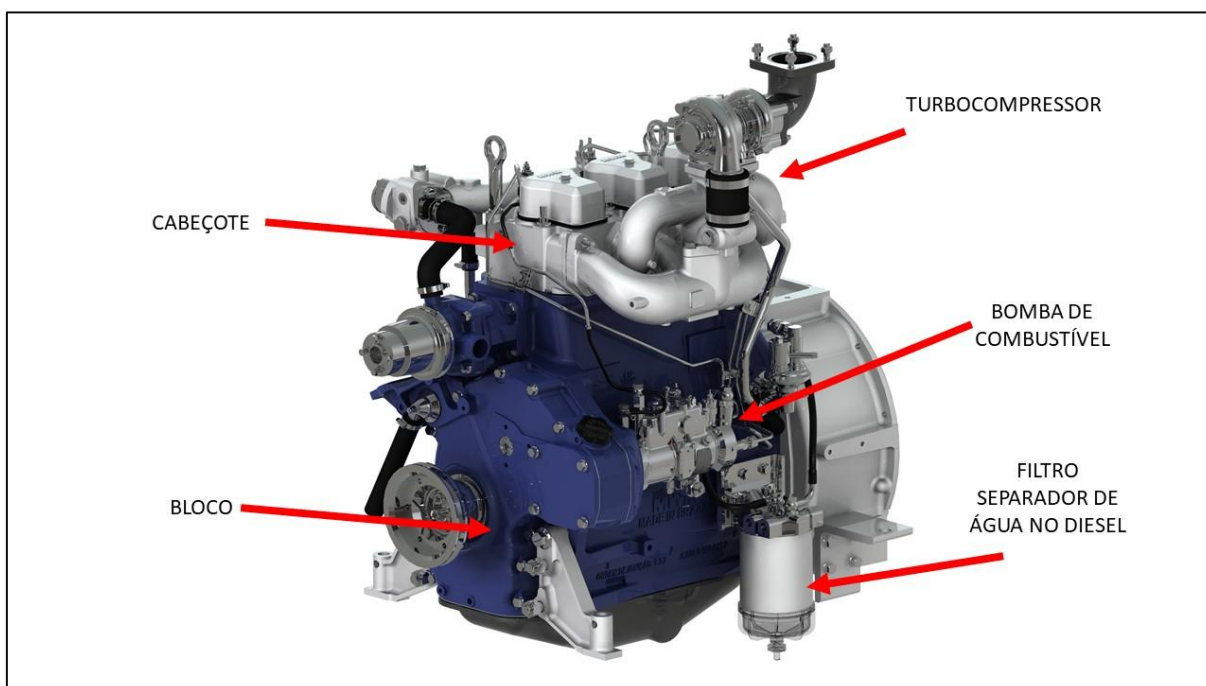
3.2 COMPONENTES MOTORES A DIESEL

Segundo Brunneti (2014, pág. 29), um motor a diesel é dotado de diversos componentes (Figura 12). O cabeçote é uma peça que se posiciona na região superior do motor. Ele fica acoplado sobre o bloco. A finalidade do cabeçote é selar a câmara de combustão e unir os conjuntos de válvulas aos cilindros. É no cabeçote do motor que temos os conjuntos de molas, eixos de comando de válvulas, e as passagens para o ar e os gases de escapamento do processo de combustão.

O bloco, internamente, possui usinagem para comportar os pistões do motor ou camisas que servem de cilindros removíveis, o que não gera contato direto com os componentes móveis do conjunto biela-pistão, diretamente com cilindro. Esse componente tem um papel importante no funcionamento térmico do motor. Passagem e galerias fazem parte da constituição desse componente, e durante o funcionamento do mesmo, o fluxo de óleo ocorre juntamente com o fluxo de fluido de arrefecimento que é responsável pela manutenção da temperatura interna ideal do mesmo.

O cilindro do bloco é a região onde ocorre a movimentação do conjunto pistão-biela. A função do cilindro é ser o guia durante o movimento rotativo e selar a câmara de combustão. É comum, em motores a diesel, o uso de camisas húmidas para a constituição interna dos mesmos. Nesses motores, os blocos de cilindro possuem os cilindros removíveis, o que apresenta uma vantagem em relação aos motores de camisa seca (o cilindro é parte do bloco). Com a substituição das camisas, o motor retorna ao funcionamento com redução de custo de manutenção.

O efeito operacional nos elementos mecânicos de um motor a combustão é importante, principalmente por questões de manutenção. Infleet (2025) indica que a ociosidade aumenta o envelhecimento do motor pois reduz o fluxo de óleo lubrificante circulando nas galerias entre o bloco e o cabeçote. A combustão se torna incompleta durante o funcionamento nesse modo, gerando acúmulo de subprodutos na câmara de combustão. Além do efeito das emissões, ociosidade reduz a durabilidade de filtros e do sistema de arrefecimento.

Figura 12 - Motor a Diesel

Fonte: Adaptado de MWM.

Disponível em: <https://www.mwm.com.br/site.aspx/Motores>. Acesso em 02/10/2025

3.3 COMBUSTÍVEL

O óleo diesel é um dos produtos derivados do processo de fracionamento de petróleo em diversos combustíveis.

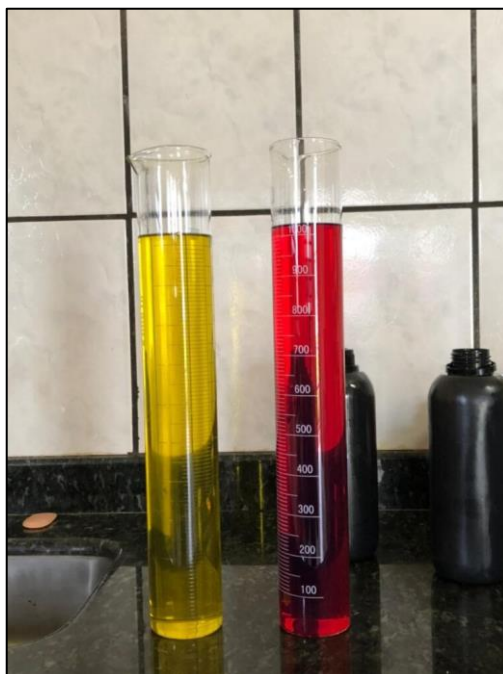
A Petrobrás é a principal produtora desse combustível no Brasil (Agência Brasil, 2025). O produto é formado por uma cadeia de hidrocarbonetos, com 8 a 16 carbonos sendo que, na sua composição química, é adicionado aditivos para melhorar o poder calorífico do mesmo e a durabilidade. Para uso comercial, a Petrobras estabelece as seguintes classificações de óleo combustível que são distribuídas (Petrobrás, 2024):

Diesel S10: O diesel S10 é um produto que possui em sua composição, uma taxa máxima de 10 miligramas de enxofre por unidade de quilograma de diesel. Esse produto é homologado pelo PROCONVE para motores na fase P7 do programa. Comercializado desde 2013, foi desenvolvido principalmente para atender a necessidade de redução de partículas de óxidos de nitrogênio durante o processo de escapamento. Outra característica sobre a composição química desse produto foi a tecnologia para partidas a frio.

A Petrobrás desenvolveu esse produto com um teor de cetano de 48, e com uma variação da massa específica que se encontra em uma faixa de 820 até 850 kg/m³. Outro aspecto importante, é o fator de evaporação do material, que ocorre no máximo aos 370 °C, o que é importante para esse tipo de motor que utiliza combustão espontânea (Petrobrás, 2024). Sua cor é amarela (Figura 13).

Diesel S500: O diesel S500, produzido pela Petrobrás, atende a equipamentos e veículos que possuem motorização desenvolvida antes do ano de 2012. O combustível é aplicável em sistemas de injeção de combustível que não possuem tecnologias robustas de sistemas de pós-tratamento de gases de exaustão sendo utilizado em máquinas e equipamentos de construção e geração de energia mais antigos. A principal característica em relação ao combustível S10 é a composição de enxofre que chega ao máximo de 500 ppm. Também é mais denso que o S10 tendo de 815 até 865 kg/m³ de massa específica (Petrobrás, 2024). Sua cor é avermelhada para diferenciar do diesel S10 e também para evitar fraudes (Figura 13).

Figura 13 - Diesel S10 (Esquerda) e Diesel S500 (Direita)



Fonte: Wattbras.

Disponível em: <https://wattbras.com.br/blog/diesel-s10-ou-s500-conheca-as-diferencas-entre-os-combustiveis-e-seus-usos-em-maquinaris-agricolas/>. Acesso em 17/06/2025

Para evitar problemas de funcionamento em motores a combustão com ou sem sistemas de pós-tratamento, a Petrobrás não recomenda a mistura dos dois combustíveis. Um dos efeitos que acometem o diesel combustível é a formação de água. Durante o processo de abastecimento, o combustível armazenado nos tanques pode sofrer os efeitos da condensação do ar. Essa água condensada se acumula no combustível, podendo gerar danos ao motor, gerado corrosão, ou problemas nos sistemas de alimentação. Outro fator para a geração de água no diesel é as diferenças de pressões e temperatura entre o ambiente interno de armazenamento e o ambiente externo (Quadro 2).

Sistemas modernos de filtragem de combustível possuem em suas composições, um filtro específico para realizar o processo de separação entre a água e o combustível. Quando tal composição chega em níveis que podem gerar falhas de funcionamento no motor, o sistema de gerenciamento e controle, por meio de monitoramento via sensor, detecta esse volume e informa ao operador do veículo ou equipamento acerca do processo de drenagem, o que facilita a manutenção.

Quadro 2 - Comparativo Químico do Óleos Diesel

Característica	Unidade	S10	S500	Descrição
Cor		Amarela	Vermelha	Coloração do Fluido
Teor biodiesel	%	15	14	% de presença de biodiesel por 1 unidade de combustível.
Massa específica (20°C)	Kg/m ³	820 a 850	820 a 865	Quantidade de massa por unidade de volume.
Ponto de fulgor	°C	38	38	Temperatura mínima para liberação de vapor.
Número de cetano		48	42	Indicador de resistência até a ignição espontânea.
Poder calorífico	MJoule/Kg	45	45	Energia liberada durante a combustão por unidade de massa do combustível.
Fator de emissão	kg CO ₂ / litro	2,68	2,68	Quantidade de valores de Gases de Efeito Estufa Gerados durante o consumo de combustível. (IPCC)

Fonte: Adaptado do Manual do Diesel - Petrobrás (2024).

3.4 SISTEMAS DE GERENCIAMENTO E PÓS-TRATAMENTO

Devido à complexidade de funcionamento de um sistema como um motor a diesel, um gerenciamento de volume de mistura ar e combustível ou de vazão de combustível para dentro das câmaras de combustão não poderiam ser feitos unicamente por meios mecânicos.

A criação de sistemas de gerenciamento eletrônico e de pós-tratamento ocorreu naturalmente, principalmente devido a sensibilidade dos motores modernos a contaminantes que existem no ar admitido e no combustível utilizado. As primeiras versões dos sistemas de gerenciamento de motores a combustão surgiram em meados dos anos 60. O primeiro sistema eletrônico para motores a combustão foi desenvolvido em 1979 onde ocorreu uma integração entre sistemas de injeção de combustível a um controlador eletrônico, esse chamado de unidade de controle do motor (Dias, 2016).

O desenvolvimento dos sistemas de injeção eletrônica teve um impacto significativo no gerenciamento e performance dos motores a combustão. Por meio desse sistema eletrônico, diversos outros sistemas passaram a ser integrados e monitorados em tempo real, o que melhorou a capacidade dos motores de reportar e trabalhar com os dados gerados, como rotação, temperatura, vazão de gases e consumo de combustível.

Cada falha gerada no sistema passou a ser padronizada por meio de códigos de diagnóstico normatizados. Diversas controladoras para outros sistemas a serem gerenciados foram desenvolvidas, e para integrar essas controladoras, um padrão de comunicação foi criado para veículos e máquinas.

A Bosch desenvolveu um sistema de comunicação que é o protocolo padrão em sistemas embarcados para maquinários industriais, veículos de estrada e equipamentos móveis não rodoviários. Esse padrão de comunicação, também chamando de padrão CAN Bus (Rede de Área de Controlador) está regulamentado pela norma ISO 11898 e pela norma SAE J1939.

Nessa rede, as informações de gerenciamento são enviadas por meio de pulsos de energia elétrica entre as unidades de controle usando dois fios do barramento, que são CAN – HIGH e o CAN – LOW.

Para conectar à rede por meio de um dispositivo externo e coletar informações das controladoras, foi estabelecido um padrão de comunicação, onde por meio desse padrão, é possível gerenciar parâmetros, alterar ou extrair informações durante o funcionamento do equipamento. A ligação entre as a rede CAN alta e baixa se dá por meio de resistores que servem para evitar problemas de distorção ou falhas de comunicação entre as duas redes.

Para monitorar o sistema de escapamento dos motores a diesel, os fabricantes utilizam sensoriamento para trabalhar em conjunto com a controladora do motor. Bosch (2014, pg. 718), define que o processo de criação de óxidos de nitrogênio tem início nos processos de formação de picos locais de temperatura do motor. Para combater esse tipo de problema, foi desenvolvido sistemas para recirculação dos gases de escapamento com objetivo de mitigar esses picos.

O sistema de recirculação de gases de escape, tem como característica, a utilização dos gases de escapamento para o sistema de admissão. Como o gás de escapamento é um gás inerte (Brunneti, 2014), os picos de temperatura são reduzidos durante a recolocação na câmara de combustão, ou em alguns motores, com uso de sistemas de resfriamento para esses gases.

Outro ponto fundamental é a utilização do processo de catálise para redução de gases de efeito estufa. Os sistemas de escapamento modernos têm um filtro catalisador que por meio de processo de oxidação, removem monóxidos de carbono que são gerados durante a combustão devido a não queima completa da mistura ar e combustível.

A massa de partículas que são ejetadas é reduzida durante o processo. Os sensores de temperatura, de pressão e de estequiometria, ligados aos sistemas de gerenciamento do motor, informam para o controlador o status do sistema (Bosch, 2014). A regulagem dos injetores de combustível, juntamente com a qualidade da mistura ar combustível são monitoradas e auxiliam juntamente com os sistemas de pós-tratamento para a redução dos níveis de emissões de contaminante.

3.5 ESCAVADEIRAS HIDRÁULICAS

As escavadeiras hidráulicas são equipamentos fora de estrada utilizados para escavação e mineração. As primeiras versões das escavadeiras hidráulicas surgiram em 1895 nos Estados Unidos (Vaz Filho, 2024). Com a evolução da hidráulica do estudo da resistência dos materiais, esse equipamento passou por várias transformações tecnológicas, o que gerou um aumento da capacidade de transporte e movimentação de carga.

O deslocamento desses equipamentos se dá por meio de esteiras transportadoras acopladas sobre motores hidráulicos individuais. Esse sistema de tração pode possuir variações de sua construção a depender do tipo de terreno que o equipamento irá se deslocar. Outro aspecto importante sobre as escavadeiras, é a capacidade de girar em até 360°, o que possibilita o acesso a pontos de escavação em várias direções e ao carregamento de caminhões para transporte do material extraído (Figura 15).

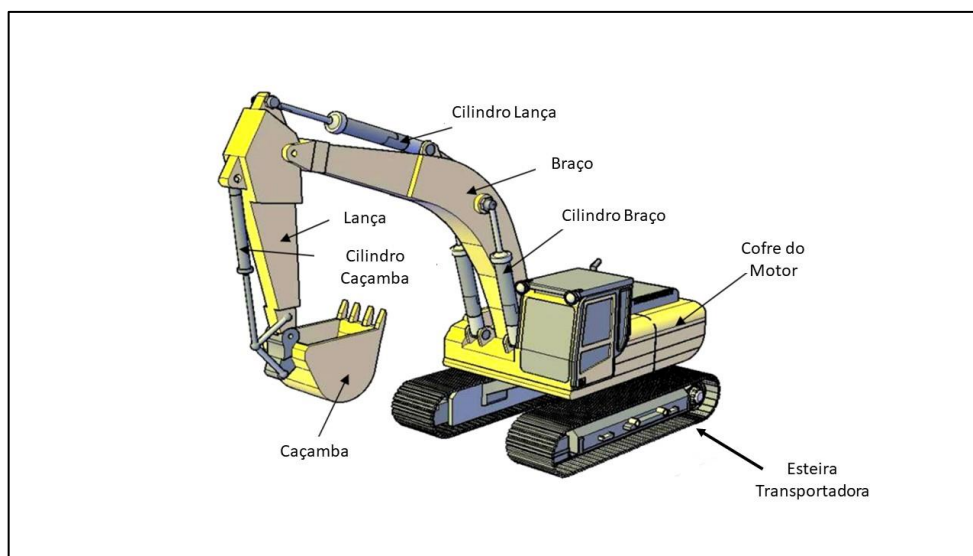
Apesar da possibilidade de deslocamento, as escavadeiras são equipamentos para operação estática devido à alta massa que o equipamento possui, o que, se ocorrer, deve ser feito em momentos de necessidade, devido ao risco de aquecimento de sistemas hidráulicos, ou a redução de durabilidade do material rodante que é projetado para baixo volume de deslocamento.

Natividade (2025, pg. 18) relata que durante um ciclo de carregamento, a escavadeira hidráulica pode ter quatro momentos entre a extração do material: espera, carregamento, despejo e viagem. O ciclo de carregamento se inicia com a aproximação de um caminhão de transporte que irá receber o material. A escavadeira, carrega o material na caçamba e realiza o despejo do material na caçamba do caminhão.

Após repetir a segunda etapa até o enchimento do caminhão, a escavadeira entra em modo de espera o caminhão se desloca para enviar o material a um ponto do processo. Em um projeto de extração de material, o tipo de escavadeira a ser utilizada depende do tipo de material a ser extraído, o volume de produção a ser obtido e o alcance da escavadeira durante o processo de escavação e carregamento. Atualmente, existem diversos fabricantes no mundo desse maquinário, onde, em sua

maioria, os motores que equipam as escavadeiras são motores a diesel, devido a geração de torque em demanda de carga.

Figura 14 - Escavadeira Hidráulica



Fonte: Adaptado de Umesh (2018)

Para análise de operacional, alguns indicadores de performance foram propostos para a utilização desse tipo de equipamento:

3.5.1 Disponibilidade Física do Equipamento

A disponibilidade física, segundo Natividade (2025, pg. 22), é um indicador de performance que mensura o percentual de tempo que o equipamento está em operação. Em um intervalo de horas, o tempo utilizado do equipamento para extração e carregamento e espera é o tempo não ocioso. Os demais tempos no período são considerados tempos de parada para o operador ou para manutenção do equipamento. Esse indicador pode ser definido pela seguinte equação:

$$\%DFE = \frac{HT - HP}{HT} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

$\%DFE$ é o percentual de disponibilidade física do equipamento;

HT é o tempo total em trabalho do equipamento;

HP é o tempo total em ociosidade;

3.5.2 Total de Carregamentos

Natividade (2025, pg. 22) define que o total de carregamentos realizados é um indicador de performance para definir em um período, qual o total de ciclos completos de enchimento de caminhões a escavadeira está realizando. Considerando o tempo necessário para realização do carregamento de um caminhão, o indicador pode ser definido da seguinte forma:

$$TDC = \frac{IT}{TC} \quad (2)$$

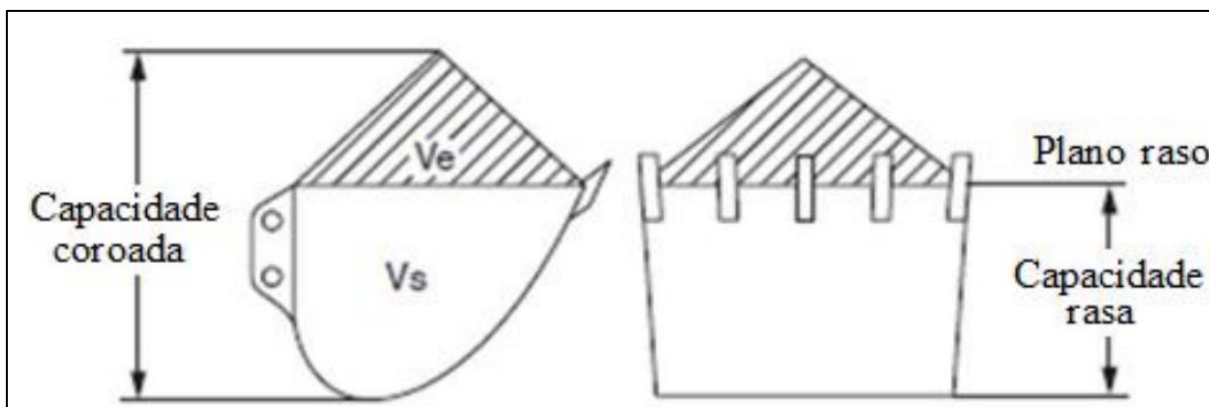
Onde IT é o intervalo de tempo definido de operação, como um turno, e o TC é o tempo ciclo de carregamento.

3.5.3 Fator de Enchimento da Caçamba

O fator de enchimento representa o quanto do volume da caçamba é utilizado durante a extração do material agregado (Racia, 2016).

Esse coeficiente, tem como base, a massa específica do material desagregado durante a escavação. Dependendo do material, é utilizado um percentual acima da capacidade da caçamba, o que forma uma “coroa” (Figura 15) de material sobre o enchimento. Essa utilização reduz a quantidade de movimentos em um ciclo completo de enchimento, o que aumenta a performance de operação.

Figura 15 - Volume de Caçamba de Escavadeiras



Fonte: Racia (2016)

Esse fator pode pela seguinte equação abaixo:

$$\%FE = \frac{Q_w \times P_{es}}{C_{max}} \quad (3)$$

Onde: Q_w é o volume de carregamento da caçamba em metros cúbicos, P_{es} é o peso específico do material e C_{max} é a massa máxima admissível da caçamba durante o processo de desagregação do material.

3.5.4 Tempo de Ciclo da Escavadeira

Durante os movimentos de operação, o somatório de tempos utilizados durante cada etapa é definido como tempo ciclo de carregamento (Racia 2016). O tempo se inicia a partir do momento que um caminhão se aproxima da escavadeira para enchimento e termina quando a escavadeira encerra todos os movimentos de carregamento, retorna para a posição de repouso e o caminhão se desloca. No caso da escavadeira se deslocar dentro da operação, o tempo de ciclo desse procedimento deve ser considerado também. O tempo de ciclo pode ser definido pela seguinte equação abaixo:

$$T_{ce} = \sum T_{op} = T_C + T_{Rv} + T_{Dp} + T_{rc} + \dots T \quad (4)$$

Onde podemos definir alguns dos tempos padrões que podemos encontrar nos processos de escavação como:

Tc é Tempo de Carregamento da Caçamba;

Trv é Tempo de Giro ou Rotação Com a Caçamba Vazia;

Tdp é Tempo de Despejo da Caçamba;

Trc é Tempo de Giro e Rotação da Caçamba carregada

3.5.5 Taxa de Consumo de Combustível

Outro aspecto importante para análise é o consumo de combustível por unidade de tempo.

Esse parâmetro está relacionado à capacidade do motor de operar em diferentes regimes e de converter a energia calorífica do combustível em trabalho mecânico. A performance do motor pode ser influenciada por diversos fatores, como o volume da câmara de combustão, a rotação e a resistência aplicada, além de alterações mecânicas, como o aumento da vazão de combustível pelos injetores ou perdas térmicas. Matematicamente, a taxa de consumo de combustível em escavadeiras pode ser calculada de maneira geral da seguinte forma:

$$\dot{m}_f = \frac{m_F - m_I}{t} \quad (6)$$

Onde m_F é a massa de combustível, no tanque, no final de operação, m_I é massa de combustível, no tanque, no início da operação e t é o tempo total que o equipamento permaneceu com o motor ligado.

3.5.6 Quantidade de Emissões de Dióxido de Carbono Equivalente

A quantidade de emissões de dióxido de carbono é outra métrica importante em análise de escavadeiras. O fator de emissão (F_e) pode ser definido como uma quantificação liberação de gases de efeito estufa, em função de material químico

consumido. Onde a quantidade de emissões de dióxido de carbono equivalente é produto do fator de emissões do combustível (V_{ce}), em função do volume de combustível consumido (F_e):

$$E_{CO_2e} = V_{ce} \times F_e \quad (7)$$

3.6 PDCA

O ciclo PDCA, promovido pelo Engenheiro Industrial Edwards Deming (1900-1993), é uma ferramenta de gestão da qualidade onde um conjunto de atividades são definidas em fases, com foco, na correção de falha de um processo (primeiro giro) e a melhoria contínua (repetição do ciclo). Conforme a norma de gestão da qualidade, a **ISO 9001:2015**, estabelece no escopo, a gestão de um processo deve ser integrada em todas as etapas do PDCA (Figura 16). Para uma efetiva aplicação do ciclo, ferramentas de controle estatístico de processos, de análise de causa raiz e de planejamento devem ser utilizadas nas fases de execução do PDCA. As etapas são definidas da seguinte forma:

- Fase PLAN (Planejamento):

Na fase de planejamento, o problema a ser atacado e os objetivos do projeto são definidos. Nessa fase, o escopo deve ser definido, tal qual, todas as partes interessadas, as informações a serem levantadas, tempo de execução e quais marcos o projeto deseja atender. Outro aspecto importante é a análise de causa raiz do problema que o projeto deseja resolver. Nessa fase, é comum a utilização de ferramentas como o Diagrama de Pareto ou Diagrama de Espinha de Peixe.

- Fase DO (Execução):

Após as análises do problema, um conjunto de ações são realizadas para mitigá-lo. Na fase de execução, ações são realizadas para implementar uma melhoria

no processo estudado. Nessa fase, o processo de padronização, gestão a vista ou uma realização de um plano de ação, com uso de ferramentas como a Matriz SWOT são usadas para aplicar a melhoria no processo.

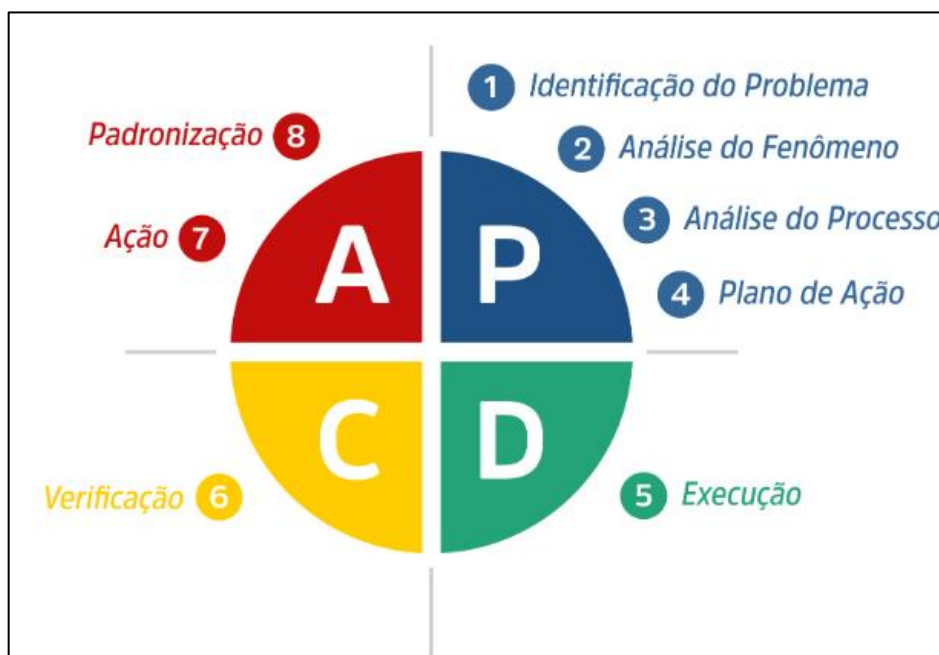
- Fase CHECK (Checagem):

Na fase de checagem, dados acerca do processo são coletados para avaliar se as ações realizadas na fase DO foram efetivas na resolução do problema. Ferramentas de Controle Estatístico de Processos (CEP) são utilizadas para avaliar os resultados obtidos, como indicadores de produtividade, gráficos de controle (cartas de controle), histogramas, etc.

- Fase ACT (Agir):

Na fase final do ciclo PDCA, as ações geradas pela fase anterior e avaliada e os resultados. Como ação, na fase Act, temos as lições aprendidas sobre o projeto, a validação da implementação de melhoria e a padronização. Nessa fase, a documentação é utilizada com definição do POP, fluxogramas, auditorias, etc.

Figura 16 - Ciclo PDCA



Fonte: Voitto (2025). Disponível em: <https://voitto.com.br/blog/artigo/o-que-e-o-ciclo-pdca>.

Acesso em 17/06/2025.

4 METODOLOGIA

Este capítulo mostra as etapas implementadas na construção do presente trabalho. Para estruturação, processo de análise foi definido em marcos de planejamento, desenvolvimento, execução e validação.

Para o projeto em estudo, o ponto de partida da análise foi um estudo de caso de eficiência energética de equipamento (Figura 17), que opera na mesorregião do Sertão Pernambucano, atuando com carregamento de minério de sulfeto de cálcio, ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), em caminhões do tipo caçamba. Para referenciais numéricos, adotou-se duas casas decimais como padrão e unidades de medidas no padrão internacional (SI).

Figura 17 - Escavadeira Analisada

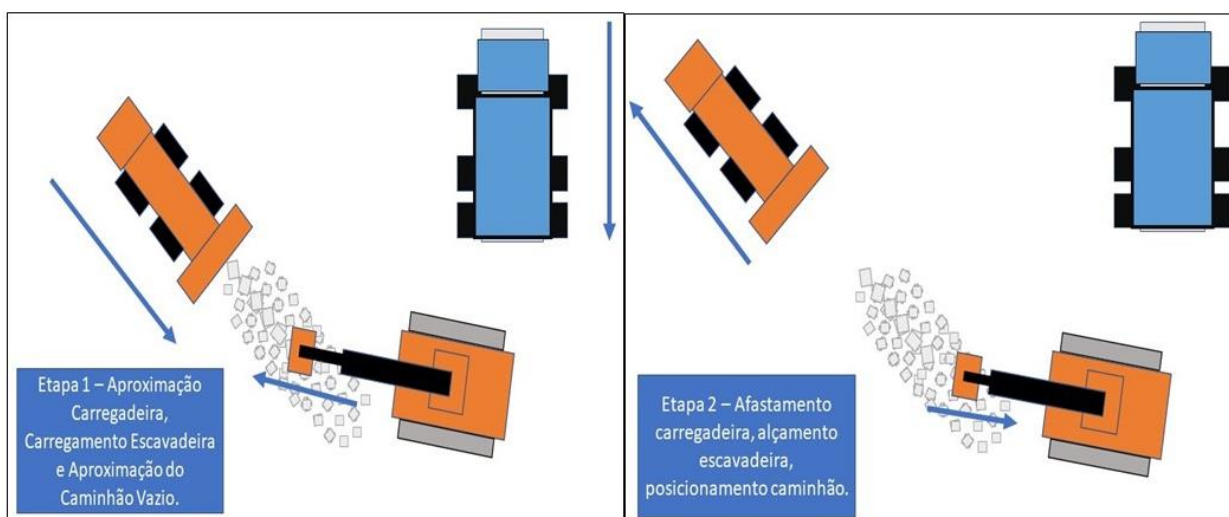


Fonte: Autor (2025)

4.1 PROCESSO DE CARREGAMENTO

A primeira etapa da análise envolveu avaliar o estado atual do processo de carregamento do equipamento. O ciclo se iniciava quando o caminhão caçamba se aproximava, de ré, para próximo do monte de material rochoso onde a escavadeira aguardava para iniciar o carregamento (Figura 18). O fluxo consistia em posicionar a escavadeira próxima de um conglomerado de rochas desagregadas que se aglomeravam utilizando uma máquina do tipo carregadeira. A escavadeira posicionava-se próximo ao monte de pedras para iniciar o processo de carregamento.

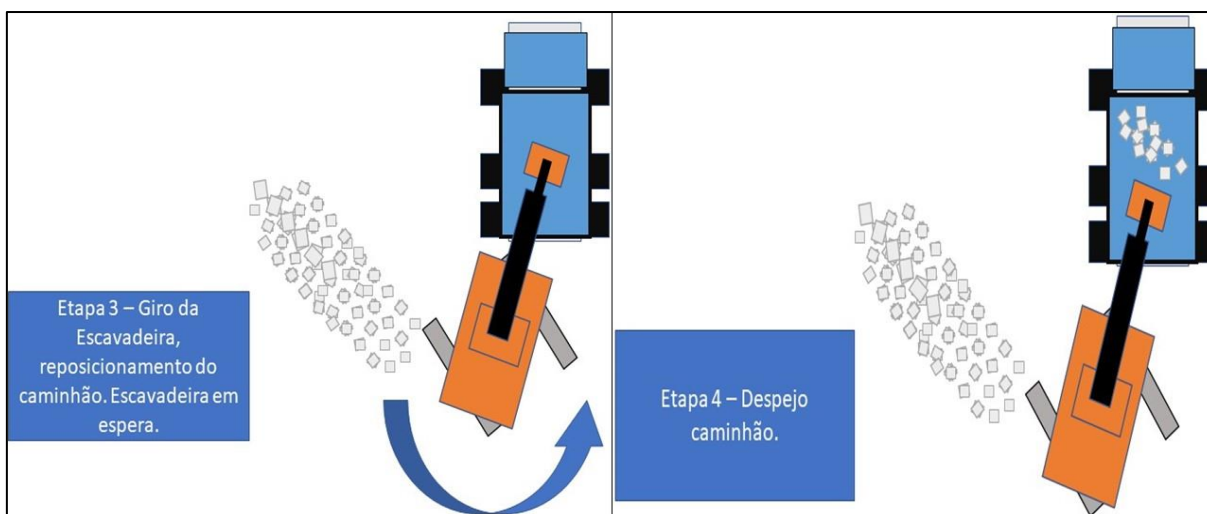
Figura 18 - Etapas 1 e 2 do Ciclo - Fase PLAN



Fonte: Autor (2025)

Após o posicionamento, a escavadeira inicializava a movimentação, capturando uma quantidade de material rochoso, e realizando o despejo de material na parte traseira do caminhão até um certo nível de preenchimento (Figura 19). Devido a um posicionamento razoavelmente longo entre a escavadeira e a caçamba do caminhão, o equipamento realizava muitos giros para capturar material. Outro aspecto que foi avaliado foi o tempo de espera quando o equipamento estava sem o caminhão próximo.

Figura 19 - Etapas 3 e 4 do Ciclo - Fase PLAN



Fonte: Autor (2025)

Algumas observações foram realizadas para identificar possíveis pontos de melhoria no processo, e fundamentar esses pontos de melhoria com base nos dados de trabalho do motor da escavadeira. Durante essa análise, foi empregado os 3'Ms (Muri, Mura, Muda).

Rossetti (2023) define que o conceito dos 3M's foi criado dentro da construção do Lean Manufacturing, que tem origem no desenvolvimento do sistema Toyota de Produção. Essa forma de avaliação de desperdícios se baseia em três palavras japonesas, que se referem a formas de desperdícios dentro do processo produtivo.

O Muri representa a etapa ou fase do processo produtivo que está mal dimensionado para a aplicação, sendo assim, sobrecarregado. O efeito dessa situação é a redução da vida útil do equipamento, componente ou geração de fadiga no operador. O segundo conceito é o de Muda. Muda é a representação da fase do processo que não gera valor agregado, ou seja, ações que fazem parte do processo produtivo, mas não geram lucro ou agregam algo no processo produtivo.

O terceiro conceito é o de Mura. Rossetti (2023) indica o Muda como o conjunto de desperdícios gerados pela falta de estruturação de um processo. Essa desestruturação pode ser solucionada por meio da aplicação de um procedimento operacional padrão. Por meio da aplicação dos conceitos, a análise do estado atual do processo (Quadro 3) foi criada para definir quais pontos deveriam ser reestruturados a fim de melhorar a performance do equipamento.

Quadro 3 - Análise de Métodos e Desperdícios

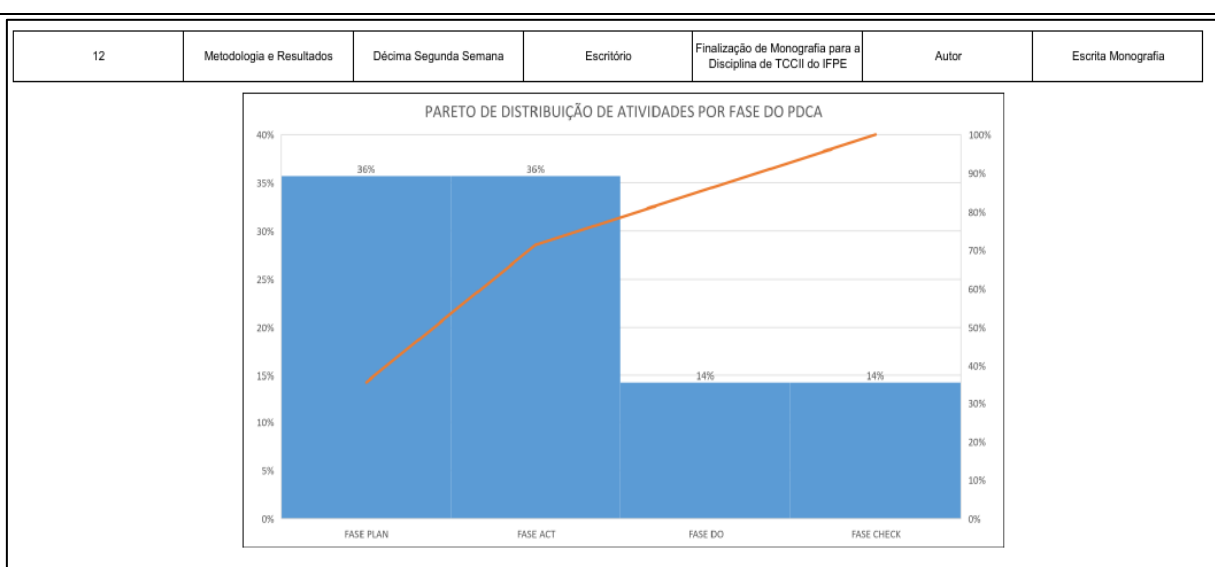
Classificação	Situação	Justificativa
Muri	Altura Muito Baixa em Relação ao Caminhão	Sobrecarga de elevação dos braços e aumento da potência do motor para elevação. Risco de queda de material na cabine.
Mura	Operação com Vários Ciclos	Aumento do tempo de carregamento, e redução da produtividade.
Mura	Sem Padronização de Processo de Carregamento	Adiciona variabilidade nos processos de carregamento e transporte de material.
Muda	Tempo de Ociosidade da Máquina Elevado	Desperdício de espera e arrumação das pedras.

Fonte: Autor (2025)

Após a realização da avaliação do estado atual, um plano de ação estruturado, com o PDCA (Figura 20), foi criado para o processo de análise com os dados de operação da escavadeira, usando métricas de produção e estudar a performance do motor. Com isso, o objetivo de analisar a performance do equipamento durante o pré padronização e depois, seria atendido de maneira sistemática e organizada, por meio de fases e definições de execução.

Figura 20 – Ciclo PDCA

PDCA						
SEMANA	FASE PLAN	FASE DO	FASE CHECK	FASE ACT	ANÁLISE	EXECUTADO?
1	1				METODO	SIM
2	1				METODO	SIM
3	1				MÁQUINA	SIM
4	1				MÁQUINA	SIM
5	1	1			MÁQUINA	SIM
6		1			MÁQUINA	SIM
7			1		MÁQUINA	SIM
8			1	1	MÁQUINA	SIM
9				1	METODO	SIM
10				1	METODO	SIM
11				1	METODO	SIM
12				1	METODO	SIM
%	36%	14%	14%	36%		
5W1H						
SEMANA	O QUE?	QUANDO?	ONDE?	PORQUE?	QUEM?	COMO?
1	Avaliar a situação problema	Primeira Semana	Equipamento	Equipamento Necessita de Melhoria da Performance Operacional	Autor	Inspeção Visual
2	Definição das Variáveis do Processo e Os Indicadores Chave	Segunda Semana	Escritório	Metrificação dos Estados Atuais de Operação	Autor	Conhecimento Operacional
3	Coleta de Dados	Terceira Semana	Equipamento	Quantificar os Estados Atuais do Equipamento na Operação e do Motor.	Autor	Ferramentas de Telemetria e Levantamento de Dados Operacionais
4	Coleta de Dados	Quarta Semana	Equipamento	Quantificar os Estados Atuais do Equipamento na Operação e do Motor.	Autor	Ferramentas de Telemetria e Levantamento de Dados Operacionais
5	Definição da Padronização	Quinta Semana	Equipamento	Padronizar Fluxo de Processo de Carregamento	Autor	Definição de Fluxograma
6	Definição da Padronização	Sexta Semana	Equipamento	Padronizar Fluxo de Processo de Carregamento	Autor	Definição de Fluxograma
7	Coleta de Dados	Sétima Semana	Equipamento	Avaliar os dados do equipamelo após padronização	Autor	Ferramentas de Telemetria e Levantamento de Dados Operacionais
8	Coleta de Dados	Oitava Semana	Equipamento	Avaliar os dados do equipamelo após padronização	Autor	Ferramentas de Telemetria e Levantamento de Dados Operacionais
9	Análise de Dados	Nona Semana	Escritório	Comparar o Efeito da Operação nas Emissões Antes e Depois da Operação	Autor	Python e Jasp
10	Análise de Dados	Décima Semana	Escritório	Comparar o Efeito da Operação nas Emissões Antes e Depois da Operação	Autor	Python e Jasp
11	Lições Aprendidas	Décima Primeira Semana	Escritório	Avaliar o que foi realizado e verificar pontos de melhoria para trabalhos futuros	Autor	Avaliação de Gráficos



Fonte: Autor (2025)

4.2 AMOSTRAGEM

Essa etapa está vinculada à definição das informações necessárias para a realização da análise, tais como; ferramentas, período de amostragem, testagem e padronização. Durante esse período, o motor teve dados de funcionamento coletados. Algumas informações de operação do equipamento escavadeira foram extraídas para referenciar o efeito operacional antes e depois da proposta de padronização (Quadro 4).

A coleta de dados do motor foi realizada com base nas informações obtidas por meio de sistema de diagnóstico desenvolvido pela fabricante HITACHI (Figura 21), que é utilizado como ferramenta de diagnóstico e coleta de dados de performance de variados fabricantes de escavadeiras. Durante a coleta dos dados, foram gerados arquivos que representam um período de gravação de dados de 60 minutos (Figura 22).

Todos os dados foram compilados em um único banco de dados. Cada amostragem possui uma distribuição de dados relacionados ao motor, utilização do equipamento e das bombas responsáveis pelo acionamento das funções hidráulicas do equipamento. O software instalado está conectado ao barramento CAN do equipamento e captura as informações de telemetria recuperadas pelas centrais eletrônicas do motor e do sistema hidráulico.

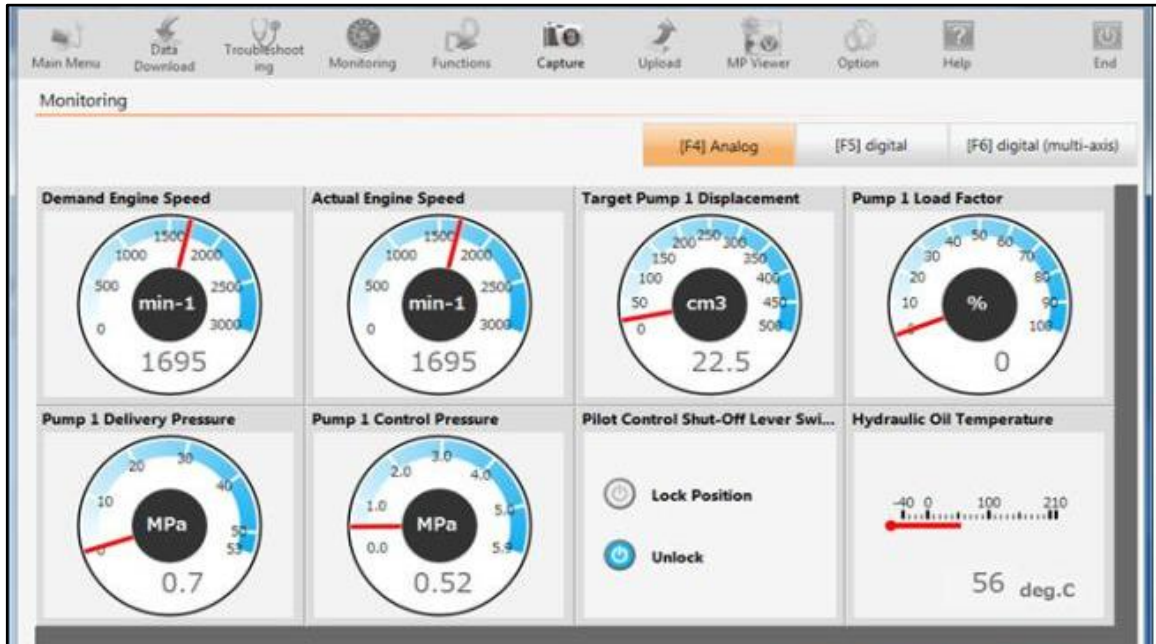
Outro aspecto foi o processo de coleta, processamento, avaliação e entendimento dos efeitos operacionais. Equipamentos fora de estrada tem seu tempo de vida útil baseado em horas ou minutos de operação, (Caterpillar, 2022). Com base nos dados que foram possíveis serem obtidos durante o processo, tem-se as seguintes variáveis de análise operacionais e de desempenho:

Quadro 4 - Variáveis Analisadas do Motor x Operação

Variável	Unidade	Fonte
Massa de CO ₂ gerado	Kg	Motor
Combustível Consumido	Kg ou Litros	Motor
Combustível Consumido Por Tempo	Kg/hora ou Litros/hora	Motor
Emissões de CO ₂ Por Tempo	Kg/hora	Motor
Torque do Motor Médio	N*m	Motor
Potência do Motor Média	Quilowatts	Motor
Rotação do Motor Média	RPM	Motor
Tempo Por Demanda de Carga	hora	Motor
Pressão da Bomba Hidráulica	MPA	Sistema Hidráulico
Tempo Total de Operação	Horas/Minutos	Motor
Tempo Em Produção Efetiva	Horas/Minutos	Motor
Tempo em Espera	Horas/Minutos	Motor
Tempo Por Modo de Potência	Horas/Minutos	Motor
Tempo de Por Tipo de Movimento	Horas/Minutos	Motor
Tempo Ciclo de Carregamento	Horas/Minutos	Operação
Fator de Enchimento	%	Operação
Total de Ciclos de Carregamento	Ciclos	Operação

Fonte: Autor (2025)

Figura 21 - HITACHI - Maintenance PRO ®



Fonte: HITACHI - Maintenance PRO Operation Manual (2010)

Figura 22 – Dados Tabelados

Engine On Time	Engine Off Time	Hour Meter [Hours]	Fuel Remaining [%]	Fuel Used [L]	H/P Mode Time [Hours]	P Mode Time [Hours]
07:13	18:47	796,19	100	298	0,0	11,2
07:21	17:50	805,98	43	261	0,0	0,1
07:19	17:49	815,38	33	214	0,0	0,0
07:24	17:31	823,84	43	209	0,0	1,3
07:26	16:33	832,13	8	173	0,0	8,2
12:02	17:31	832,40	7	4	0,0	0,2
08:55	17:05	838,74	81	167	0,0	6,3
12:20	17:07	840,53	72	34	0,0	1,7
15:28	15:29	840,56	72	0	0,0	0,0
07:56	17:37	846,05	4	142	0,0	5,4
07:45	16:22	851,37	86	135	0,0	5,3
08:26	13:08	856,07	43	123	0,0	4,7
07:07	18:14	864,49	82	216	5,1	2,2
07:15	16:56	871,39	43	177	6,9	0,0
07:12	17:39	876,21	64	104	4,8	0,0
07:54	11:11	879,19	41	57	2,9	0,0
07:47	17:42	885,18	43	164	5,9	0,0
07:24	17:25	890,99	71	152	5,8	0,0
07:17	17:20	899,58	99	184	8,6	0,0
07:36	18:16	907,58	43	170	8,0	0,0
08:15	11:49	910,43	16	52	2,8	0,0
14:01	14:41	911,10	10	9	0,6	0,0
06:59	16:21	914,23	100	76	3,1	0,0
07:20	18:35	917,68	83	78	3,4	0,0
14:31	17:17	917,81	83	1	0,1	0,0

Fonte: Autor (2025)

4.2.1 Amostragem de Dados Operacionais

O processo de determinação de amostragem de tempo de ciclo do carregamento, fator de enchimento e total de ciclos por carregamento da escavadeira envolveu, inicialmente, a avaliação das limitações e de que maneira os dados deveriam coletados. Para o presente projeto, foram definidas, as seguintes considerações da análise para reduzir os efeitos de variabilidade (Tabela 1):

Tabela 1 - Considerações da Análise

Variável	Valor	Unidade
Tempo Médio de Trabalho Efetivo	5	Horas/Dia
Volume da Caçamba Escavadeira	1,4	Metros Cúbicos
Volume da Caçamba Caminhão	12	Metros Cúbicos
Total de Dias Fase Plan	15	Dias
Total de Dias Fase Do	5	Dias
Total de Dias Fase Check	5	Dias
Preço do Diesel	R\$ 6,00	R\$/Litro
Tamanho da Frota	12	Escavadeiras

Fonte: Autor (2025)

Devido à ausência de uma balança rodoviária, não seria possível determinar com precisão os valores de massa por carregamento. Para gerar uma base, os dados de volume da caçamba de carregamento do caminhão e da escavadeira foram utilizados como referência. A equação 3 foi adaptada para considerar a razão entre os movimentos de despejo realizados durante um ciclo completo de carregamento e os volumes das caçambas do caminhão e da escavadeira:

$$\%FE = \frac{Q_w \times P_{es}}{C_{max}} \approx \frac{V_{cc}}{V_{ce}} \quad (8)$$

Onde V_{cc} representa o volume da caçamba do caminhão cheia, e o V_{ce} , o volume da caçamba da escavadeira. Para o número de ciclos de carregamento (equação 2), se considerou uma população média finita no período da análise. Usando como referência, uma observação inicial de tempo ciclo de carregamento da fase PLAN, de aproximadamente 813 segundos, o total de carregamentos da seguinte forma:

$$Total\ de\ Ciclos = \frac{d_{oper} \times \overline{h_{liqu}}}{\overline{h_{car}}} \quad (9)$$

Considerando os limites da análise definidos, temos o seguinte total de carregamentos mensais, considerando um regime de operação de 6 horas:

$$Ciclos = \frac{20[Dias] \times 5[horas/dia] \times 3600[seg/hora]}{813[segundos/Ciclo]} = 442,80\ Ciclos \quad (10)$$

Temos então, um total de 443 ciclos de carregamento como população durante o período total de análise. Para a definição da amostragem mínima de tempo de ciclos de carregamento, usa-se como base, a definição de amostragem para estimar uma média de população finita (Fávero, 2024):

$$n = \frac{N \times s^2}{(N - 1) \times \frac{B^2}{Z_\alpha^2} + \sigma^2} \quad (11)$$

Como o desvio padrão populacional era desconhecido, durante o processo de coleta de dados de produção na fase PLAN, foram feitas, mas 4 observações (Tabela 2) para definir um desvio padrão de referência, já calculando as outras variáveis de operação:

Tabela 2 - Amostragem de Produção

Amostras	Despejos	Tempo total (s)	Tempo ciclo médio (s)	%FE
1	19	812,94	45,78	45,00%
2	9	382,50	42,50	95,00%
3	21	747,34	35,58	40,00%
4	16	782,50	71,13	53,00%
5	19	761,29	40,06	45,00%

Fonte: Autor (2025)

Com os dados anteriores, o desvio padrão de referência foi e posteriormente, a amostragem mínima necessária. Seja o desvio padrão amostral definido por (Fávero, 2024):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (12)$$

Logo, para a amostragem, o valor do desvio considerado para tempo de ciclo foi de aproximadamente, 188,40. Considerando um erro de 10%, o desvio padrão de referência já determinado e a população de 443 ciclos, temos então:

$$N = 443 \text{ [Ciclos]}$$

$$s = 188,4 \text{ [Segundos]}$$

$$B = 0,10 \times 813 = 81,3 \text{ (Considerando o Erro de 10\%)}$$

$$z_{\alpha} = 1,96 \text{ (Para 95\% de Confiança)}$$

$$n = \frac{443 \cdot 188,4^2}{(443 - 1) \cdot \frac{81,3^2}{1,96^2} + 188,4^2} = 19,77 \text{ [Amostras]} \quad (13)$$

Portanto, para estimar a quantidade de coletas de variáveis operacionais, com base no método empregado, foi definido que o valor mínimo de amostras seria de aproximadamente 20 amostras de carregamentos. Considerando a disponibilidade para realizar essas coletas, definido que nas fases de transição, foram extraídas 30 coletas de tempos de carregamento e ciclos para estimar uma média razoável dos efeitos da padronização no processo analisado.

4.2.2. Amostragem de Dados do Motor

Durante o processo de análise da escavadeira, nos períodos estabelecidos para coleta dos dados, na fase PLAN, o equipamento realizou operações por cerca de 26 horas distribuídas ao longo da fase de planejamento, considerando as paradas que ocorreram no período. Durante as fases DO e CHECK, os tempos de operação propostos para extração das bases de dados, para garantir efeitos comparativos similares em relação a fase PLAN, com base nos dias que a máquina trabalhou durante essas fases, foram de 25 e 26 horas de operação, totalizando 76 horas de operação analisadas (Tabela 3).

Para a análise dos efeitos operacionais, informações padrões acerca da característica do mesmo foram inicialmente pesquisadas juntamente com a principal fonte consumidora de potência do equipamento que é a bomba hidráulica. O motor utilizado na escavadeira (Figura 25), opera em um regime de entre 1000 e 2000 rotações por minuto e é aplicado em diversos tipos de equipamentos, como geradores elétricos e em navios.

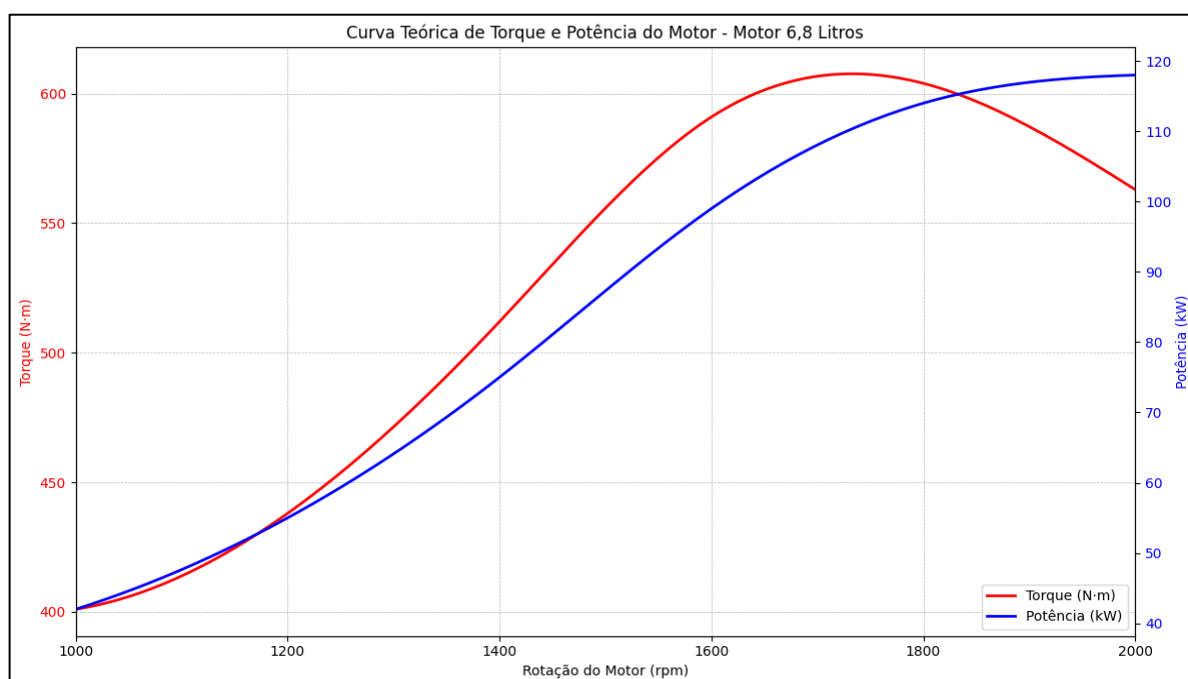
O motor possui uma litragem de 6,8 litros, acoplado a um corpo estrutural formado de duas bombas (Figura 24), de deslocamento variável. Essas duas bombas funcionam por meio de pistões de acionamento variável e acionam os cilindros hidráulicos que movimentam os braços e a caçamba do equipamento, juntamente com os motores hidráulicos que movimentam as esteiras transportadoras. Com base no datasheet disponibilizado pelo Laboratório de Emissões da EPA (Ver Anexo 1), o motor é classificado pelas normas de emissões como TIER II.

Em seu sistema de gerenciamento, um controlador que regula os níveis de rotação e potência gerada conforme a solicitação de carregamento ou da velocidade de deslocamento do equipamento. Essa regulação permite que o equipamento possa operar de maneira adequada, reduzindo as emissões geradas e o consumo de combustível.

Outro aspecto importante sobre a análise do motor são as verificações de falha do gerenciamento eletrônico. Durante o processo de análise, não foram reportadas falhas apresentadas que poderiam impactar no segmento do projeto, como erros de leitura em sensores ou falhas de comunicação entre o software de extração dos dados e o equipamento.

As curvas do motor (Figura 23), baseadas no datasheet (Quadro 5) (Anexo 1) foram interpoladas para suavizar a visualização. Essas curvas representam bem a característica padrão do motor a Diesel que é uma fonte geradora de torque alto em baixa e média rotação, o que justifica a aplicação do mesmo em uma escavadeira hidráulica. O diesel utilizado pelo motor é o padrão S10, onde a proporção do combustível em relação ao biodiesel, está fixada em 15%, conforme a legislação do Conselho Nacional de Política Energética, em 2025.

Figura 23 - Curva de Torque x Potência – Motor Escavadeira



Fonte: Autor (2025)

Tabela 3 - Distribuição dos Dados de Telemetria por Fase

Fase	Horas	Amostras
Plan	26,10	40
Do	24,60	30
Check	26,60	30

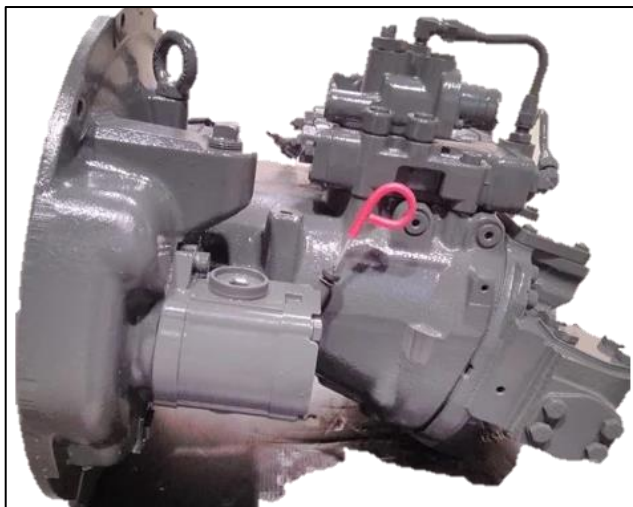
Fonte: Autor (2025)

Quadro 5 - Características do Motor Analisado

Característica	Valor	Unidade
Cilindros	6	
Volume	6,8	Litros
Rotação	1000-2000	RPM
Máxima Potência	120	kW
Faixa de Potência No Eixo em Alta Pressão da Bomba	>96	kW
Faixa de Potência No Eixo em Média Pressão da Bomba	48-96	kW
Faixa de Potência No Eixo em Baixa Pressão da Bomba	<48	kW
Consumo Médio	16-18	Litros/Hora
Combustível	Diesel S10	-
Proporção Biodiesel/Diesel	15%	-
Fase de Emissões	Tier 2/Stage II	-

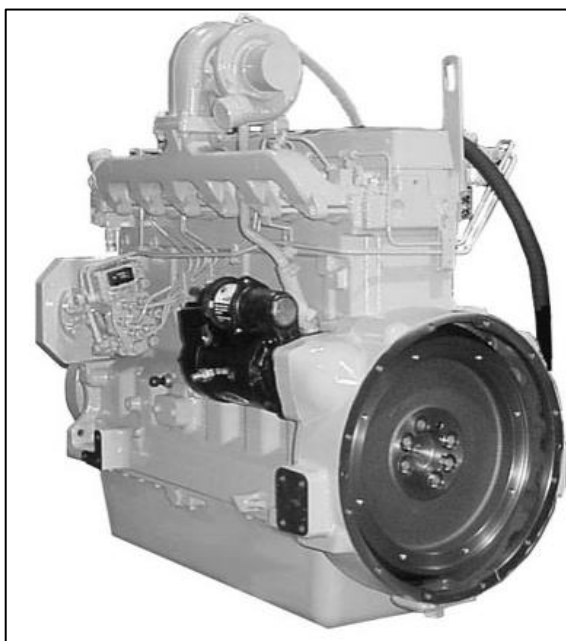
Fonte: Autor (2025)

Figura 24 – Corpo de Bombas de Deslocamento Variável



Fonte: Autor (2025)

Figura 25 - Motor 6 Cilindros Analisado



Fonte: Kva Diesel.

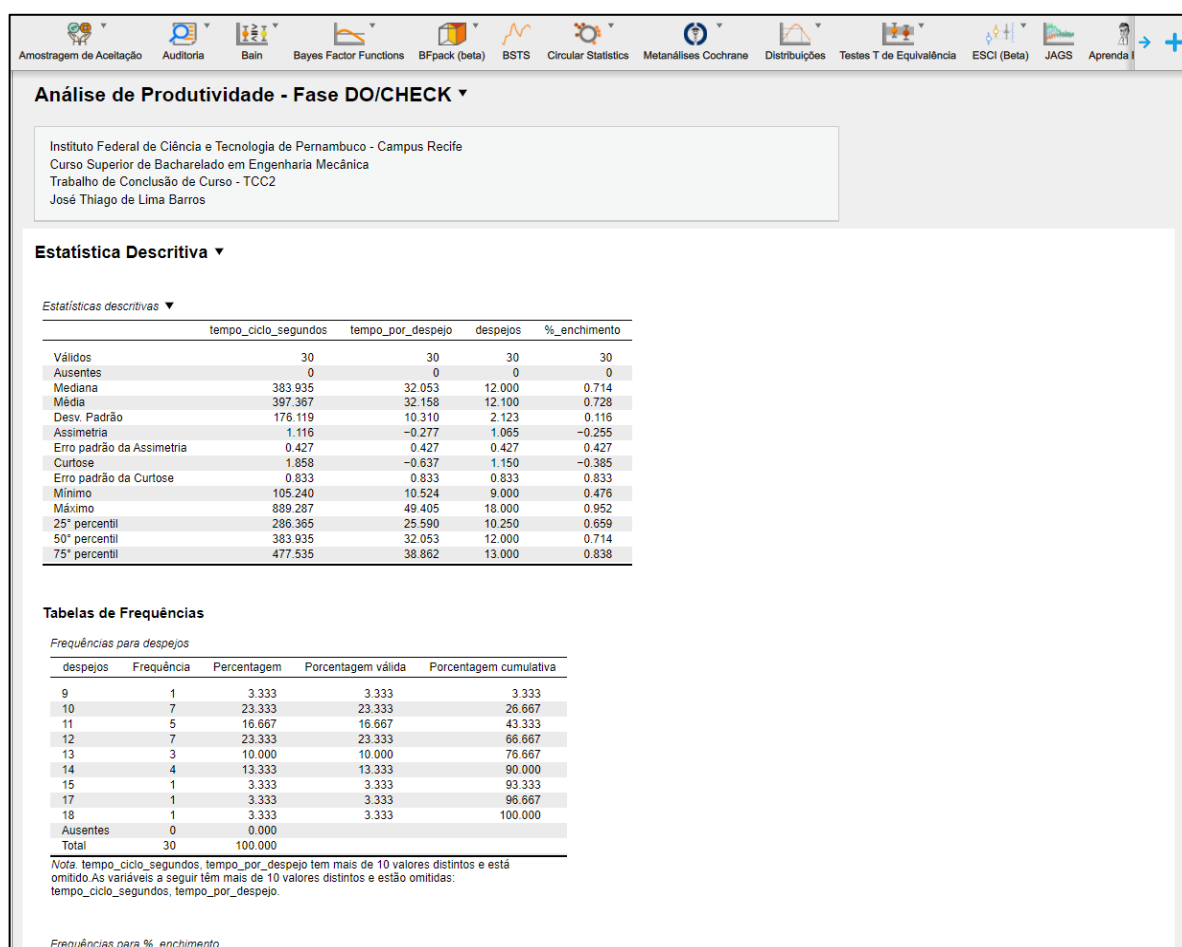
Disponível em: <https://kva-diesel.dk/galleri>. Acesso em 30 de agosto de 2025.

4.3 MATEMÁTICA COMPUTACIONAL

Para realizar o processamento dos dados coletados do motor, foi utilizado o software STARENGI, desenvolvido no IFPE. O software é uma aplicação para analisar motores a combustão interna baseados em ensaios de performance normatizados pela Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA) e pela SAE.

Outra ferramenta utilizada foi o JASP (Figura 26), que é um software de análises estatísticas, open source, baseado na linguagem R. O uso dessas ferramentas em conjunto serviu para gerar os relatórios de análises e efeitos comparativos durante as fases do ciclo PDCA.

Figura 26 - Análise de Dados de Produção – JASP



Fonte: Autor (2025)

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção são discutidos os resultados obtidos segundo a metodologia realizada.

5.1 PADRONIZAÇÃO – FASE DO

Após a verificação da operação e dos dados obtidos, algumas mudanças no processo foram propostas. Com base nos 3Ms que fundamentaram a análise de desperdício, algumas propostas de modificação do processo foram implementadas (Quadro 6).

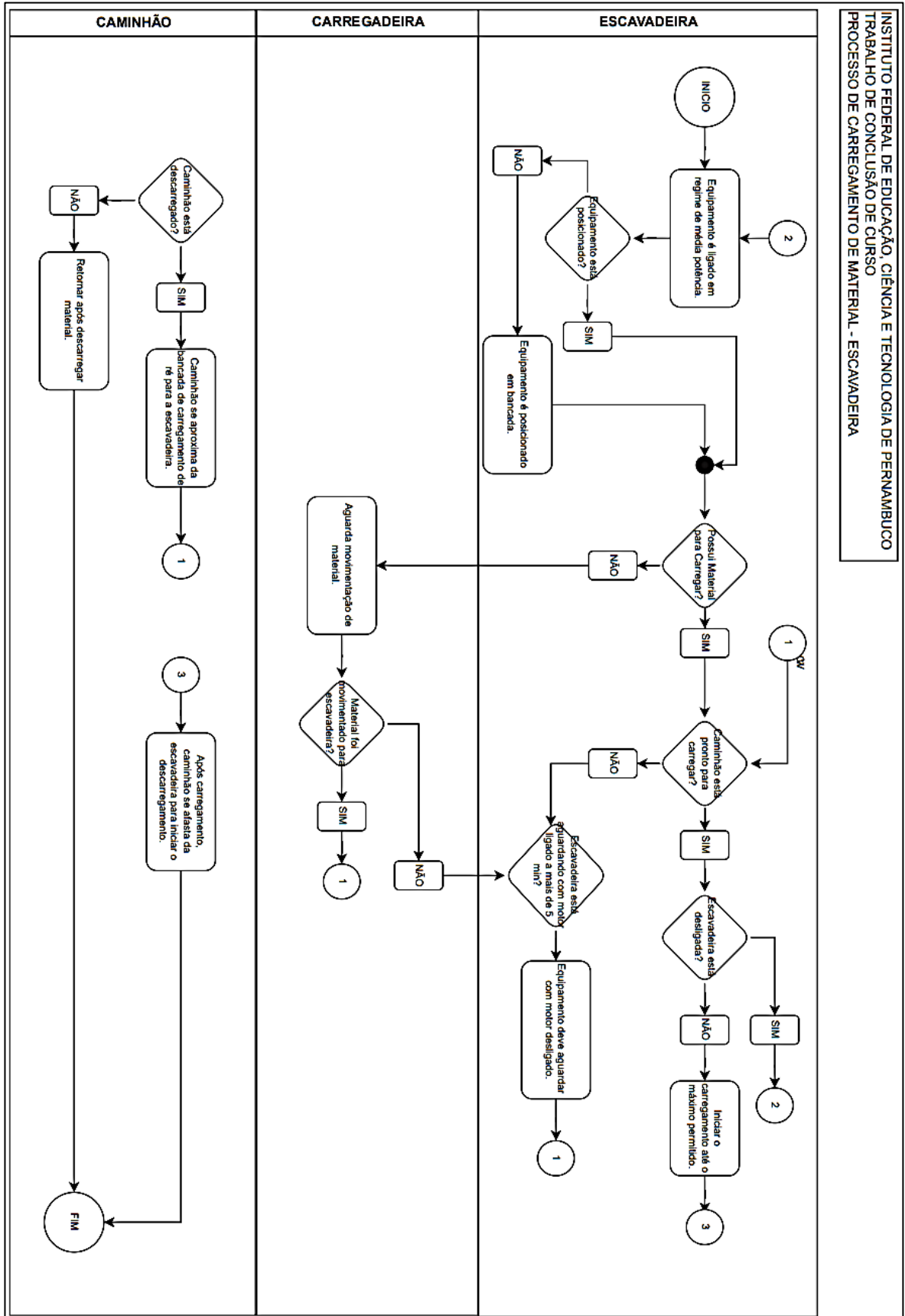
A padronização operacional realizada (Figura 27) deveria impactar o aspecto de produtividade, atrelado ao fator de eficiência. Para isso, estabilizar os movimentos de deslocamento do equipamento e o regime de potência e tempo de ociosidade foram pontos de definição das melhorias:

Quadro 6 – Ajuste de Utilização

Situação	Padronização	Justificativa
Altura muito baixa em relação ao caminhão.	Posicionamento do equipamento sobre bancada de pedras, elevando o equipamento acima da caçamba.	Redução da altura de elevação em relação ao equipamento. Redução da necessidade de deslocamento e reposicionamento. Aumento da segurança e visibilidade em relação a caçamba do equipamento.
Operação com vários ciclos	Aumento do fator de enchimento. Ajuste da potência do motor para utilização em regime de média potência.	Aumento do volume de material carregado. Redução de movimento de ciclo por caminhão. Equalizar demanda de elevação/carregamento e potência do motor.
Sem padronização de processo de carregamento.	Criação de fluxo padronizado.	Padronização da operação. Redução de variabilidade operacional.
Tempo de ociosidade da máquina elevado.	Padronização de tempo de funcionamento do equipamento em espera ou baixa rotação.	Redução do consumo de combustível em modo ocioso. Aumento da vida útil do motor. Redução das emissões.

Fonte: Autor (2025)

Figura 27 – Fluxo de Carregamento



5.2 RESULTADOS DOS EFEITOS OPERACIONAIS

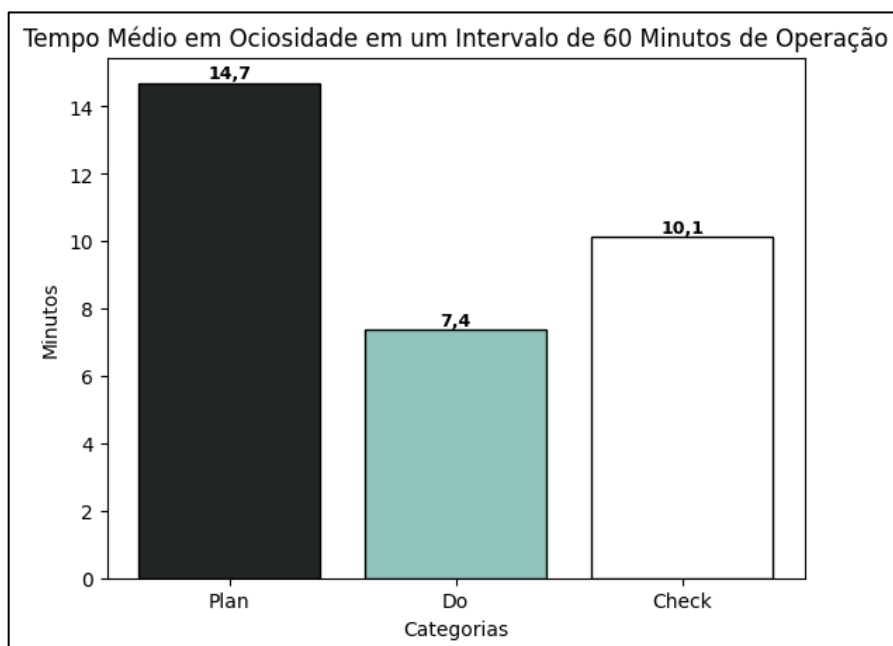
5.2.1. Análise de Dados de Telemetria

Após a padronização do processo, a escavadeira apresentou uma diminuição de 32% na ociosidade, ao comparar as fases PLAN e CHECK (Figura 28). Essa redução foi identificada por meio dos dados de telemetria, que passaram a registrar, menor tempo de operação em condição de baixa rotação.

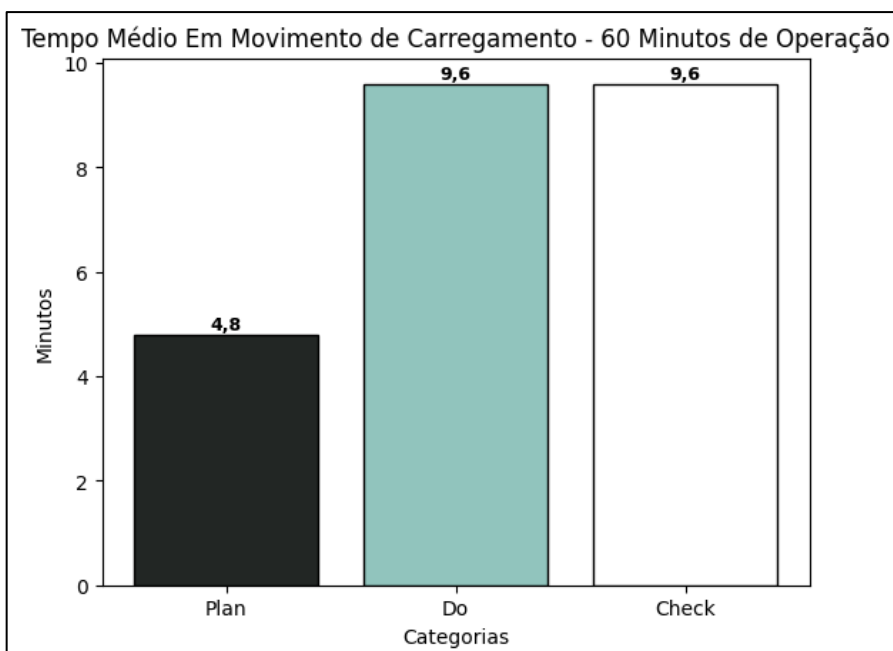
Também foram analisados os tempos relacionados aos movimentos do equipamento. Com a redução do tempo de espera, e a padronização do posicionamento, da escavadeira em uma bancada, acima do transporte a ser carregado, houve diminuição da necessidade de reposicionamento durante o carregamento (Figura 26).

Observou-se um aumento do tempo dedicado a outros movimentos operacionais. Destaca-se que, o aumento do tempo de giro não representa movimentos com maiores ângulos, mas um aumento na frequência de realização desse movimento, associada à melhoria do tempo de ciclo de carregamento. Os dados do motor também foram reportados. Durante a verificação, como esperado, o aumento da solicitação do equipamento gerou aumento em relação a solicitação de potência do motor em relação as fases PLAN, principalmente devido ao aumento da carga em relação ao fator de enchimento (Figura 32).

Avaliando as solicitações de carga do motor, foi possível notar uma estabilização da média das pressões nas bombas e o aumento do tempo em regime de média potência (Figura 33). O aumento de pressão do motor se dá devido ao aumento da força de desagregação e da força de elevação em virtude do fator de enchimento maior. Avaliando as distribuições (Figura 35), mostra-se o aumento da concentração em um único regime de potência entre as fases do e check. O efeito operacional também é indicado durante a avaliação dos desvios entre as potências. Na fase plan, o equipamento operava com um regime de desvio padrão médio de 22,93 kW. Nas fases do e check, o equipamento obteve um desvio padrão médio de 11,52 e 14,04 kW respectivamente.

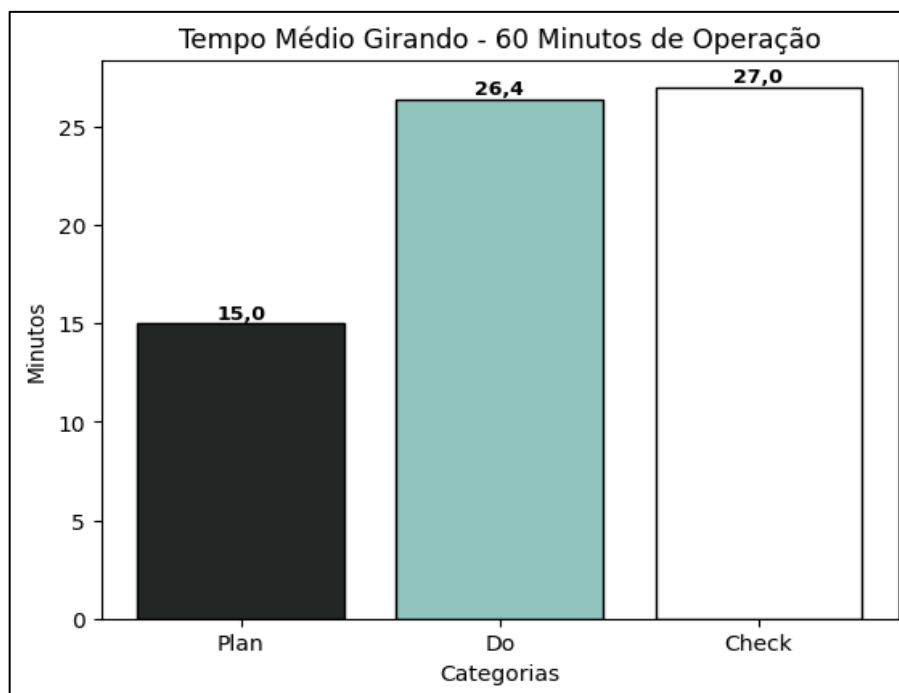
Figura 28 - Tempo Médio Ocioso – em 60 Minutos

Fonte: Autor (2025)

Figura 29 - Tempo Médio Carregando – em 60 Minutos

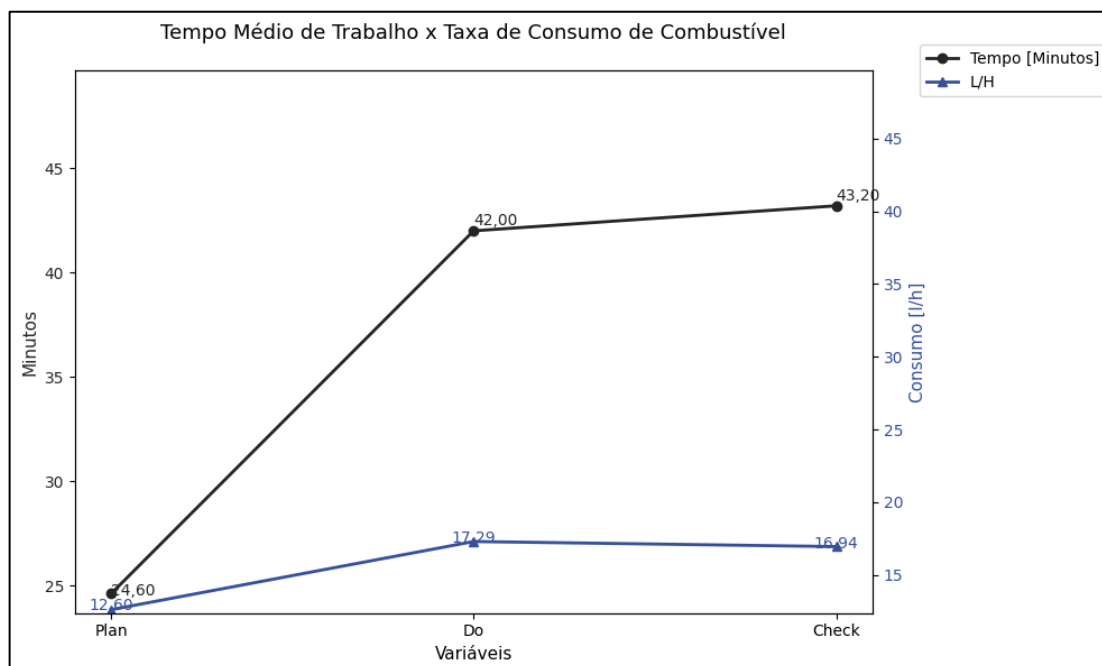
Fonte: Autor (2025)

Figura 30 - Tempo Médio Girando – em 60 Minutos



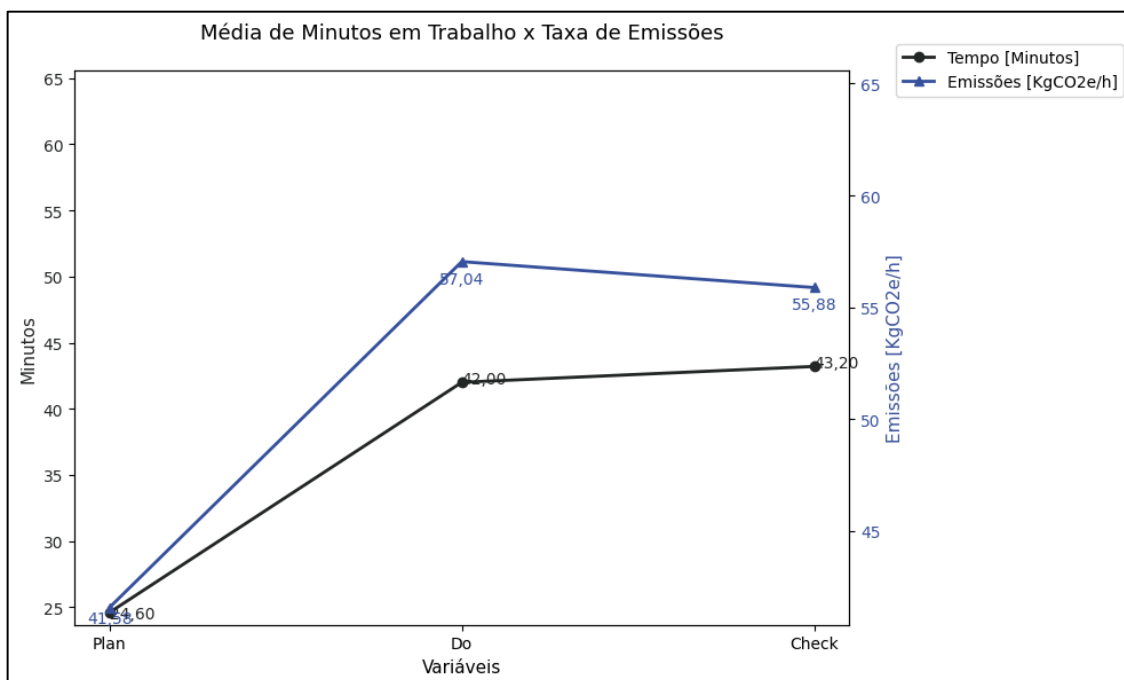
Fonte: Autor (2025)

Figura 31 - Média de Tempo Trabalhado em 60 Min x Consumo de Combustível em 60 minutos



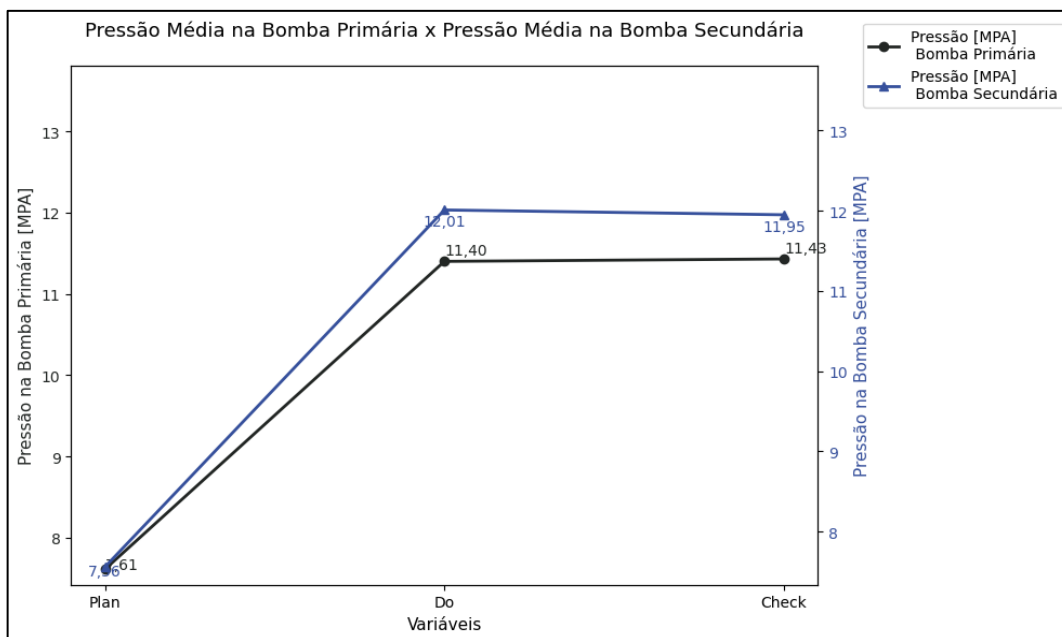
Fonte: Autor (2025)

Figura 32 - Média de Tempo Trabalhado em 60 Min x Emissões de Kg de CO₂e em 60 minutos

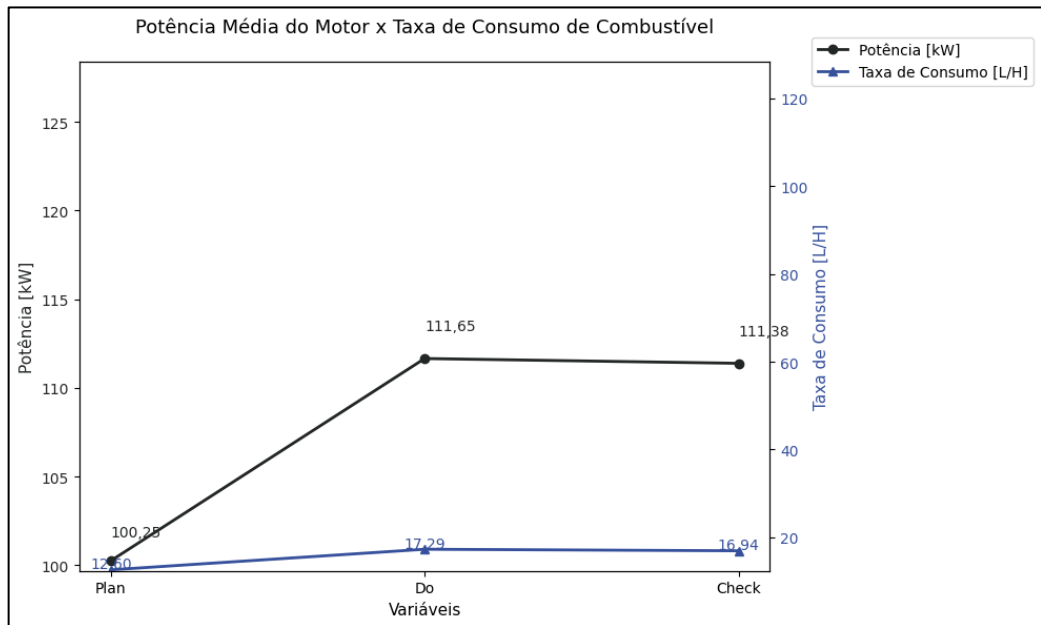


Fonte: Autor (2025)

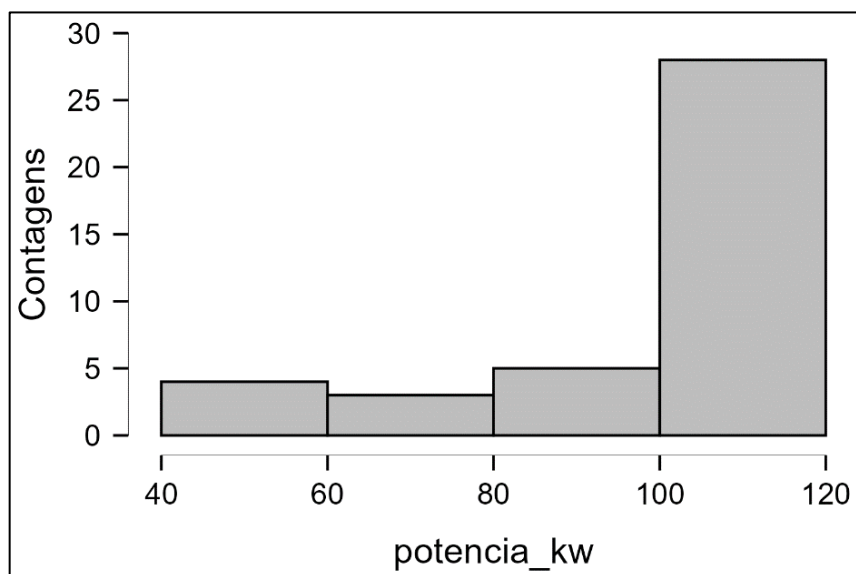
Figura 33 - Pressão Média no Sistema Hidráulico



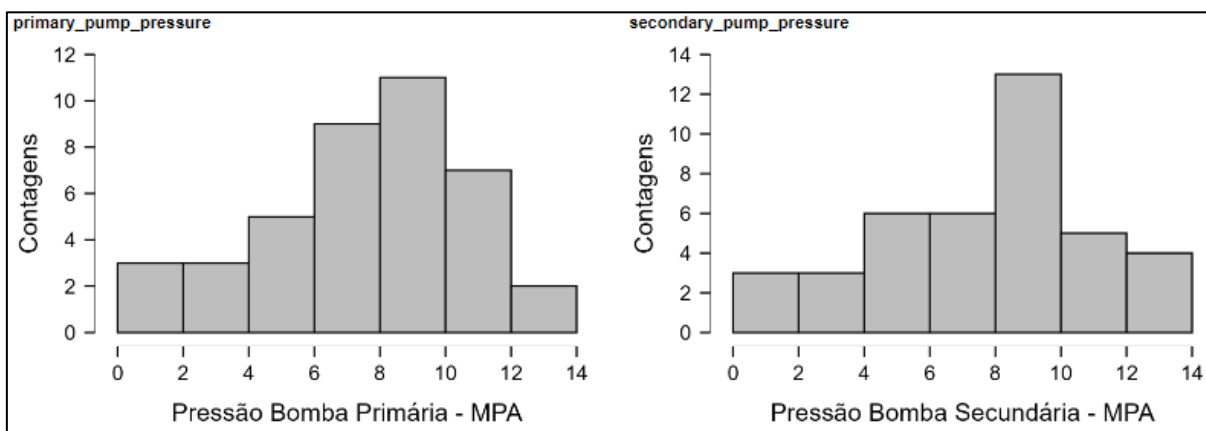
Fonte: Autor (2025)

Figura 34 - Potência Utilizada x Taxa de Consumo de Combustível

Fonte: Autor (2025)

Figura 35 – Distribuição de Potência, em kW – Fase Plan

Fonte: Autor (2025)

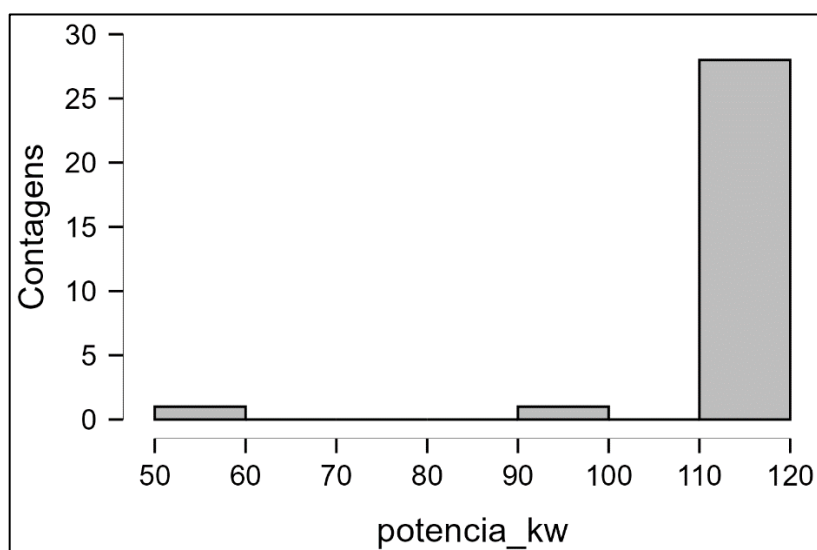
Figura 36 – Distribuição de Pressões das Bombas, em MPA – Fase Plan

Fonte: Autor (2025)

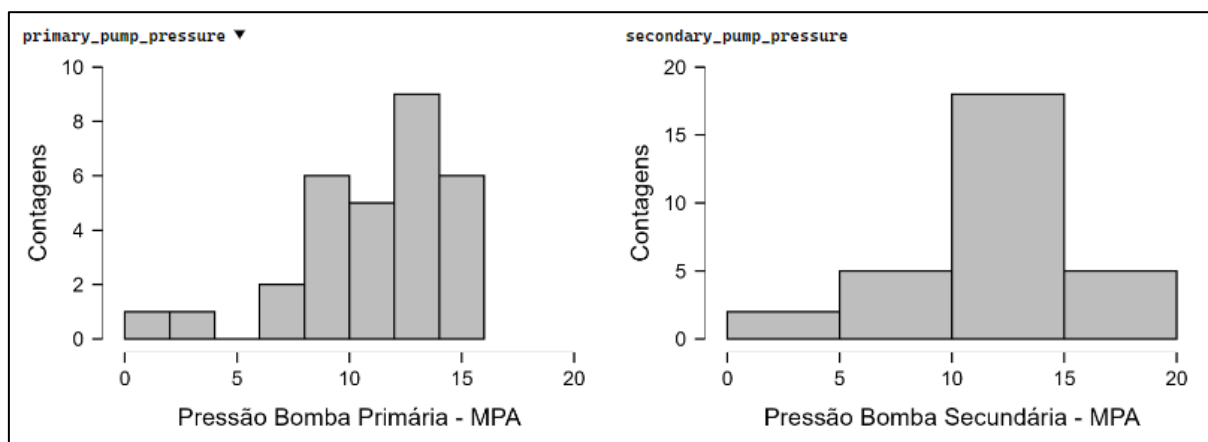
Tabela 4 – Estatísticas de Carga no Motor – Fase PLAN

Variável	Potência Motor	Pressão Bomba Primária	Pressão Bomba Secundária
Média	100,24	7,60	7,56
Desv. Padrão	22,30	3,41	3,38

Fonte: Autor (2025)

Figura 37 – Distribuição de Potência, em kW – Fase Do

Fonte: Autor (2025)

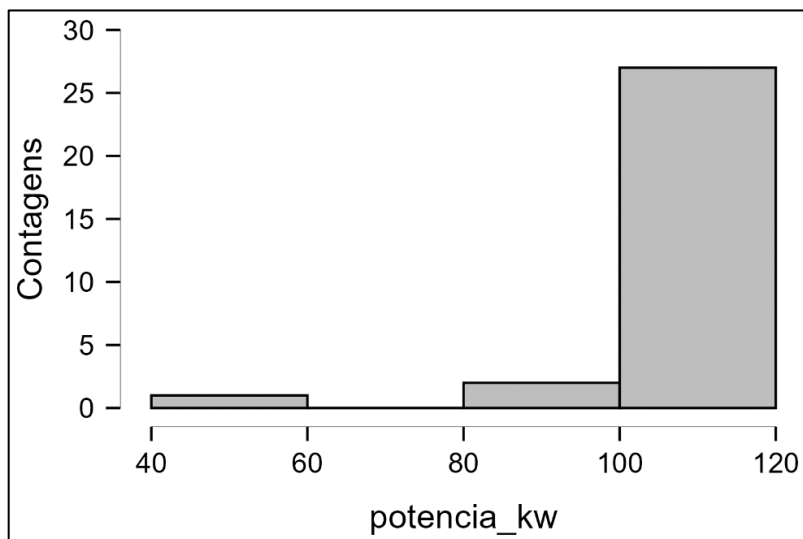
Figura 38 – Distribuição de Pressões das Bombas, em MPA – Fase Do

Fonte: Autor (2025)

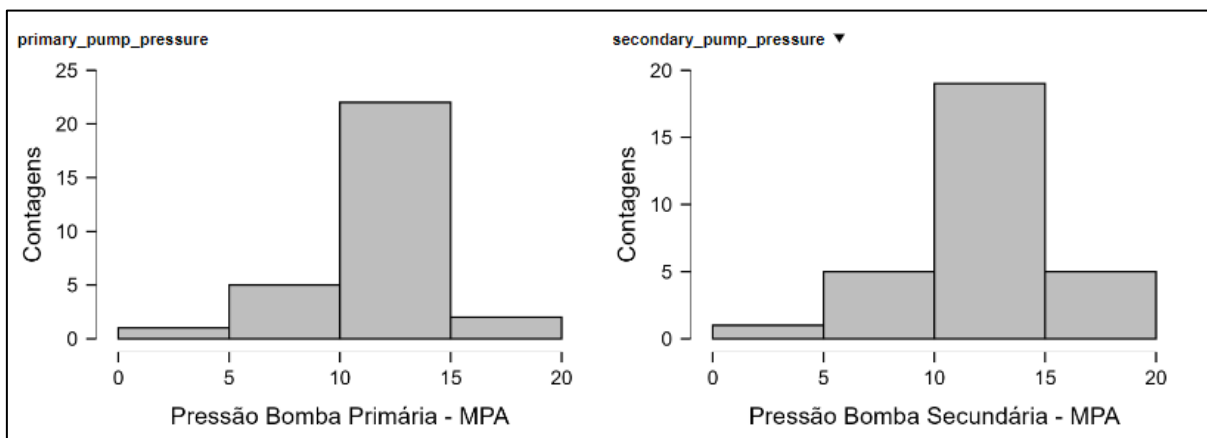
Tabela 5 – Estatísticas de Carga no Motor – Fase DO

Variável	Potência Motor	Pressão Bomba Primária	Pressão Bomba Secundária
Média	111,65	11,39	12,00
Desv. Padrão	11,52	3,38	3,46

Fonte: Autor (2025)

Figura 39 – Distribuição de Potência, em kW – Fase Check

Fonte: Autor (2025)

Figura 40 – Distribuição de Pressões das Bombas, em MPA – Fase Check

Fonte: Autor (2025)

Tabela 6 – Estatísticas de Carga no Motor – Fase CHECK

Variável	Potência Motor	Pressão Bomba Primária	Pressão Bomba Secundária
Média	111,39	11,43	11,94
Desv. Padrão	14,09	3,12	3,36

Fonte: Autor (2025)

5.2.2 Análise de Dados de Operação

Para a análise dos tempos de ciclo, o valor médio obtido no final da fase PLAN foi de aproximadamente 819 segundos (Tabela 7) por caminhão, com um fator de enchimento estimado, em média de 52% (Equação 8).

Na fase DO/CHECK, quando o equipamento foi reposicionado (Figura 42), o fator de enchimento teve sua média estimada em 73%. O equipamento obteve um aumento geral do fator de enchimento, de aproximadamente 36,54% entre as fases PLAN e DO/CHECK (Tabela 13). Avaliando em termos de tempo de ciclo, a redução foi de 51,02% entre as fases, evidenciando aumento de capacidade de produção, em virtude da padronização do processo de carregamento

O desvio padrão entre o tempo de ciclo médio reduziu para 176,12 segundos, o que indica uma melhoria na regularidade dos tempos em relação à média geral. As curvas de distribuição mostram a concentração dos valores de tempo ciclo a direita, antes da padronização e também o deslocamento da curva para a esquerda pós padronização. Especificando uma referência de 7 minutos para o carregamento em ambas as distribuições, é possível visualizar a distribuição dos tempos de ciclo em relação a especificação.

Tabela 7 - Estatística Descritiva – Fase PLAN

Variável	Tempo ciclo	Tempo por despejo	Despejos	% enchimento
Mediana	819,68	53,33	18,00	48,01 %
Média	811,66	53,74	17,17	52,00 %
Desv. Padrão	195,39	12,91	3,28	12,00 %

Fonte: Autor (2025)

Tabela 8 - Estatística Descritiva – DO/CHECK

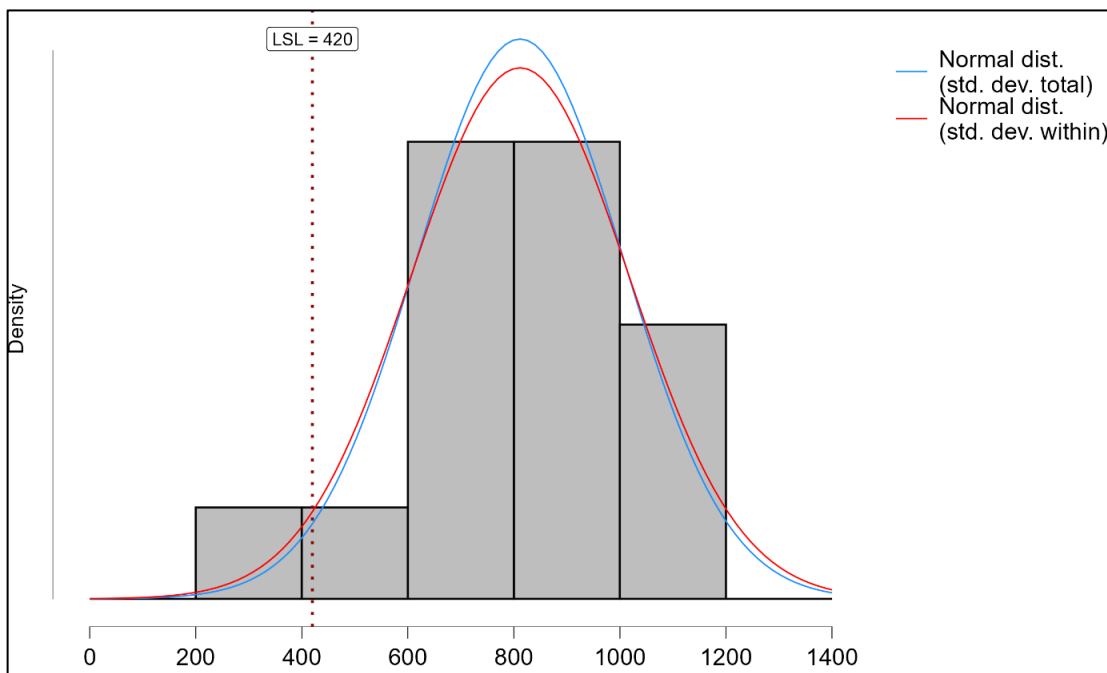
Variável	Tempo ciclo	Tempo por despejo	Despejos	% enchimento
Mediana	383,93	32,05	12,00	71,00 %
Média	397,37	32,16	12,10	73,00 %
Desv. Padrão	176,12	10,31	2,12	17,11 %

Fonte: Autor (2025)

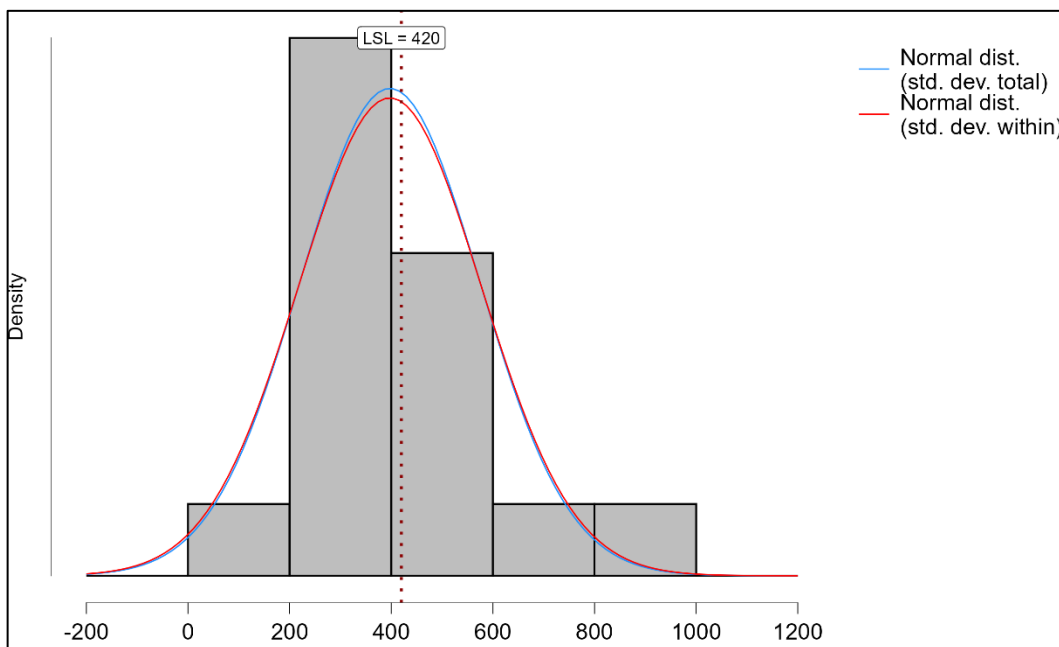
Figura 41 - Reposicionamento da Máquina - Fase Do/Check



Fonte: Autor (2025)

Figura 42 – Distribuição de Tempo de Ciclo - Fase PLAN/DO

Fonte: Autor (2025)

Figura 43 – Distribuição de Tempo de Ciclo - Fase DO/CHECK

Fonte: Autor (2025)

As demais variáveis operacionais foram analisadas, umas em relação as outras. Uma das principais medidas estatísticas utilizadas para relacionar diferentes grandezas e a correlação, que determina a relação de linearidade de uma grandeza em relação a outra. A correlação pode ser definida pela seguinte equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (14)$$

A equação 14 representa o método de Pearson. A correlação implica em uma relação entre duas grandezas (x e y) onde quanto mais próximo o valor r estiver de 1, a indicação é que as grandezas têm uma relação de linearidade (x cresce e y cresce ou diminui). É importante salientar que correlação não implica, necessariamente, casualidade. Dados terem correlação forte não indicam uma relação de causa, o que não é o caso do procedimento de carregamento com a escavadeira uma vez que o processo é conhecido e as relações entre as variáveis estudadas também são conhecidas.

No procedimento de carregamento, o fator de enchimento influencia diretamente a quantidade de material despejada na caçamba do caminhão. Observa-se uma correlação negativa entre o fator de enchimento e o número de ciclos de carregamento, uma vez que o aumento do volume de material transportado em um único movimento reduz a necessidade de múltiplas operações de escavação e descarga.

Adicionalmente, verifica-se uma correlação negativa entre o fator de enchimento e o tempo de ciclo total, pois quanto maior o volume carregado por movimento, mais rapidamente a caçamba do caminhão é preenchida. Essa relação contribui para a redução do tempo de carregamento, o aumento da eficiência operacional e a otimização do desempenho do sistema de transporte de material. Os dados de performance do equipamento mostram a relação entre as grandezas analisadas. As análises dos dados na fase plan (Tabela 9) e na fase de checagem (Tabela 10) indicam o comportamento esperado para o processo.

Tabela 9 - Correlação – Fase PLAN

Variável	Tempo ciclo	Despejos	% enchimento
Tempo ciclo	1,00	0,61	-0,67
Despejos	0,61	1,00	-0,96
% Enchimento	-0,67	-0,96	1,00

Fonte: Autor (2025)

Tabela 10 - Correlação - DO/CHECK

Variável	Tempo ciclo	Despejos	% enchimento
Tempo ciclo	1,00	0,74	-0,69
Despejos	0,74	1,00	-0,98
% Enchimento	-0,69	-0,98	1,00

Fonte: Autor (2025)

Durante a análise, também foi realizado o teste-t de Student para amostras populacionais emparelhadas para comparar as variáveis, antes e depois do processo de padronização. O teste-t é aplicado, segundo Fávero (2024), para se verificar se duas amostras relacionadas, extraídas antes e depois de um marco, são ou não diferentes significativamente. No manual do JASP (Goss, 2020), a indicação estatística para análise desse resultado se baseia em quatro pressupostos principais:

- A variável dependente deve ser medida em escala contínua;
- A variável independente deve consistir em 2 grupos categóricos relacionados/combinados, ou seja, cada participante coincide em ambos os grupos;
- As diferenças entre os pares combinados devem ter, aproximadamente, distribuição normal;
- Não deve haver outliers significativos nas diferenças entre os 2 grupos;

Fávero (2024) indica que para o teste-t em dados emparelhados, deve-se determinar a diferença entre os pares em cada posição e realizar o teste de hipótese. Antes de realizar a verificação do efeito da padronização, foi realizado também o teste de normalidade dos dados amostrais.

No teste utilizado, o de Shapiro-Wilk, aplicado em amostras com valores entre 4 e 2000 (Fávero, 2024), a hipótese nula se refere ao conjunto amostral pertencer ou não a uma distribuição normal. Foi considerado para amostragem de 30 valores, o valor da estatística de Shapiro é 0,912 (Fávero, 2024) para um nível de significância de 0,05 (ANEXO 2).

No teste de hipótese t, a hipótese nula (H_0) é que a diferença pareada entre os grupos analisados é zero:

1. Hipótese Nula $\rightarrow H_0: \mu_d = 0$ onde $\mu_d = \mu_{antes} - \mu_{depois}$
2. Hipótese Alternativa $\rightarrow H_1: \mu_d \neq 0$

Com base nos resultados obtidos, os valores p ficaram abaixo do nível de significância de 0,05 (ANEXO 3). Isso implica dizer que para o teste de hipótese, ocorre a rejeição a hipótese nula (H_0).

Dessa forma, conclui-se que as diferenças observadas antes e depois da padronização são significativas. A análise das suposições do teste, por meio da avaliação da normalidade das diferenças, indicou que, embora uma das variáveis apresentasse leve desvio, o teste t pareado permaneceu adequado, considerando o tamanho da amostra.

Tabela 11 – Teste de Shapiro - Wilk

			W	p
Tempo Ciclo Antes	-	Tempo Ciclo Depois	0,906	0,012
Despejos Antes	-	Despejos Depois	0,930	0,050
% Enchimento Antes	-	% Enchimento Depois	0,944	0,115
Tempo de Despejo Antes	-	Tempo de Despejo Depois	0,970	0,550

Fonte: Autor (2025)

Tabela 12 – Teste T Para Amostras Dependentes

Medição 1		Medição 2	t	p
Tempo Ciclo Antes	-	Tempo Ciclo Depois	7,38	< 0,001
Despejos Antes	-	Despejos Depois	7,56	< 0,001
% Enchimento Antes	-	% Enchimento Depois	-7,39	< 0,001
Tempo de Despejo Antes	-	Tempo de Despejo Depois	6,75	< 0,001

Fonte: Autor (2025)

5.2.3 Análise Operacional Final

Em termos de economia, foi possível reduzir o custo anual de combustível no equipamento em R\$ 2.646,00. Com a manutenção da taxa de consumo a 16,94 Litros por Hora, caso a expansão do processo de padronização ocorresse para toda a frota de escavadeiras (Tabela 1), e as condições fossem replicadas em todos os equipamentos, o custo anual com combustível passaria de R\$ 1.568.548,80 para R\$ 1.536.796,80. A redução anual do custo de seria de R\$ 31.752,00.

Em termos de emissões, o total de massa gerada de dióxido de carbono equivalente, entre a fase DO e CHECK, segundo a telemetria, passou de 57,04 para 55,88 Kg de dióxido de carbono equivalente por hora, reduzindo a quantidade de emissões em 1,16 kg por hora.

Considerando a mesma análise realizada para o consumo, o equipamento passou pela redução de em 71,87 tCO₂e para 70,48 tCO₂e. Considerando a expansão para a frota de equipamentos definida, em o volume anual de emissões, a quantidade de poluentes gerado, passaria de, aproximadamente, 862 tCO₂e para 845 tCO₂e na frota, implicando em uma redução de 17,53 tCO₂e. Para efeitos de comparação, a Agência de Proteção Ambiental Americana disponibiliza um painel para equivalência entre valores de emissões entre diferentes fontes geradoras. Segundo o painel, a economia gerada pode ser comparável a emissões geradas das seguintes formas:

1. Quatro veículos de passeio a gasolina, movidos durante um ano;
2. Quinze veículos a passeio, elétricos, movidos durante um ano;
3. Emissões geradas por duas casas durante um ano;
4. Total de emissões consumidas por 290 mudas de árvores em 10 anos;

A eficiência operacional do equipamento pode ser determinada com base no tempo de operação em trabalho e no tempo de operação em ociosidade em um intervalo de 60 minutos. Com base no método de Lewis et al. (2013), a eficiência pode ser determinada, invertendo a equação 1, da seguinte forma:

$$\eta = \frac{\text{Tempo Não Ocioso}}{\text{Tempo Ocioso} + \text{Tempo Não Ocioso}} \quad (15)$$

Os dados mostraram que o equipamento passou de 63% antes da intervenção, para 85% durante a intervenção e 81% depois da intervenção. As proporções entre a média de minutos trabalhando e em ociosidade antes, durante e depois da padronização, passaram de 1,67 para 5,68 e 4,28 respectivamente. O efeito operacional indica que o equipamento performou melhor, porém é necessário ajuste fino na operação para estabilizar os números de eficiência do equipamento.

Uma das explicações para o consumo ter reduzido pode estar atrelado a estabilização dos regimes de potência, mas também a leve queda na carga sobre o motor como indicado nas pressões da bomba primária entre as fases DO e CHECK, juntamente com a redução da proporção do tempo trabalhado e do tempo ocioso. Aspectos não analisados durante essa verificação operacional podem aprofundar o efeito, como o da viscosidade do óleo hidráulico atrelado a temperatura e também a variação de utilização do equipamento entre operadores.

Tabela 13 - Comparativo – Operação - PLAN X CHECK.

Variável	Média Antes	Média Depois	Variação
% de Enchimento	52,10 %	72,70 %	+ 39,53 %
Tempo de Ciclo	811,66	397,37	- 51,04 %
Tempo por Despejo	53,74	32,16	- 40,15 %
Despejos	17,00	12,00	- 29,41 %

Fonte: Autor (2025)

Tabela 14 - Comparativo – Performance em 60 Minutos - PLAN X CHECK.

Variável	Média Antes	Média Depois	Variação
Média de Minutos Em Trabalho	24,60	43,20	+ 242,20 %
Média de Minutos Em Ociosidade	14,70	10,1	- 31,95 %
Média de Minutos Em Carregamento	4,80	9,6	- 100,00 %
Média de Minutos Em Giro	15,00	27,00	- 80,00 %

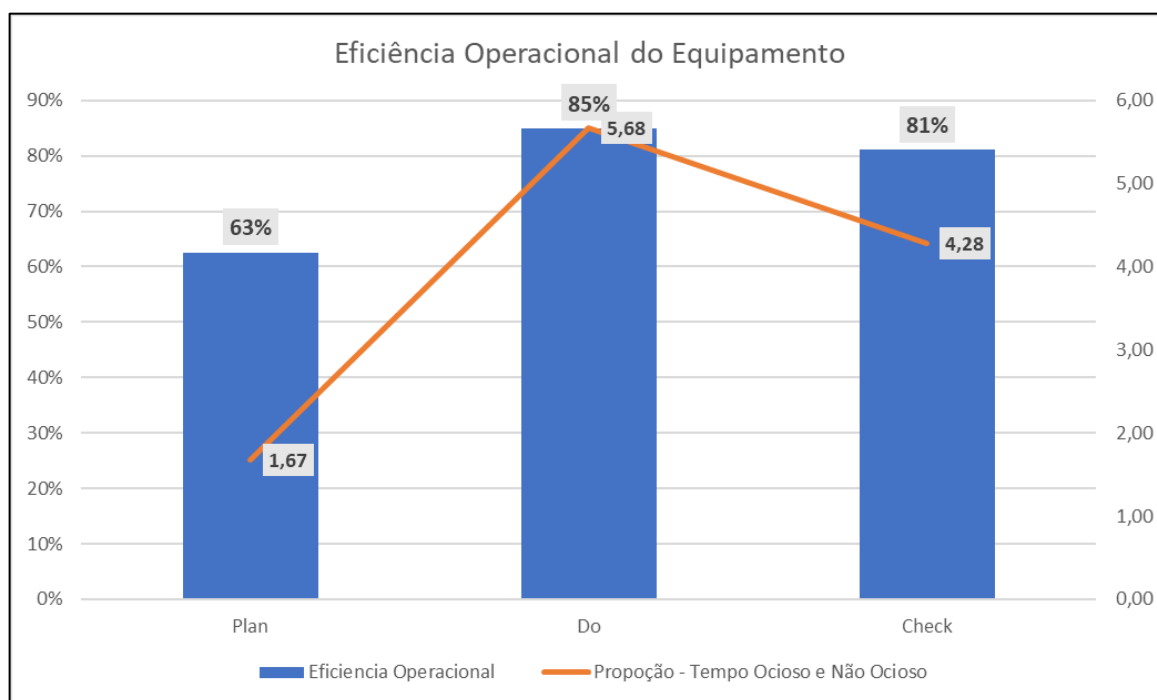
Fonte: Autor (2025)

Tabela 15 - Comparativo – Taxas de Consumo – Durante e Depois da Implementação da Padronização – DO X CHECK.

Variável	Média Antes	Média Depois	Variação
Taxa de Consumo – L/H	17,29	16,94	-2,02 %
Taxa de Emissões - tCO_2e/H	57,04	55,88	- 2,03 %

Fonte: Autor (2025)

Figura 44 – Eficiência da Escavadeira e Proporção de Tempo Não Ocioso e Ocioso



Fonte: Autor (2025)

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Após a finalização do presente trabalho, foi possível fazer uma comparação dos efeitos operacionais da escavadeira, nas fases do ciclo PDCA, com os impactos no motor utilizado no equipamento sendo acompanhados, desta forma seguem as conclusões mais relevantes e alguns sugestões como continuidade do trabalho.

6.1. CONCLUSÕES FINAIS

Durante a construção do trabalho, diversas informações foram geradas e analisadas. Com os dados, foi possível realizar a avaliação do desempenho geral do equipamento antes e depois da implementação da padronização. O processo de melhoria de um sistema de produção envolve um estudo minucioso dos gargalos existentes para a criação do plano de ação e da definição das ações de correção, resultando em melhoria do processo e nas lições apreendidas. Com a metodologia definida, é possível replicar o método empregado em outras análises ou melhorar o método já existente.

A primeira avaliação notável foi a redução do tempo de ociosidade média do equipamento em 32%, considerando um intervalo de 60 minutos de operação. Esse efeito operacional é a redução da manutenção da atividade que não agrega valor durante o processo de carregamento, sendo a ação resultante da avaliação dos efeitos de desperdício (Quadro 3). O impacto desse indicador reduz a possibilidade de falhas no motor devido a desgaste desnecessário, gerado pelo tempo longo em baixa rotação sem atividade e o desperdício contínuo de combustível sem a conversão do consumo em trabalho.

Com as alterações do fluxo de operação, o equipamento passou a produzir mais e ter mais estabilidade de movimentos durante o processo. A análise dos tempos operacionais demonstrou a estabilização, por meio da redução dos desvios entre os tempos ciclos, de 195,39 segundos para 176,12 segundos, o que em um processo fabril, indica menor variabilidade. O ajuste operacional que resultou esse fator, que foi o reposicionamento da máquina em relação ao caminhão de carregamento, resultou da análise de sobrecarga do equipamento.

O aumento do fator de enchimento gerou, como esperado, o efeito físico devido ao aumento da demanda de potência no motor, para o aumento da força hidráulica, porém, a estabilização dos modos de utilização, a longo prazo, durante as fases DO e CHECK, indicou uma melhoria da eficiência do equipamento. Apesar do aumento do fator de enchimento de cerca de 39,53%

O equipamento obteve uma redução de 2,02% da taxa de consumo de combustível. Com o aumento estimado do fator de enchimento, o equipamento passou a realizar menos ciclos de carga e descarga, estimando-se a média que passou de 17 ciclos para 12 ciclos para enchimento de um caminhão. Essa redução demonstra que mesmo que o equipamento tenha aumento da solicitação, é possível manter um consumo estável e reduzido.

Os dados de redução de consumo estão diretamente ligados as taxas de emissões onde o equipamento passou de 57,04 para 55,88 Kg de dióxido de carbono equivalente por hora. A redução das emissões, apesar de estar sendo definida com base nos valores de quantidade de combustível consumido e do fator de emissão do combustível, pode ser, na prática, ainda menor, devido aos sistemas de pós-tratamento de emissões como os filtros catalisadores ou por meio de adoção de variações renováveis do diesel como o biodiesel.

A economia gerada com combustível, possibilita a utilização e o direcionamento do valor para a manutenção preventiva do equipamento, como a troca de elementos filtrantes, componentes elétricos. O impacto dessa economia gera aumento da disponibilidade do equipamento, uma vez que, realizando as manutenções, a probabilidade de quebras não programadas será menor, aumentando o tempo médio entre falhas.

Outro aspecto importante sobre o desenvolvimento do trabalho foi a adoção de ferramentas de análise estatística open source como o JASP. Por meio da utilização dessas ferramentas, os custos com software proprietário para o processamento dos dados coletados foram zerados. A adoção de ferramentas como essas demonstram que projetos de alta demanda pode ser desenvolvidos por opções mais acessíveis de aplicações, apesar da curva de aprendizagem ser mais longa.

Por fim, por meio da conclusão desse trabalho, foi possível desenvolver uma abordagem de análise para motores a combustão interna, aplicado a uma escavadeira, que poderá ser replicada em diferentes sistemas. A utilização de uma ferramenta consolidada a décadas como o ciclo PDCA, mostra que a aplicação da técnica se mantém atual, e utilizada de forma adequada, gera resultados positivos dentro do ambiente fabril. O projeto consolidado resultou na publicação do trabalho de conclusão de curso no repositório institucional do IFPE, sendo o mesmo podendo ser referência para diversos artigos e publicações futuras vinculadas ao estudo gerado.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade e geração de mais estudos acerca de escavadeiras hidráulicas e equipamentos móveis fora de estrada como um todo, algumas recomendações são sugeridas para futuros estudos.

A primeira sugestão de estudo seria referente a comparação de diferentes materiais nas forças de desagregação: Por meio de dados de telemetria, coletar dados de performance de escavadeiras em regimes de operação com diferentes materiais rochosos, como brita, calcário, areia, e avaliar os efeitos na performance do motor, comparando os efeitos nas emissões e no consumo de combustível.

A segunda sugestão de estudo é a avaliação dos efeitos de temperatura no consumo de combustível: Por meio de análises estatísticas, avaliar o efeito da temperatura externa e interna do motor no consumo de combustível e nas emissões. Em conjunto, o efeito da válvula EGR e o impacto dos sistemas de resfriamento de gases de escapamento nos motores.

A terceira sugestão seria a avaliação, com uso de ANOVA, o efeito da a variação de diferentes ferramentas de penetração no solo: comparando com diferentes materiais, em termos de eficiência de fator de enchimento e nas forças de desagregação do solo, e avaliar as diferentes taxas de consumo e de emissões sobre diferentes regimes de operação. Por fim, por meio dessas recomendações, espera-se que o tema proposto tenha continuidade científica, sendo relevante para melhoria da eficiência dos equipamentos de construção e redução de poluentes no meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ARMAC. **Otimizando o uso de combustível em máquinas pesadas: 9 ações.** Disponível em: <https://armac.com.br/blog/manutencao/consumo-de-combustivel/> Acesso em: 15 dez. 2025.

AGÊNCIA BRASIL. **Brasil bate pela 1ª vez marca de 5 milhões de barris de petróleo e gás.** Agência Brasil, Brasília, 1 set. 2025. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2025-09/brasil-bate-pela-1a-vez-marca-de-5-milhoes-de-barris-de-petroleo-e-gas>. Acesso em: 5 out. 2025.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna.** Vol. 1. 2. ed. São Paulo: Editora Blücher, 2014. 554 p. ISBN 978-85-212-1293-5.

BOSCH. **Manual de tecnologia automotiva.** 25. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

BRAUN, Silvana; APPEL, Lucia Gorenstin; SCHMAL, Martin. **A poluição gerada por máquinas de combustão interna movidas a diesel: a questão dos particulados. Estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras.** Química Nova, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 414–420, jun. 2004. DOI: 10.1590/S0100-40422004000300018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/vG7RHJHrHTTcRnSCmHqvYCj/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 01 ago. 2025.

CASA CIVIL. **Brasil se compromete a reduzir emissões de carbono em 50 %, até 2030.** Casa Civil, 03 nov. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2021/novembro/brasil-se-compromete-a-reduzir-emissoes-de-carbono-em-50-ate-2030>. Acesso em: 18 junho. 2025.

CONAMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 490, de 16 de novembro de 2018.** Brasília, 2018. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=767. Acesso em: 12 ago. 2025.

CATERPILLAR INC. **Caterpillar Performance Handbook.** 50. ed. Peoria, IL: Caterpillar Inc., 2022. 588 p. SEBD0351-50.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa – Uma Abordagem Prática.** 4. ed. São Paulo: AMGH / McGraw-Hill, 2012. Tradução de Fátima A. M. Lino.

DORNOFF, Jan; RODRÍGUEZ, Felipe. Euro 7: **The new emission standard for light- and heavy-duty vehicles in the European Union**. Washington, D.C.: International Council on Clean Transportation (ICCT), março de 2024. Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/03/ID-116-%E2%80%93Euro-7-standard_final.pdf. Acesso em: 17 ago. 2025.

DURIEUX, Bernardo. **Sem infraestrutura, o carro elétrico continuará sendo um luxo urbano**. Valor Econômico, 22 jul. 2025. Disponível em: <https://valor.globo.com/patrocinado/pressworks/noticia/2025/07/22/seminfraestrutura-o-carro-eletrico-continuara-sendo-um-luxo-urbano.ghtml>. Acesso em: 10 agosto. 2025.

DIAS, B. M. A. **Unidade microcontroladora para gerenciamento eletrônico de um motor de combustão interna ciclo Otto**. 2015. Dissertação (Mestrado em Microeletrônica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Defendida em 26 mar. 2015. Publicada em 17 jun. 2016. DOI: 10.11606/D.3.2016.tde-15062016-162711. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3140/tde-15062016-162711/pt-br.php>. Acesso em: 23 ago. 2025.

DOE - DEPARTMENT OF ENERGY. **Idling Reduction for Personal Vehicles**. Washington, D.C.: Vehicle Technologies Office, May 2015. Disponível em: https://afdc.energy.gov/files/u/publication/idling_personal_vehicles.pdf. Acesso em: 7 jan. 2026.

FIDELIS, Washington Manoel. **Acompanhamento remoto por sensoriamento sem fio em componentes de escavadeiras**. 2022. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Automação para Processos de Mineração) – Instituto Tecnológico Vale, Itabira, 2022. Orientador: Prof. Gustavo Pessin. Disponível em: <https://www.itv.org/wp-content/uploads/2023/03/TCC-Washington-Fidelis-.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2025.

FÁVERO, Luiz Paulo; BELFIORE, Patrícia. **Manual de Análise de Dados: Estatística e Machine Learning com Excel®, SPSS®, Stata®, R® e Python®**. 2. ed. Barueri: GEN LTC, 2024. 1.288 p. ISBN 978-85-95159-93-8.

GOSS-SAMPSON, Mark A.; FARO, André; LEITE, Michelle de Farias; et al. **Análise estatística no JASP: um guia para estudantes** (versão em português brasileiro). 4. ed. JASP-Stats, 2020. Disponível em: <https://jasp-stats.org/wp-content/uploads/2021/11/Statistical-Analysis-in-JASP-A-Students-Guide-v14-Brazilian-Portuguese.pdf>

HAGAN, R.; MARKEY, E.; CLANCY, J.; KEATING, M.; DONNELLY, A.; O'CONNOR, D. J.; MORRISON, L.; MCGILLICUDDY, E. J. **Non-Road Mobile Machinery Emissions and Regulations: A Review**. Air, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 14–36, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.3390/air1010002>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2813-4168/1/1/2>. Acesso em: 01 ago. 2025.

HONÓRIO, Gesner Moreira Honório; SANTOS, Ricardo Augusto Oliveira. **Telemetria como ferramenta iot na gestão da segurança de frotas veiculares**. ARACÊ , [S. l.], v. 6, n. 3, p. 7692–7709, 2024. DOI: 10.56238/arev6n3-201. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/1414>. Acesso em: 7 jan. 2026.

HEYWOOD, John B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2018. 1056 p. ISBN 978-1-260-11610-6

IBAMA. Manual PROCONVE/PROMOT. 2011. 34 p. **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis**. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/veiculosautomotores/manual_proconve%20promot_portugues.pdf. Acesso em: 21 ago. 2025.

INFLEET. **Ociosidade do motor: o que é, impactos e como reduzir**. Disponível em: <https://infleet.com.br/blog/ociosidade-do-motor/>. Acesso em: 19 dez. 2025.

KHAN, A. B. M. S.; CLARK, N. N.; THOMPSON, G. J.; WAYNE, W. S.; GAUTAM, M.; LYONS, D. W.; HAWELTI, D. **Idle emissions from heavy-duty diesel vehicles: review and recent data**. Journal of the Air & Waste Management Association, v. 56, n. 10, p. 1404–1419, 2006. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464551.

LEWIS, P. V.; LEMING, M.; RASDORF, W. **Impact of engine idling on fuel use and CO₂ emissions of nonroad diesel construction equipment**. Journal of Management in Engineering, v. 28, n. 1, p. 31–38, 2012. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000068.

MARQUES, L.S.; Ferraz, G.A.e.S.; Moreira Neto, J.; Magalhães, R.R.; de Lima, D.A.; Tsuchida, J.E.; Fuzatto, D.C. **Agricultural Machinery Telemetry: A Bibliometric Analysis**. AgriEngineering 2022, 4, 939–950. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4040060>

MORDOR. **Brazil Construction Equipment Market**. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/brazil-construction-equipment-market>. Acesso em: 21 dez. 2025.

MAHAMED, Elham; ROGAGE, Kay; DOUKARI, Omar; KASSEM, Kassem. **Automating equipment productivity measurement using deep learning**. In: Proceedings of the 2021 European Conference on Computing in Construction (EC³ 2021), v. 1, p. 140–147, 2021. DOI: 10.35490/EC3.2021.153.

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**: Relatório – 6ª edição, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>. Acesso em: 22 junho. 2025.

NATIVIDADE. Lucas Rocha. **Gestão de tempos improdutivos da frota de transporte e os impactos no planejamento estratégico de lavra**. 2025. 52 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/7702>. Acesso em: 17 ago. 2025.

OLIVEIRA. João Douglas Costa de. **Produção de biodiesel a partir de diferentes fontes de óleos**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/22957>. Acesso em: 01 setembro. 2025.

PETROBRAS. **Manual de Diesel**. Versão Agosto de 2024. Disponível em: https://petrobras.com.br/documents/2677942/3190768/Manual%20de%20Diesel_2023-%20rev%20agosto%202024.pdf/50e7a007-186b-0502-88d4-df2c752e526b?version=1.0&t=1722547705000&download=true. Acesso em: 24 ago. 2025.

PSU. **How much heavy equipment fuel consumption per hour?** Disponível em: <https://psualatberat.com/en/tabel-konsumsi-bbm-alat-berat/>. Acesso em: 4 jan. 2026.

RACIA, Ismael Momade. **Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/163322>. Acesso em: 24 ago. 2025.

RAPANELLO, Arthur; TERAZZI, Luis Fernando. **Os Impactos Econômicos e Operacionais do Tempo de Motor Ocioso em Caminhões**: Um estudo em uma Empresa do Setor Canavieiro. *Advances in Global Innovation & Technology*, [S. l.], v. 4, n. 1, p. e41392, 2025. Disponível em: <https://revista.fateczl.edu.br/index.php/git/article/view/392>. Acesso em: 7 jan. 2026.

RODRIGUES, Lucas Calabria Correia. **Análise de dados de telemetria de máquinas agrícolas de concessionária John Deere**. 2023. 30 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Belém, 2023. Disponível em: <https://bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/2996>. Acesso em: 30 ago. 2025.

ROSSETTI, Gabriel. **O que significa muda, mura, muri**. Voitto, 2023. Disponível em: <https://voitto.com.br/blog/artigo/o-que-significa-muda-mura-muri-3m>. Acesso em: 01 nov. 2025.

SOBRATEMA Associação Brasileira De Tecnologia Para Construção E Mineração. **Estudo Sobratema do Mercado Brasileiro de Equipamentos para Construção em 2024**. Disponível em: <https://www.sobratema.org.br/estudomercado>. Acesso em: 7 jan. 2026.

SHARMA, Shivom; MARÉCHAL, François. **Carbon dioxide capture from internal combustion engine exhaust using temperature swing adsorption**. *Frontiers in Energy Research*, v. 7, p. 143, 2019. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/energyresearch/articles/10.3389/fenrg.2019.00143/full>. Acesso em: 2 out. 2025.

SOUZA, Hanna Cristina Tavares Dantas de. **Combustíveis: hidrocarbonetos, alcoóis e ésteres trabalhados por meio de estudo de casos**. 2025. 119 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Química – PROFQUI) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/a0278418-8f22-44a5-8bf-b8ae5967d639>. Acesso em: 17 ago. 2025.

SOUSA, Barbara Martins; LONGHINI, Tatielle Menolli. **Implantação de sistema de IoT para rastreamento de máquinas de terraplenagem a serviço de uma indústria de celulose**. *Exacta*, v. 20, n. 3, p. 666–687, 2022. DOI: 10.5585/exactaep.2021.16859.

TRANSPORT & ENVIRONMENT. **Reducing emissions from non-road mobile machinery: How new CO₂ rules, public procurement and infrastructure provisions can bring clean, affordable off-road machines to market and establish Europe's industry as a zero-emission leader**. 2024. Disponível em: https://www.transportenvironment.org/uploads/files/202412_NRMM_briefing_final.pdf. Acesso em: 17 ago. 2025.

UNIÃO EUROPEIA. **Regulamento (UE) 2016/1628 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 14 de setembro de 2016, relativo aos requisitos respeitantes aos limites de emissão de gases e partículas poluentes e à homologação de motores de combustão interna para máquinas móveis não rodoviárias, que altera os Regulamentos (UE) n.º 1024/2012 e (UE) n.º 167/2013 e que altera e revoga a Diretiva 97/68/CE**. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 252, p. 53–74, 16 set. 2016. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R1628>. Acesso em: 17 ago. 2025.

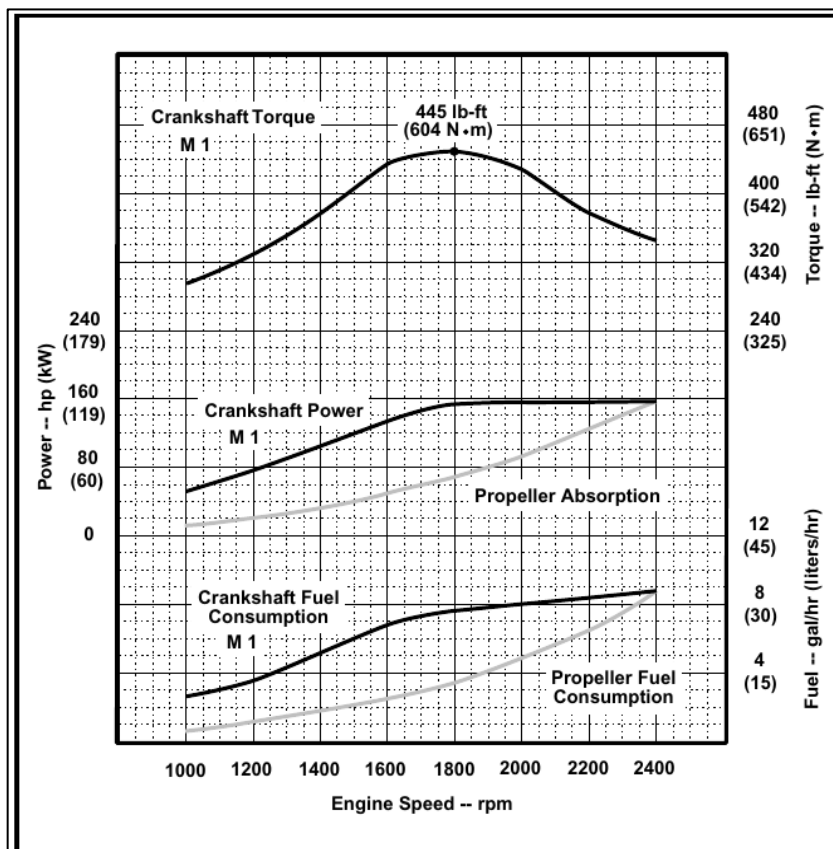
VAZ FILHO, Silter. **Análise estatística do tempo de ciclo de escavadeiras hidráulicas operando em uma lavra seletiva de calcário para tinta**. 2024. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Catalão, Catalão, 2024. Disponível em: https://prod.ufcat.edu.br:1337/uploads/SILTER_VAZ_FILHO_0a6dde4a60.pdf. Acesso em: 17 ago. 2025.

VICENTE, Pedro Teixeira. **Aplicação da metodologia PDCA na gestão da manutenção de equipamentos móveis de uma empresa de mineração**. 2021. 85 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021

TU, R.; LI, T.; MENG, C.; CHEN, J.; SHENG, Z.; XIE, Y.; XIE, F.; YANG, F.; CHEN, H.; LI, Y.; GAO, J.; LIU, Y. **Real-world emissions of construction mobile machines and comparison to a non-road emission model**. Science of The Total Environment, v. 771, p. 145365, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145365

ANEXOS

ANEXO 1 – ESPECIFICAÇÕES DO MOTOR



Fuel Consumption for Typical Propeller Curve

Engine rpm	Crank. Power hp (kW)	Crank. Torque lb-ft (N·m)	Prop. Absorption hp (kW)	Prop. Fuel gal/hr(L/hr)
2400	158 (118)	346 (470)	158 (118)	8.9 (33.7)
2200	158 (118)	478 (512)	122 (91)	6.5 (24.7)
2000	158 (118)	416 (563)	92 (68)	4.9 (18.4)
1800	153 (114)	445 (604)	67 (50)	3.5 (13.4)
1600	133 (99)	436 (591)	47 (35)	2.5 (9.5)
1400	101 (75)	377 (512)	31 (23)	1.7 (6.4)
1200	74 (55)	323 (438)	20 (15)	1.1 (4.1)
1000	56 (42)	296 (401)	11 (9)	0.6 (2.4)

ANEXO 2 – VALORES CRÍTICOS DE ESTATÍSTICA DE SHAPIRO-WILK

Tamanho da amostra <i>N</i>	Nível de significância α								
	0,01	0,02	0,05	0,10	0,50	0,90	0,95	0,98	0,99
3	0,753	0,758	0,767	0,789	0,959	0,998	0,999	1,000	1,000
4	0,687	0,707	0,748	0,792	0,935	0,987	0,992	0,996	0,997
5	0,686	0,715	0,762	0,806	0,927	0,979	0,986	0,991	0,993
6	0,713	0,743	0,788	0,826	0,927	0,974	0,981	0,936	0,989
7	0,730	0,760	0,803	0,838	0,928	0,972	0,979	0,985	0,988
8	0,749	0,778	0,818	0,851	0,932	0,972	0,978	0,984	0,987
9	0,764	0,791	0,829	0,859	0,935	0,972	0,978	0,984	0,986
10	0,781	0,806	0,842	0,869	0,938	0,972	0,978	0,983	0,986
11	0,792	0,817	0,850	0,876	0,940	0,973	0,979	0,984	0,986
12	0,805	0,828	0,859	0,883	0,943	0,973	0,979	0,984	0,986
13	0,814	0,837	0,866	0,889	0,945	0,974	0,979	0,984	0,986
14	0,825	0,846	0,874	0,895	0,947	0,975	0,980	0,984	0,986
15	0,835	0,855	0,881	0,901	0,950	0,976	0,980	0,984	0,987
16	0,844	0,863	0,887	0,906	0,952	0,975	0,981	0,985	0,987
17	0,851	0,869	0,892	0,910	0,954	0,977	0,981	0,985	0,987
18	0,858	0,874	0,897	0,914	0,956	0,978	0,982	0,986	0,988
19	0,863	0,879	0,901	0,917	0,957	0,978	0,982	0,986	0,988
20	0,868	0,884	0,905	0,920	0,959	0,979	0,983	0,986	0,988
21	0,873	0,888	0,908	0,823	0,960	0,980	0,983	0,987	0,989
22	0,878	0,892	0,911	0,926	0,961	0,980	0,984	0,987	0,989
23	0,881	0,895	0,914	0,928	0,962	0,981	0,984	0,987	0,989
24	0,884	0,898	0,916	0,930	0,963	0,981	0,984	0,987	0,989
25	0,888	0,901	0,918	0,931	0,964	0,981	0,985	0,988	0,989
26	0,891	0,904	0,920	0,933	0,965	0,982	0,985	0,988	0,989
27	0,894	0,906	0,923	0,935	0,965	0,982	0,985	0,988	0,990
28	0,896	0,908	0,924	0,936	0,966	0,982	0,985	0,988	0,990
29	0,898	0,910	0,926	0,937	0,966	0,982	0,985	0,988	0,990
30	0,900	0,912	0,927	0,939	0,967	0,983	0,985	0,988	0,990

ANEXO 3 – DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT

Graus de liberdade	Probabilidade associada na cauda superior								
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	127,3	318,309	636,619
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,894	6,869
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,768
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,689
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,660
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
35	0,682	1,306	1,690	2,030	2,438	2,724	2,996	3,340	3,591
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551
45	0,680	1,301	1,679	2,014	2,412	2,690	2,952	3,281	3,520
50	0,679	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	2,937	3,261	3,496
z	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807	3,090	3,291