



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JULLYANE MILENA SILVA DE FIGUEIREDO

**PROTÓTIPO DE SISTEMA BASEADO EM CONHECIMENTO NA
NUVEM PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM CAMINHÕES FORA-
DE-ESTRADA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Orientador: João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.

Florianópolis – SC

2023

JULLYANE MILENA SILVA DE FIGUEIREDO

**PROTÓTIPO DE SISTEMA BASEADO EM CONHECIMENTO NA
NUVEM PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM CAMINHÕES FORA-
DE-ESTRADA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de
Santa Catarina, para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Orientador: João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.

Florianópolis – SC

2023

Figueiredo, Jullyane Milena Silva de
PROTÓTIPO DE SISTEMA BASEADO EM CONHECIMENTO NA NUVEM
PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM CAMINHÕES FORA-DE-ESTRADA /
Jullyane Milena Silva de Figueiredo ; orientador, João
Carlos Espíndola Ferreira, 2023.
93 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Sistemas Especialistas. 3.
Diagnostico de Falhas. 4. Sistema em nuvem. 5. Veículo fora
de- estrada. I. Ferreira, João Carlos Espíndola. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Jullyane Milena Silva de Figueiredo

**Protótipo de Sistema Baseado em Conhecimento na Nuvem para
Diagnóstico de Falhas em Caminhões Fora-De-Estrada**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando Antonio Forcellini, Dr.Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Antonio Carlos Valdiero, Dr.Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marcelo Gitirana Gomes Ferreira, Dr.Eng.
Universidade Estadual de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Henrique Simas, Dr.Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D. Orientador

Florianópolis, 2023.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus pela inspiração e luz no meu caminho e a Nossa Senhora pela providência dos meios para que este trabalho fosse possível.

Ao Prof. João Carlos, pela orientação e pelos esforços para que este projeto gerasse frutos tangíveis, por sua compreensão e paciência diante de alguns tropeços e dificuldades enfrentadas.

Aos meus amados pais, Haroldo e Malena, que são a base sólida sobre a qual construí cada passo deste caminho. Suas palavras de encorajamento, amor incondicional e apoio constante foram o combustível que impulsionou meu progresso. Cada sacrifício que fizeram não passa despercebido e sou profundamente grato por ter pais tão incríveis.

À minha querida irmã Giovanna, sua presença alegre e apoio constante foram um lembrete constante de que eu não estava sozinho nessa jornada. Suas palavras de ânimo e ombro amigo foram meu conforto nos momentos desafiadores.

À minha amada avó Maria José (*in memoriam*), levo comigo as lembranças de seus conselhos sábios e seu amor incondicional. Sua sabedoria e gentileza moldaram minha jornada e eu dedico esta conquista em sua memória.

Ao César Tadeu por todo apoio, carinho, fortaleza e parceria. Sua presença ao meu lado durante todo este trabalho foi uma fonte inesgotável de motivação. Suas palavras de incentivo e encorajamento me impulsionaram nos momentos de dúvida e cansaço. Sua crença em mim fez toda a diferença.

Aos amigos de Belém e aos que fiz em Florianópolis, em especial da Comunidade Católica Shalom, que me acolheram e sempre me incentivaram ao longo da jornada.

Dedico aos meus pais e à toda a minha família.

RESUMO

Com o avanço tecnológico, a busca por segurança, produtividade e qualidade se tornou constante no mercado. Empresas estão adotando estratégias cada vez mais inovadoras para se manterem competitivas na era da globalização. Destaca-se a importância da manutenção, com foco na manutenção preditiva e proativa para maximizar a eficácia dos equipamentos. Confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade desempenham papéis cruciais no desempenho das máquinas, de modo que a negligência na manutenção adequada pode resultar em prejuízos significativos para as empresas. A aplicação de inteligência artificial pode aumentar a produtividade e a qualidade dos processos industriais. Os Sistemas Especialistas (SE) surgem como uma abordagem promissora para a solução de problemas complexos, permitindo a tomada de decisões rápidas e eficazes. A integração de sistemas especialistas com a computação em nuvem potencializa a escalabilidade e a capacidade de processamento, contribuindo para a resolução eficiente de problemas. Diante do exposto, este trabalho tem como finalidade desenvolver um sistema especialista em nuvem baseado em conhecimento, voltado para a otimização dos diagnósticos de manutenção de ativos da mineração. O protótipo busca aproveitar experiências passadas para sugerir soluções para problemas atuais, contribuindo para a melhoria da eficiência nos processos de manutenção. O protótipo é alimentado com dados coletados pelo setor de manutenção de uma mineradora localizada no sudeste do Pará. O sistema foi desenvolvido na nuvem, que facilita o uso pelo usuário, eliminando a necessidade de instalação de softwares. O protótipo foi validado com dois especialistas, um engenheiro de manutenção da frota de caminhões fora-de-estrada de uma grande mineradora e uma especialista em análises de vibrações, com experiência em desenvolvimento de sistemas de análise de falhas, que atua em uma empresa de tecnologia com foco em diagnóstico de falhas. Os resultados da avaliação indicaram que o protótipo possui aplicabilidade prática e é considerado relevante para a localização de falhas e redução do tempo de diagnóstico. A qualidade dos diagnósticos e a clareza das explicações foram bem avaliadas pelos especialistas. A avaliação dos especialistas forneceu insights relevantes para aprimorar o sistema, incluindo sugestões para melhorias na interface do usuário e na inclusão de mais sistemas e modos de falhas.

Palavras-chave: Sistemas Especialistas, Mineração, Veículo fora- de-estrada, Manutenção, Diagnostico de Falhas, Sistema em nuvem.

ABSTRACT

With technological advancement, the pursuit of safety, productivity, and quality has become constant in the market. Companies are adopting increasingly innovative strategies to remain competitive in the era of globalization. The importance of maintenance stands out, focusing on predictive and proactive maintenance to maximize equipment efficiency. Reliability, maintainability, and availability play crucial roles in machine performance, so neglecting proper maintenance can result in significant losses for companies. The application of artificial intelligence can enhance productivity and quality in industrial processes. Expert Systems (ES) emerge as a promising approach for solving complex problems, enabling rapid and effective decision-making. Integrating expert systems with cloud computing leverages scalability and processing capacity, contributing to efficient problem resolution. Given the above, this study aims to develop a cloud-based expert system grounded in knowledge, aimed at optimizing maintenance diagnostics for mining assets. The system seeks to leverage past experiences to suggest solutions for current problems, contributing to improved efficiency in maintenance processes. The system is fed with data collected by the maintenance department of a mining company located in southeastern Pará. The cloud-based development of the system facilitates user access, eliminating the need for software installation. The prototype was validated with two experts: a maintenance engineer from a major mining company's fleet of off-road trucks and a vibration analysis specialist with experience in developing failure analysis systems, working for a technology company focused on fault diagnostics. Validation results indicated that the prototype has practical applicability and is deemed relevant for fault localization and reduced diagnostic time. The quality of diagnoses and clarity of explanations received favorable evaluations from the experts. The experts' assessment provided relevant insights for system improvement, including suggestions for enhancing the user interface and incorporating more systems and modes of failure.

Keywords: Expert Systems, Mining, Off-Road Vehicle, Maintenance, Fault Diagnosis, Cloud-based System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Caminhão fora-de-estrada 785D.....	26
Figura 2: Principais componentes do caminhão com acionamento mecânico.	26
Figura 3: Caminhão em terreno de mineração.	28
Figura 4: Componentes de um sistema especialista.	35
Figura 5: Esquema de interação entre o EC e o especialista de domínio do problema.....	38
Figura 6: Fluxograma do procedimento adotado na elaboração do protótipo.	39
Figura 7: Modelo de formulário entregue a equipe de turno	49
Figura 8: Estrutura do código utilizado para diagnóstico nos sistemas hidráulico, elétrico, lubrificação e mecânico.	53
Figura 9: Tela inicial com instruções de uso protótipo desenvolvido no Google Colab.	54
Figura 10: Interface inicial do protótipo.	55
Figura 11: Interface com um exemplo de perguntas e resposta do sistema.	56
Figura 12: Janela principal do programa com a interface gráfica do usuário local.	58
Figura 13: Janelas <i>pop-up</i> com perguntas a serem respondidas pelo usuário: Neste caso as perguntas são relacionadas ao diagnóstico do sistema hidráulico.	59
Figura 14: Diagnóstico informado pelo sistema.	60
Figura 15 - Falha 1 referente ao sistema hidráulico.	62
Figura 16 - Exemplo 3 de falha no sistema Hidráulico.	63
Figura 17 - Exemplo 3 de falha no sistema Hidráulico.	63
Figura 18 - Exemplo 1 de falha no sistema Elétrico.	65
Figura 19 - Exemplo 2 de falha no sistema Elétrico.	66
Figura 20 - Exemplo 3 de falha no sistema Elétrico.	67
Figura 21 - Exemplo 1 de falha para o sistema de lubrificação.	68
Figura 22 - Figura 21 - Exemplo 2 de falha para o sistema de lubrificação.	69
Figura 23 - Exemplo 3 de falha para o sistema de lubrificação.	69
Figura 24 - Exemplo 1 de falha para o sistema mecânico.	70
Figura 25 - Exemplo 2 de falha para o sistema mecânico.	71
Figura 26 - Exemplo 3 de falha para o sistema mecânico.	71
Figura 27 - Exemplo de resposta quando o sistema não identifica falha.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Gerações da Manutenção.	21
Tabela 2: Informações coletadas para construção da base de conhecimento.	50
Tabela 3: Premissas presentes na estrutura de regras.	52
Tabela 4: Tabela verdade para o sistema hidráulico	61
Tabela 5: Tabela verdade para o sistema elétrico.	65
Tabela 6: Tabela verdade para o sistema de lubrificação.	68
Tabela 7 - Tabela verdade para o sistema mecânico.	70

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

EH - Especialista Humano

EC - Engenheiro do Conhecimento

SE - Sistema especialista

SBC - Sistema Baseado em Conhecimento

TPM - Total Productive Maintenance

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos específicos	17
1.2. JUSTIFICATIVA	17
2. MANUTENÇÃO	19
2.1. HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO	20
2.2. TIPOS DE MANUTENÇÃO	20
2.2.1. Manutenção corretiva	21
2.2.2. Manutenção preventiva	22
2.2.3. Manutenção preditiva	22
2.2.4. Manutenção produtiva total (Total Productive Maintenance – TPM)	23
2.2.5. Manutenção centrada em confiabilidade (MCC)	24
3. CAMINHÃO FORA-DE-ESTRADA 785D	25
3.1. FALHAS MECÂNICAS	27
3.2. FALHAS NOS PNEUS.....	27
3.3. FALHAS ELÉTRICAS.....	29
3.4. FALHA NO SISTEMA HIDRÁULICO.....	29
3.5. FALHAS DE SISTEMAS DE CONTROLE E COMUNICAÇÃO	30
3.6. PROBLEMAS COM O SISTEMA DE ARREFECIMENTO.....	31
3.7. FALHAS DE LUBRIFICAÇÃO	32
4. SISTEMAS ESPECIALISTAS	34
4.1. MODELO E FASES DE DESENVOLVIMENTO DE UM SE	37
4.1.1. Aquisição do conhecimento	39
4.1.2. Representação do conhecimento	40
4.1.3. Implementação do conhecimento	42
4.1.4. Verificação e avaliação	43
4.2. SISTEMAS ESPECIALISTAS PARA DIAGNÓSTICOS DE FALHAS.....	44
5. PROTÓTIPO PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS	47
5.1. AQUISIÇÃO DO CONHECIMENTO	47
5.1.1. Coleta de dados de manutenção em campo	48
5.1.2. Transcrição dos dados para planilha	50
5.2. REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO.....	51

5.3.	IMPLEMENTAÇÃO DO CONHECIMENTO	52
5.4.	INTERFACE DO PROGRAMA	53
5.4.1.	Interface em nuvem no Google Colab	54
5.4.2.	Interface gráfica do usuário no Jupyter Notebook.....	58
5.5.	VERIFICAÇÃO	60
5.5.1.	Sistema Hidráulico	61
5.5.2.	Sistema Elétrico	64
5.5.3.	Sistema de lubrificação	67
5.5.4.	Sistema mecânico	69
5.6.	AVALIAÇÃO	72
6.	CONCLUSÃO	76
6.1.1.	Recomendações para trabalhos futuros	77
	REFERÊNCIAS.....	79
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DO PROTÓTIPO	88
	APÊNDICE B – REGRAS USADAS NA ELABORAÇÃO DO PROGRAMA.....	91

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico se disseminando globalmente, é cada vez mais comum que o mercado demande resultados mais expressivos em termos de segurança, produtividade e qualidade (FREITAS *et al.*, 2020)

O processo de globalização mundial exige que as empresas implementem novas estratégias para adequar sua competitividade aos padrões internacionais, visando sua permanência no mercado (NARDO *et al.*, 2021). As empresas que promovem a inovação e competitividade apresentam vantagem nesse cenário. Neste contexto, a gestão adequada da manutenção dos ativos físicos possui importância cada vez mais significativa para os resultados do negócio.

A necessidade de adaptação e utilização de novas tecnologias fez com que a indústria evoluísse para uma nova era. Conectividade, quantidade de dados, novos dispositivos, redução de estoque, customização e produção controlada deram origem à chamada indústria 4.0 (ZONTA *et al.*, 2020).

A nova revolução industrial denominada “Indústria 4.0” foi discutida pela primeira vez em 2011 na Alemanha durante a Feira de Hannover. É a quarta revolução industrial depois da Indústria 1.0, 2.0 e 3.0 (BIGLIARDI *et al.*, 2020). No início, a Indústria 4.0 foi lançada para aumentar o potencial de transformação da indústria, possibilitando a integração da Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) com a estrutura industrial para aprimorar a automação e digitalização dos diferentes processos industriais (KUMAR, *et al.*, 2022)

Silvestri *et al.* (2020) afirmam que a maioria das empresas considera a gestão da manutenção como um dos primeiros passos a serem aplicados no contexto da indústria 4.0, promovendo uma importante transição da quebra do equipamento e manutenção periódica para a manutenção preditiva e proativa, com o objetivo de obter vantagens econômicas e técnicas. Esses procedimentos encurtam as paradas e, conseqüentemente, aumentam a eficácia geral do equipamento (*overall equipment effectiveness* - OEE) (ZINN; VOGEL-HEUSER; OCKER, 2020).

No campo da mineração, a confiabilidade desempenha um papel de extrema importância para assegurar a presença contínua dos ativos e cumprir com os prazos de produção estipulados. Especificamente, nos deparamos com a necessidade vital de manter os caminhões fora-de-estrada, os quais desempenham uma função crucial no transporte de minério de ferro. Esses equipamentos desempenham uma

função essencial ao movimentar grandes volumes de minério em direção às instalações de beneficiamento. Dada a sua significância na indústria mineradora, é imprescindível garantir a operação desses caminhões, através de uma manutenção cuidadosamente planejada de seus componentes. Isso busca garantir o desempenho ótimo e a confiabilidade desses equipamentos, reduzindo ao mínimo as interrupções não planejadas e otimizando a eficiência geral do processo de mineração (KAPPAUN, 2023)

A indisponibilidade do ativo pode resultar em grandes prejuízos financeiros para a empresa. O desempenho da máquina depende principalmente da confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade (AGRAWAL; CHATTOPADHYAYA; ADESH, 2022). A manutenção de equipamentos representa uma parte significativa dos custos operacionais totais da mina, variando de 20% a 35% dos custos operacionais totais (DHILLON, 2008)

Caminhões de transporte têm um papel significativo em minas a céu aberto em todo o mundo. Eles representam cerca de 40% dos custos operacionais totais, sendo essencial maximizar a disponibilidade e a utilização deles para obter o máximo dos recursos existentes (MACKEY, 2015). Nesta perspectiva, os custos da indisponibilidade, deterioração e mau funcionamento dos ativos possuem relação direta com a ausência de manutenção adequada (VICENTE *et al.*, 2021)

No contexto de manutenção orientada por dados, o setor de engenharia deve encontrar formas para lidar com a ampla base de conhecimento disponível, como conhecimentos obtidos em análise de modos de falha e efeitos (*Failure Mode and Effect Analysis* - FMEA), desenvolvimento de estratégias de manutenção e investigações de falhas (HODKIEWICZ *et al.*, 2020). Esses dados são essenciais para fazer uso de recursos de inteligência artificial, como raciocínio automatizado, permitindo que os computadores executem as atividades repetitivas geralmente realizadas por técnicos, resultando em um aumento da produtividade e controle da qualidade dos processos (HODKIEWICZ *et al.*, 2021)

Nesse contexto, os Sistemas Especialistas (SE) surgem como uma solução promissora, pois são capazes de representar e manipular conhecimento especializado de forma a tomar decisões apropriadas em tempo curto (DURKIN, 1990). Ao desenvolver um sistema especialista, busca-se criar uma base de dados, que, por meio de regras e lógica, possa identificar problemas operacionais, sugerir possíveis causas e propor soluções adequadas.

A abordagem de Inteligência Artificial por meio de sistemas especialistas proporciona vantagens significativas, como a capacidade de lidar com informações incompletas, e a habilidade de aprender com experiências anteriores, aprimorando a qualidade das decisões ao longo do tempo (WALLEY, 1995). Ao integrar essa tecnologia com a computação em nuvem, pode-se explorar a escalabilidade e o poder computacional disponíveis na nuvem (“cloud”), podendo contribuir para aumentar a eficiência na busca pela solução de problemas (ZIZAD *et al.*, 2021).

Diante do exposto, este trabalho tem como finalidade desenvolver um sistema especialista em nuvem baseado em conhecimento para auxiliar na solução de problemas de manutenção em equipamentos mecânicos, mostrando ao usuário orientações acerca das prováveis causas da não conformidade, além de recomendar soluções para o problema. O sistema é alimentado com dados coletados pelo setor de manutenção, criando um banco de conhecimento para ser utilizado por futuros profissionais da área visando a redução do tempo para encontrar o problema real, e do tempo de resolução da falha do equipamento. O sistema foi desenvolvido na nuvem, que facilita o uso pelo usuário, eliminando a necessidade de instalação de softwares.

Este trabalho visa contribuir para a otimização dos diagnósticos de manutenção de ativos da mineração, utilizando experiências adquiridas na resolução de não conformidades passadas, para sugerir novas soluções para problemas atuais. Também espera-se contribuir para que pesquisas futuras sejam desenvolvidas em temas relacionados à aplicação de sistemas baseados no conhecimento em manutenção. A implementação deste sistema especialista pode representar um avanço significativo na eficiência operacional da indústria de mineração, resultando em economias de tempo e recursos consideráveis. Além disso, a disponibilidade na nuvem torna o acesso e a utilização do programa mais acessíveis e práticos para os profissionais de manutenção em todo o setor.

A dissertação está organizada em 6 capítulos, estruturados da seguinte forma: No capítulo 2 são apresentados o histórico da manutenção, bem com os principais tipos. No capítulo 3 são apresentados os principais conceitos sobre o caminhão fora de estrada, bem com os principais tipos de falhas. No Capítulo 4 são apresentados os principais conceitos de um Sistema Especialista aplicados à detecção e diagnóstico de falhas, bem como exemplos de aplicação da ferramenta para diagnóstico de falhas. No capítulo 5 são apresentadas as etapas de elaboração do

protótipo do sistema especialista para diagnóstico de falha em caminhões fora de estrada. No Capítulo 6 são expostas as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho e as recomendações para possíveis trabalhos futuros.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver o protótipo de um sistema baseado em conhecimento na nuvem capaz de coletar, analisar e diagnosticar falhas de caminhão fora-de-estrada apresentando ao usuário orientações sobre as prováveis causas da não conformidade informada, recomendando soluções para o problema, para aumentar a eficiência do processo de detecção de falhas e manutenção no setor da mineração reduzindo o tempo para realização do diagnóstico.

1.1.2. Objetivos específicos

- Selecionar informações acerca do histórico de manutenções realizadas nos ativos;
- Construir uma base de casos para armazenar o conhecimento gerado na manutenção;
- Desenvolver sistema computacional de apoio à tomada de decisões na manutenção.

1.2. JUSTIFICATIVA

O setor de mineração desempenha um papel fundamental na economia global, e os caminhões fora-de-estrada são fundamentais para o transporte eficiente de grandes volumes de materiais do setor. Todavia, a operação desses veículos é um grande desafio, principalmente relacionados às falhas mecânicas que podem levar a paradas não programadas, aumentando os custos de manutenção e reduzindo a produtividade (ANGELES e KUMRAL, 2020; LOUIT e KNIGHTS, 2001).

Diante disso, é muito importante o desenvolvimento de soluções tecnológicas para efetuar corretamente o diagnóstico de falhas para garantir a eficiência operacional e a sustentabilidade desses setores.

Portanto, essa pesquisa visa enfrentar os desafios técnicos e operacionais associados ao diagnóstico preciso e ágil de falhas nesses veículos de grande porte, buscando contribuir de maneira relevante para a indústria.

A implementação de um sistema baseado em conhecimento em nuvem representa uma abordagem promissora para o diagnóstico de falhas em caminhões fora-de-estrada. Ao capturar o conhecimento especializado de operadores experientes e técnicos, o sistema é capaz de tomar decisões adequadas de maneira rápida e objetiva. Essa capacidade de diagnóstico rápido permitirá que problemas operacionais sejam identificados precocemente, reduzindo o tempo de parada dos veículos e maximizando a disponibilidade e eficiência das operações.

Além disso, a adoção da computação em nuvem como infraestrutura para o sistema permite vantagens estratégicas. A escalabilidade e a capacidade de armazenamento disponíveis na nuvem permitem o processamento eficiente de grandes volumes de dados, possibilitando a implementação de um sistema robusto. A partir da nuvem, o sistema pode ser acessado de forma distribuída e remota, permitindo sua utilização em diferentes locais de operação, conectando frotas de caminhões e centralizando informações cruciais para o diagnóstico em tempo real.

Adicionalmente, a pesquisa contribui para o avanço do campo de Inteligência Artificial aplicada à engenharia, especialmente no que se refere ao desenvolvimento de sistemas de diagnóstico de falhas em ambientes industriais (LIU et al., 2018). O aprofundamento teórico e prático dessa área de conhecimento poderá abrir novas perspectivas para futuras aplicações em diferentes setores industriais, além de impactar positivamente a academia, ao fornecer novos insights e metodologias para a solução de problemas

2. MANUTENÇÃO

A manutenção, palavra derivada do latim *manus tenere*, que significa "manter o que se tem", está presente na história humana desde o momento em que se iniciou o uso de instrumentos de produção. Com o surgimento da revolução industrial no final do século XVIII, a sociedade cresceu em sua capacidade de produzir bens de consumo. No século XX ocorreram algumas revoluções, com destaque especial para as avançadas tecnologias que afetaram e transformaram significativamente o modo de vida do homem (VIANA, 2014).

Considerando esse contexto, o crescimento das empresas passou a ficar diretamente relacionado à sua capacidade de inovação e desenvolvimento de melhorias contínuas, gerando uma crescente busca por ferramentas de organização e gerenciamento inovadoras visando garantir a confiabilidade e produtividade. Viana (2014) afirma que a presença de equipamentos cada vez mais sofisticados e de alta produtividade resultou na necessidade de elevada disponibilidade, tendo como resultado um aumento nos custos de inatividade ou subatividade. Portanto, a eficiência dos equipamentos de produção depende de um uso racional e produtivo.

A NBR 5462 (1994) define manutenção como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.

Kardec e Nascif (2010) afirmam que a manutenção possui a função de manter o funcionamento e a confiabilidade dos equipamentos, levando em consideração também fatores como segurança e meio ambiente. Slack *et al.* (2002) descrevem a manutenção como termo utilizado para se referir ao modo pelo qual as organizações tentam evitar as falhas em suas instalações físicas.

Para Gursk (2002), a missão da manutenção consiste em garantir a disponibilidade dos equipamentos e instalações de modo que atendam a um processo de produção preservando o meio ambiente, com confiabilidade, segurança e custos adequados.

Jonge e Scarf (2020) afirmam que no passado a manutenção era vista como algo que precisava ser feito após a ocorrência de falha, mas, também, era difícil de gerenciar. Atualmente, a manutenção é reconhecida como uma função empresarial essencial e um elemento muito importante na gestão de ativos (KARIA *et al.*, 2014).

A importância da manutenção consiste em evitar o desgaste natural que máquinas, equipamentos ou peças sofrem ao longo do tempo pelo uso, contribuindo para o mau funcionamento, resultando em gastos indesejados (XENOS, 2014).

A implementação de práticas de manutenção avançadas permite o monitoramento contínuo dos equipamentos, a coleta e o armazenamento de dados, bem como a identificação de oportunidades de melhoria, visando evitar interrupções no processo de produção. As paralisações podem ocorrer por diferentes motivos, como a substituição de peças em caso de falhas ou a realização programada de atividades de manutenção periódicas (CAVALIERI *et al.*, 2008).

2.1. HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO

Após a revolução industrial no final do século XVIII, houve um crescimento da capacidade de produção de bens de consumo. No século XX ocorreram várias revoluções, de modo especial aquelas ocorridas no campo da tecnologia, cada vez mais rápidas e impactantes no modo de vida do homem (VIANA, 2014).

No contexto dessas revoluções é muito importante a necessidade de manter os equipamentos em funcionamento, retornando ao uso após falhas ou paradas ocasionadas por diferentes motivos. Portanto, a manutenção tornou-se necessária ao processo, pois seria inviável manter a produção sem uma equipe de manutenção.

Segundo Kardec e Nascif (2010), desde os anos 1930 a evolução da manutenção passou por quatro gerações, podendo ser observada em cada uma delas a necessidade produtiva da época. Na Tabela 1 pode-se observar a crescente evolução da manutenção.

Observa-se que a evolução industrial e o aumento da competitividade do mercado possuem relação direta com a evolução dos métodos de manutenção sendo aplicados para monitoramento, gerenciamento e execução, com o objetivo de garantir o pleno funcionamento das fábricas.

2.2. TIPOS DE MANUTENÇÃO

Assim como os equipamentos, a manutenção também evoluiu com o passar dos anos, principalmente na sua forma de administrar e no desenvolvimento dos tipos de manutenção para atender as necessidades da indústria. De acordo com a norma NBR 5462 existem três tipos de manutenção: Corretiva, Preventiva e

Preditiva. Entretanto, atualmente tem-se cinco tipos de manutenção, os quais serão descritos nos tópicos a seguir.

Tabela 1: Gerações da Manutenção.

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO	
1º GERAÇÃO	Iniciou período anterior à Segunda Guerra Mundial (1939-1945), em uma época em que as indústrias possuíam equipamentos mais simples e mal dimensionados. Associado a isto, devido à realidade da época o fator produtividade não era prioridade nesse contexto, de modo que não havia necessidade de uma manutenção sistematizada, ou seja, nesse período a manutenção era essencialmente corretiva
2º GERAÇÃO	Pós-Segunda Guerra Mundial, nessa geração pode-se observar uma maior competitividade entre as empresas e aumento da necessidade do funcionamento pleno dos equipamentos. O número de máquinas nas indústrias também cresceu, resultando na implantação da manutenção preventiva e de um planejamento da manutenção.
3º GERAÇÃO	Dos anos 1970 em diante houve uma aceleração no processo de mudanças no setor industrial. A paralização da produção passou a aumentar os custos e afetar a qualidade dos produtos, tornando-se uma preocupação generalizada. Na manufatura, devido à tendência mundial de adotar sistemas <i>just-in-time</i> , os efeitos das paralisações se tornaram mais graves. Foi nesse período que a manutenção preditiva ganhou força, pois era notável a necessidade dos equipamentos estarem funcionando durante todo o período de produção.
4º GERAÇÃO	Na quarta geração, algumas das exigências em relação à manutenção permanecem. A confiabilidade dos equipamentos é o grande objetivo da manutenção. A consolidação das atividades de Engenharia da Manutenção, dentro da estrutura organizacional da Manutenção, tem na garantia da Disponibilidade, da Confiabilidade e da Manutenibilidade as três maiores justificativas de sua existência.

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif, 2010.

2.2.1. Manutenção corretiva

A NBR 5462 (1994) define manutenção corretiva (ou reativa) como a manutenção executada logo após a ocorrência de uma falha inesperada, com o objetivo de recolocar um item em condições de executar a função requerida. Sua principal função consiste em restaurar ou corrigir as condições de funcionamento de um sistema ou equipamento.

Isto não significa que a manutenção corretiva é uma manutenção emergencial, de modo que sua principal função é restaurar ou corrigir as condições de funcionamento de um sistema ou equipamento. Este tipo de manutenção pode

ser dividido em duas classes: Manutenção corretiva planejada e Manutenção corretiva não planejada (KARDEC; NASCIF, 2007).

A manutenção corretiva não planejada consiste na execução da manutenção na ocorrência da falha sem preparação prévia para a execução do serviço. Este tipo de manutenção gera grandes custos visto que a falha inesperada resulta em perdas de produção, qualidade, entre outros (INÁCIO DA SILVA et al., 2008).

2.2.2. Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é planejada e controlada, realizada em datas determinadas, a fim de manter o ativo em certas condições de funcionamento. O planejamento é realizado utilizando a documentação das operações de manutenção corretivas realizadas e informações fornecidas pelos fabricantes (ALMEIDA, 2014)

A manutenção preventiva obedece a um padrão previamente esquematizado e definido geralmente pelo fabricante ou fornecedor dos ativos da fábrica, estabelecendo paradas periódicas permitindo a troca de peças usadas por novas, assegurando assim o funcionamento ideal da máquina por um período predeterminado (FILHO, 2013).

Seu foco principal consiste em prevenir a ocorrência de falhas. Os procedimentos realizados neste tipo de manutenção são planejados conforme as características do equipamento, e dentre elas tem-se: análise do estado em que se encontra o equipamento; troca de componentes por recomendação de fabricantes ou por vida útil definida; ajustes de possíveis desgastes encontrados.

2.2.3. Manutenção preditiva

Este tipo de manutenção tem por objetivo realizar um acompanhamento do equipamento mediante monitoramento, por medições ou por controle estatístico a fim de identificar a proximidade da ocorrência da falha. Sua finalidade é determinar o tempo correto da necessidade da intervenção, evitando desmontagens e otimizando a vida útil dos componentes (VIANA, 2014).

De acordo com Cyrino (2015), a partir dos anos 1970 a manutenção preditiva surgiu como uma estratégia de manutenção de grande importância, oferecendo resultados superiores em termos de produtividade, lucratividade, qualidade do produto e desempenho geral das indústrias. Essa abordagem de manutenção

possibilita a avaliação da vida útil dos componentes do equipamento e das condições necessárias para aproveitar esse tempo de vida da melhor maneira possível

Segundo Pires e Okada (2020), os objetivos da Manutenção preditiva são:

- Determinar a necessidade de manutenção dos componentes de um equipamento;
- Reduzir a quantidade de montagens desnecessárias quando o equipamento é submetido a inspeções;
- Garantir maior disponibilidade dos equipamentos;
- Reduzir intervenções não planejadas e maiores danos aos componentes;
- Aumentar a vida útil do equipamento, com maior confiabilidade;
- Auxiliar nas estratégias de prioridade de manutenção.

2.2.4. Manutenção produtiva total (Total Productive Maintenance – TPM)

Este conceito abrange os programas de manutenção preventiva e preditiva, incluindo também um programa de treinamento para os operadores, para que eles possam auxiliar no monitoramento da máquina no exercício das atividades e executar operações de manutenção mais simples (ALMEIDA, 2014).

A Manutenção Autônoma (MA) é uma das características-chave da TPM (*Total Productive Maintenance*), e começa quando o operador assume a responsabilidade pela máquina, realizando os ciclos de manutenção e atividades de melhoria. Essa abordagem busca evitar a deterioração acelerada e melhorar as condições do equipamento. É importante ressaltar que é necessário preparar cada operador, capacitando-os para desempenhar essas funções de maneira adequada.

A construção de um programa de TPM é feita tendo por base cinco pilares que envolvem toda a empresa, tornando possível alcançar metas como zero defeito, falha zero e aumento na disponibilidade dos ativos. Os cinco pilares são:

- Eficiência;
- Autorreparo;
- Planejamento;
- Treinamento;
- Ciclo de vida.

2.2.5. Manutenção centrada em confiabilidade (MCC)

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2008), a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) é um programa que utiliza técnicas que combinam abordagens sistêmicas para garantir que os equipamentos industriais mantenham suas funções originais. Portanto, a MCC visa a estruturação sistemática mediante a definição de tarefas de manutenção adequadas ao propósito de garantir a confiabilidade e a segurança operacional do sistema ao menor custo possível, com o uso dos principais elementos que a manutenção oferece (MOREIRA, *et al.*, 2019)

Este tipo de manutenção tem por base sistemáticas de administração que visam eliminar e prevenir defeitos, eliminando suas causas. Esse tipo de manutenção é indicado nos casos em que falhas ou defeitos podem causar tragédias ou grandes prejuízos (ALMEIDA, 2014).

3. CAMINHÃO FORA-DE-ESTRADA 785D

Os caminhões fora-de-estrada (“*off-road*”) são veículos desenvolvidos para operar em terrenos íngremes, rochosos ou irregulares. Suas principais aplicações são em setores de mineração, construção civil, agronegócios e setores em que são necessárias grande capacidade de tração e transporte de cargas.

Caminhões fora-de-estrada são usados em minas a céu aberto no transporte de materiais sólidos ao longo de pequenas e médias distâncias, em condições de terreno irregulares (ÖZFIRAT *et al.*, 2018). As suas vantagens incluem a flexibilidade de utilização, possibilidade de ciclos rápidos e uma longa vida útil. Entretanto, a manutenção de equipamentos desse porte é onerosa (LEAL e ANDRADE, 2018).

Esses veículos possuem características específicas que os diferenciam dos caminhões convencionais, como uma suspensão reforçada, tração nas quatro rodas, pneus de grandes dimensões e capacidade de carga elevada.

Os caminhões fora-de-estrada desempenham um papel fundamental em operações de grande escala (por exemplo, no setor de mineração) como a extração e o transporte de minerais, a construção de estradas em áreas remotas e o transporte de materiais em locais de difícil acesso. Eles oferecem eficiência, durabilidade e capacidade de manobra necessárias para enfrentar as condições adversas encontradas nessas atividades.

O caminhão Fora-de-Estrada 785D (Figura 1) consiste em uma máquina de terraplanagem. Este caminhão basculante possui uma caçamba aberta para o transporte e despejo de minério. Sua capacidade de carregamento é de 136 toneladas. A vida útil deste equipamento está relacionada ao seu total de horas trabalhadas. Estima-se que sua vida útil seja de 20.000 horas de serviço e, para isto, é necessária a execução regular de manutenções preventivas seguindo as orientações do fabricante.

Figura 1: Caminhão fora-de-estrada 785D.



Fonte: Caterpillar, 2022.

Estes caminhões podem ter dois tipos de acionamento: elétrico e mecânico. A figura 2 ilustra os principais elementos do caminhão fora de estrada com acionamento mecânico.

Figura 2: Principais componentes do caminhão com acionamento mecânico.



Fonte: Caterpillar, 2022. Adaptado.

Por sua aplicação exigir o máximo do equipamento, a quantidade de falhas apresentada por esses caminhões é elevada. Os principais tipos de falhas que podem ocorrer no modelo 785D são descritas nas próximas seções.

3.1. FALHAS MECÂNICAS

As falhas mecânicas são comuns em caminhões fora-de-estrada podendo ocorrer em componentes como motores, transmissões, eixos, sistemas de suspensão, freios, entre outros. Desgaste, fadiga, quebras e mau funcionamento de peças mecânicas podem levar a paradas não programadas, impactando negativamente a disponibilidade do caminhão (Caterpillar, 2022)

Essas falhas podem gerar grandes prejuízos, especialmente em caminhões fora-de-estrada, onde a confiabilidade e a disponibilidade são críticas para operações eficientes. Paradas não programadas causadas por falhas mecânicas podem resultar em:

- Atrasos na entrega de cargas e produtos;
- Aumento dos custos de manutenção corretiva;
- Redução da produtividade da frota;
- Riscos de acidentes, especialmente se a falha ocorrer durante a operação;
- Impactos negativos na segurança dos motoristas e de outros usuários das estradas.

Para evitar essas falhas, a manutenção preventiva é essencial, além de ações como: inspeções regulares, substituição de peças desgastadas, lubrificação adequada, monitoramento de condições e, sempre que possível, uso de componentes de alta qualidade. Isso ajuda a manter a disponibilidade dos caminhões, a segurança nas operações e a eficiência geral das atividades de mineração.

3.2. FALHAS NOS PNEUS

As falhas em pneus de caminhão fora de estrada são um desafio significativo devido às condições severas nas quais esses veículos operam. Caminhões fora de estrada são frequentemente usados em terrenos acidentados, conforme ilustra a figura 3, como minas, pedreiras, construção civil e florestas, onde as estradas podem ser irregulares, rochosas e cheias de obstáculos. Isso coloca um grande estresse nos pneus, o que pode levar a várias formas de falha (KAPPAUN, 2023).

Figura 3: Caminhão em terreno de mineração.



Fonte: Caminhão de Mineração 789D/Caminhão de Transporte | Cat | Caterpillar, 2023.

Algumas das principais causas de falhas em pneus de caminhão fora de estrada são:

- **Cortes e perfurações:** As superfícies acidentadas podem conter objetos afiados, como pedras e detritos. Esses objetos podem perfurar ou cortar os pneus, causando vazamentos de ar. Pneus furados podem resultar em perda de pressão, afetando significativamente a capacidade de suportar cargas e pode levar a paradas não programadas.
- **Desgaste excessivo:** O terreno áspero e os movimentos frequentes podem causar desgaste nos pneus, reduzindo a tração e aumenta o risco de falhas.
- **Sobrecarga:** Caminhões fora-de-estrada frequentemente transportam cargas pesadas. A sobrecarga constante pode causar danos progressivos aos pneus, especialmente se eles não forem dimensionados adequadamente para suportar as cargas.
- **Más condições de manutenção:** A falta de manutenção adequada, como calibração inadequada da pressão dos pneus, falta de inspeções regulares e não reparar danos menores a tempo, pode contribuir para falhas prematuras dos pneus.

3.3. FALHAS ELÉTRICAS

As falhas elétricas em caminhões fora de estrada podem ter um impacto significativo no funcionamento geral desses veículos, levando a paradas inesperadas e causando interrupções nas operações (KAPPAUN, 2023). Várias partes do sistema elétrico do caminhão podem ser propensas a problemas, incluindo o sistema de partida, as baterias e o alternador. As principais são:

- **Sistema de partida:** O sistema de partida é fundamental para ligar o motor do caminhão. Se houver falhas nesse sistema, como um motor de arranque defeituoso, solenoide danificado ou fiação deteriorada, o caminhão pode não ser capaz de iniciar. Isso resulta em paradas inesperadas e impede que o veículo seja colocado em funcionamento.
- **Baterias:** As baterias são responsáveis por fornecer a energia necessária para ligar o motor e alimentar os sistemas elétricos do caminhão. Se as baterias estiverem descarregadas devido a falhas ou falta de manutenção, o caminhão não iniciará. Além disso, conexões soltas ou corroídas podem afetar a capacidade de carga das baterias, diminuindo a sua eficácia.
- **Alternador:** O alternador é responsável por recarregar as baterias enquanto o motor está funcionando, e fornecer energia elétrica para os sistemas do veículo. Se o alternador falhar, as baterias podem se descarregar rapidamente, causando falha elétrica em todos os sistemas. Isso também pode resultar em paradas inesperadas se a energia elétrica não for suficiente para manter o motor em funcionamento.

3.4. FALHA NO SISTEMA HIDRÁULICO

As falhas no sistema hidráulico de um caminhão fora de estrada podem ter um impacto significativo na operação e na funcionalidade desse veículo, especialmente porque esses caminhões muitas vezes dependem de sistemas hidráulicos para operações críticas, como levantamento de carga, controle de direção, freios e outros componentes vitais (Caterpillar, 2022). Várias áreas do sistema hidráulico podem ser propensas a problemas, e falhas nesses componentes podem resultar em paradas inesperadas e afetar o funcionamento geral do ativo, os principais tipos de falha são:

- **Vazamentos:** Um dos problemas mais comuns em sistemas hidráulicos é o vazamento de fluido. Isso pode ocorrer devido ao desgaste das mangueiras, conexões soltas ou deterioração das juntas. Vazamentos podem levar à perda gradual de fluido hidráulico, reduzindo a eficiência do sistema e, eventualmente, causando falha nos componentes.
- **Bomba hidráulica:** A bomba hidráulica é responsável por pressurizar o fluido e fornecer energia para os sistemas hidráulicos. Se a bomba falhar, os componentes que dependem dela, como cilindros de elevação e freios hidráulicos, não funcionarão corretamente. Isso pode resultar em problemas de controle de carga, dificuldades na operação de guindastes ou falha nos freios, representando um risco para a segurança.
- **Cilindros hidráulicos:** Os cilindros hidráulicos são usados para mover e levantar cargas pesadas. Se um cilindro falhar devido a vazamentos, selos danificados ou problemas de vedação, a capacidade de levantar ou controlar cargas pode ser comprometida. Isso pode impactar negativamente a produtividade e aumentar o risco de acidentes.
- **Filtros e contaminação:** O sistema hidráulico pode ser afetado por contaminação por partículas estranhas ou degradação do fluido. Filtros inadequadamente mantidos, ou fluido hidráulico envelhecido, podem resultar em acúmulo de sujeira e partículas nos componentes do sistema, causando desgaste prematuro e falhas.

3.5. FALHAS DE SISTEMAS DE CONTROLE E COMUNICAÇÃO

As falhas nos sistemas eletrônicos de controle e comunicação de caminhões fora de estrada podem ter um impacto significativo na eficiência operacional, na segurança e na confiabilidade desses veículos. Os caminhões modernos frequentemente dependem de uma variedade de sistemas eletrônicos para controlar o motor, a transmissão, os sistemas de segurança, o monitoramento de condições e a comunicação com outros veículos ou centros de controle. Quando esses sistemas falham, podem ocorrer paradas inesperadas, perda de produtividade e riscos de segurança. Abaixo são listadas algumas áreas de falhas nos sistemas eletrônicos de caminhões fora de estrada:

- **Unidades de controle eletrônico (*Electronic Control Units* - ECUs):** Os caminhões fora de estrada modernos são equipados com diversas ECUs, as quais são responsáveis por controlar diferentes aspectos do veículo, como injeção de combustível, gerenciamento da transmissão, sistemas de freio ABS, controle de tração, entre outros. Falhas nas ECUs podem causar comportamentos inesperados do veículo, redução de desempenho ou, em casos extremos, a parada completa do motor ou do sistema de transmissão.
- **Sensores:** Os sensores desempenham um papel crucial no monitoramento de várias condições do caminhão, como temperatura do motor, pressão dos pneus, níveis de fluidos e muito mais. Se um sensor falhar, as informações essenciais para o controle e monitoramento adequado do veículo podem ser perdidas, tornando difícil a identificação de problemas e aumentando o risco de danos mais sérios.
- **Sistemas de comunicação:** Muitos caminhões fora de estrada possuem sistemas de comunicação para transmitir dados sobre o estado do veículo, localização e condições operacionais. Falhas nesses sistemas podem dificultar a coordenação das operações, o monitoramento de frotas ou a comunicação em situações de emergência.
- **Falhas de software:** À medida que os caminhões utilizam sistemas eletrônicos mais complexos, o software se torna uma parte fundamental desses sistemas. Falhas no software podem resultar em mau funcionamento dos sistemas de controle, travamentos ou até mesmo vulnerabilidades de segurança.

3.6. PROBLEMAS COM O SISTEMA DE ARREFECIMENTO

O sistema de arrefecimento é essencial para manter a temperatura do motor dentro de limites seguros, especialmente em caminhões fora de estrada que enfrentam condições adversas e cargas pesadas (STACKPATH, 2023). Problemas com o sistema de arrefecimento podem ter sérias consequências para o motor e a operação do caminhão. Alguns problemas comuns incluem:

- **Superaquecimento:** O superaquecimento do motor é uma preocupação muito importante em caminhões fora de estrada, especialmente durante operações pesadas ou em ambientes com temperaturas elevadas. O superaquecimento pode resultar em danos severos ao motor, incluindo o empenamento da cabeça

do cilindro, problemas com os selos do motor e, até mesmo, o derretimento de componentes.

- **Vazamentos:** Vazamentos no sistema de arrefecimento podem ocorrer devido a mangueiras desgastadas, juntas defeituosas, radiadores danificados ou problemas nas conexões. Vazamentos reduzem a eficiência do sistema, levando à perda gradual de líquido de arrefecimento, o que pode resultar em superaquecimento e diminuição do desempenho do motor.
- **Bloqueio ou obstrução:** Depósitos de minerais, sedimentos ou sujeira podem se acumular no radiador, nas mangueiras ou no bloco do motor, obstruindo o fluxo de líquido de arrefecimento. Isso pode afetar a capacidade de resfriamento do sistema e levar ao superaquecimento.
- **Problemas na bomba d'água:** A bomba d'água é responsável por circular o líquido de arrefecimento pelo sistema. Se a bomba d'água falhar, o fluxo de arrefecimento é comprometido, resultando em superaquecimento e possíveis danos ao motor.
- **Má qualidade do líquido de arrefecimento:** A utilização de líquido de arrefecimento de baixa qualidade, ou a mistura incorreta de líquidos, pode levar à formação de depósitos, corrosão e outros problemas que prejudicam a eficiência do sistema de arrefecimento.
- **Problemas no termostato:** O termostato regula a temperatura do líquido de arrefecimento que entra no motor. Se o termostato falhar, ele pode ficar preso em uma posição aberta ou fechada, prejudicando o equilíbrio térmico do motor.

3.7. FALHAS DE LUBRIFICAÇÃO

As falhas de lubrificação podem gerar grandes prejuízos, uma vez que esses veículos operam em ambientes adversos, sob cargas pesadas e condições de terreno desafiadoras. A lubrificação adequada é essencial para reduzir o desgaste, o atrito e a dissipação de calor em componentes mecânicos, proporcionando uma operação mais suave e prolongando a vida útil das peças (PEREIRA, 2019). Falhas na lubrificação podem levar a vários problemas, incluindo:

- **Desgaste excessivo:** A falta de lubrificação adequada ou o uso de lubrificantes inadequados pode resultar em desgaste prematuro em componentes críticos do caminhão, como pistões, anéis, rolamentos, engrenagens e outros mecanismos

móveis. Isso pode levar a falhas mecânicas, perda de eficiência e necessidade de reparos ou substituições frequentes.

- **Aumento do atrito:** A lubrificação deficiente aumenta o atrito entre as partes móveis, resultando em maior consumo de energia, maior produção de calor e perda de potência. Isso pode afetar o desempenho geral do caminhão, especialmente em condições de alta carga ou durante operações de longa duração.
- **Sobreaquecimento:** Componentes que não estão devidamente lubrificados podem aquecer mais rapidamente devido ao aumento do atrito e à falta de capacidade de dissipação de calor proporcionada pelo lubrificante. Isso pode levar a sobreaquecimento do motor, transmissão e outras partes críticas, aumentando o risco de falha e danos ao veículo.
- **Corrosão:** Lubrificantes inadequados ou contaminados podem acelerar o processo de corrosão em componentes metálicos, especialmente em ambientes agressivos ou úmidos, comuns em aplicações fora de estrada.

O papel do caminhão dentro da empresa é essencial para a produção, ilustrando a necessidade da criação e implantação de técnicas de monitoramento e controle que proporcionem a diminuição de perdas através de uma detecção rápida de problemas, seguida da tomada de medidas corretivas (LEAL & ANDRADE, 2018).

4. SISTEMAS ESPECIALISTAS

Um Sistema Especialista (SE) é uma área da Inteligência Artificial (IA) que funciona por meio de conhecimento para realizar inferências e solucionar problemas complexos. É um software que emula as habilidades de tomada de decisão de um especialista humano. A aplicação de Sistemas Especialistas é ampla, abrangendo diversas áreas do saber, como medicina, negócios, ciência e engenharia (GIARRATANO e RILEY, 2005).

Os sistemas especialistas estão sendo aplicados em diferentes áreas de conhecimento (SOTNIK et al., 2022). Todavia, muitos setores ainda não desfrutam desse sistema para auxiliar na resolução de problemas que exigem conhecimento especializado.

A necessidade de sistemas especializados cresceu exponencialmente devido à quantidade de dados que as empresas são capazes de coletar de seus clientes, bem como aos avanços na capacidade de armazenamento de dados dos computadores, tecnologia de coleta de dados e redução de custos (DHILLON, 2008). Esses fatores combinados têm impulsionado o surgimento de sistemas especialistas baseados em regras (SILVA, 2020).

O conhecimento inicialmente desenvolvido é frequentemente fragmentado ou baseado em experiência, e é utilizado para resolver problemas complexos de maneira eficiente. Essa base de conhecimento é representada em um sistema especialista por meio de dados ou regras (NGUYEN et al., 1987). O sistema é treinado com esse conhecimento para torná-lo mais robusto e eficiente.

Gonzalez e Dankel (1993) definem Sistemas Baseados em Conhecimento (SBCs) como sistemas que imitam a habilidade de especialistas humanos para solucionar problemas em um determinado campo. Esses sistemas, também conhecidos como sistemas especialistas, diferem de algoritmos comuns e heurísticas de busca por três conceitos fundamentais:

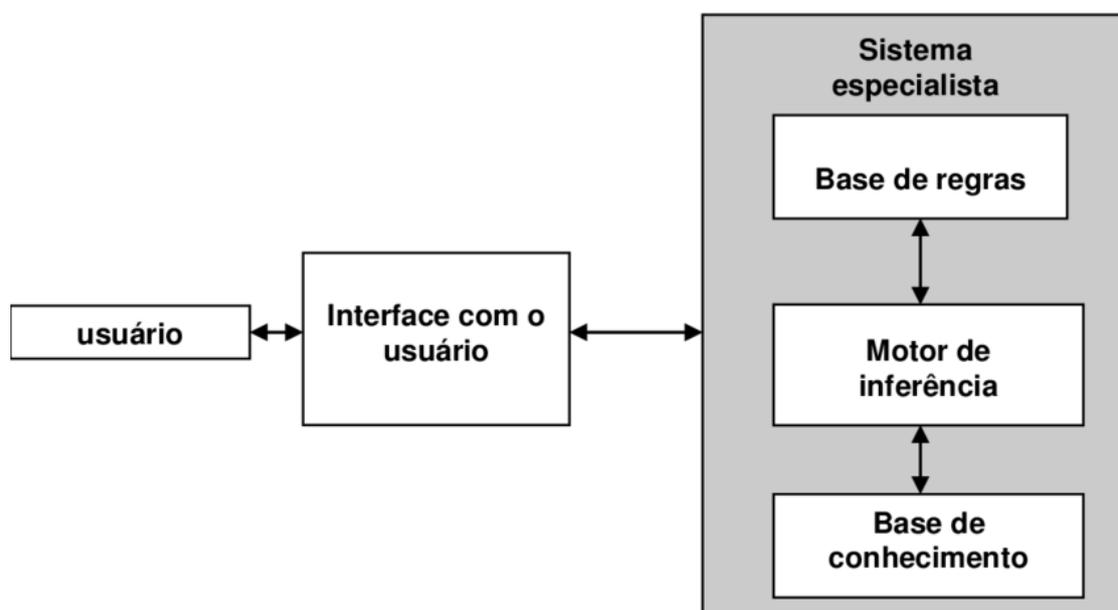
- a) **Separação do conhecimento da forma como ele é aplicado:** Isto significa que a estrutura básica que manipula o conhecimento pode ser usada independentemente do domínio de aplicação. Para desenvolver SBCs, foram criados “shells” na década de 1970, como o MYCIN, o qual foi um dos primeiros SBCs construídos, e tinha o objetivo de realizar diagnóstico de

doenças sanguíneas por meio de diálogos com médicos (RUSSEL E NORVIG, 2003).

- b) **Uso de conhecimento altamente específico sobre um domínio:** Os SBCs são projetados para resolver problemas específicos em um campo determinado.
- c) **Natureza heurística do conhecimento empregado:** Isto se refere à habilidade do especialista humano de solucionar problemas complexos sem depender de procedimentos ou algoritmos rígidos.

Conforme sistemas especialistas buscaram imitar a capacidade de tomada de decisões de um Especialista Humano (EH) (QUARESMA, 2021), uma estrutura computacional fundamental foi concebida, abrangendo os procedimentos e componentes intimamente ligados ao pensamento e à memória humanos. A Figura 4 representa esses componentes, que incluem:

Figura 4: Componentes de um sistema especialista.



Fonte: Stair, 1998.

- **Memória operacional:** Atua como uma forma de memória de curto prazo do sistema, uma vez que guarda os fatos pertinentes ao problema que o usuário apresenta, durante a sua resolução. Esses fatos podem ser obtidos de várias

origens, como sensores, entradas do teclado, bancos de dados ou outros programas (GIARRATANO e RILEY, 1998).

- **Base de regras:** Corresponde ao conhecimento acumulado mediante a experiência e formação do especialista humano na área, ou seja, a memória de longo prazo. Ela contém condições que são equivalentes a "questionamentos" direcionados à memória de trabalho. É nesse componente que as relações causais são claramente definidas, permitindo o encadeamento das regras até a resolução do problema (EMERSON, 2009)
- **Motor de inferência:** Serve como o mecanismo de controle do sistema, análogo ao processo de raciocínio humano. Ele é responsável por determinar quais regras são pertinentes com base nos fatos ou objetos do problema em questão. Além disso, o motor mantém uma agenda contendo uma lista ordenada de regras que foram atendidas (ativadas – “*triggered*”), executa essas regras em ordem de prioridade, e atualiza os fatos relacionados ao problema que serão analisados no próximo ciclo (EMERSON, 2009). Ou seja, a máquina de inferência opera como um processador cognitivo que contrasta os dados armazenados na memória operacional com o conhecimento presente na base de conhecimento, a fim de derivar uma conclusão (DURKIN, 1994).

Os SBCs oferecem vantagens que incluem: disponibilidade de conhecimento especializado, facilidade de modificação (MATELLI e BAZZO, 2005; CHENG e HUBELE, 1992), consistência nas respostas, preservação e acesso permanente ao conhecimento, capacidade de obter soluções a partir de dados incompletos, e a habilidade de fornecer explicações para as soluções obtidas.

Em resumo, os SBCs são sistemas que utilizam o conhecimento de especialistas humanos para resolver problemas específicos em um determinado domínio. Eles representam uma ferramenta para a tomada de decisões e solução de problemas, proporcionando vários benefícios para diversas áreas de aplicação.

Por outro lado, os SBCs apresentam algumas desvantagens. Uma delas é a possibilidade de erros nas respostas, semelhante a especialistas humanos. Além disso, os SBCs possuem um conhecimento limitado no domínio específico em que foram desenvolvidos, o que significa que podem não ser capazes de lidar com situações ou problemas fora do escopo para os quais foram projetados (LOPES,

2019). Portanto, é muito importante considerar essas limitações e buscar estratégias para mitigar os possíveis problemas decorrentes dessas desvantagens.

4.1. MODELO E FASES DE DESENVOLVIMENTO DE UM SE

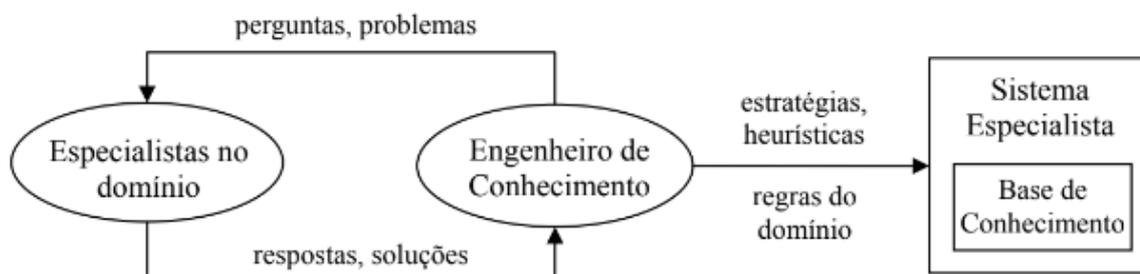
O processo de desenvolvimento de um sistema especialista é denominado como engenharia de conhecimento, e envolve uma interação específica entre o desenvolvedor do Sistema Especialista (SE), chamado Engenheiro de Conhecimento (EC), e um ou mais especialistas humanos (EHs) em um problema particular de uma área ou domínio de conhecimento (SPNGLER et al., 1989) (Figura 5). Essa interação é crucial para a criação de um sistema que possa replicar o conhecimento e a expertise dos especialistas humanos em resolver problemas específicos dentro do domínio em questão.

O papel do Engenheiro de Conhecimento (EC) é multifacetado. Em primeiro lugar, ele atua como um mediador entre o conhecimento tácito dos especialistas humanos e o sistema que está sendo desenvolvido. Isso envolve a tarefa complexa de extrair o conhecimento tácito dos especialistas, ou seja, o conhecimento que está implícito na mente dos especialistas na forma de procedimentos, estratégias e regras empíricas. Esse tipo de conhecimento é frequentemente difícil de expressar de forma explícita e precisa, e é aí que entra o papel do EC em traduzi-lo em um formato que possa ser utilizado pelo sistema especialista.

Além disso, o EC é responsável por implementar esse conhecimento no sistema, transformando-o em regras, algoritmos e estruturas de dados compreensíveis para o computador. Essa implementação envolve não apenas a tradução do conhecimento, mas também a adaptação dele para que seja eficaz dentro do contexto do SE. O EC pode precisar incorporar outros tipos de conhecimento, como regras de inferência, modelos matemáticos e bases de dados, para tornar o SE mais robusto e capaz de lidar com uma variedade de situações dentro do domínio.

Em resumo, o EC desempenha um papel crucial na ponte entre o conhecimento especializado dos especialistas humanos e a criação de um sistema especialista funcional. Sua capacidade de extrair, traduzir e implementar o conhecimento tácito é fundamental para o sucesso do desenvolvimento de sistemas especialistas que podem ajudar na resolução de problemas complexos em domínios específicos de conhecimento.

Figura 5: Esquema de interação entre o EC e o especialista de domínio do problema.



Fonte: WATERMAN, 1986.

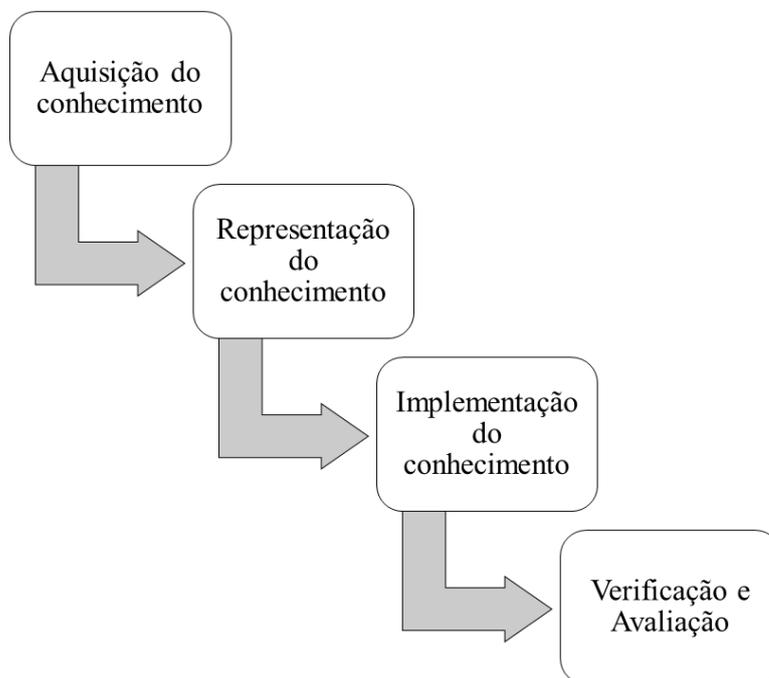
O especialista humano (EH) é um profissional com habilidades para resolver problemas específicos, de maneira rápida e eficiente. Sua capacidade de obter insights sobre o problema permite que identifiquem rapidamente as informações mais relevantes e deduzam as soluções mais prováveis. Grande parte desse conhecimento é adquirido ao longo dos anos por meio de experiências pessoais, que não podem ser encontradas em livros ou manuais de regras e procedimentos.

Muitas vezes suas decisões são baseadas na intuição, e podem nunca ter sido explicitamente declaradas ou documentadas (HART, 1992). Isso torna a experiência dos EHs uma combinação valiosa de conhecimento técnico e sabedoria prática, permitindo-lhes enfrentar desafios com uma abordagem eficaz.

Após constatar a viabilidade da aplicação da tecnologia de sistemas especialistas para resolver um problema identificado, especialmente quando a solução requer uma abordagem predominantemente heurística (intuitiva), e o conhecimento de um especialista humano (EH) é limitado (SAKTHIVEL e KALYANARAMAN, 1993), pode-se iniciar o processo de desenvolvimento do SE.

O processo de desenvolvimento de um sistema especialista envolve cinco etapas: aquisição do conhecimento, representação do conhecimento, codificação do conhecimento, verificação e avaliação. Cada fase desempenha um papel fundamental no sucesso do SE, garantindo que o conhecimento especializado seja corretamente capturado e incorporado no sistema. A Figura 6 representa o ciclo de desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista.

Figura 6: Fluxograma do procedimento adotado na elaboração do protótipo.



Fonte: Autoria própria, 2023.

4.1.1. Aquisição do conhecimento

A primeira fase do desenvolvimento de um Sistema Especialista (SE) é a aquisição do conhecimento (PRERAU, 1987). Nessa fase, especialistas humanos, que são profissionais experientes no campo de interesse, desempenham um papel fundamental. Eles são entrevistados ou participam de sessões de brainstorming para compartilhar seu conhecimento sobre o domínio de aplicação do sistema (LIOU, 1990). Essa etapa é crucial porque é aqui que o SE começa a aprender e a compreender o conhecimento que será usado para resolver problemas no domínio em questão.

O processo de aquisição de conhecimento é complexo (BITTENCOURT, 2001), pois não se trata apenas de adicionar novos elementos de conhecimento à base existente. Em vez disso, envolve a integração cuidadosa desse novo conhecimento com o que já está disponível. É necessário definir de forma precisa como esses conhecimentos se relacionam entre si e como podem ser usados para tomar decisões dentro do SE.

O papel do Especialista de Conhecimento (EC) nesse processo pode variar dependendo do método ou técnica específica usada para extrair o conhecimento.

Em alguns casos, o EC pode adotar uma postura de aprendiz, buscando entender e absorver o conhecimento do Especialista Humano (EH). Em outras circunstâncias, o EC pode preferir conduzir entrevistas não estruturadas com o EH ou até mesmo observar o EH enquanto ele executa tarefas específicas (WAGNER *et al.*, 2002). Essa flexibilidade é necessária, pois diferentes métodos podem ser mais adequados para diferentes tipos de conhecimento e domínios.

É importante observar que a área de aquisição de conhecimento ainda não possui uma metodologia amplamente aceita e estabilizada. Não existe um consenso sobre um ciclo de vida definitivo para o processo de aquisição de conhecimento, com etapas claramente definidas, produtos específicos em cada etapa e métodos padronizados para cada uma delas (RUSSELL E NORVIG, 2004).

No contexto deste trabalho, a aquisição de conhecimento para o desenvolvimento do protótipo SE envolveu a coleta de dados de manutenção em campo e a estruturação dessa base de conhecimento. Isso significa que os especialistas em manutenção forneceram informações sobre como resolver problemas de manutenção, e essas informações foram organizadas de forma a serem utilizadas pelo SE para tomar decisões e fornecer orientações.

4.1.2. Representação do conhecimento

Após a fase de aquisição do conhecimento, segue-se a etapa crucial da representação desse conhecimento. Conhecimento, como definido por Starr (2006), abrange o conjunto completo de dados e informações que as pessoas utilizam de forma prática para executar tarefas, realizar ações específicas e construir mais conhecimento. Em essência, o conhecimento apresenta duas características distintas:

(a) Tem um propósito intrínseco, pois é uma peça fundamental na caixa de ferramentas intelectuais para atingir metas específicas.

(b) Tem a capacidade de gerar informações adicionais. Por exemplo, o entendimento de que a pressão do freio está abaixo ou acima do normal é uma forma de conhecimento sobre o sistema de freio, que pode levar a conclusões adicionais, expandindo assim a base de informações e conhecimentos disponíveis.

Portanto, nesta etapa, o conhecimento adquirido dos especialistas é organizado e formalizado em uma estrutura compreensível pelo Sistema Especialista (SE). Diversas técnicas de representação de conhecimento podem ser

empregadas, como regras de produção, redes semânticas, árvores de decisão, entre outras (KHAN et al., 2016). A representação do conhecimento é de extrema importância para garantir que o SE possa realizar raciocínios e tomar decisões consistentes e precisas com base no conhecimento especializado (GRIMM, 2009).

Existem várias formas de expressar o conhecimento. No contexto de sistemas especialistas, Østerby (1992) e Cawsey (1998) delineiam três abordagens proeminentes de representação:

- **Estruturação de Objetos:** Isso envolve o uso de estruturas como redes semânticas, frames, grafos conceituais e tecnologias orientadas a objetos para representar o conhecimento. Essas estruturas permitem descrever objetos, suas propriedades e relacionamentos de maneira organizada.
- **Aplicação da Lógica:** Nessa abordagem, o conhecimento é representado por meio de enunciados lógicos, que podem ser proposicionais (afirmações sobre estados de coisas) ou predicados (afirmações sobre relações entre objetos). Isso permite uma representação precisa e formal do conhecimento.
- **Formulação de Regras:** Aqui, o conhecimento é expresso em termos de regras que orientam ações ou inferências em diferentes cenários. Essas regras seguem a estrutura "SE <condição ou premissa>, ENTÃO <ação ou conclusão>" e são essenciais para sistemas especialistas, pois permitem que o SE tome decisões com base em condições específicas.

Russell e Norvig (2021) explicam que redes semânticas são uma forma de representação do conhecimento que utiliza gráficos para visualizar uma base de conhecimento e inferir propriedades de objetos com base em suas associações com categorias. Por outro lado, lógicas de descrição são representações que fornecem uma linguagem formal para construir e combinar definições de categorias e algoritmos para determinar relações de subconjunto e superconjunto entre categorias.

De acordo com Cawsey (1998), em vez de adotar uma abordagem relativamente descritiva e estática para representar o conhecimento (como um conjunto de relações consideradas verdadeiras), pode ser mais eficaz representá-lo como um conjunto de regras que orientam ações ou inferências em diferentes cenários. Essas regras são expressas por meio de declarações no formato "SE , ENTÃO ". Isso permite que o conhecimento seja aplicado de maneira mais dinâmica e adaptável em situações variáveis.

4.1.3. Implementação do conhecimento

Nesta fase o conhecimento é traduzido para uma linguagem de programação ou uma forma computacional que o sistema possa utilizar (BLUM e WACHTER, 1986). Nesta fase são criadas as regras, algoritmos e estruturas de dados necessárias para que o SE possa aplicar o conhecimento adquirido na resolução de problemas reais.

O CLIPS (C Language Integrated Production System) foi uma das primeiras ferramentas utilizadas para construção de sistemas especialistas. Ele foi desenvolvido pelo Centro Espacial Lyndon B. Johnson da NASA entre 1985 e 1996. CLIPS é um programa em linguagem C baseado em regras, que usa uma solução heurística para implementar e manter uma solução algorítmica (CLIPS, 2023)

Entretanto, outro paradigma da programação é a programação orientada a objetos (POO). Conforme Hauswirth et al. (2004), um objeto é uma coleção de dados e comportamentos associados. Programação orientada a objetos é suportada pelas linguagens de programação como Java, C++, C# e Python.

Python (DUSTY, 2010) é uma linguagem de programação de alto nível, a qual possui uma vasta biblioteca que disponibiliza módulos e funções para várias tarefas comuns. A disponibilidade dessas bibliotecas resulta na redução de tempo no processo de desenvolvimento do código (PYTHON, 2023). A linguagem Python está presente em diversos Ambientes de Desenvolvimento Integrados (Integrated Development Environment - IDE), como o Pycharm, Spyder, Jupyter Notebook e Google Colab.

Google Colaboratory é um produto de livre acesso do Google Research. Ele permite que qualquer pessoa escreva e execute um código em Python através do navegador (GOOGLE COLAB, 2023).

Anaconda é uma plataforma de distribuição que armazena diferentes IDEs e que suportam linguagem Python ou R. Diferentemente do Google Colab, o Anaconda é um programa aberto que só executa linguagem Python em um computador local.

Entre as IDEs do Anaconda e o Google Colaboratory, ambos adotam diferentes modos de exibição para desenvolvimento de programas na linguagem Python. Entretanto, o Colab não permite a criação de interface gráfica no navegador, mas as IDEs do Anaconda possibilitam tal criação com uma biblioteca de Python.

Optou-se neste trabalho pela programação orientada a objetos em Python e, para implementar o conhecimento, foi utilizado o Google Colab, por ser uma plataforma de desenvolvimento baseada na nuvem que oferece várias vantagens para o desenvolvimento de sistemas especialistas. Ele possui um ambiente préconfigurado, eliminando a necessidade de configuração manual do ambiente, evitando problemas de compatibilidade; facilidade de compartilhamento do desenvolvimento feito no ambiente; integração com o Google Drive, facilitando o armazenamento e acesso a notebooks e datasets; proporciona segurança no desenvolvimento e escalabilidade das aplicações desenvolvidas (GOOGLE COLAB, 2023)

4.1.4. Verificação e avaliação

Na fase do desenvolvimento de um SE, denominada verificação e avaliação do sistema, o SE é testado e avaliado para garantir que ele esteja funcionando de acordo com as expectativas, e que os resultados obtidos sejam corretos e confiáveis (O'KEEFE e O'LEARY, 1993).

Verificar é analisar o desencadeamento das regras dentro da máquina de inferência, evitando os erros de inferência, e avaliar a fluidez do código, a fim de evitar erros de sintaxe e de semântica. (SAMIR ELLOUMI et al., 2014)

De acordo com Smith e Kandel (1993), a verificação ocorre mediante a aplicação de análise estática e dinâmica. A análise estática não implica a execução do SBC, sendo empregada, por exemplo, na verificação da base de conhecimento, manualmente ou por meio de alguma ferramenta automática, com o objetivo de avaliar a precisão, coerência e abrangência do conhecimento. Já a análise dinâmica envolve a execução efetiva do SBC, sendo empregada, por exemplo, para verificar se o SBC está fornecendo respostas corretas e se está empregando o processo adequado de inferência.

Já a avaliação consiste em testar o sistema em diferentes situações para verificar se ele está tomando decisões precisas e coerentes de acordo com o conhecimento especializado. A avaliação determina a eficácia do sistema final com relação às necessidades do usuário final e ao mesmo tempo avalia se o SBC executa a tarefa desejada com um nível suficiente de perícia. A avaliação analisa as exigências explícitas e implícitas do sistema (RIGONI, 2009). Essa fase é essencial

para garantir a qualidade e a eficácia do SE antes de sua implantação em um ambiente real.

O processo de verificação e avaliação do SBC desenvolvido neste trabalho está detalhadamente descrito nas seções 5.5 e 5.6, respectivamente, fornecendo um conjunto de diretrizes e práticas para garantir que o sistema cumpra suas funções de maneira precisa e confiável.

4.2. SISTEMAS ESPECIALISTAS PARA DIAGNÓSTICOS DE FALHAS

Os sistemas especialistas desempenham um papel crucial na identificação e diagnóstico de falhas em uma ampla variedade de domínios (CASTELANI, 2003) incluindo a indústria automotiva e de veículos pesados. Nesta seção, destaca-se alguns exemplos de aplicações desse sistema para diagnóstico de falhas.

VAGENAS (1992) desenvolveu um sistema especialista de consulta chamado PROGNOS para o diagnóstico de falhas no sistema de transmissão de modelos TORO 500 LHD na mina de Kiruna, Suécia. Esse sistema é um dos primeiros esforços para explorar o potencial e as limitações de aplicar sistemas especialistas para o diagnóstico de falhas em maquinaria de mineração na indústria de mineração sueca. O PROGNOS utiliza uma base de conhecimento de regras "Se ... Então" e segue uma abordagem dedutiva para fazer inferências.

A aquisição do conhecimento para o desenvolvimento do PROGNOS ocorreu utilizando métodos de captura de conhecimento que incluíram o estudo de documentos operacionais, entrevistas com mecânicos experientes da mina e análise de literatura relevante.

O autor escolheu a ferramenta de construção de sistemas especialistas 1st-CLASS para implementar o PROGNOS. Esta ferramenta oferece uma alta facilidade de apresentação intuitiva da base de conhecimento e permite ativar programas externos de texto e gráficos para apoiar as regras. O PROGNOS já foi testado na mina de Kiruna e as sugestões fornecidas pelo sistema para o diagnóstico de falhas são consideradas lógicas e razoáveis pelos mecânicos da mina.

Patton *et al.* (1989) desenvolveram em seu trabalho um sistema especialista para auxiliar eletricitas no diagnóstico de falhas elétricas em máquinas de mineração. O sistema incluiu programas de diagnóstico, referência e tutorial. A parte de diagnóstico do sistema foi baseada em uma abordagem de raciocínio causal,

usada para estabelecer uma hierarquia de sintomas e as regras de produção subsequentes para identificar falhas em nível de componente no circuito de controle do motor de um carro de transporte. Com esta abordagem, as conclusões foram desenvolvidas diretamente a partir do conhecimento do circuito e do seu comportamento (tanto nos modos de funcionamento como de falha) com base nos primeiros princípios, em vez da heurística de um especialista no domínio. Os sintomas e sua estrutura hierárquica foram formulados através da criação de cenários hipotéticos e da realização de uma análise qualitativa do circuito para cada falha.

O estudo de Hassannayebi et al. (2022) teve como objetivo apresentar e implementar um sistema especialista baseado em conhecimento que utiliza opiniões sintetizadas de especialistas para aprimorar as instalações de controle de pressão de gás. Considerando o histórico de falhas nos componentes do sistema de transmissão de gás e a natureza incerta dos dados, os autores desenvolveram um novo sistema especialista difuso usando programação orientada a objetos para analisar modos e condições de falha. O modelo de inteligência artificial é projetado na linguagem de programação C#, e uma interface de usuário foi desenvolvida para facilitar a implementação. A validade do modelo baseado em conhecimento foi testada por meio da implementação de estudos de caso do mundo real adaptados da indústria de gás no Irã. A implementação do sistema especialista projetado pelos autores demonstrou que ele pode minimizar a probabilidade de uma falha melhorando as condições de segurança.

O trabalho de Young *et al* (2022) apresenta uma nova abordagem para eliciar conhecimento em sistemas especialistas, com foco na interpretação de dados de séries temporais em engenharia e monitoramento de ativos industriais. A abordagem dos autores utiliza primitivas simbólicas para parametrizar dados de monitoramento de condições, facilitando a obtenção rápida e precisa do conhecimento dos especialistas do domínio. Isso permitiu a formalização e implementação eficiente do conhecimento em um sistema de diagnóstico. A parametrização do conhecimento possibilitou a melhoria iterativa da base de conhecimento com base em novos dados. A abordagem foi aplicada com sucesso ao conjunto de dados Tennessee Eastman, identificando falhas de maneira precisa e explicando as razões por trás de cada detecção. Esta abordagem ofereceu economia de tempo na obtenção de conhecimento, reduzindo a carga sobre os engenheiros. No entanto, há limitações,

como o foco em dados de séries temporais, desafios na captura de relações temporais complexas e a necessidade de pesquisa adicional para permitir a interação bidirecional entre especialistas e sistemas especialistas.

Em geral, esses estudos mostram que os sistemas especialistas, apesar de não ser uma ferramenta nova, continuam a ser uma ferramenta valiosa no diagnóstico de falhas em diversas indústrias, e novas abordagens possuem grande potencial de melhorar ainda mais a eficiência desses sistemas. Portanto, a pesquisa contínua nesta área é fundamental para avançar no desenvolvimento de sistemas especialistas cada vez mais eficazes e versáteis.

5. PROTÓTIPO PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS

Este capítulo tem como propósito apresentar uma descrição detalhada dos métodos implementados no protótipo desenvolvido neste trabalho. A seguir serão apresentadas as principais classes de objetos representadas e a estrutura das regras de produção utilizadas para possibilitar que o protótipo do sistema execute diagnósticos de falhas com base em parâmetros anormais identificados e situações predefinidas.

O objetivo principal aqui é enfatizar a viabilidade desses métodos de representação e a capacidade intrínseca de um Sistema Especialista (SE) em lidar com fatos e informações relacionadas ao estado interno dos componentes. Essa capacidade torna-se essencial, uma vez que interromper o funcionamento de um caminhão *off-road* para realizar verificações implica em riscos de segurança para os colaboradores, especialmente devido a locais de difícil acesso em alguns pontos de inspeção do equipamento, além dos custos significativos associados à parada para manutenção citados no início deste trabalho.

Nesse contexto, a parada para manutenção é vista como uma opção indesejável, a menos que existem evidências claras que justifiquem uma ação ou tarefa de manutenção. Portanto, entender como o SE opera e como ele pode diagnosticar falhas com base em informações anormais e situações específicas é fundamental para otimizar a manutenção de caminhões *off-road*, minimizando paradas desnecessárias e garantindo a segurança dos colaboradores.

5.1. AQUISIÇÃO DO CONHECIMENTO

Neste estudo, o processo de aquisição de conhecimento foi executado mediante a combinação de duas fontes fundamentais de informação, permitindo assim uma abordagem abrangente e sólida: (a) a coleta de dados diretamente no campo de operação, em colaboração com Especialistas Humanos (EHs) encarregados do diagnóstico, e (b) a obtenção de informações relacionadas à execução das atividades de manutenção da frota.

A aquisição do conhecimento foi dividida em duas fases, cada uma desempenhando um papel crucial no desenvolvimento do Sistema Especialista (SE) em questão, as quais são descritas a seguir:

5.1.1. Coleta de dados de manutenção em campo

No contexto da coleta de dados em campo, uma abordagem abrangente foi adotada para reunir informações essenciais sobre todas as atividades de manutenção realizadas nas frotas de caminhões. É importante destacar que, embora as informações tenham sido coletadas para todas as manutenções, o foco principal deste trabalho recaiu sobre o processo de manutenção corretiva realizado pelo setor responsável durante um período específico, abrangendo dois meses no ano de 2020.

Deve-se observar que o setor encarregado da manutenção dos caminhões não dispunha de uma base de dados históricos para registros detalhados das intervenções de manutenção anteriores. Portanto, a primeira iniciativa foi a criação de uma base de dados dedicada à manutenção, destinada a documentar de forma completa todas as intervenções realizadas nos equipamentos da frota.

Para a eficaz coleta e registro das informações adquiridas, foi desenvolvida uma planilha eletrônica. Essa planilha foi concebida para armazenar de forma abrangente o histórico completo das intervenções de manutenção executadas. Ela incluiu campos para registrar detalhes relevantes, tais como a duração de cada fase da manutenção, a frequência das intervenções e a tipologia das falhas identificadas.

Os dados essenciais necessários para o preenchimento dessa planilha foram obtidos por meio de diversas fontes, incluindo relatórios emitidos pelas equipes de plantão que estavam envolvidas diretamente nas atividades de manutenção. Além disso, informações foram fornecidas pelos colaboradores que desempenham funções importantes na execução das tarefas de manutenção.

Um exemplo ilustrativo dos formulários desenvolvidos para simplificar e agilizar a coleta das informações necessárias pode ser visualizado na Figura 7. Esse processo de coleta de dados permitiu a construção de um registro histórico completo e detalhado das atividades de manutenção, que serviu como base sólida para o desenvolvimento subsequente do sistema especialista em manutenção de caminhões fora-de-estrada.

Figura 7: Modelo de formulário entregue a equipe de turno

Medição de processos - Frotas Carregamento e Transporte

Data	Turno	Equipamento	Horário de parada	Início atendimento	Final atendimento	Observações

Fonte: Autoria própria, 2023.

O propósito fundamental do banco de dados reside em viabilizar o registro detalhado das intervenções efetuadas nos equipamentos e na coleta de informações essenciais, incluindo o sistema no qual a falha foi identificada, os sintomas observados, o diagnóstico realizado e as medidas corretivas propostas. Esse processo foi conduzido ao longo de 60 dias, com atualizações diárias, visando alimentar o banco de dados com informações sobre todas as manutenções executadas nos equipamentos.

Tal iniciativa resultou na construção de uma base de conhecimento sólida, na qual foram registrados dados textuais que representam as informações obtidas em conjunto com os especialistas da equipe de manutenção. É importante ressaltar que essa etapa foi realizada em uma mineradora localizada no sul do estado do Pará, e a equipe de Especialistas Humanos (EH) era responsável tanto pela manutenção preventiva quanto pela corretiva de oito caminhões fora-de-estrada do modelo 785D.

O acesso a um histórico detalhado das manutenções em veículos fora de estrada confere à equipe uma base de informações mais robusta para gerenciar a frota com maior eficiência. Essa visão ampla permite a identificação de padrões de desgaste e falhas recorrentes, resultando na minimização de interrupções não planejadas e na otimização de recursos. Além disso, a análise de tendências com base no histórico possibilita ajustes precisos nos intervalos de manutenção, resultando em redução de custos e na prevenção de substituições prematuras de peças. Essas vantagens, quando combinadas com a implementação de um sistema especialista que acelera o diagnóstico de falhas, contribuem para maior confiabilidade operacional, cumprimento de prazos e significativa economia de custos.

5.1.2. Transcrição dos dados para planilha

As informações iniciais foram registradas em formato físico, utilizando papel impresso, tornando o processo mais acessível e prático durante as atividades dos colaboradores. No entanto, reconhecendo a necessidade de criar um histórico eletrônico mais organizado e de fácil acesso, optou-se por desenvolver uma planilha eletrônica específica. Essa planilha teve a finalidade de compilar o histórico completo das intervenções de manutenção realizadas, abrangendo detalhes como a duração de cada etapa do processo, a frequência de ocorrência e os tipos de falhas identificadas.

Dentre as informações coletadas diretamente no campo de operação, aquelas que se mostraram mais significativas para o desenvolvimento do sistema especialista incluíram: o sistema no qual a falha foi identificada, os sintomas observados, o diagnóstico fornecido pelos Especialistas Humanos (EH) e as ações empreendidas para corrigir a falha e restaurar o funcionamento do ativo afetado. Um resumo dessas informações cruciais está apresentado de forma mais detalhada na Tabela 2.

Tabela 2: Informações coletadas para construção da base de conhecimento.

SINTOMAS	DIAGNÓSTICO	MEDIDA CORRETIVA PROPOSTA	SISTEMA
Vazamento	Anel da mangueira de entrada da tela da bomba do implemento está danificado	Troca do anel, completar nível do tranque hidráulico e realizar teste no sistema	Hidráulico
Vazamento no tanque hidráulico da direção	Válvula do dreno do tanque do óleo da direção entreaberta	Realizar fechamento da válvula	Hidráulico
Falha intermitente na câmara traseira	Oxidação e folga no conector da câmara	Realizar limpeza e reaperto do conector	Elétrico
Alarme intermitente de superaquecimento do líquido aquecedor; Medição da temperatura ELC feita com <i>infrared</i> onde consta que a temperatura está normal, teste de resistência do sensor constatando normalidade	Contaminação do conector do sensor de temperatura	Limpeza do conector do sensor de temperatura	Elétrico

A duração das etapas, principalmente em relação ao tempo para realizar o diagnóstico, também foi uma das informações coletadas com os EHS. Por meio dessa informação pode-se comprovar que o tempo entre o diagnóstico da falha e a ação corretiva foi muito longo em alguns casos, mostrando mais uma vez que dispor de um sistema especialista para auxiliar no diagnóstico pode reduzir o tempo do diagnóstico, proporcionando benefícios ao processo.

5.2. REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO

No desenvolvimento do protótipo do sistema especialista voltado para o diagnóstico de falhas em caminhões fora-de-estrada, optou-se por representar o conhecimento usando duas principais abordagens: lógica proposicional e regras.

A representação baseada em regras oferece uma maneira explícita e compreensível de expressar o conhecimento, empregando uma estrutura "Se-então". Essa abordagem se assemelha à forma como os especialistas humanos articulam seu conhecimento ao tomar decisões (Russel e Nörvig, 2021).

A base de conhecimento foi estruturada com base em declarações lógicas que fazem uso dos operadores lógicos "OU" e "E" dentro das regras. A estrutura das regras é delineada da seguinte forma:

SE <premissa 1> E <premissa 2> E <premissa 3> ,

ENTÃO <recomendação>

Essas regras são formuladas a partir de três premissas que, dependendo das respostas dos usuários, resultam em uma recomendação específica de manutenção. A Tabela 3 fornece detalhes sobre as premissas incorporadas nas regras do sistema de diagnóstico de falhas, para os sistemas: hidráulico, elétrico, lubrificação e mecânico.

Tabela 3: Premissas presentes na estrutura de regras.

Sistema	Premissa 1	Premissa 2	Premissa 3
Hidráulico	Pergunta sobre vazamento hidráulico	Pergunta sobre a vedação	Pergunta sobre o filtro
Elétrico	Pergunta sobre o sistema	Pergunta sobre o compressor	Pergunta sobre a limpeza
Lubrificação	Pergunta sobre nível de óleo	Pergunta sobre vazamento	Pergunta sobre filtro
Mecânico	Perguntas sobre ruído	Perguntas sobre vibração	Perguntas sobre potência

Fonte: Autoria própria, 2023.

5.3. IMPLEMENTAÇÃO DO CONHECIMENTO

O conhecimento, representado por meio de regras e lógica, foi incorporado no sistema com uma abordagem de programação orientada a objetos. Para implementar essa abordagem, utilizamos o ambiente de desenvolvimento interativo em Python, o Google Colab. Esse ambiente foi escolhido devido à sua capacidade de facilitar o desenvolvimento de um sistema de inferência de fatos com suas respectivas regras, bem como oferecer flexibilidade para compartilhar o arquivo com outros usuários, uma vez que está armazenado na nuvem.

A implementação das regras foi realizada por meio de condicionais, tais como "If, Elif e Else". A máquina de inferência do sistema especialista foi construída por meio de uma classe. Essa classe encapsula uma série de funções, sendo que cada função é acionada de acordo com o valor do atributo selecionado pelo usuário. Para proporcionar uma visão mais clara desse processo, a Figura 8 apresenta um esquema simplificado do código utilizado.

O método "*Initialization*" atua como o construtor da classe, sendo instanciado sempre que a classe é utilizada. Nesse método, um texto de boas-vindas é mostrado ao usuário. O método "*choose_type*" é uma função que pergunta ao usuário qual sistema ele deseja diagnosticar a falha. O usuário escolhe entre sistema hidráulico, elétrico, lubrificação e mecânico.

Figura 8: Estrutura do código utilizado para diagnóstico nos sistemas hidráulico, elétrico, lubrificação e mecânico.

Classe: KnowledgeEngine
Initialization
Choose_type
run
run_hidraulico
run_eletrico
run_lubrificação
run_mecanico

Fonte: Autoria própria, 2023.

Quando o atributo “run” é instanciado conforme o objeto, que é a classe *KnowledgeEngine*, ele executa uma lista para o usuário escolher o sistema que pretende diagnosticar a falha. Quando o usuário escolhe o sistema, ele responde a um questionário que, após a conclusão, retorna uma ação de manutenção corretiva.

5.4. INTERFACE DO PROGRAMA

O código foi implementado em duas plataformas diferentes, o ambiente interativo Google Colab e o Jupyter Notebook, que faz parte da distribuição Anaconda. Essa abordagem oferece aos usuários duas alternativas de interface para interagir com o sistema especialista.

O uso do Google Colab desempenhou um papel significativo na avaliação do sistema especialista baseado na nuvem, especialmente durante a colaboração com especialistas externos. Esse ambiente proporcionou uma maneira prática de compartilhar o sistema e coletar feedback valioso.

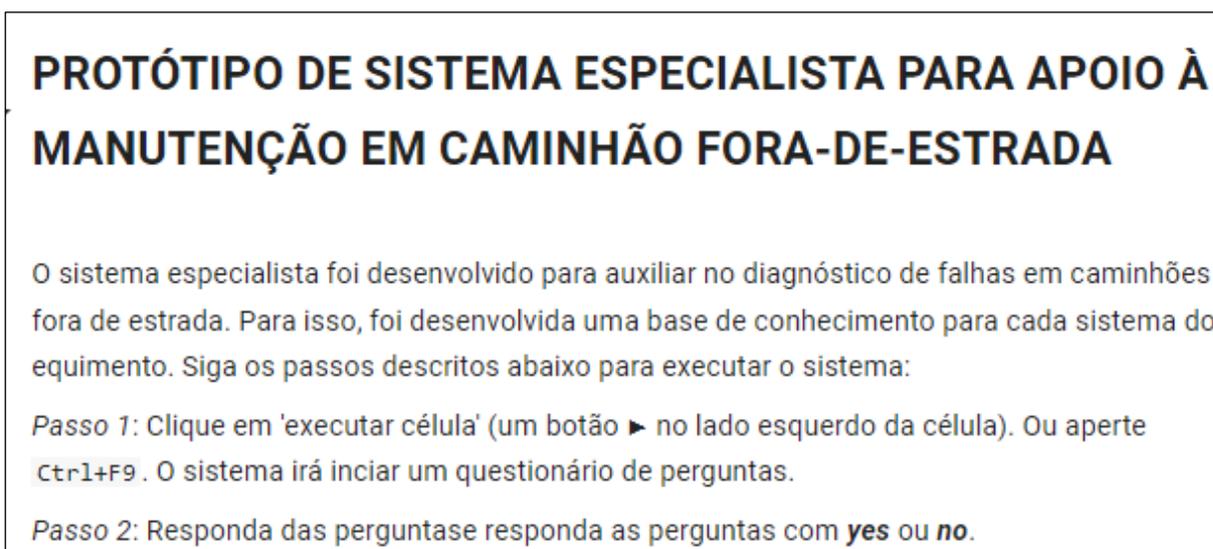
Por outro lado, o código desenvolvido no Jupyter Notebook, instalado localmente em um computador, permitiu a criação de uma interface gráfica mais rica. Isso enriqueceu a experiência de interação com o sistema, tornando-o mais acessível e amigável para os usuários. A escolha entre essas duas opções de interface depende das necessidades específicas e das preferências dos usuários, garantindo assim uma maior flexibilidade na utilização do sistema especialista.

5.4.1. Interface em nuvem no Google Colab

Para validar o sistema especialista, uma interface gráfica foi desenvolvida e está disponível no ambiente de nuvem. Essa abordagem de interação foi fundamental para fornecer aos especialistas uma plataforma acessível que lhes permitisse avaliar detalhadamente o protótipo desenvolvido.

Ao acessar a Figura 9, é possível visualizar a tela inicial do sistema, que começa explicando claramente seu propósito. Esta tela inicial desempenha um papel importante ao fornecer ao usuário orientações iniciais sobre como utilizar o sistema de diagnóstico. Essa abordagem simplifica a compreensão da finalidade do programa e fornece as informações necessárias para as etapas iniciais de interação. Como resultado, a experiência de uso torna-se mais fluida e orientada.

Figura 9: Tela inicial com instruções de uso protótipo desenvolvido no Google Colab.



Fonte: Autoria própria, 2023.

É importante destacar que o sistema especialista pode ser acessado diretamente na nuvem, eliminando a necessidade de instalação de programas no computador do usuário. Essa característica contribui para a acessibilidade e praticidade do sistema, permitindo que os especialistas e outros usuários o utilizem sem complicações, em qualquer dispositivo com acesso à internet.

Após a conclusão dos dois primeiros passos mencionados anteriormente, o programa avança para uma nova fase, apresentando ao usuário uma nova tela com instruções adicionais. Nesta etapa, o sistema solicita ao usuário que escolha qual

sistema deseja investigar em relação à falha identificada. Para tornar essa decisão mais informada (esclarecida), o sistema fornece orientações contextuais que guiam o usuário sobre como proceder.

A Figura 10 ilustra este processo, mostrando como o sistema exibe essa tela com a opção de seleção do sistema para análise. Este passo tem como objetivo principal direcionar a interação do usuário, permitindo que ele tome uma decisão inicial sobre qual área deseja examinar primeiro. Essa abordagem visa aumentar a compreensão do usuário sobre o processo global e facilitar a continuação da interação, proporcionando, assim, uma experiência mais instrutiva e direcionada.

Figura 10: Interface inicial do protótipo.

Passo 2: Responda das perguntase responda as perguntas com **yes** ou **no**.

 [Mostrar código](#)

Prezado usuário, é com grande satisfação que apresentamos
nosso programa de sistema especialista, uma ferramenta projetada
para auxiliar no diagnóstico eficaz de falhas em caminhões fora de estrada.
Antes de prosseguirmos, por favor, nos indique qual sistema você deseja analisar:
Digite 'Hidraulico', 'Eletrico', 'Lubrificacao' ou 'Mecanico':

Fonte: Autoria própria, 2023.

Essa etapa é fundamental para tornar o uso do sistema mais intuitivo, garantindo que o usuário possa interagir com o programa de maneira eficaz e direcionada, de acordo com suas necessidades e interesses específicos. É um elemento crucial para a usabilidade e eficácia geral do sistema especialista.

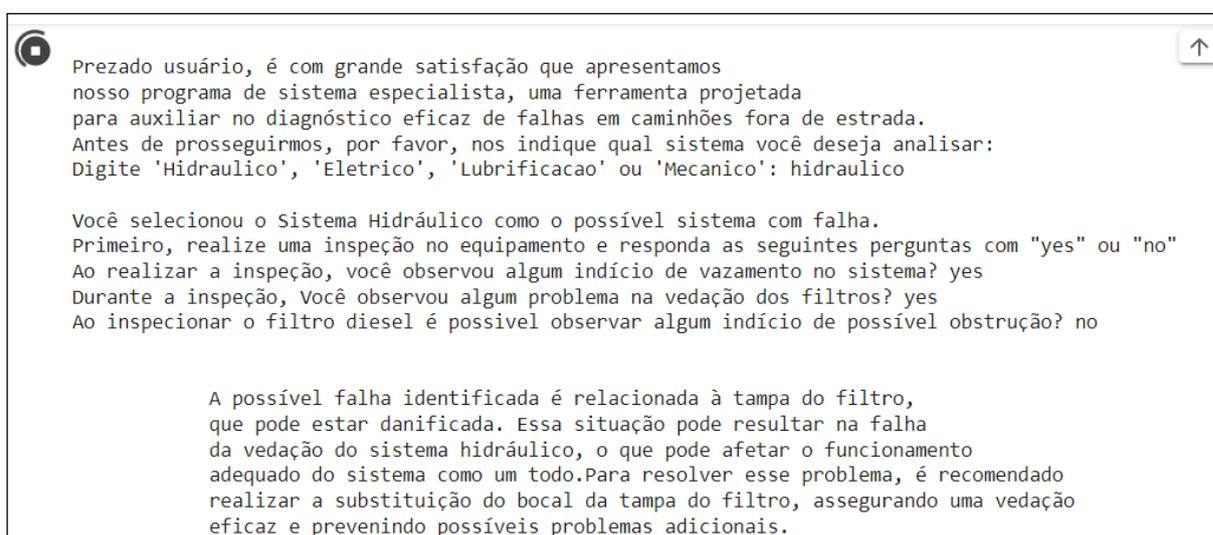
Para utilizar o sistema especialista, o usuário deve inserir no campo designado o nome do sistema que deseja investigar. Uma vez que o sistema escolhido é inserido, o programa inicia uma sequência de três perguntas, oferecendo opções de respostas "yes" ou "no" para cada uma delas.

Com base nas respostas fornecidas pelo usuário, o sistema entra em ação, analisando as informações disponíveis. Após uma análise cuidadosa, o programa exibe um diagnóstico específico, acompanhado de orientações direcionadas para o usuário. Essas orientações indicam as possíveis ações a serem tomadas para solucionar o problema identificado.

A Figura 11 ilustra visualmente como esse processo ocorre, proporcionando uma compreensão clara de como o usuário interage com o sistema e como as respostas fornecidas conduzem a um diagnóstico e recomendações específicas.

O objetivo principal dessa abordagem é guiar o usuário de forma eficaz através das etapas do processo, permitindo que suas respostas determinem um diagnóstico apropriado e as medidas a serem tomadas. Isso garante que o usuário tenha uma experiência interativa significativa e instrutiva, ajudando-o a resolver problemas relacionados ao sistema escolhido de maneira mais eficiente.

Figura 11: Interface com um exemplo de perguntas e resposta do sistema.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O exemplo acima ilustra o processo de diagnóstico realizado pelo sistema especialista em uma situação em que a falha está relacionada à tampa do filtro do motor, que pode estar danificada. Nesse cenário, o sistema não apenas identifica a falha, mas também fornece informações detalhadas sobre as possíveis consequências dessa falha no sistema hidráulico. Isso inclui problemas na vedação e possíveis vazamentos que podem resultar em contaminação do sistema. Além da identificação da falha e das suas consequências, o sistema também orienta o usuário sobre as ações recomendadas para solucionar o problema em questão. No exemplo, essas ações podem incluir a troca da tampa do filtro e a verificação do sistema de vedação para garantir que a vedação esteja adequada ao sistema.

É importante observar que, em situações em que o protótipo não consegue identificar uma falha com base nas informações fornecidas, uma mensagem é enviada ao usuário. Essa mensagem indica que não foram encontradas falhas na base de conhecimento que correspondam às respostas e informações fornecidas. Em implementações futuras e ciclos de aprimoramento, essa mensagem poderá ser aprimorada para incluir informações mais detalhadas e uma explicação mais abrangente para a incapacidade de detecção da falha, aprimorando ainda mais a interação com o usuário.

5.4.2. Interface gráfica do usuário no Jupyter Notebook

Este trabalho também desenvolveu uma interface gráfica em um computador local. Esse tipo de interface ficou restrito ao domínio da pesquisadora. Devido à incorporação de diversas bibliotecas em Python, foi utilizada uma biblioteca para o desenvolvimento da interface gráfica do usuário, chamado de Tkinter.

O código desenvolvido no Google Colab passou por algumas modificações para se adequar aos métodos e funções do Tkinter.

A Figura 12 ilustra a interface principal do programa, em que se pode notar que o diagnóstico por meio dessa interface é bastante intuitivo. O usuário seleciona um dos dois sistemas disponíveis para o diagnóstico e, nesse caso, o sistema selecionado é o sistema Hidráulico.

Figura 12: Janela principal do programa com a interface gráfica do usuário local.

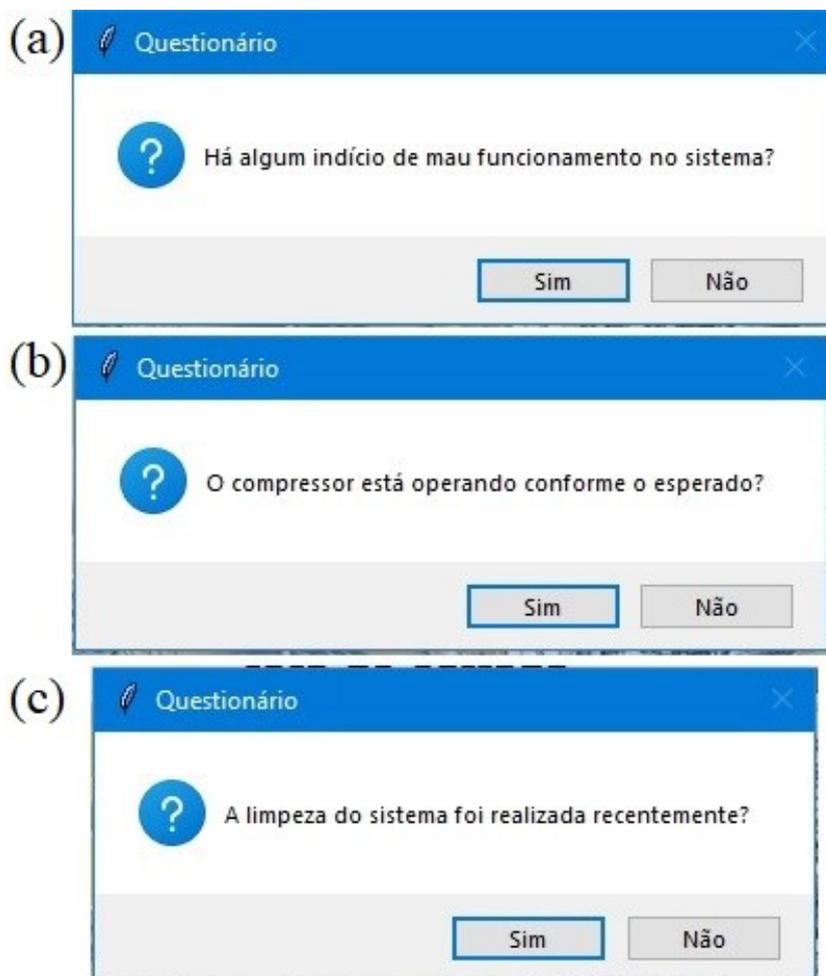


Fonte: Autoria própria, 2023.

Na Figura 13 é mostrada a sequência de perguntas que são ativadas para o sistema hidráulico. Três questionamentos são formulados: Há algum indício de mal funcionamento do sistema? O compressor está operando conforme o esperado? A limpeza do sistema foi realizada recentemente? cujas respostas "Sim" ou "Não" conduzem a diagnósticos distintos. Para essa interface, o campo de resposta

aparece para o usuário com a opção de selecionar um botão, facilitando a experiência do usuário no programa.

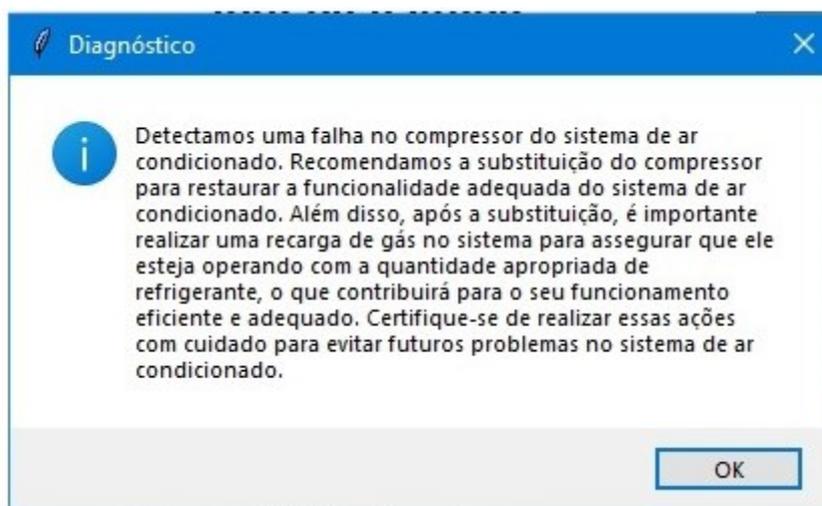
Figura 13: Janelas *pop-up* com perguntas a serem respondidas pelo usuário: Neste caso as perguntas são relacionadas ao diagnóstico do sistema hidráulico.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Por sua vez, a Figura 14 ilustra o diagnóstico obtido a partir da sequência de respostas "Sim", "Não" e "Sim" às perguntas mostradas na Figura 13.

Figura 14: Diagnóstico informado pelo sistema.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Na Figura 14, quando um usuário responde às perguntas propostas pelo programa, o sistema gera uma nova seção na qual exibe um diagnóstico potencial, juntamente com orientações sobre as medidas recomendadas para solucionar o problema. Esse processo ocorre com base nas respostas fornecidas pelo usuário, as quais são avaliadas pelo sistema para determinar o diagnóstico apropriado e as próximas etapas recomendadas para abordar a situação. Isso garante que os usuários obtenham informações claras em relação às possíveis falhas identificadas e como lidar com elas de maneira eficaz.

5.5. VERIFICAÇÃO

A verificação teve como propósito a análise manual da execução das regras. Por outro lado, na avaliação, o sistema especialista baseado em nuvem foi disponibilizado para especialistas através do google Colab junto a um formulário, visando a obtenção de feedback para aprimorar o protótipo.

O procedimento de verificação consiste em uma análise minuciosa do acionamento da máquina de inferência com base nas respostas fornecidas pelos utilizadores. Com o intuito de otimizar esse processo, um algoritmo iterativo foi desenvolvido para examinar as diversas combinações possíveis no espaço de estados do sistema especialista

A confirmação direta de cada regra foi efetuada por meio da construção de tabelas verdade. Nesse sentido, quatro tabelas verdade foram elaboradas: um referente ao sistema hidráulico (Tabela 4), um referente ao sistema elétrico (Tabela

5), uma referente ao sistema de lubrificação (Tabela 6) e uma referente ao sistema mecânico (Tabela 7).

5.5.1. Sistema Hidráulico

A tabela verdade apresentada para o sistema hidráulico (Tabela 4) é composta por um total de 8 regras. Essa quantidade resulta da combinação de três perguntas, cada uma com duas alternativas possíveis, gerando um total de $2 \times 2 \times 2 = 8$ combinações distintas.

Tabela 4: Tabela verdade para o sistema hidráulico

Premissa 1	Premissa 2	Premissa 3	Resultado
yes	yes	yes	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
yes	yes	no	A possível falha identificada é relacionada à tampa do filtro, que pode estar danificada. Essa situação pode resultar na falha da vedação do sistema hidráulico, o que pode afetar o funcionamento adequado do sistema como um todo. Para resolver esse problema, é recomendado realizar a substituição do bocal da tampa do filtro, assegurando uma vedação eficaz e prevenindo possíveis problemas adicionais.
yes	no	yes	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
yes	no	no	É possível que a abraçadeira dos filtros esteja folgada. Essa folga pode resultar em um encaixe inadequado do filtro, o que pode comprometer a vedação e permitir a entrada de impurezas no sistema. Para solucionar essa questão, é importante reposicionar o filtro de maneira correta e realizar o aperto adequado da abraçadeira, assegurando um ajuste firme e evitando que a folga continue a causar problemas. Isso garantirá a integridade do sistema e a eficiência na filtragem dos elementos indesejados.
no	yes	yes	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
no	yes	no	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
no	no	yes	Filtros diesel podem estar obstruídos. Essa obstrução pode causar restrição no fluxo de diesel, afetando negativamente o desempenho do motor. Para resolver essa situação, é necessário realizar a substituição completa do kit de filtros diesel, permitindo que o fluxo de combustível volte a ocorrer de forma adequada e garantindo o funcionamento eficiente do veículo.
no	no	no	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento

Fonte: Autoria própria, 2023.

A Figura 15 mostra a descrição de uma falha que está relacionada a problemas de vazamento no sistema hidráulico. Pode-se observar que o sistema oferece uma identificação clara e direta do possível problema em questão. Além disso, ele fornece uma recomendação específica para solucionar esse problema, seguindo as mesmas ações que a equipe de manutenção realizou quando se deparou com essa falha durante as operações de campo. Essa abordagem visa assegurar que o usuário do sistema obtenha orientações precisas e práticas para abordar a falha detectada, com base em experiências reais e bem-sucedidas no campo. Isso contribui para a eficácia do sistema ao oferecer soluções alinhadas com as melhores práticas de manutenção e reparo.

Figura 15 - Falha 1 referente ao sistema hidráulico.

Você selecionou o Sistema Hidráulico como o possível sistema com falha.
 Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes perguntas com "yes" ou "no"
 Ao realizar a inspeção, você observou algum indício de vazamento no sistema? yes
 Durante a inspeção, Você observou algum problema na vedação dos filtros? yes
 Ao inspecionar o filtro diesel é possível observar algum indício de possível obstrução? no

A possível falha identificada é relacionada à tampa do filtro, que pode estar danificada. Essa situação pode resultar na falha da vedação do sistema hidráulico, o que pode afetar o funcionamento adequado do sistema como um todo. Para resolver esse problema, é recomendado realizar a substituição do bocal da tampa do filtro, assegurando uma vedação eficaz e prevenindo possíveis problemas adicionais.

Fonte: autoria própria, 2023.

A falha apresentada na figura 15 foi comunicada pela equipe de manutenção por meio do formulário mencionado na seção 5.1. Dentro dos campos disponíveis no referido formulário, foi incluída a possibilidade de registro do tempo necessário para o completo diagnóstico e solução do problema em questão. No presente caso, os especialistas responsáveis informaram que o período despendido para a identificação da anomalia foi de aproximadamente uma hora e quinze minutos. Com a aplicação do programa desenvolvido, espera-se uma significativa redução desse tempo.

As figuras 16 e 17 apresentam outros exemplos de falhas identificadas pelo programa no sistema hidráulico. É notável que as ações recomendadas pelo programa são consistentes com as intervenções previamente realizadas no campo pela equipe de manutenção. Essa congruência entre as recomendações do sistema

e as práticas reais no terreno tem um impacto significativo na eficiência do diagnóstico e reparo de falhas.

Figura 16 - Exemplo 3 de falha no sistema Hidráulico.

Você selecionou o Sistema Hidráulico como o possível sistema com falha.
 Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes perguntas com "yes" ou "no"
 Ao realizar a inspeção, você observou algum indício de vazamento no sistema? yes
 Durante a inspeção, Você observou algum problema na vedação dos filtros? no
 Ao inspecionar o filtro diesel é possível observar algum indício de possível obstrução? no

É possível que a abraçadeira dos filtros esteja folgada. Essa folga pode resultar em um encaixe inadequado do filtro, o que pode comprometer vedação e permitir a entrada de impurezas no sistema. Para solucionar essa questão, é importante reposicionar o filtro de maneira correta e realizar o aperto adequado da abraçadeira, assegurando um ajuste firme e evitando que a folga continue a causar problemas. Isso garantirá a integridade do sistema e a eficiência na filtragem dos elementos indesejados.

Fonte: autoria própria, 2023.

Essa abordagem permite que a equipe de manutenção conduza o diagnóstico de forma mais ágil, uma vez que as ações sugeridas estão alinhadas com experiências anteriores bem-sucedidas. Como resultado, o tempo necessário para identificar a falha e tomar medidas corretivas é reduzido, minimizando o tempo de inatividade do equipamento e melhorando a produtividade geral da operação. Em última análise, essa integração entre o programa especialista e as práticas de campo contribui para uma manutenção mais eficaz e eficiente.

A falha apresentada na Figura 16 foi comunicada pela equipe de manutenção por meio do formulário mencionado na seção 5.1. Para esse caso, os especialistas responsáveis informaram que o período despendido para a identificação da anomalia foi de aproximadamente 2 horas e 15 minutos. Com a aplicação do programa desenvolvido, espera-se uma significativa redução desse tempo.

Figura 17 - Exemplo 3 de falha no sistema Hidráulico.

Você selecionou o Sistema Hidráulico como o possível sistema com falha.
 Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes perguntas com "yes" ou "no"
 Ao realizar a inspeção, você observou algum indício de vazamento no sistema? no
 Durante a inspeção, Você observou algum problema na vedação dos filtros? no
 Ao inspecionar o filtro diesel é possível observar algum indício de possível obstrução? yes

Filtros diesel podem estar obstruídos. Essa obstrução pode causar restrição no fluxo de diesel, afetando negativamente o desempenho do motor. Para resolver essa situação, é necessário realizar a substituição completa do kit de filtros diesel, permitindo que o fluxo de combustível volte a ocorrer de forma adequada e garantindo o funcionamento eficiente do veículo.

Fonte: autoria própria, 2023.

A equipe de manutenção comunicou a falha ilustrada na Figura 17 utilizando o mesmo formulário. Nesse incidente específico, os especialistas responsáveis relataram que levaram cerca de 1 hora e 40 minutos para identificar a anomalia.

Pode-se observar que, para os três exemplos apresentados, o uso do programa desenvolvido reduziria significativamente o tempo de diagnóstico, permitindo com que os esforços da equipe de manutenção pudessem ser direcionados de maneira mais assertiva e eficaz.

5.5.2. Sistema Elétrico

Por sua vez, na tabela verdade referente ao sistema elétrico (Tabela 5) observa-se uma quantidade reduzida de respostas que demandam intervenções corretivas, ocasionando um aumento na frequência de células vazias na base de conhecimento. Percebe-se que, das oito combinações possíveis, cinco delas não resultam em recomendações para ação corretiva, resultando em ausência de medidas corretivas na base de conhecimento.

O espaço combinatório, com seus oito estados possíveis, pode ser ampliado mediante a adaptação do código em linguagem Python. Essa adaptação permite a inclusão de novos sistemas que compõem o caminhão para serem analisados, como o sistema de lubrificação, proporcionando ao algoritmo a sua expansão. De fato, o algoritmo foi concebido na forma de funções que residem dentro de uma classe, cada uma destinada ao diagnóstico de sistemas individuais que compõem o veículo. A natureza expansível do algoritmo de diagnóstico de falhas possibilita a incorporação de novos sistemas à classe, através da criação de novas funções. D

a mesma forma que apresentado anteriormente para o sistema hidráulico, as figuras a seguir fornecem exemplos de falhas identificadas no sistema elétrico. Nota-se como o sistema destaca e comunica essas falhas com base em regras predefinidas e inseridas na sua base de conhecimento.

Tabela 5: Tabela verdade para o sistema elétrico.

Premissa 1	Premissa 2	Premissa 3	Resultado
yes	yes	yes	Identificamos uma falha no conector elétrico responsável pelo acionamento do compressor, o que pode estar causando problemas no funcionamento do compressor. Recomendamos que você corrija a conexão desse conector elétrico para restaurar o correto acionamento do compressor e garantir o funcionamento adequado do sistema. Certifique-se de realizar a correção de forma adequada para evitar futuras interrupções no funcionamento.
yes	yes	no	Identificamos um problema no filtro externo do sistema, o qual está obstruído devido o acúmulo de poeira. Essa obstrução está levando a um congelamento na serpentina do evaporador, afetando negativamente o desempenho do sistema de refrigeração. Para solucionar essa questão, recomendamos realizar uma limpeza minuciosa no filtro externo, removendo toda a poeira acumulada. Ao fazer isso, você estará restaurando a capacidade de circulação de ar e evitando o congelamento indesejado na serpentina do evaporador. Certifique-se de executar essa limpeza com atenção, pois é um passo essencial para manter o sistema de refrigeração funcionando de maneira eficiente e evitar futuras interrupções devido a essa obstrução.
yes	no	yes	Detectamos uma falha no compressor do sistema de ar-condicionado. Recomendamos a substituição do compressor para restaurar a funcionalidade adequada do sistema de ar-condicionado. Além disso, após a substituição, é importante realizar uma recarga de gás no sistema para assegurar que ele esteja operando com a quantidade apropriada de refrigerante, o que contribuirá para o seu funcionamento eficiente e adequado. Certifique-se de realizar essas ações com cuidado para evitar futuros problemas no sistema de ar-condicionado.
yes	no	no	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
no	yes	yes	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
no	yes	no	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
no	no	yes	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
no	no	no	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento

Fonte: Autoria própria, 2023.

No caso ilustrado na Figura 18, referente ao sistema elétrico, os especialistas registraram que o tempo necessário para o diagnóstico foi de cerca de 3 horas, aproximadamente. Uma das complexidades enfrentadas ao realizar esse tipo de diagnóstico consiste na presença de inúmeros componentes que compõem o caminhão. Nesta situação, a implementação do programa auxiliaria na orientação

dos esforços da equipe, possibilitando uma significativa redução no tempo necessário para o diagnóstico.

Figura 18 - Exemplo 1 de falha no sistema Elétrico.

Você selecionou o Sistema Elétrico como o possível sistema com falha.
 Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes perguntas com "yes" ou "no"
 Há algum indício de mau funcionamento no sistema? yes
 O compressor do ar condicionado está operando conforme o esperado? yes
 A limpeza do sistema foi realizada recentemente? yes

Identificamos uma falha no conector elétrico responsável pelo acionamento do compressor,
 o que pode estar causando problemas no funcionamento do compressor. Recomendamos que você corrija a
 conexão desse conector elétrico para restaurar o correto acionamento do compressor e garantir o funcionamento
 adequado do sistema. Certifique-se de realizar a correção de forma adequada para evitar futuras interrupções
 no funcionamento.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Já o problema mostrado na Figura 19 é mais complexo, apresentando o tempo de aproximadamente de 1 hora e 45 minutos. Uma dificuldade para esse tipo de diagnóstico corresponde aos diversos componentes que compõem o caminhão. Neste caso, o programa ajudaria a direcionar os esforços da equipe, resultando na redução do tempo de diagnóstico.

Figura 19 - Exemplo 2 de falha no sistema Elétrico.

Você selecionou o Sistema Elétrico como o possível sistema com falha.
 Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes perguntas com "yes" ou "no"
 Há algum indício de mau funcionamento no sistema? yes
 O compressor do ar condicionado está operando conforme o esperado? no
 A limpeza do sistema foi realizada recentemente? yes

Detectamos uma falha no compressor do sistema de ar condicionado. Recomendamos a substituição
 do compressor para restaurar a funcionalidade adequada do sistema de ar condicionado. Além disso, após
 a substituição, é importante realizar uma recarga de gás no sistema para assegurar que ele esteja
 operando com a quantidade apropriada de refrigerante, o que contribuirá para o seu funcionamento eficiente
 e adequado. Certifique-se de realizar essas ações com cuidado para evitar futuros problemas no sistema de
 ar condicionado.

Fonte: Autoria própria, 2023.

No caso da Figura 20, observa-se um exemplo de ocorrência de uma falha elétrica em um componente mecânico. Com a implementação do programa, pode-se estabelecer essas correlações específicas de maneira significativamente mais rápida, proporcionando um auxílio expressivo ao executor da atividade, resultando em uma redução notável no tempo necessário para o diagnóstico de falhas. Essa eficiência que resulta em economia de tempo é um dos principais benefícios do uso de um sistema especialista para diagnóstico de falhas.

Figura 20 - Exemplo 3 de falha no sistema Elétrico.

Você selecionou o Sistema Elétrico como o possível sistema com falha.
 Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes perguntas com "yes" ou "no"
 Há algum indício de mau funcionamento no sistema? yes
 O compressor do ar condicionado está operando conforme o esperado? yes
 A limpeza do sistema foi realizada recentemente? no

Identificamos um problema no filtro externo do sistema, o qual está obstruído devido o acúmulo de poeira. Essa obstrução está levando a um congelamento na serpentina do evaporador, afetando negativamente o desempenho do sistema de refrigeração. Para solucionar essa questão, recomendamos realizar uma limpeza minuciosa no filtro externo, removendo toda a poeira acumulada. Ao fazer isso, você estará restaurando a capacidade de circulação de ar e evitando o congelamento indesejado na serpentina do evaporador. Certifique-se de executar essa limpeza com atenção, pois é um passo essencial para manter o sistema de refrigeração funcionando de maneira eficiente e evitar futuras interrupções devido a essa obstrução.

Fonte: Autoria própria, 2023.

5.5.3. Sistema de lubrificação

A tabela verdade apresentada para o sistema de lubrificação (Tabela 6) é composta por um total de 8 regras. Essa quantidade resulta da combinação de três perguntas, cada uma com duas alternativas possíveis, gerando um total de $2 \times 2 \times 2 = 8$ combinações distintas. Cada combinação representa uma condição específica relacionada ao sistema de lubrificação, e aciona uma regra correspondente para fornecer orientações ou ações recomendadas com base nas respostas fornecidas pelo usuário. Essa abordagem permite abranger uma variedade de cenários possíveis no sistema de lubrificação, e oferece assistência personalizada com base na situação identificada.

Da mesma forma que apresentado anteriormente para o sistema elétrico, as figuras a seguir fornecem exemplos de falhas identificadas no sistema de lubrificação. A Figura 21 apresenta um exemplo de falha quando o conjunto de respostas no programa é: Yes, No, No.

Tabela 6: Tabela verdade para o sistema de lubrificação.

Premissa 1	Premissa 2	Premissa 3	Resultado
yes	yes	yes	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
yes	yes	no	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
yes	no	yes	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
yes	no	no	A possível falha identificada está relacionada ao nível de óleo abaixo do recomendado. Um baixo nível de óleo pode levar à lubrificação insuficiente dos componentes do motor, resultando em desgaste prematuro. Para resolver este problema, sugerimos adicionar óleo ao motor até atingir o nível adequado. Certifique-se de usar o tipo correto de óleo recomendado pelo fabricante.
no	yes	yes	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
no	yes	no	Foi identificado um vazamento de óleo. Isso pode causar uma diminuição constante do nível de óleo no motor, levando a problemas de lubrificação. Realize uma inspeção para identificar a fonte do vazamento e realize o reparo. Verifique novamente o nível de óleo e adicione óleo se necessário.
no	no	yes	O filtro de óleo parece estar obstruído. Isso pode impedir a passagem adequada de óleo pelo sistema de lubrificação, causando falhas na lubrificação. Para solucionar essa situação, substitua o filtro de óleo por um novo. Certifique-se de utilizar o filtro de óleo adequado para o seu caminhão fora de estrada.
no	no	no	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 21 - Exemplo 1 de falha para o sistema de lubrificação.

Você selecionou o Sistema de Lubrificação como o possível sistema com falha.
 Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes perguntas com "yes" ou "no"
 Ao verificar o nível de óleo, você observou que está abaixo do nível recomendado? yes
 Durante a inspeção, você observou algum indício de vazamento de óleo? no
 Ao inspecionar o filtro de óleo, você observou algum sinal de possível obstrução? no

A possível falha identificada está relacionada ao nível de óleo abaixo do recomendado. Um baixo nível de óleo pode levar à lubrificação insuficiente dos componentes do motor, resultando em desgaste prematuro. Para resolver este problema, é fundamental adicionar óleo ao motor até atingir o nível adequado. Certifique-se de usar o tipo correto de óleo recomendado pelo fabricante.

Fonte: Autoria própria, 2023.

As Figuras 22 e 23 apresentam outros dois exemplos de falhas por lubrificação que são identificadas usando-se o sistema desenvolvido. Pode-se notar que o sistema apresenta as respostas obedecendo as regras inseridas.

Figura 22 - Exemplo 2 de falha para o sistema de lubrificação.

Você selecionou o Sistema de Lubrificação como o possível sistema com falha.
 Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes perguntas com "yes" ou "no"
 Ao verificar o nível de óleo, você observou que está abaixo do nível recomendado? no
 Durante a inspeção, você observou algum indício de vazamento de óleo? yes
 Ao inspecionar o filtro de óleo, você observou algum sinal de possível obstrução? no

Foi identificado um vazamento de óleo. Isso pode causar uma diminuição constante do nível de óleo no motor, levando a problemas de lubrificação. A localização do vazamento deve ser identificada e reparada o mais rápido possível. Após o reparo, verifique novamente o nível de óleo e adicione óleo se necessário.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 23 - Exemplo 3 de falha para o sistema de lubrificação.

Você selecionou o Sistema de Lubrificação como o possível sistema com falha.
 Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes perguntas com "yes" ou "no"
 Ao verificar o nível de óleo, você observou que está abaixo do nível recomendado? no
 Durante a inspeção, você observou algum indício de vazamento de óleo? no
 Ao inspecionar o filtro de óleo, você observou algum sinal de possível obstrução? yes

O filtro de óleo parece estar obstruído. Isso pode impedir a passagem adequada de óleo pelo sistema de lubrificação, causando falhas na lubrificação. Para solucionar essa situação, substitua o filtro de óleo por um novo. Certifique-se de utilizar o filtro de óleo adequado para o seu caminhão fora de estrada.

Fonte: Autoria própria, 2023.

5.5.4. Sistema mecânico

Por fim, a tabela verdade associada ao sistema mecânico (Tabela 7) também é composta por um total de 8 regras, resultantes da combinação de três questões, cada uma com duas alternativas possíveis, de modo que apresente 8 cenários possíveis. Cada cenário representa uma condição específica relacionada ao sistema mecânico e aciona uma regra para orientar ou recomendar ações com base nas respostas do usuário. Essa abordagem abrange diversos possíveis cenários no contexto do sistema mecânico e oferece orientações personalizadas de acordo com a situação identificada.

As figuras a seguir ilustram falhas mecânicas em um caminhão fora-de-estrada sendo um exemplo de como o sistema é capaz de identificar problemas com

clareza e sugerir ações. As recomendações são baseadas em práticas de manutenção previamente comprovadas no campo, garantindo soluções eficazes.

A Figura 24 mostra um exemplo de falha possível de ser identificada relacionada à vibração excessiva do equipamento.

Tabela 7 - Tabela verdade para o sistema mecânico.

Premissa 1	Premissa 2	Premissa 3	Resultado
yes	yes	yes	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
yes	yes	no	A vibração excessiva pode ser um sinal de desequilíbrio nas rodas, problemas na suspensão ou desgaste de peças do chassi. É recomendado que você verifique as rodas e a suspensão primeiro. Se o problema persistir, pode ser um problema de desgaste de peças, realize uma inspeção no seu equipamento e faça a substituição das peças desgastadas.
yes	no	yes	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
yes	no	no	A possível falha identificada está relacionada a ruídos anormais no motor. Esses ruídos podem indicar problemas internos no motor, como problemas de válvulas, pistões ou mancais. Recomendamos tirar o veículo de produção para realizar uma rotina de inspeção mais detalhada nos componentes.
no	yes	yes	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
no	yes	no	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento
no	no	yes	A perda significativa de potência pode ser causada por diversos problemas, como falhas no sistema de alimentação de combustível, problemas no sistema de exaustão ou problemas no motor. Recomenda-se verificar o filtro de ar, filtro de combustível e o sistema de escape e em caso de avaria, realizar a substituição dos componentes.
no	no	no	Não foram encontradas falhas na base de conhecimento

Fonte: Autoria própria, 2023

Figura 24 - Exemplo 1 de falha para o sistema mecânico.

Você selecionou o Sistema Mecânico como o possível sistema com falha.
 Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes perguntas com "yes" ou "no"
 Ao ligar o motor, você observou algum ruído anormal? yes
 Durante o funcionamento, você sentiu alguma vibração excessiva no veículo? yes
 Você notou uma perda significativa de potência ao acelerar? no

A possível falha identificada está relacionada a ruídos anormais no motor.
 Esses ruídos podem indicar problemas internos no motor, como problemas de válvulas, pistões ou mancais. É importante realizar uma avaliação mais detalhada do motor por um mecânico qualificado para determinar a causa exata e realizar os reparos necessários.

Deseja fazer uma nova consulta? (yes/no):

Fonte: Autoria própria, 2023.

As Figuras 25 e 26 também mostram exemplos de falhas relacionadas ao sistema mecânico, fornecendo diferentes cenários de problemas que podem ser identificados. Estas imagens são ilustrações adicionais das capacidades do sistema em reconhecer e orientar sobre problemas no componente mecânico do veículo.

Figura 25 - Exemplo 2 de falha para o sistema mecânico.

Você selecionou o Sistema Mecânico como o possível sistema com falha.
Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes perguntas com "yes" ou "no"
Ao ligar o motor, você observou algum ruído anormal? yes
Durante o funcionamento, você sentiu alguma vibração excessiva no veículo? no
Você notou uma perda significativa de potência ao acelerar? no

A possível falha identificada está relacionada a ruídos anormais no motor.
Esses ruídos podem indicar problemas internos no motor, como problemas de válvulas, pistões ou mancais. É importante realizar uma avaliação mais detalhada do motor por um mecânico qualificado para determinar a causa exata e realizar os reparos necessários.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 26 - Exemplo 3 de falha para o sistema mecânico.

Você selecionou o Sistema Mecânico como o possível sistema com falha.
Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes perguntas com "yes" ou "no"
Ao ligar o motor, você observou algum ruído anormal? no
Durante o funcionamento, você sentiu alguma vibração excessiva no veículo? no
Você notou uma perda significativa de potência ao acelerar? yes

A perda significativa de potência pode ser causada por diversos problemas, como falhas no sistema de alimentação de combustível, problemas no sistema de exaustão ou problemas no motor. Recomenda-se verificar o filtro de ar, filtro de combustível e o sistema de escape. Se o problema persistir, é essencial que um mecânico qualificado avalie o motor para identificar a causa raiz.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Quando o programa não associa uma combinação de respostas a uma falha, ele apresenta a mensagem “Não foram encontradas falhas na base de conhecimento.”, conforme mostra a Figura 27. Essa resposta também é apresentada pelo programa para todos os sistemas do caminhão fora-de-estrada que foram abordados neste trabalho, caso não seja encontrada uma combinação de respostas para uma falha.

Figura 27 - Exemplo de resposta quando o sistema não identifica falha.

Você selecionou o Sistema Mecânico como o possível sistema com falha.
Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes perguntas com "yes" ou "no"
Ao ligar o motor, você observou algum ruído anormal? no
Durante o funcionamento, você sentiu alguma vibração excessiva no veículo? no
Você notou uma perda significativa de potência ao acelerar? o
Não foram encontradas falhas mecânicas na base de conhecimento.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Com os dados apresentados anteriormente pode-se notar benefícios do uso do sistema especialista para o diagnóstico de falhas. Esses sistemas contam com conhecimento especializado, enquanto sua eficiência e consistência, aliadas à capacidade de reduzir custos operacionais e fornecer suporte a técnicos humanos, destacam sua utilidade em situações críticas de diagnóstico de falhas, otimizando a manutenção e a operação dos veículos (DE SOUZA et al, 2004). Por outro lado, sistemas de linguagem natural, como o ChatGPT (WANG et al., 2023), podem não oferecer o mesmo nível de conhecimento especializado e eficiência em diagnósticos específicos dessa natureza, apresentando diagnósticos genéricos, além de serem sistemas vulneráveis em relação a privacidade e segurança de dados.

5.6. AVALIAÇÃO

A avaliação da qualidade da base de conhecimento aplicada no sistema é de suma importância para o desenvolvimento. A etapa de avaliação visa avaliar o funcionamento do sistema e as respostas da base de conhecimento.

Esta etapa tem por objetivo avaliar a representação do conhecimento empregado no protótipo desenvolvido. Para isso, foram realizados testes de avaliação do sistema por: (a) um engenheiro de manutenção de uma mineradora, que atua diretamente na manutenção preventiva e corretiva de caminhões fora-deestrada; (b) uma analista de vibrações, com experiência em desenvolvimento de sistema, que atua em uma empresa especialista em soluções tecnológicas para monitoramento de ativos, incluindo ativos de mineração.

Foi elaborado um questionário na plataforma Google Forms, apresentado no Apêndice A, e enviado para os especialistas, para que ambos registrassem suas avaliações. As métricas de avaliação foram definidas baseadas na interpretação dos usuários a respeito das informações incluídas no SE, como a linguagem usada, a

relevância das falhas abordadas, e clareza do diagnóstico apresentado e avaliação geral do sistema.

O questionário inicia com uma breve introdução, expondo o seu objetivo e como o validador deve realizar a etapa. A elaboração ocorreu desse modo para permitir avaliar se o conhecimento inserido no SE apresenta fácil interpretação.

Como a etapa de avaliação foi realizada com um engenheiro de manutenção e um especialista de manutenção por vibração, cada especialista abordou de modo diferente a avaliação do sistema. Enquanto o engenheiro focou mais nas falhas estudadas no protótipo e no modo como o SE consegue detectar as falhas, a especialista de vibração, por possuir experiência em desenvolvimento de sistemas, comentou a respeito da interface e aplicação do sistema para identificar falhas.

Do ponto de vista de avaliação geral do SE, a abordagem distinta de cada área é vista como algo positivo, pois evita lacunas durante o seu desenvolvimento. Quando os validadores são especialistas em áreas específicas do protótipo, surgem desafios na avaliação devido às perspectivas divergentes. Isso pode resultar em conflitos na representação do conhecimento entre os especialistas.

A fase de avaliação do SE, assim como a etapa de verificação, é realizada a cada ciclo de implementação. No entanto, a avaliação no primeiro ciclo foi específica para o modo como as falhas foram inseridas no sistema. Isso se deveu ao fato de que o primeiro ciclo abordou a implementação de falhas no protótipo, o que gerou uma situação em que os especialistas não possuíam experiência prévia para validar tal conhecimento. Além disso, as falhas investigadas não apresentavam uma complexidade substancial em termos de representação do conhecimento.

Em relação à primeira pergunta realizada no formulário **“As perguntas feitas pelo sistema foram de fácil compreensão?”** Ambos os analistas responderam que sim, a especialista em vibração comentou que as perguntas estavam formuladas de maneira clara, facilitando a resposta no ambiente indicado.

A segunda pergunta foi em relação à interface do usuário, apresentada a seguir:

2. Qual a maior dificuldade ao utilizar o sistema?

- () Correlacionar a situação real às perguntas
- () Linguagem utilizada nas perguntas
- () Interface do questionário
- () Executar o serviço de nuvem Colab

() *Comentário*

A especialista de vibração indicou que a maior dificuldade foi em relação à interface do usuário. Embora já tenha experiência na utilização do Colab e achar fácil a execução, sugeriu-se como melhoria do protótipo alterar os campos de respostas de textos para uso de botões. Escrever as respostas por extenso não prejudicou o uso do sistema, mas esse ponto de melhoria agregaria valor ao sistema. Essa sugestão de melhoria foi levada em consideração na interface realizada no software Anaconda, onde, apesar de estar hospedado em um computador local, já apresenta a opção de responder as perguntas assinalando botões.

O engenheiro de manutenção não assinou nenhuma dificuldade no uso do sistema, e vale ressaltar que esse especialista não tinha nenhuma experiência com o uso do Google Colab, sendo um ponto positivo em relação à usabilidade do sistema por usuários com poucas ou nenhuma experiência no ambiente de desenvolvimento usado para o desenvolvimento do protótipo

Em relação à terceira pergunta **“O protótipo possui aplicação em uma rotina de manutenção real?”**, todos os especialistas consideraram possível a aplicação em um sistema de diagnóstico de falhas em caminhões fora de estrada. Entretanto, o engenheiro comentou que o protótipo poderia também ser aplicado na rotina de inspeção dos equipamentos, de maneira particular na inspeção do sistema de lubrificação do equipamento, auxiliando a diagnosticar de maneira mais eficaz problemas de lubrificação, realizando a interpretação de dados de coleta de óleo realizado pela área.

Para a pergunta 4 **“Os diagnósticos realizados pelo sistema são relevantes para a localização da falha?”**, todos os avaliadores indicaram que os diagnósticos apresentados foram relevantes para a localização da falha. O engenheiro de manutenção sugeriu incluir o sistema de lubrificação com diagnósticos para as análises de óleo.

Em relação à pergunta 5 **“Os diagnósticos possuem uma explicação clara sobre a falha?”**, os especialistas indicaram que as explicações apresentadas foram claras o suficiente, fornecendo detalhes relevantes para auxiliar o executor da manutenção a realizar as atividades.

Em relação à pergunta 6 **“Você conhece algum sistema de manutenção de veículos fora de estrada que possui sistema de diagnóstico de falhas semelhante ao apresentado? Caso a resposta seja sim, qual seria?”**, os especialistas indicaram desconhecer algum sistema com proposta parecida ao protótipo proposto, ressaltando a importância do protótipo desenvolvido.

Em relação à pergunta 7 **“Como você define a qualidade do protótipo apresentado quanto às falhas abordadas e diagnóstico delas?”**, o engenheiro de manutenção indicou o sistema como “Muito bom”, acrescentando que o protótipo possui bom potencial para ser aplicado à realidade da manutenção em campo. A especialista de vibração indicou o protótipo como “Excelente”, apontando a sua relevância para o cenário de manutenção.

Como sugestões de melhoria, os especialistas indicaram a inclusão de mais modos de falhas. A analista de vibração sugeriu a aplicação do protótipo para outros veículos do setor de mineração, como escavadeiras e carregadeiras.

6. CONCLUSÃO

O protótipo de SE desenvolvido neste trabalho refere-se à detecção de falhas em caminhões fora-de-estrada. Ao longo deste trabalho, foram detalhados os métodos implementados, abrangendo desde a aquisição do conhecimento até a avaliação do sistema. Foram apresentadas a viabilidade das técnicas de representação de conhecimento e a capacidade de um Sistema Especialista (SE) em lidar com informações complexas sobre o estado interno dos componentes, resultando em diagnósticos precisos e eficientes.

Observou-se ao longo do desenvolvimento do trabalho o benefício da sua aplicação para o profissional responsável pelo diagnóstico de falha, pois a demanda por aprimorar e reduzir o tempo de diagnóstico de falha é uma necessidade atual do setor. Também se notou a relevância da aplicação para o setor de mineração. A dificuldade para encontrar literatura de SE aplicados na mineração mostra que este ainda é um setor pouco explorado para a aplicação de SE, justificando a aplicação do sistema no setor escolhido.

A aquisição do conhecimento foi realizada por meio da coleta de dados em campo, garantindo que as falhas inseridas no sistema correspondessem a exemplos que correspondem a situações reais. A fase de coleta de dados de manutenção foi fundamental para a construção do histórico de falhas, fornecendo uma base importante para a elaboração das regras de diagnósticos. As regras foram estruturadas utilizando lógica proposicional. Essas regras possibilitam que o sistema tome decisões com base nas informações fornecidas pelo usuário. As decisões são expressas em forma de diagnóstico e orientações para correção das falhas e reestabelecimento do sistema. O protótipo foi desenvolvido com uma interface de usuário tanto no ambiente em nuvem quanto em plataforma local, facilitando a interação e obtenção de informações pelo usuário.

A verificação foi realizada por meio de tabelas verdade, garantindo que as regras estivessem funcionando conforme o esperado. Já a avaliação ocorreu mediante a disponibilização do protótipo para especialistas em manutenção. A avaliação dos especialistas forneceu insights relevantes para aprimorar o sistema, incluindo sugestões para melhorias na interface do usuário e na inclusão de mais sistemas e modos de falhas.

Os resultados da avaliação indicaram que o protótipo possui aplicabilidade prática para o responsável pelo diagnóstico em campo, e é considerado relevante para a localização de falhas e redução do tempo de diagnóstico. A qualidade dos diagnósticos e a clareza das explicações foram bem avaliadas pelos especialistas. Embora ambos os avaliadores tenham abordado o sistema a partir de suas perspectivas específicas, isso se mostrou benéfico para identificar possíveis lacunas e melhorias.

Apesar do número de falhas abordadas no protótipo tenha sido considerado baixo, considera-se que o sistema desenvolvido atingiu o objetivo proposto ao diagnosticar falhas.

Assim, o protótipo desenvolvido mostra um passo promissor no desenvolvimento de sistemas especialistas para diagnóstico de falhas de caminhões fora-de-estrada. A integração de métodos de aquisição de conhecimento, representação lógica e interfaces de usuário eficazes contribui para a criação de um sistema para otimizar a manutenção, reduzir custos e aumentar a confiabilidade dos equipamentos. Com base nos resultados e feedback dos especialistas, o protótipo tem potencial para ser expandido e aplicado em ambientes industriais, beneficiando equipes de manutenção.

6.1.1. Recomendações para trabalhos futuros

Uma recomendação para desenvolvimento futuro do protótipo de sistema especialista para diagnóstico de falhas em caminhões fora-de-estrada pode se concentrar na expansão do conjunto de falhas abordadas. A inserção de novos cenários de falha nos sistemas hidráulico, elétrico, lubrificação e mecânico permitiria uma cobertura mais abrangente das possíveis situações de falha. Desta forma, haveria um aumento da abrangência do sistema, fornecendo diagnósticos para um conjunto ainda maior de problemas que possam surgir durante a operação dos veículos.

Além de aprimorar os sistemas existentes, uma direção promissora seria a expansão do escopo do protótipo para incluir outros sistemas dos caminhões fora-de-estrada. Cada sistema possui suas próprias características e padrões de falha, o que enriqueceria a base de conhecimento e tornaria o sistema ainda mais abrangente

Uma interface de usuário mais aprimorada é um aspecto crucial para garantir a usabilidade e a aceitação do sistema especialista. Trabalhos futuros podem desenvolver uma interface mais intuitiva e amigável. A substituição de respostas em formato de texto por botões de escolha, como sugerido pelos especialistas, pode melhorar a experiência do usuário, especialmente para aqueles menos familiarizados com ambientes de programação.

REFERÊNCIAS

- AAMODT, A.; PLAZA, E. Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches. **AI Communications**, 7(1), 39–59, 1994.
- AGRAWAL, A. K.; CHATTOPADHYAYA, S.; ADESH, A. K. Assessment of reliability and maintainability of earth pressure balance tunnel boring machine (EPBTBM) – An approach. **Tunnelling And Underground Space Technology**. India, p. 104337-104347. mar. 2022.
- ALMEIDA, P. S. **Manutenção Mecânica Industrial: conceitos básicos e tecnologia aplicada**. São Paulo: Saraiva, 2014. 255 p.
- ANGELES, E., & KUMRAL, M. Optimal inspection and preventive maintenance scheduling of mining equipment. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 20, p. 1408-1416, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.
- BIGLIARDI, B.; BOTTANI, E.; CASELLA, G. Enabling technologies, application areas and impact of industry 4.0: A bibliographic analysis. *Procedia Manuf.* 2020, 42, 322–326
- BITTENCOURT, G. (2001) *Inteligência artificial: ferramentas e teorias*. Florianópolis: Editora da UFSC.
- BITTENCOURT, G. **Inteligência artificial: ferramentas e teorias**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2001. 362 p.
- BLUM, B. I., WACHTER, R. F. Expert system applications in software engineering. *Telematics and Informatics*, 3(4), p. 237-262, 1986.
- Caminhão de Mineração 789D/Caminhão de Transporte | Cat | Caterpillar. Disponível em: <https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/18107706.html>. Acesso em: 11 ago. 2023
- CASTELANI, M. R. **Sistema especialista para o gerenciamento operacional de redes de distribuição de gás natural**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2003.
- CATERPILLAR. **Equipamentos**. Disponível em: https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment.html. Acesso em: 10 de Maio de 2022.

CAVALIERI, S., GARETTI, M., MACCHI, M., & PINTO, R. A decision-making framework for managing maintenance spare parts. *Production planning & control*, 19(4), 379-396, 2008.

CAWSEY, A. *The essence of artificial intelligence*. Prentice Hall, 1997.

CHENG, C. S.; HUBELE, N. F. Design of a knowledge-based expert system for statistical process control. *Computers & Industrial Engineering*, 22(4), p. 501-517, 1992.

CLIPS: A Tool for Building Expert Systems. Disponível em: <<https://www.clipsrules.net/>>. Acesso em: 10 de agosto de 2023.

CYRINO, L. Manutenção Preditiva, conceito e aplicação. 28 de Fev. de 2015. Disponível em: . Acesso em: 15 de jul. de 2023.

DE SOUZA, I.; SPRITZER, I.; OLIVEIRA, W. P. A importância da inteligência artificial e dos sistemas especialistas. Congresso Brasileiro de ensino de Engenharia. Brasília, 2004.

DHILLON, B. S. *Mining equipment reliability*. Springer London, 2008.

DURKIN, J. Research review: Application of expert systems in the sciences. *Ohio Journal of Science*, 90, p. 171-179, 1990.

DURKIN, J., *Expert Systems: Design and Development*. New Jersey, Editora Prentice Hall, 1994

Dusty P. *Python 3 Object Oriented Programming: Harness the power of Python 3 objects*. Packt Publishing Ltd. Olton, Birmingham. 2010.

EMERSON, R. *Metodologia para implantação da manutenção centrada na confiabilidade: uma abordagem fundamentada em sistemas baseados em conhecimento e lógica Fuzzy*. 2009.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. 1ª ed. Porto Alegre: Elsevier. 2009.

FREITAS, C. A. de; REAL SILVA, A.; SILVA DE AGUIAR, D.; MANOEL DA SILVA, M.; DA SILVA CARDOSO, A.; REIS MARTINS, D. .; SANTOS DE ARRUDA, A. C. A evolução da segurança no trabalho aplicada na manutenção industrial 4.0. *REMIPE - Revista de Micro e Pequenas Empresas e Empreendedorismo da Fatec Osasco*, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 229–251, 2020. DOI: 10.21574/remipe.v6i2.289. Disponível em: <https://remipe.fatecosasco.edu.br/index.php/remipe/article/view/289>. Acesso em: 8 jul. 2023.

GIARRATANO, J., RILEY, G., Expert Systems - Principles and Programming. Boston, Editora USA International Thomson Publishing, 3ª Edição, 1998.

GIARRATANO, J.; RILEY, G. Introduction to expert systems. Expert Systems, 4th edn. Thomson Course Technology, p. 19, 2005.

GONZALEZ, A. J., DANKEL, D. D. The engineering of knowledge-based systems: theory and practice. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.

Google Colab. Disponível em: <<https://colab.google/>>. Acesso em: 10 de agosto de 2023.

GOOGLE. **O que é o Colab.** Disponível em: https://colab.research.google.com/notebooks/welcome.ipynb?hl=pt_BR. Acesso em: 24 de Maio de 2022.

GRIMM, S. Knowledge representation and ontologies. In: Scientific data mining and knowledge discovery: Principles and foundations, p. 111-137. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

GUEYE, I.; KEBE, A.; DIOP, M. Creation of a knowledge management model based on CBR: Application to the maintenance of autonomous solar photovoltaic installations. **2021 IEEE 12th Annual Information Technology, Electronics And Mobile Communication Conference (IEMCON)**. Vancouver, Bc, Canada, p. 1077-1082. dez. 2021.

Gurski, C. A. Curso de formação de operadores de refinaria: noções de confiabilidade e manutenção industrial – Curitiba : **PETROBRAS : UnicenP**, 2002. 24 p.

HART, A.. **Knowledge acquisition for expert systems**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1992. 196 p. ISBN 0070269114.

Hassannayebi, Erfan, *et al.* “Predictive Analytics for Fault Reasoning in Gas Flow Control Facility: A Hybrid Fuzzy Theory and Expert System Approach.” **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, vol. 77, 2022, p. 104796.

HODKIEWICZ, M.; KLÜWER, J. W.; WOODS, C.; SMOKER, T.; LOW, E. An ontology for reasoning over engineering textual data stored in FMEA spreadsheet tables. **Computers In Industry**. Tarbes, p. 103496-103505. out. 2021.

HODKIEWICZ, M.; KLÜWER, J.W.; WOODS, C.; SMOKER, T.; FRENCH, T. Digitalization and reasoning over engineering textual data stored in spreadsheet tables. **IFAC Papers OnLine**, 53 (3), 239–244. 2020.

INÁCIO DA SILVA, C. M., CABRITA, C. M. P., & MATIAS, J. C. O. **Proactive reliability maintenance: a case study concerning maintenance service costs.** *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 14(4), p. 343-355, 2008.

JONGE, B.; A. SCARF, P. A review on maintenance optimization. **European Journal Of Operational Research.** Reino Unido, p. 805-824. set. 2020

KAPPAUN, A. G. P. Estudo da aplicação da confiabilidade para os pneus de frotas de caminhões fora-de-estrada: o caso de uma mineradora. 2023. 71 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - **Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, 2023.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: Função estratégica.** 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2010. 384 p

KARIA, N., ASAARI, M. H. A. H., & SALEH, H. **Exploring maintenance management in service sector: A case study.** In: Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operation Management, Bali, Indonesia (pp. 7-9), 2014.

KHAN, S. U., KHAN, M., e NAUMAN, M. **Semi-automatic knowledge transformation of semantic network ontologies into Frames structures.** In: 2016 6th International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH), p. 712-717, 2016.

KUMAR, R.; RANI, S.; AWADH, M.A. **Exploring the Application Sphere of the Internet of Things in Industry 4.0: A Review, Bibliometric and Content Analysis.** *Sensors* 2022, 22, 4276. <https://doi.org/10.3390/s22114276>

LEAL, V. J.; ANDRADE, P. C. de R. Modelagem dos dados de falha de um caminhão fora-de-estrada. *ForScience: Revista científica do IFMG, Formiga*, v. 6, n. 3, e00500, jul./dez. 2018.

LIANG, M. Case-based reasoning for flight conflicts resolution in en-route short term conflict alert situation. **The Open Automation and Control Systems Journal.** v. 7, n. 1, p. 84-92, 2015.

Liebowitz, J., 1992. "Teaching an applied expert systems course: A content outline". *Journal of Information Systems Education*, Vol. 4, No. 3.

LIOU, Y. I. Knowledge acquisition: Issues, techniques, and methodology. In Proceedings of the 1990 ACM SIGBDP Conference on Trends and Directions in Expert Systems, p. 212-236, 1990.

LIU, R., YANG, B., ZIO, E., & CHEN, X. Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 108, p. 33-47, 2018.

LOPES, Kennedy Reurison. Sistema especialista para ambiente industrial baseado em regras com auto-aprendizagem. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

LOUIT, D. M., & KNIGHTS, P. F. Simulation of initiatives to improve mine maintenance. *Mining Technology*, 110(1), p. 47-58, 2001.

MA, G.; JIANG, L.; XU, G.; ZHENG, J. A Model of Intelligent Fault Diagnosis of Power Equipment Based on CBR. **Mathematical Problems In Engineering**. China, p. 1-9. mar. 2015.

MACKEY, J. Heavy mine haul truck. Surrey: University of Surrey, 2015.

MARQUES, A. C.; BRITO, J. N. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 7, p. 8913–8923, 2019.

MATELLI, J. A.; BAZZO, E. A methodology for thermodynamic simulation of high temperature, internal reforming fuel cell systems. *Journal of Power Sources*. 142(1-2), p. 160-168, 2002.

MIKOS, W. L. **Modelo Baseado Em Agentes Em Apoio À Solução De Problemas De Não-Conformidades Em Ambientes De Manufatura Com Recursos Distribuídos**. 2008. 348 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MITRA, R.; BASAK, J. Methods of case adaptation: A survey. **International Journal of Intelligent Systems**, 20(6), 627–645, 2015.

NARDO, M.; MADONNA, M.; ADDONIZIO, P.; GALLAB, M. A mapping analysis of maintenance in Industry 4.0. **Journal Of Applied Research And Technology**. México, p. 653-675. dez. 2021

NEWELL, A. E SIMON, H. A (1963) GPS, a program that simulates human thought. New York: McGraw-Hill.

NGUYEN, T. A., PERKINS, W. A., LAFFEY, T. J., & PECORA, D. Knowledge base verification. *AI Magazine*, 8(2), p. 69-75, 1987.

O'KEEFE, R. M., O'LEARY, D. E. Expert system verification and validation: a survey and tutorial. *Artificial Intelligence Review*, 7, p. 3-42, 1993.

OSTERBY, T. Kunstig intelligens: metoder og systemer. Norway, 1992. Accessed: May 26, 2022. [Online]. Available: <https://bibliotek.dk/da/work/870970-basis%3A07338228>

ÖZFIRAT, P. M., ÖZFIRAT, M. K., MALLI, T. Selection of coal transportation mode from the open pit mine to the thermic power plant using fuzzy analytic hierarchy process. *Transport*, 33(2), p. 502-509, 2018.

Patton, SB, Novak, T e Sanford, RL. Diagnóstico de falhas elétricas usando sistemas especialistas. Estados Unidos: Np, 1989.

PEREIRA, M. K. Análise comparativa entre caminhões fora de estrada na mineração: através de indicadores de desempenho. 2019. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019.

PIRES, C. A.; OKADA, R. H. Manutenção preditiva. *Revista Interface Tecnológica*, 17(1), p. 635–647, 2020.

PRERAU, D. S. Knowledge acquisition in the development of a large expert system. *AI Magazine*, 8(2), p. 43-43, 1987.

PYTHON, S. F. **Python**. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 24 de maio de 2022.

PYTHON. P.. Disponível em: <<https://www.python.org/>>. Acesso em: 11 de agosto de 2023.

QUARESMA, A. Inteligência artificial fraca e força bruta computacional. *TECHNO REVIEW. International Technology, Science and Society Review*, v. 10, n. 1, p. 67–78, 20 jul. 2021.

RICHTER, M. M.; WEBER, R. O. **Case-Based Reasoning: a textbook**. Springer, 2013. Disponível em: <<https://www.springer.com/br/book/9783642401664#>>. Acesso em: 10 de maio de 2022.

RIGONI, E. **METODOLOGIA PARA IMPLANTAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE: uma abordagem fundamentada em Sistemas Baseados em Conhecimento e Lógica Fuzzy**. UFSC - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Florianópolis, 2009.

RUSSEL, S.; NORVIG, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. EUA: Prentice Hall, 2003.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. Artificial intelligence: a modern approach. 4th. ed. Hoboken, NJ: Pearson Education, 2021. 1167 p. ISBN 978-1-292-40117-1.

RUSSELL, Stuart J., NORVIG, Peter, **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. Editora Prentice Hall, 2ª Edição, 2004.

SAKTHIVEL, T. S.; KALYANARAMAN, V. A KBES for integrated engineering. *Engineering with Computers*, 9(1), p. 1-16, 1993.

SAMIR E. *et al.* Inference engine based on closure and join operators over Truth Table Binary Relations. *Journal of logical and algebraic methods in programming*, v. 83, n. 2, p. 180–193, 1 mar. 2014.

SANTOS, A. L. Uso de rede neural para desenvolvimento de sistema especialista para diagnose de doenças foliares em eucalipto. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, 2019.

SILVA, C. M. R. da. Um sistema especialista baseado em heurística direcionada por características estáticas e dinâmicas para a detecção gradual de phishing direcionados. 2020. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

SILVESTRI, L.; FORCINA, A.; INTRONA, V.; SANTOLAMAZZA, A.; CESAROTTI, V. Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. **Computers In Industry**. , p. 103335-103351. dez. 2020.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**; . São Paulo: Atlas, 2009.

SMITH, S., KANDEL, A., *Verification and Validation of Rule Based Expert Systems*. Editora CRC Press, 1993.

SPANGLER, A. M., RAY, C. D., HAMAKER, K. Knowledge acquisition for expert system development. *Computers and Electronics in Agriculture*, 4(1), p. 23-32, 1989.

StackPath. Disponível em: <<https://blogwlmSCANIA.ITAIPUMG.COM.BR/sistema-de-arrefecimento-do-motor/>>. Acesso em: 14 ago. 2023.

STAIR, R. M. *Princípios de sistemas de informação: uma abordagem gerencial*. São Paulo: LTC, 1998.

STARR, R. R. Contribuições para a detecção de vazamentos em tubulações de gás natural: uma abordagem baseada em conhecimento. 2006. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TRAN, H. M.; SCHÖNWÄLDER, J., DisCaRia—Distributed Case-Based Reasoning System for Fault Management. **IEEE Transactions on Network and Service Management**, 12(4), p. 540-553, 2015.

VAGENAS, N. Prognos: A Prototype Expert System for Fault Diagnosis of the Transmission System of Load-Haul-Dump Vehicles in Kiruna Mine, Lkab, Sweden. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 25, n. 17, p. 173–178, ago. 1992.

VARSHAVSKII, P. R., EREMEEV, A. P. Modeling of case-based reasoning in intelligent decision support systems. **Sci. Tech. Inf. Proc.** 37, 336–345 (2010).

VARSHAVSKII, P.; ALEKHIN, R.; POLYAKOV, S.; BLASHONKOV, T.; MUKHACHEVAL., Development of a Modular Case-Based Reasoning System for Data Analysis. **2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)**, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/REEPE49198.2020.9059242.

VIANA, H. R. G. PCM, Planejamento e Controle da Manutenção. Rio de Janeiro: **Qualitymark Editora**, 2014. 192 p

VICENTE, B.; HERMOSILLA; J.; CORVELLO; F; SILVA; E.; BARBALHO, S. Custos da manutenção: Implementação e gestão da técnica de manutenção preventiva checklist e seus impactos. In: **41º Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Foz do Iguaçu, 2021.

WAGNER, W. P.; OTTO, J; CHUNG, Q. B. Knowledge acquisition for expert systems in accounting and financial problem domains. **Knowledge-Based Systems**, v. 15, n.8, p. 439-447, Nov. 2002.

WALLEY, P. Measures of uncertainty in expert systems. **Artificial Intelligence**, 83(1), p. 1-58, 1996.

WANGENHEIM, C. G. e WANGENHEIM, A. **Raciocínio baseado em casos**. Barueri: Editora Manole. 2003.

WATSON, I. Applyig Knowledge Management: Techniques for building Organizational Memories. San Francisco, CA: **Morgan Kaufmann Publishers Inc.**, 2003. 252 p.

XENOS, H. G. D.. **Gerenciando a manutenção produtiva: ocaminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade**. 2 ed. NovaLima: Falconi, 2014. 405p.

YOUNG, A. et al. Parameterisation of domain knowledge for rapid and iterative prototyping of knowledge-based systems. **Expert Systems with Applications**, v. 208, p. 118169, dez. 2022.

ZINN, J.; VOGEL-HEUSER, B.; OCKER, F. A concept for fault diagnosis combining Case-Based Reasoning with topological system models. **IFAC - Papersonline**. Berlim, p. 8217-8224. 11 jul. 2020.

ZISAD, S. N., CHOWDHURY, E., HOSSAIN, M. S., ISLAM, R. U., & ANDERSSON, K. An integrated deep learning and belief rule-based expert system for visual sentiment analysis under uncertainty. *Algorithms*, 14(7), p. 213, 2021.

ZONTA, T.; COSTA, C. A.; RIGHI, R. R.; LIMA, M. J.; TRINDADE, E. S.; LI, G. P. Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. **Computers & Industrial Engineering**. p. 106889-106906. dez. 2020.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DO PROTÓTIPO

QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO

Este questionário possui como objetivo validar o protótipo de Sistema Baseado Em Conhecimento Na Nuvem Para Diagnóstico De Falhas Em Caminhões Fora-De-Estrada sendo parte da dissertação de mestrado. O objetivo é avaliar o desempenho do sistema em relação as falhas inseridas e os diagnósticos realizados. O sistema deve ser utilizado e respondido individualmente. É muito importante que todas as questões sejam respondidas. Caso tenha alguma dúvida referente ao questionário ou ao Sistema especialista, por favor entre em contato: eng.jullyanefigueiredo@gmail.com

1. As perguntas feitas pelo sistema foram de fácil compreensão?

Sim

Não

Comentário:

2. Qual a maior dificuldade ao utilizar o sistema?

Correlacionar a situação real às perguntas

Linguagem utilizada nas perguntas

Interface do questionário

Executar o serviço em nuvem Google Colaboratory - Colab

Outros [favor especificar abaixo]

3. O protótipo possui aplicação em uma rotina de manutenção real?

Sim

Não

Comentário:

4. Os diagnósticos realizados pelo sistema são relevantes para a localização da falha?

Sim

Não

Comentário:

5. Os diagnósticos possuem uma explicação clara sobre a falha?

Sim

Não

Comentário:

6. Você conhece algum sistema de manutenção de veículos fora de estrada que possui sistema de diagnóstico de falhas?

Sim

Não

Se sim, Qual?

7. Como você define a qualidade do protótipo apresentado quanto às falhas abordadas e diagnóstico delas?

Muito Ruim Ruim Bom Muito Bom Excelente

8. Você é especialista ou tem experiência na área? Se sim, cite o setor e a função que você atua.

Obrigada pela disponibilidade em contribuir com o desenvolvimento do software. Caso haja sugestões ou dúvidas, favor contatar por e-mail

(eng.jullyanefigueiredo@gmail.com). Caso tenha algum comentário referente ao protótipo, fique à vontade para expor:

APÊNDICE B – REGRAS USADAS NA ELABORAÇÃO DO PROGRAMA

```
def run_hidraulico(self):
    print('')
    Você selecionou o Sistema Hidráulico como o possível sistema com falha.
    Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes
    perguntas com "yes" ou "no"'''
    vazamento = input('Ao realizar a inspeção, você observou algum
    indício de vazamento no sistema? ')
    vedacao = input('Durante a inspeção, Você observou algum
    problema na vedação dos filtros? ')
    filtro = input('Ao inspecionar o filtro diesel é possível
    observar algum indício de possível obstrução? ')
    print('')

    if vazamento.lower() in ['yes', 'y'] and vedacao.lower() in
    ['yes', 'y'] and filtro.lower() in ['no', 'n']:
        print('')
        A possível falha identificada é relacionada à tampa do
        filtro, que pode estar danificada.
        Essa situação pode resultar na falha da vedação do sistema
        hidráulico, o que pode afetar o funcionamento adequado do sistema como
        um todo.
        Para resolver esse problema, é recomendado realizar a
        substituição do bocal da tampa do filtro, assegurando uma vedação
        eficaz e prevenindo
        possíveis problemas adicionais.'''
        elif vazamento.lower() in ['no', 'n'] and vedacao.lower() in
        ['no', 'n'] and filtro.lower() in ['yes', 'y']:
            print(''Filtros diesel podem estar obstruídos. Essa
            obstrução pode causar restrição no fluxo de diesel, afetando
            negativamente o desempenho
            do motor. Para resolver essa situação, é necessário
            realizar a substituição completa do kit de filtros diesel, permitindo
            que o fluxo de combustível
            volte a ocorrer de forma adequada e garantindo o
            funcionamento eficiente do veículo.'''
            elif vazamento.lower() in ['yes', 'y'] and vedacao.lower() in
            ['no', 'n'] and filtro.lower() in ['no', 'n']:
                print(''É possível que a abraçadeira dos filtros esteja
                folgada. Essa folga pode resultar em um encaixe inadequado do filtro, o
                que pode comprometer
                a vedação e permitir a entrada de impurezas no sistema.
                Para solucionar essa questão, é importante reposicionar o filtro de
                maneira correta e realizar
                o aperto adequado da abraçadeira, assegurando um ajuste
                firme e evitando que a folga continue a causar problemas. Isso
                garantirá a integridade do sistema
```

```

        e a eficiência na filtragem dos elementos indesejados.'')
    else:
        print('Não foram encontradas falhas na base de
conhecimento')

    def run_eletrico(self):
        print('')
        Você selecionou o Sistema Elétrico como o possível sistema com falha.
        Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes
        perguntas com "yes" ou "no" ''')
        eficiencia = input('Há algum indício de mau funcionamento no
sistema? ')
        compressor = input('O compressor do ar condicionado está
operando conforme o esperado? ')
        limpeza = input('A limpeza do sistema foi realizada
recentemente? ')
        print('')

        if eficiencia.lower() in ['yes', 'y'] and compressor.lower() in
['yes', 'y'] and limpeza.lower() in ['yes', 'y']:
            print('')Identificamos uma falha no conector elétrico
responsável pelo acionamento do compressor, o que pode estar causando
problemas no funcionamento
do compressor. Recomendamos que você corrija a conexão
desse conector elétrico para restaurar o correto acionamento do
compressor e garantir o funcionamento
adequado do sistema. Certifique-se de realizar a correção
de forma adequada para evitar futuras interrupções no
funcionamento.'')
            elif eficiencia.lower() in ['yes', 'y'] and compressor.lower()
in ['no', 'n'] and limpeza.lower() in ['yes', 'y']:
                print('')Detectamos uma falha no compressor do sistema de
ar condicionado. Recomendamos a substituição do compressor para
restaurar a funcionalidade adequada do
sistema de ar condicionado. Além disso, após a
substituição, é importante realizar uma recarga de gás no sistema para
assegurar que ele esteja operando com a quantidade
apropriada de refrigerante, o que contribuirá para o seu
funcionamento eficiente e adequado. Certifique-se de realizar essas
ações com cuidado para evitar futuros problemas
no sistema de ar condicionado.'')
            elif eficiencia.lower() in ['yes', 'y'] and compressor.lower()
in ['yes', 'y'] and limpeza.lower() in ['no', 'n']:
                print('')Identificamos um problema no filtro externo do
sistema, o qual está obstruído devido o acúmulo de poeira. Essa
obstrução está levando a um congelamento na serpentina
do evaporador, afetando negativamente o desempenho do
sistema de refrigeração. Para solucionar essa questão, recomendamos
realizar uma limpeza minuciosa no filtro externo,

```

removendo toda a poeira acumulada. Ao fazer isso, você estará restaurando a capacidade de circulação de ar e evitando o congelamento indesejado na serpentina do evaporador.

Certifique-se de executar essa limpeza com atenção, pois é um passo essencial para manter o sistema de refrigeração funcionando de maneira eficiente e evitar futuras interrupções devido a essa obstrução.'')

```

else:
    print('Não foram encontradas falhas na base de
conhecimento')
def run_lubrificacao(self):
    print('')
    Você selecionou o Sistema de Lubrificação como o possível sistema com
falha.
Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes
perguntas com "yes" ou "no"')
    nivel_oleo = input('Ao verificar o nível de óleo, você observou
que está abaixo do nível recomendado? ')
    vazamento_oleo = input('Durante a inspeção, você observou algum
indício de vazamento de óleo? ')
    filtro_obstruido = input('Ao inspecionar o filtro de óleo, você
observou algum sinal de possível obstrução? ')
    print('')

    if nivel_oleo.lower() in ['yes','y'] and vazamento_oleo.lower()
in ['no','n'] and filtro_obstruido.lower() in ['no', 'n']:
        print('')
        A possível falha identificada está relacionada ao nível de
óleo abaixo do recomendado.
        Um baixo nível de óleo pode levar à lubrificação
insuficiente dos componentes do motor,
        resultando em desgaste prematuro. Para resolver este
problema, sugerimos adicionar óleo
        ao motor até atingir o nível adequado. Certifique-se de
usar o tipo correto de óleo
        recomendado pelo fabricante.'')
    elif nivel_oleo.lower() in ['no','n'] and
vazamento_oleo.lower() in ['yes','y'] and filtro_obstruido.lower() in
['no', 'n']:
        print('')
        Foi identificado um vazamento de óleo. Isso pode causar uma
diminuição constante
        do nível de óleo no motor, levando a problemas de
lubrificação. Realize um inspeção para
        identificar a fonte do vazamento e realize o reparo.
verifique novame
        nte o nível de óleo e adicione óleo se necessário.'')

```

```

        elif nivel_oleo.lower() in ['no', 'n'] and
vazamento_oleo.lower() in ['no', 'n'] and filtro_obstruido.lower() in
['yes', 'y']:
            print('')
            O filtro de óleo parece estar obstruído. Isso pode impedir
a passagem adequada
            de óleo pelo sistema de lubrificação, causando falhas na
lubrificação. Para solucionar
            essa situação, substitua o filtro de óleo por um novo.
Certifique-se de utilizar o filtro
            de óleo adequado para o seu caminhão fora de estrada.'')
        else:
            print('Não foram encontradas falhas de lubrificação na base
de conhecimento.')
def run_mecanico(self):
    print('')
    Você selecionou o Sistema Mecânico como o possível sistema com falha.
Primeiro, realize uma inspeção no equipamento e responda as seguintes
perguntas com "yes" ou "no"')
        ruido_anormal = input('Ao ligar o motor, você observou algum
ruído anormal? ')
        vibracao = input('Durante o funcionamento, você sentiu alguma
vibração excessiva no veículo? ')
        perda_potencia = input('Você notou uma perda significativa de
potência ao acelerar? ')
        print('')

        if ruido_anormal.lower() in ['yes', 'y'] and vibracao.lower()
in ['no', 'n'] and perda_potencia.lower() in ['no', 'n']:
            print('')
            A possível falha identificada está relacionada a ruídos
anormais no motor.
            Esses ruídos podem indicar problemas internos no motor,
como problemas de
            válvulas, pistões ou mancais. Recomendamos tirar o veículo
de produção para
            realizar uma rotina de inspeção mais detalhada nos
componentes.'')
        elif ruido_anormal.lower() in ['yes', 'y'] and vibracao.lower()
in ['yes', 'y'] and perda_potencia.lower() in ['no', 'n']:
            print('')
            A vibração excessiva pode ser um sinal de desequilíbrio nas
rodas,
            problemas na suspensão ou desgaste de peças do chassi. É
recomendado
            que você verifique as rodas e a suspensão primeiro. Se o
problema
            persistir, pode ser um problema de desgaste de peças,
realize uma

```

```
        inspeção no seu equipamento e faça a substituição das peças
desgastadas.'')
    elif ruido_anormal.lower() in ['no', 'n'] and vibracao.lower()
in ['no', 'n'] and perda_potencia.lower() in ['yes', 'y']:
        print('')
        A perda significativa de potência pode ser causada por
diversos problemas,
        como falhas no sistema de alimentação de combustível,
problemas no sistema
        de exaustão ou problemas no motor. Recomenda-se verificar o
filtro de ar,
        filtro de combustível e o sistema de escape e em caso de
avaria, realizar
        a substituição dos componentes.'')
    else:
        print('Não foram encontradas falhas mecânicas na base de
conhecimento.')
```