



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
CECAU - Colegiado do Curso de
Engenharia de Controle e Automação



Jeferson Lucas Pereira

**Aprimorando a Confiabilidade Operacional: Monitoramento de
temperatura do Sistema de Freio de Carregadeiras Caterpillar 994H**

Monografia de Graduação

Ouro Preto, 2024

Jeferson Lucas Pereira

**Aprimorando a Confiabilidade Operacional:
Monitoramento de temperatura do Sistema de Freio de
Carregadeiras Caterpillar 994H**

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro(a) de Controle e Automação.

Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Prof. Dr. Bruno Nazário Coelho

Ouro Preto

2024



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Jeferson Lucas Pereira

Aprimorando a confiabilidade operacional: Monitoramento de temperatura do sistema de freio de carregadeiras Caterpillar 994H

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 22 de fevereiro de 2024

Membros da banca

[Dr.] - Bruno Nazário Coelho - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Eng..] - Rogério Cunha Sampaio - (Sotreq S/A)

[Dr.] - Agnaldo J. R. Reis- (Universidade Federal de Ouro Preto)

Bruno Nazário Coelho, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/02/2024



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Nazário Coelho, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/02/2024, às 10:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0672096** e o código CRC **C3B7F175**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.002051/2024-49

SEI nº 0672096

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

Agradecimentos

A Deus, pela vida e por me proporcionar saúde e sabedoria para realizar esse trabalho. A minha mãe, irmãos e toda minha família, pelo apoio e direcionamento quando precisei, e que diante da minha ausência se mantiveram presentes. Aos professores, pelo compartilhamento de tantas informações e experiências, que foram cruciais para o meu aprendizado e fizeram diferença de como enxergar a vida.

*“O importante é não parar de
questionar; a curiosidade tem
sua própria razão de existir” ..*

— Albert Einstein.

Resumo

Na competição dinâmica entre as empresas de mineração, impulsionada pelo alcance da incessante por produção eficiente e segura, o emprego de tecnologias tornou-se uma necessidade. Essa realidade reflete também na mineração, onde montantes gigantes econômicos prosperam, mas existem diversos desafios para seguir. No centro dessa equação complexa, está a gestão eficaz dos equipamentos fora de estrada, responsáveis pelo primeiro contato do mineral a ser extraído, cujo desempenho é de extrema importância para o sucesso operacional. Dentro desse cenário, a análise de tendências de falhas dos equipamentos emerge como uma ferramenta crucial, permitindo antecipar potenciais problemas e, assim, mitigar riscos operacionais e financeiros. O objetivo do trabalho foi apresentar o desenvolvimento do sistema de monitoramento de temperatura do óleo do arrefecimento do sistema de freio de um equipamento de carregamento dentro de uma empresa de mineração, aonde que devido a falha no sistema de frenagem o equipamento apresentava baixos índices de manutenibilidade, visando o aumento do índice de disponibilidade física do equipamento e segurança durante operação. Os processos foram realizados em etapas, seguindo um estudo e após a implementação de um conjunto de sensores no equipamento acoplados a um Arduino para monitoramento do equipamento. O projeto apresentou um baixo custo relacionado a outros dispositivos no mercado. Os resultados garantiram uma melhor performance operacional do equipamento e receberam aprovação da mineradora para aplicação nas demais.

Palavras-chaves: Equipamentos de mineração, Monitoramento de temperatura, Performance operacional e Mineração.

Abstract

In the dynamic competition among mining companies, driven by the constant pursuit of efficient and safe production, the use of technologies has become a necessity. This reality is also reflected in mining, where enormous economic amounts thrive, but there are various challenges to overcome. At the core of this complex equation is the effective management of off-road equipment, responsible for the initial contact with the mineral to be extracted, whose performance is of utmost importance for operational success. Within this scenario, the analysis of equipment failure trends emerges as a crucial tool, allowing for the anticipation of potential problems and, thus, mitigating operational and financial risks. The objective of the study was to present the development of a hydraulic oil temperature monitoring system for a loading equipment within mining, aiming to increase the physical availability index of the equipment. The processes were carried out in stages, following a study and the implementation of a set of sensors on the equipment. The project presented a low cost compared to other devices in the market. The results ensured better operational performance of the equipment and received approval from the mining company for application in others.

Key-words: Mining equipment, Temperature monitoring, Operational performance, and Mining.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Carregadeira de rodas Caterpillar 994H.Fonte: (CATERPILLAR, 2013)	19
Figura 2 – Comando final Caterpillar 994H.Fonte: (CATERPILLAR, 2013)	20
Figura 3 – Sistema de freio Caterpillar 994H.Fonte: (CATERPILLAR, 2013)	20
Figura 4 – Anel do pistão deformado.Fonte: Autor	21
Figura 5 – Placa Arduino modelo UNO.Fonte: (ARDUINO, 2023)	21
Figura 6 – Modulo de relógio em tempo real.Fonte: (CIRCUITS, 2023)	22
Figura 7 – Conversor termopar.Fonte: (TECHNOLOGIES, 2023)	22
Figura 8 – Construção do termopar.Fonte: (MATTHEW DUFF, 2010)	23
Figura 9 – Termopar tipo K.Fonte: (SAR - SOLUÇÕES DE AUTOMAÇÃO E ROBÓTICA, 2023)	23
Figura 10 – Regulador de tensão LM2576.Fonte: (ELETRÔNICOS, 2023)	24
Figura 11 – Adaptador de Cartão MicroSD.Fonte: (CATALEX, 2023)	24
Figura 12 – Modulo GSM 800l com antena.Fonte: (CATALEX, 2023)	25
Figura 13 – Tela de consulta de relatórios Smartmine. Fonte:	26
Figura 14 – MTTR - Carregadeiras de rodas. Fonte: Autor	26
Figura 15 – MTBF - Carregadeiras de rodas. Fonte: Autor	27
Figura 16 – Gráfico de Pareto da frota de carregadeiras 994H. Fonte: Autor	28
Figura 17 – Estratificação de falhas - Carregadeira 1. Fonte: Autor	29
Figura 18 – Estratificação de falhas - Carregadeira 2. Fonte: Autor	29
Figura 19 – Estratificação de falhas - Carregadeira 3. Fonte: Autor	29
Figura 20 – Esquema de montagem do circuito. Fonte: Autor	32
Figura 21 – Montagem física do circuito. Fonte: Autor	32
Figura 22 – Local de instalação do sensor de medição de temperatura. Fonte: Autor	33
Figura 23 – Sensor de temperatura instalado no tanque de arrefecimento. Fonte: Autor	33
Figura 24 – Instalação do circuito de aquisição de dados na cabine. Fonte: Autor	34
Figura 25 – Imagem termográfica, temperatura da saída do reservatório de óleo de arrefecimento. Fonte: Autor	37
Figura 26 – Imagem termográfica, temperatura do comando final dianteiro direito. Fonte: Autor	37
Figura 27 – Imagem termográfica, temperatura do comando final dianteiro esquerdo. Fonte: Autor	38
Figura 28 – Dados gerados pelos sensores. Fonte: Autor	39
Figura 29 – Gráfico de análise de tendência de temperatura. Fonte: Autor	39
Figura 30 – MTRR - Dezembro 2023. Fonte: Autor	40
Figura 31 – MTBF - Dezembro 2023. Fonte: Autor	40
Figura 32 – Pareto - Dezembro 2023. Fonte: Autor	41

Lista de tabelas

Tabela 1 – Contagem de falhas das carregadeiras de rodas 994H	28
Tabela 2 – Posicionamento dos componentes	33
Tabela 3 – Comparação de Temperaturas	37
Tabela 4 – Comparação de Temperaturas	38
Tabela 5 – Comparação de Temperaturas	38
Tabela 6 – Análise dos ganhos de MTTR	40
Tabela 7 – Análise dos ganhos de MTBF	41
Tabela 8 – Diferença entre disponibilidade física antes e depois do sistema	41

Lista de abreviaturas e siglas

MTTR	Mean Time to Repair (Tempo Médio de Reparo)
MTBF	Mean Time Between Repair (Tempo Entre Falhas)
DD	Dianteiro direito
DE	Dianteiro esquerdo
TD	Traseiro direito
TE	Traseiro esquerdo
GSM	Global System for Mobile Communications
SPI	Serial Peripheral Interface

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativas e Relevância	12
1.2	Objetivos	13
1.3	Organização e estrutura	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
3	DESENVOLVIMENTO	18
3.1	Materiais e Métodos	18
3.2	Montagem do circuito	31
3.3	Programação do sistema	35
3.4	Calibração dos termopares	37
3.5	Geração de dados e análise	39
4	RESULTADOS	40
5	CONCLUSÃO	42
	Referências	44
	APÊNDICE A – CÓDIGO	47

1 Introdução

Na era da mineração moderna, onde a confiabilidade e segurança operacional são imperativos, o monitoramento contínuo de equipamentos desempenha um papel central. A detecção precoce de anomalias não apenas fornece um indicativo vital de falhas iminentes, mas também capacita as empresas a agirem proativamente, intervindo antes que falhas significativas impactem as operações. Esta abordagem eficaz não só resulta na redução de custos associados à manutenção corretiva, mas também contribui para a extensão da vida útil dos equipamentos, otimizando os recursos disponíveis.

A implementação de programas de inspeção e manutenção preventiva, aliada ao sistema de monitoramento constante, assegura que os equipamentos estejam sempre em condições ideais de operação, reduzindo significativamente a probabilidade de falhas inesperadas. Essa abordagem integrada não apenas promove a identificação precoce de desgastes excessivos e potenciais problemas relacionados à temperatura, por exemplo, mas também permite a programação eficiente de intervenções preventivas. Dessa forma, o sistema de monitoramento atua sinergicamente com os programas de manutenção, proporcionando uma gestão holística da integridade do equipamento e otimizando o Tempo Médio de Reparo (MTTR), contribuindo para a melhoria contínua da confiabilidade operacional.

Os notáveis progressos em automação e robótica estão transformando significativamente a condução das operações de mineração, visando não apenas à redução de custos, prevenção de acidentes e aumento da produção, mas também à manutenção da competitividade das empresas no mercado ([DARLING, s.d.](#)). Neste contexto, apresentamos um projeto de automação específico, detalhando a implementação de um sistema de monitoramento de temperatura do óleo de arrefecimento dos freios em uma carregadeira de rodas Caterpillar 994H, operando em uma mineradora de grande porte na região sudeste de Minas Gerais.

O objetivo primordial é otimizar a produtividade, a disponibilidade física e a segurança das operações, reduzir os custos de manutenção e aprimorar os indicadores de desempenho, como o Tempo Entre Falhas (MTBF) e o Tempo Médio de Reparo (MTTR). A análise constante da temperatura não só contribui para a segurança operacional, mas também para a eficiência global do equipamento, permitindo a identificação precoce de desgastes excessivos e problemas relacionados à temperatura, e possibilitando a programação de intervenções preventivas para otimização do MTTR e a melhoria da confiabilidade operacional.

1.1 Justificativas e Relevância

O projeto de automação proposto de monitoramento contínuo da temperatura do óleo de arrefecimento dos freios em uma carregadeira de rodas Caterpillar 994H, destaca-se em meio ao cenário desafiador da mineração moderna. A justificativa para esse monitoramento é reduzir as falhas relacionadas ao sistema de freio do equipamento, aonde que devido a excesso de temperatura do componente, o sistema de freio perde eficiência, necessitando a substituição prematura do componente.

Necessidade na Era da Mineração Moderna:

O contexto atual da mineração exige altos padrões de confiabilidade e segurança operacional. O projeto responde a essa necessidade, reconhecendo o papel central do monitoramento contínuo na mitigação de riscos e na garantia da integridade dos equipamentos. O objetivo é alcançar um alto nível de flexibilidade para atender as exigências dos mercados atuais, que tem expectativas crescentes de produtividade e lucro, tendo como premissa a sustentabilidade, eficiência do uso de recursos naturais, preservação do meio ambiente, e a preservação da saúde e integridade dos colaboradores. (SANTOS, 2018)

Mitigação de Falhas Iminentes:

O foco na detecção precoce de anomalias representa uma estratégia proativa para mitigar falhas iminentes, permitindo intervenções oportunas que evitam impactos significativos nas operações. Isso não apenas assegura a continuidade das atividades, mas também reduz os custos associados à manutenção corretiva.

Extensão da Vida Útil dos Equipamentos:

A implementação de estratégias preventivas, como o monitoramento constante, contribui para a extensão da vida útil dos equipamentos. Ao antecipar desgastes excessivos e problemas relacionados à temperatura, o projeto visa maximizar os investimentos em ativos, otimizando os recursos disponíveis.

Contribuição para os Avanços em Automação e Robótica:

O projeto está alinhado aos notáveis progressos em automação e robótica, transformando a condução das operações de mineração. Ao adotar sistemas avançados de monitoramento, busca-se não apenas reduzir custos e prevenir acidentes, mas também manter a competitividade das empresas em um mercado dinâmico.

Otimização de Indicadores de Desempenho:

A implementação do sistema de monitoramento de temperatura visa otimizar indicadores-chave de desempenho, como o Tempo Entre Falhas (MTBF) e o Tempo Médio de Reparo (MTTR). A análise constante da temperatura contribui não apenas para a segurança operacional, mas também para a eficiência global do equipamento.

Impacto na Produtividade e Segurança Operacional:

Ao focar na otimização da produtividade, disponibilidade física e segurança das operações, o projeto visa criar um ambiente de trabalho mais eficiente e seguro, promovendo benefícios tanto para a empresa quanto para os trabalhadores envolvidos nas operações de mineração. Em suma, o projeto de automação proposto não apenas atende às demandas do setor de mineração moderna, mas também representa uma contribuição significativa para a otimização operacional, redução de custos e manutenção da competitividade das empresas no mercado em que necessitam de constante evolução.

1.2 Objetivos

1. Objetivo principal

Desenvolver um protótipo de um sistema de monitoramento de temperatura para carregadeiras de rodas Caterpillar 994H utilizando uma placa de Arduino, um módulo de tempo real, um módulo GSM para envio de informações, um módulo de cartão de memória para armazenar dados, e três termopares para medição de temperatura em pontos, demonstrando a sua montagem e função de cada componente.

2. Objetivos secundários

- Redução das métricas de MTBF e MTTR
- Avaliar as temperaturas que os comandos dianteiros podem atingir durante a operação.
- Prevenir falhas por aumento de temperatura nos componentes
- Coletar dados de temperatura com data e hora e armazená-los em um data logger.
- Criar alertas para temperaturas acima do limite pré-definido e enviar a uma sala de controle a informação em caso de alertas.
- Avaliar a eficácia do sistema na redução do MTTR e melhoria do MTBF.

1.3 Organização e estrutura

No capítulo são apresentados e discutidos os principais trabalhos no campo de pesquisa de monitoramento e manutenção de ativos.

No Capítulo 1 de introdução, são apresentados os fundamentos e contextos que motivaram a realização deste estudo. A introdução abrange na seção 1.1 as justificativas e relevâncias que fundamentam a escolha do tema, ressaltando a importância da prevenção de falhas em equipamentos por meio da implementação de técnicas preditivas. A utilização de componentes como o Arduino e termopares é destacada como parte integrante dessa estratégia.

Já no subitem 1.3 os objetivos do trabalho apresentam-se os objetivos gerais e específicos que direcionam a pesquisa, delineando as metas a serem alcançadas e a contribuição esperada para a área de monitoramento térmico e manutenção preditiva.

No Capítulo 2 é abordada a Revisão de Literatura, e neste capítulo concentra-se em explorar trabalhos relacionados à pesquisa em questão. Inclui uma contextualização aprofundada do tema, apresentando conceitos e teorias fundamentais. Uma análise crítica de estudos anteriores destaca lacunas no conhecimento existente e evidencia como esta pesquisa contribui para o desenvolvimento do campo.

Adiante, no Capítulo 3: Desenvolvimento. Neste capítulo, mostra a fundamentação de um sistema de monitoramento de temperatura para prevenir falhas no sistema de freio de carregadeiras Caterpillar, utilizando sensores Arduino. No 3.1 são detalhados os materiais e métodos utilizados na pesquisa. Inclui a descrição da montagem do circuito na seção 3.2, a programação do sistema, a geração de dados e a análise subsequente. Cada etapa do processo é apresentada de forma clara, fornecendo uma compreensão abrangente do seguimento do experimento. E no subitem 3.4 Geração de dados e análise aborda a geração de dados e as técnicas utilizadas para a análise posterior.

Já na seção de resultados e conclusão, nos itens 4 e 5 respectivamente, este capítulo apresenta os resultados obtidos, utilizando gráficos, tabelas para demonstrar os ganhos. Em seguida, a discussão dos resultados destaca implicações práticas e teóricas, fornecendo uma análise aprofundada dos dados. A conclusão sintetiza os resultados, reafirma os objetivos alcançados e discute o impacto geral da pesquisa.

2 Revisão de literatura

Na indústria moderna, a qualidade da manutenção influencia diretamente o tempo de atividade operacional e a eficiência do equipamento. Portanto, com base no monitoramento das condições da maquinaria, a manutenção preditiva pode minimizar o tempo de inatividade da máquina e as perdas potenciais ([ONUR SURUCU STEPHEN ANDREW GADSDEN, 2023](#))

O monitoramento de condições é um elemento essencial da filosofia da Manutenção Centrada na Confiabilidade, que é uma das estratégias da manutenção preditiva, que é abordada no trabalho, que aonde através da coleta e análise de dados sobre o estado dos equipamentos, é possível identificar falhas em seus estágios iniciais, antes que causem paradas não planejadas e disruptivas. Isso permite que as equipes de manutenção implementem ações preventivas e corretivas de forma proativa, garantindo a confiabilidade e o bom funcionamento dos sistemas. O monitoramento de condições contribui para a otimização da gestão de ativos, reduzindo custos, aumentando a produtividade e garantindo a segurança da operação ([MOUBRAY, 1997](#))

Em mineração não é diferente, aliado a manutenção, temos um conjunto de estratégias com implementação de programas de inspeção e manutenções preventivas, aonde que em conjunto com o monitoramento constante desempenha um aumento significativo nas manutenções.

Baseado nas definições dos tipos de manutenções pela ([ABNT, 1994](#)), iremos abordar os tipos mais comuns, que se dividem em: Manutenção preventiva, corretiva e preditiva.

Manutenção preventiva: “Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falhas ou a degradação do funcionamento de um item.”

Manutenção corretiva: “Manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.”

Manutenção preditiva: ”Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção e diminuir a manutenção corretiva.”

Apesar de apresentar os 3 tipos básicos de manutenção, conforme o artigo ([VEDAN, 2024](#)) hoje possuímos também a interação entre a implementação da inteligência artificial (IA) na área de manutenção, evidenciando a transformação que essa integração proporciona aos processos industriais. A convergência entre manutenção e IA resulta em abordagens mais

proativas, especialmente na adoção de estratégias de manutenção preditiva. Sensores, como os exemplificados pelos modelos Smart Trac e Energy Trac da TRACTIAN, alimentados por IA, monitoram continuamente variáveis como vibração, temperatura, corrente e potência, permitindo análises em tempo real. A aplicação de algoritmos de IA, conforme destacado no texto, possibilita a identificação antecipada de padrões e tendências, permitindo antecipar falhas antes que elas ocorram sem a necessidade da intervenção humana para estudo de padrões e tendências.

Segundo (CARVALHO et al., 2019) A manutenção preditiva é um conjunto de ferramentas utilizadas para determinar quando uma manutenção específica é necessária. A ferramenta se baseia no monitoramento contínuo da máquina ou processo, e isso permite que a manutenção seja realizada somente quando necessária. Uma função secundária e não menos importante da manutenção preditiva é a possibilidade de detecção precoce de falhas, graças a ferramentas baseadas em dados históricos – aprendizado de máquina – bem como aspectos visuais das falhas – cor e desgaste. Como uma possível parte do conceito da Indústria 4.0.

Este estudo se focaliza na aplicação de técnicas preditivas como uma estratégia de monitoramento para prevenir falhas corretivas em equipamentos. O emprego de componentes como o Arduino e termopares é essencial para implementar essas técnicas. Através do monitoramento contínuo e da análise de dados, torna-se possível identificar e corrigir problemas potenciais antes que evoluam para falhas no equipamento.

O Arduino, uma plataforma de código aberto, utiliza hardware e software intuitivos para transformar entradas, como sensores de luz ou toques em botões, em saídas, como acionar motores ou ligar LEDs. Inicialmente concebido no Ivrea Interaction Design Institute como uma ferramenta de prototipagem rápida, o Arduino evoluiu para atender diversas necessidades, desde placas simples de 8 bits até produtos destinados à Internet das Coisas (IoT), wearables, impressão 3D e ambientes embarcados. Sua popularidade decorre da acessibilidade e flexibilidade, sendo amplamente utilizado em diversas aplicações (ARDUINO, 2018).

Este trabalho baseia-se no desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados térmicos, utilizando a placa Arduino UNO, conforme detalhado por (MELEGARI et al., 2023) em sua pesquisa.

Conforme (GABRIELA F. P. GREGÓRIO, 2018), MTTR representa a média aritmética dos tempos de reparo de um equipamento. Por outro lado, MTBF refere-se à média dos intervalos entre o término de uma falha e o início de outra em equipamentos reparáveis. Essas métricas desempenham um papel fundamental na determinação do índice de manutenibilidade dos equipamentos, fornecendo insights cruciais sobre sua confiabilidade e eficácia.” Abaixo segue a equação de MTTR:

$$MTTR = \frac{\text{Tempo Total de Inatividade}}{\text{Número Total de Falhas}}$$

Enquanto MBTF:

$$MTBF = \frac{\text{Tempo Total de Operação}}{\text{Número Total de Falhas}}$$

A disponibilidade é quando um item está em condições de executar uma certa função em um determinado instante ou durante um intervalo de tempo preestabelecido, ou seja, é a relação entre o tempo produzindo e o tempo programado. A disponibilidade pode ser calculada pela equação:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} * 100$$

A análise das métricas de MTTR, MTBF e disponibilidade fornece uma clara visão e dados valiosos para aprimorar a eficácia operacional. Ao examinar o Tempo Médio para Reparo (MTTR), as equipes de manutenção identificam áreas que demandam atenção, podendo indicar processos ineficientes, falta de peças ou necessidade de treinamento. O Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) oferece perspectivas sobre a frequência das falhas, indicando a robustez do design ou necessidade de melhorias. A equação de disponibilidade proporciona informações sobre a prontidão operacional, sugerindo eficiência na execução de funções e minimização do tempo de inatividade e conseqüentemente o tempo real que o equipamento está para cumprir o papel produtivo dentro de um sistema. Essas percepções orientam decisões imediatas e estratégias de longo prazo para aprimorar a confiabilidade e eficácia dos sistemas, resultando em operações mais eficientes.

3 Desenvolvimento

3.1 Materiais e Métodos

A seção descreve o problema, o equipamento da pesquisa, e os materiais empregados no monitoramento da temperatura do óleo de arrefecimento do sistema de freio em carregadeiras de rodas de grande porte Caterpillar 994H. Utilizando sensores de temperatura com interface Arduino, o método visa compreender as condições operacionais que afetam as vedações do sistema de freio ao longo do tempo. O monitoramento preciso é crucial devido às variações significativas de temperatura que podem danificar as vedações, comprometendo a eficiência e segurança do sistema. A utilização de sensores permite a coleta de dados em tempo real para uma análise detalhada das condições térmicas durante o funcionamento do equipamento. A pesquisa visa otimizar a durabilidade e desempenho das vedações, contribuindo para estratégias de manutenção preventiva e melhorando a confiabilidade operacional dos sistemas de freio. Detalhando procedimentos e instrumentos, a abordagem busca promover a replicabilidade e confiabilidade dos resultados, impulsionando o avanço do conhecimento na área e aprimorando a segurança e eficiência de equipamentos similares.

O sistema de freio da carregadeira de rodas apresenta falhas devido ao derretimento do anel de vedação do pistão (9) quando submetido a altas temperaturas. Essa falha causa a mistura do óleo do sistema de freio com o sistema de arrefecimento, levando à parada corretiva do equipamento.

Embora a máquina conte com um sistema de monitoramento de temperatura no tanque do sistema de arrefecimento, esse sistema apresenta uma limitação de medição até 120 graus Celsius. Diante dessa restrição, o projeto se concentrou na criação de um sistema de monitoramento de temperatura para os comandos finais, dada a necessidade de avaliar as temperaturas que esses comandos podem atingir durante a operação. Assim, desenvolveu-se um sistema de monitoramento destinado a acompanhar as condições operacionais dos equipamentos, prevenindo possíveis falhas decorrentes do aumento de temperatura nos componentes.

1. Carregadeiras de rodas 994H

A Carregadeira de rodas Caterpillar 994H é uma carregadeira de grande porte de superfície projetada para atender às necessidades de perfuração de mineração em grande escala. Ela é usada em mineração a céu aberto e em pedreiras para realizar carregamento de caminhões fora-de-estrada. São projetadas com durabilidade integrada, garantindo o máximo disponibilidade através de múltiplos ciclos de vida. Com desempenho otimizado e simplificado facilidade de manutenção, as máquinas

permitem que você mova mais materiais com eficiência e segurança a um custo menor por tonelada. Introduzido em 1990, o 994 tornou-se a principal escolha dos clientes na sua classe de tamanho. Focados em ajudar nossos clientes a ter sucesso, continuamos a desenvolver cada novo legado de confiabilidade, segurança, conforto do operador, facilidade de manutenção e sustentabilidade da série. (CATERPILLAR, 2013)



Figura 1 – Carregadeira de rodas Caterpillar 994H. Fonte: (CATERPILLAR, 2013)

- Capacidade de carga nominal: 38 toneladas
- Motor: Motor diesel Cat 3516B HD Engine de 1577 HP
- Peso operacional: 195.434 kg
- Altura de descarga: 10933mm
- Tempo de ciclo: 11,5 segundos

- Sistema de freio

O sistema de freio do equipamento é localizado dentro do comando final do equipamento, o comando final atua nas extremidades dos eixos transferindo a força para as rodas ou enquanto proporciona redução de velocidade de rotação e aumento de torque.

Os freios de serviço são essenciais para os quatro conjuntos do comando final, sendo acionados por óleo sob pressão. Um circuito de arrefecimento do óleo separado remove o calor gerado pelo atrito dos freios. O anel (4) dos freios, fixado no fuso (7), permanece estático enquanto a máquina está se locomovendo. As placas (5) conectadas ao ponto de ancoragem possuem estrias que se encaixam nas estrias do disco (6), permitindo que a roda (8) e os discos (6) girem juntos. Canaletas nos discos possibilitam o fluxo constante de óleo de resfriamento da câmara (3) entre as placas e discos, mesmo durante a aplicação dos freios. Quanto o operador aciona o



Figura 2 – Comando final Caterpillar 994H. Fonte: (CATERPILLAR, 2013)

sistema de freio, o óleo pressurizado flui para a câmara (10), forçando o pistão (9) contra as placas (5) e discos (6), resultando em fricção. A liberação do pedal permite que o óleo retorne ao reservatório, movendo o pistão (9) para a posição de repouso, permitindo a rotação das rodas.

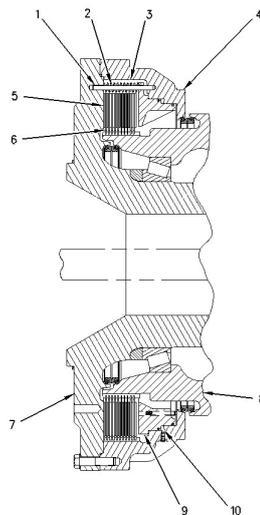


Figura 3 – Sistema de freio Caterpillar 994H. Fonte: (CATERPILLAR, 2013)

Com o aumento da temperatura de forma não controlada, temos a deformação plástica do anel de vedação, causando a falha no sistema, transferindo o óleo de aplicação do freio para o óleo responsável pela retirada de temperatura do óleo gerada pela ação de fricção em discos e molas durante aplicação do freio, tal item inutiliza o componente, sendo necessário sua substituição para futuro reparo.



Figura 4 – Anel do pistão deformado. Fonte: Autor

2. Materiais

- Arduino Uno

O Arduino foi escolhido devido a seu custo reduzido e fácil adaptação ao sistema. As placas Arduino são compostas por microcontroladores ATmega328P, que são microprocessadores de 8 bits com 32kB de memória flash (ARDUINO, 2023). O Arduino oferece uma plataforma acessível e de fácil programação, na qual pode-se obter inúmeros sensores e componentes de fácil acoplamento (ARDUINO, 2023), como observado na Figura 1.



Figura 5 – Placa Arduino modelo UNO. Fonte: (ARDUINO, 2023)

- Módulo RTC DS3231

O Módulo de relógio em tempo real I2C DS3231 de alta precisão com EEPROM de 32 Kbit e sensor de temperatura de 10 bits integrado com resolução de 0,25C. O DS3231 é um relógio em tempo real (RTC) I²C extremamente preciso e de baixo custo com um oscilador de cristal compensado por temperatura (TCXO) e cristal integrados. O dispositivo incorpora uma entrada de bateria e mantém uma cronometragem precisa quando a alimentação principal do dispositivo é interrompida. A integração do ressonador de cristal aumenta a precisão a longo prazo do dispositivo, bem como reduz a contagem de peças em uma linha de fabricação. O DS3231 está disponível

em faixas de temperatura comercial e industrial e é oferecido em um pacote SO de 16 pinos. ([DATASHEET, 2023](#))



Figura 6 – Modulo de relógio em tempo real.Fonte: ([CIRCUITS, 2023](#))

- Conversor termopar MAX6675

O MAX6675 é um conversor termopar digital sofisticado com um conversor analógico para digital (ADC) de 12 bits integrado. O MAX6675 também contém junta fria detecção e correção de compensação, um controlador digital, uma interface compatível com SPI e lógica de controle. O MAX6675 foi projetado para funcionar em conjunto com um microcontrolador externo (μC) ou outra inteligência em aplicações termostáticas, de controle de processo ou de monitoramento. ([MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, 2021](#))



Figura 7 – Conversor termopar.Fonte: ([TECHNOLOGIES, 2023](#))

- Termopar tipo K

O termopar é um componente simples e amplamente utilizado para medição. O princípio de funcionamento do termopar é regido pelo efeito seebeck. O efeito de seebeck consiste em dois materiais dissimilares ligados em uma extremidade, conhecida como junta quente, e esta mesma extremidade submetida a uma diferença de temperatura. A outra extremidade não unida liga-se a um condicionador de sinal a partir de fios de sinal. Logo, será gerada uma diferença de potencial dependente da temperatura na junta quente e na junta de referência (MATTHEW DUFF, 2010)

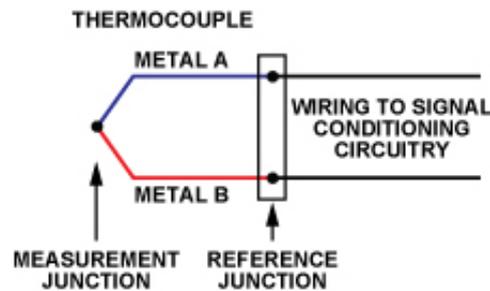


Figura 8 – Construção do termopar. Fonte: (MATTHEW DUFF, 2010)

No trabalho utilizaremos o termopar tipo K e sua composição que consiste em ligas de níquel contendo cromo e alumínio, manganês e silício, respectivamente. Conectado fisicamente ao termopar, iremos utilizar o MAX6675 aonde é convertido o sinal analógico gerado pelo termopar em uma leitura digital de temperatura. A interface de comunicação comum é a SPI, permitindo a conexão com microcontroladores. A leitura resultante é expressa em graus Celsius, simplificando a integração e leitura de temperaturas de diferentes pontos no equipamento.



Figura 9 – Termopar tipo K. Fonte: (SAR - SOLUÇÕES DE AUTOMAÇÃO E ROBÓTICA, 2023)

- Regulador de tensão LM2596

A série de reguladores LM2596 /LM2596HV são circuitos integrados que fornecem todas as funções ativas para um regulador de comutação abaixador de tensão, capaz de acionar um 3A de carga com excelente regulagem de linha e carga. Esses dispositivos estão disponíveis em tensões de saída fixas de 3,3 V, 5 V, 12 V e um versão de saída ajustável.([DATASHEET, 2023](#))



Figura 10 – Regulador de tensão LM2576.Fonte: ([ELETRÔNICOS, 2023](#))

- Adaptador de Cartão MicroSD

O módulo (Adaptador de Cartão MicroSD) é um módulo leitor de cartão MicroSD para leitura e gravação através do sistema de arquivos e do driver de interface SPI. O sistema SCM pode ser concluído dentro de um arquivo no cartão MicroSD. Suporta Cartão MicroSD, Cartão MicroSDHC (cartão de alta velocidade).

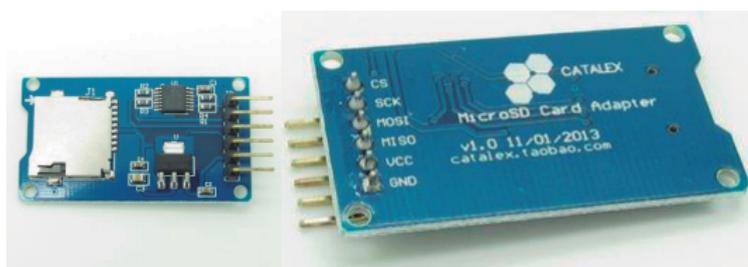


Figura 11 – Adaptador de Cartão MicroSD.Fonte: ([CATALEX, 2023](#))

- Módulo GSM GPRS SIM800L com Antena

O módulo SIM800L é um módulo GSM/GPRS quad-band que opera nas frequências GSM850MHz, EGSM900MHz, DCS1800MHz e PCS1900MHz, atendendo a todos os requisitos de espaço em aplicações de usuário, como smartphones, PDAs e outros dispositivos móveis. Possui um encaixe para microSIM, antena para o sinal de rede, saídas para microfone, alto-falante e campainha. Os requisitos de alimentação para

este módulo são estritamente de 3,4 a 4,4V DC, com uma corrente mínima de 2A. (MECHATRONIX CENTRAL, 2017).

O padrão utilizado com a interface UART para a comunicação entre o módulo e o microcontrolador foi o RS-232, cujo funcionamento necessita de três conectores, sendo eles: o pino de transmissão de dados (TX), de recepção de dados (RX) e, por fim, o fio referente ao terra (GND). É importante ressaltar que o RS-232 trabalha usualmente com nível de tensão Transistor to Transistor Logic (TTL), ou seja, 5V, e pode chegar a velocidades de transmissão de até 20 Kbps (AXELSON, 2007)



Figura 12 – Modulo GSM 8001 com antena.Fonte: (CATALEX, 2023)

- Visual Studio 2023

Visual Studio Code é um editor de código-fonte leve, mas poderoso, que é executado na área de trabalho e está disponível para Windows, macOS e Linux. Ele vem com suporte integrado para JavaScript, TypeScript e Node.js e possui um rico ecossistema de extensões para outras linguagens e tempos de execução (como C++, C, Java, Python, PHP, Go e .NET). (MICROSOFT, 2023)

3. Metodologia

Para realizar a análise de falhas das carregadeiras foi realizado a aquisição dos dados de MTTR e MTBF gerados pelo software de gerenciamento de mina *SmartMine* ®. O *SmartMine* ® O SmartMine é uma solução completa para a operação e otimização de minas subterrâneas e a céu aberto. Um conjunto de ferramentas criado para maximizar a produção, a qualidade e a utilização de todos os ativos das minas, visando reduzir os custos de operação e manutenção. Sua tecnologia já foi testada e aprovada em diferentes tipos de minas, incluindo operações com uma necessidade significativa de controle da qualidade do minério na planta (DEVEX, 2020). Para geração de gráficos e tabelas foi utilizado o software *Microsoft Excel* ®. Os dados adquiridos para execução do trabalho foram adquiridos no período de junho de 2023 a dezembro de 2023.

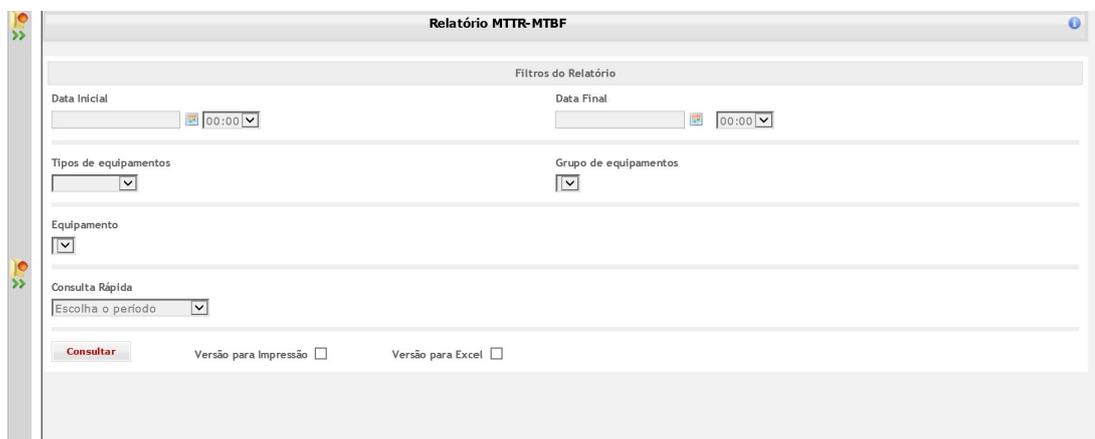


Figura 13 – Tela de consulta de relatórios Smartmine. Fonte:

Após aquisição dos dados foram gerados os seguintes gráficos de MTTR e MTBF:

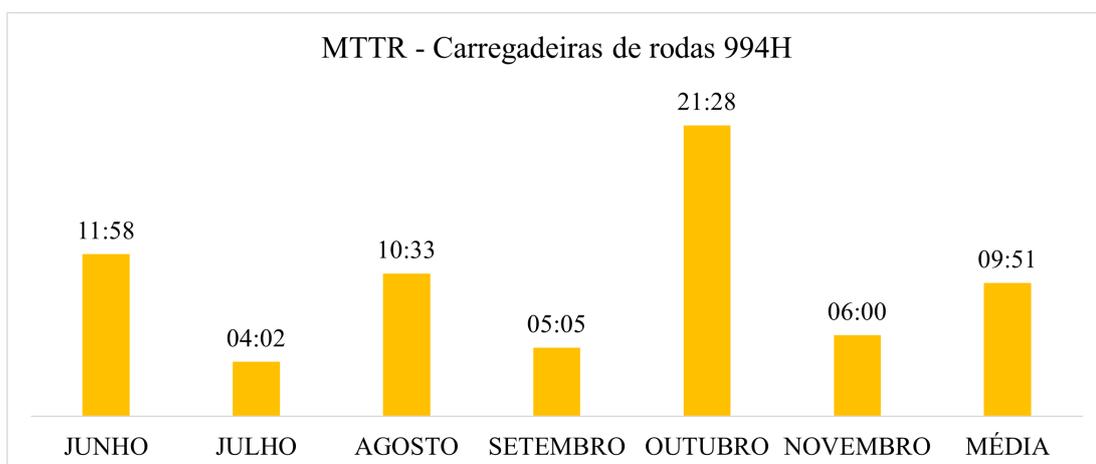


Figura 14 – MTTR - Carregadeiras de rodas. Fonte: Autor

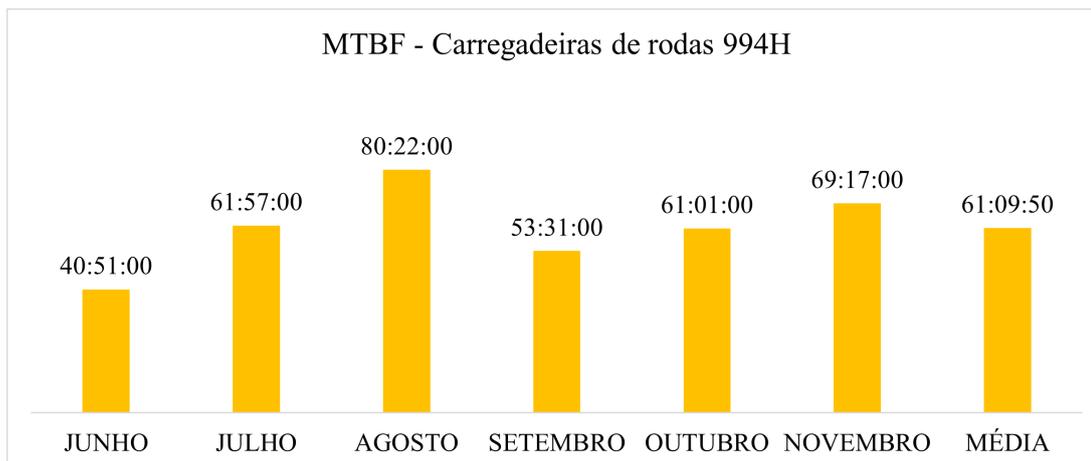


Figura 15 – MTBF - Carregadeiras de rodas. Fonte: Autor

A metodologia aplicada no trabalho foi baseado nas principais falhas causadoras de redução da confiabilidade dos equipamentos. Foi utilizado a metodologia do Diagrama de Pareto para tratativa das falhas com maior impacto na frota.

Segundo (MACHADO, 2012) Diagrama de Pareto tem como finalidade mostrar a importância de todas as condições, a fim de, escolher o ponto de partida para solução do problema, identificar a causa básica do problema e monitorar o sucesso.

O Diagrama de Pareto tem como princípio que 80% das consequências vem de 20% das causas. Segundo (KOCH, 2015), O Princípio 80/20 afirma que ocorre um desequilíbrio entre as causas e os resultados, aonde a maioria tem baixo impacto e a pequena maioria tem alto impacto. Ou seja, os resultados são a derivação de uma pequena proporção das causas e esforços necessários para gerar esses resultados.

Após levantamento dos dados de paradas do equipamentos, aonde que foi gerado um gráfico de Pareto das principais falhas. Logo, podemos observar que, de acordo com o gráfico de Pareto e na tabela 1 o maior número de ocorrências foi decorrente do sistema de freio.

Tabela 1 – Contagem de falhas das carregadeiras de rodas 994H

Sistema de falha	Quantidade de paradas	(% Acumulada)
Sistema de Freio	22	18,80%
Lubrificação	21	36,75%
Implementos	14	48,72%
Combustível	8	55,56%
Sistema Elétrico	6	60,68%
Ferramenta Penetração Solo	5	64,96%
Chassi	5	69,23%
Sistema Trem de Força	4	72,65%
Sistema ar condicionado	4	76,07%
SmartMine	4	79,49%
Motor	4	82,91%
Sistema de arrefecimento	3	85,47%
Cabine	3	88,03%
Sistema de Direção	3	90,60%
Sistema de admissão de AR	2	92,31%
Sistema Afex	2	94,02%
Safemine	2	95,73%
Aguardando Manutenção	1	96,58%
Borracharia	1	97,44%
Acidente	1	98,29%
Sistema Payload	1	99,15%
Inspeção	1	100,00%
Total Geral	117	

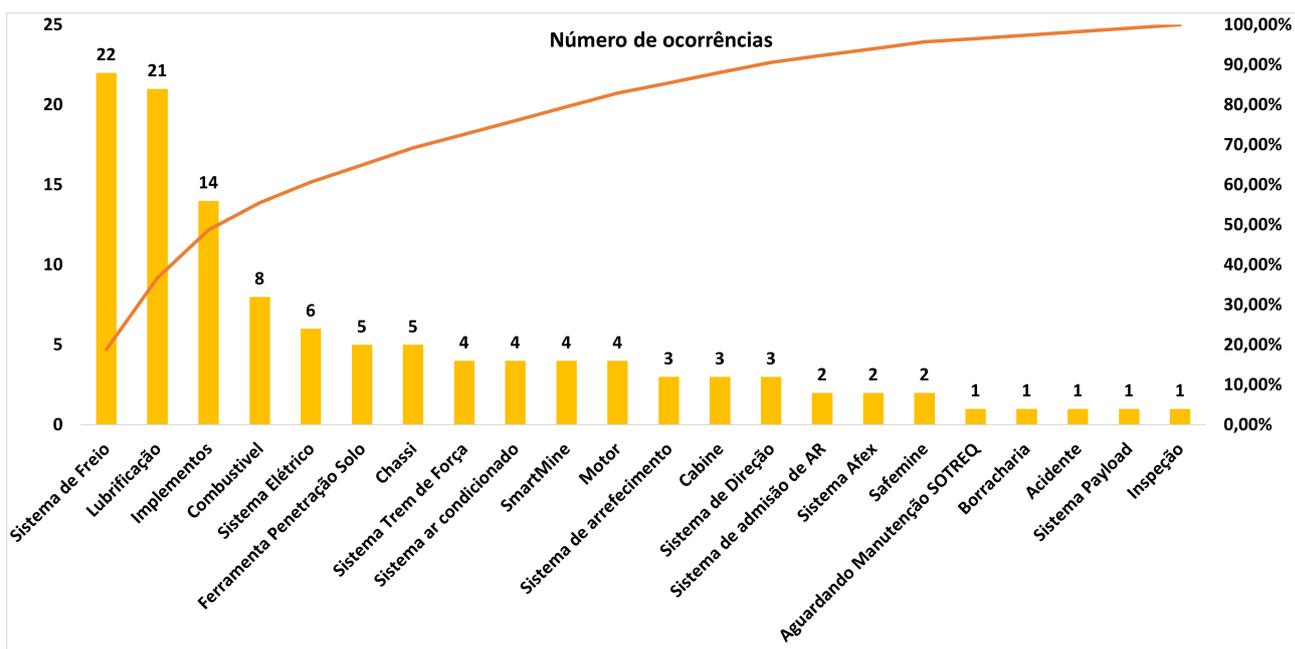


Figura 16 – Gráfico de Pareto da frota de carregadeiras 994H. Fonte: Autor

Realizando uma análise aprofundada dos dados, foi iniciado uma pesquisa para determinar qual a falha principal do sistema de freio da frota, com isso foram gerados os seguintes gráficos a seguir, nos gráficos são apresentados uma estratificação as principais falhas do sistema de freio:

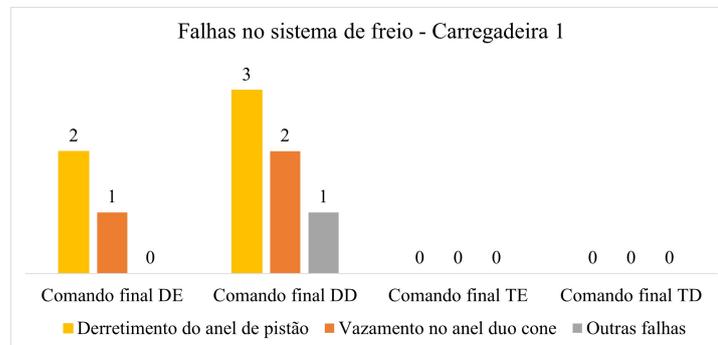


Figura 17 – Estratificação de falhas - Carregadeira 1. Fonte: Autor

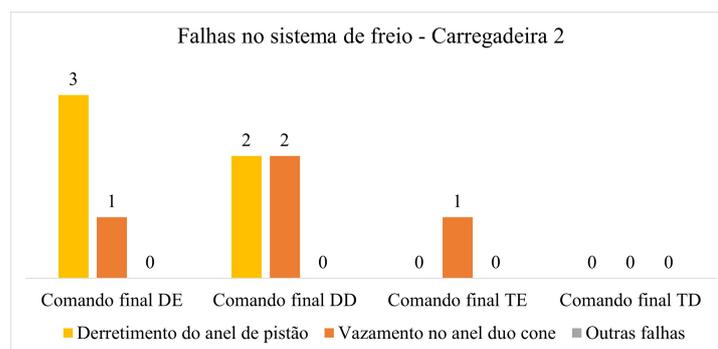


Figura 18 – Estratificação de falhas - Carregadeira 2. Fonte: Autor

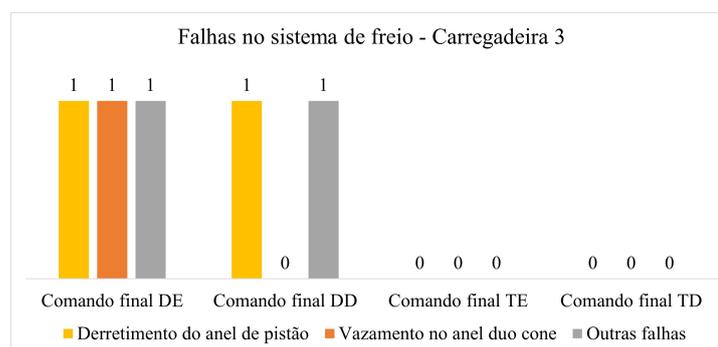


Figura 19 – Estratificação de falhas - Carregadeira 3. Fonte: Autor

De acordo com os dados analisados, cerca de 54% das falhas dos comandos finais estão relacionadas ao derretimento do anel de pistão, e 83% das falhas estão relacionadas aos comandos finais dianteiros.

Esses dados foram fundamentais para criação do sistema de monitoramento centralizado, pois contribuiu para a criação de um sistema focado exatamente nas falhas.

Para verificar a disponibilidade dos equipamentos foi realizado o calculo de Disponibilidade física,a aonde que apresentou os seguintes resultados:

MTBR Médio	MTTR Médio	Disponibilidade física
61:09:00	09:51	86,126%

3.2 Montagem do circuito

O sistema foi implementado no final do mês de Novembro de 2023 e foi aplicado nas três máquinas da mineração.

Devido a condição física da mina e a indisponibilidade de sinal de telefone, o método para aquisição de dados escolhido foi o cartão micro SD, aonde que diariamente um inspetor realiza a aquisição dos dados e envia para análise do analista de frota. Esse é responsável por analisar os padrões de temperatura e criar medidas de controle para prevenir futuras falhas no equipamento.

Devido a análise do perfil de falha do equipamento, a montagem do circuito para o sistema de monitoramento de temperatura no trabalho foi desenvolvido para medir os seguintes pontos:

- Reservatório de óleo de arrefecimento do freio
- Comando final dianteiro direito
- Comando final dianteiro esquerdo

O circuito de montagem simples, os termopares tipo K são fisicamente conectados aos MAX6675, equipamento responsável por converter os sinais analógicos do termopar em leituras digitais de temperatura. Ambos são integrados à placa Arduino, que recebe alimentação de 5V dos reguladores LM2596. O módulo de relógio DS3231 é conectado à placa Arduino por meio da comunicação I2C, assegurando uma marcação precisa do tempo. Adicionalmente, o adaptador de cartão MicroSD é vinculado à placa Arduino para armazenamento de dados. O módulo GSM/GPRS SIM800L, possibilitando comunicação remota, é integrado ao sistema. Ao montar o circuito, foi utilizado de cabos com pinos aonde que se ligam os componentes, priorizando uma estrutura lógica. A alimentação do circuito é proveniente de uma alimentação de 12V gerada por um conversor acoplado ao equipamento. Segue abaixo esquemático da montagem do circuito:

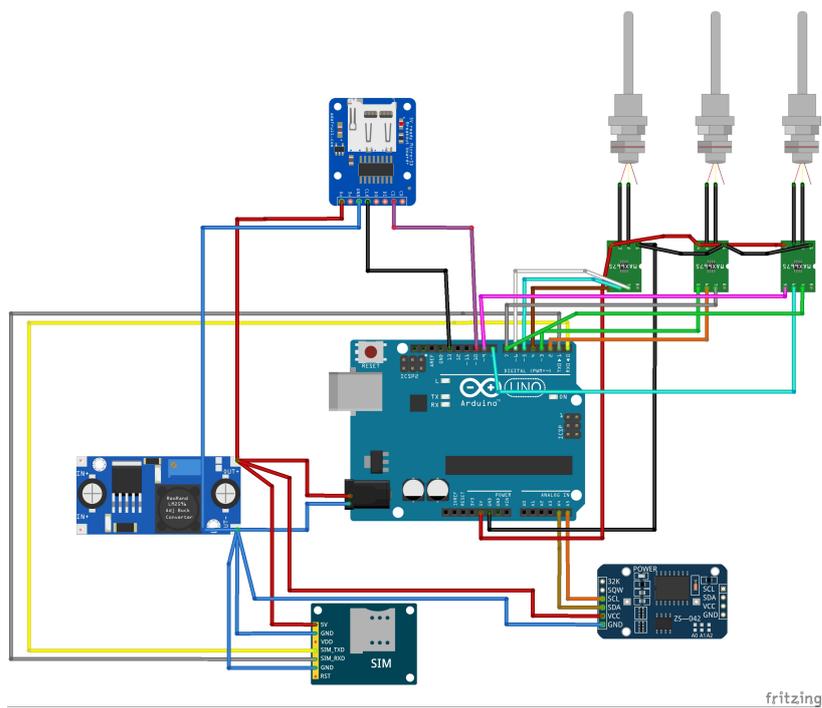


Figura 20 – Esquema de montagem do circuito. Fonte: Autor

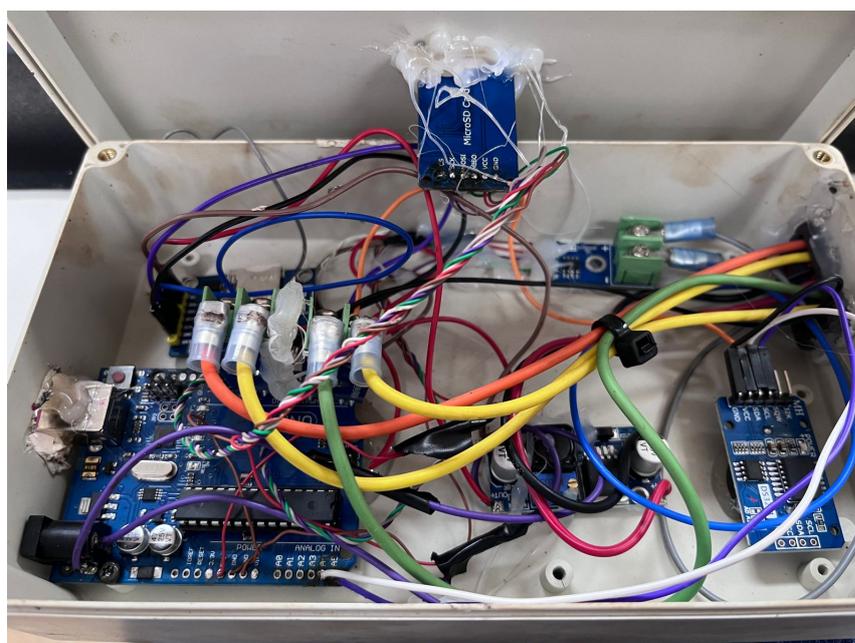


Figura 21 – Montagem física do circuito. Fonte: Autor

Tabela 2 – Posicionamento dos componentes

Disposição dos componentes no equipamento		
Tipo	Posição	Localização
Sensor de temperatura	Tanque de arrefecimento	1
Sensor de temperatura	Comando final dianteiro direito	3
Sensor de temperatura	Comando final dianteiro esquerdo	4
Circuito de aquisição de dados	Cabine	2



Figura 22 – Local de instalação do sensor de medição de temperatura. Fonte: Autor



Figura 23 – Sensor de temperatura instalado no tanque de arrefecimento. Fonte: Autor

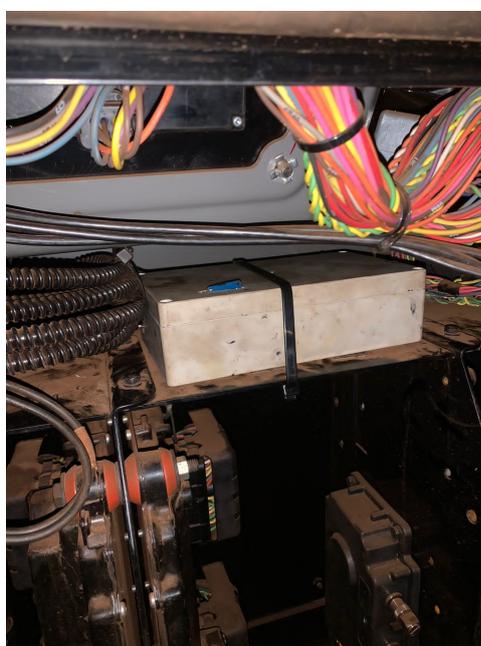


Figura 24 – Instalação do circuito de aquisição de dados na cabine. Fonte: Autor

3.3 Programação do sistema

O código gerado foi desenvolvido na linguagem de programação C++, que é a linguagem principal utilizada no ambiente de desenvolvimento Arduino. O código basicamente monitora três sensores de temperatura usando termopares MAX6675, registrando os dados em um cartão SD. Se a temperatura de qualquer sensor ultrapassar 90 graus Celsius, o sistema envia alertas por SMS através de um módulo GSM/GPRS (SIM800L) para números de telefone específicos. O arquivo "PTData.csv" no cartão SD é atualizado com as leituras dos sensores, proporcionando um monitoramento contínuo das condições de temperatura.

Segue abaixo as principais funcionalidades do código:

- Sensores de Temperatura:

Três termopares MAX6675 monitoram as temperaturas dos sensores T, CFDD e CFDE. Os dados de temperatura são lidos em graus Celsius.

- Armazenamento de Dados:

Um arquivo chamado "PTData.csv" é criado e atualizado em um cartão SD. O arquivo contém leituras dos sensores T, CFDD e CFDE em formato CSV.

- Comunicação GSM/GPRS:

Um módulo GSM/GPRS SIM800L é utilizado para enviar alertas por SMS. Se a temperatura de qualquer sensor ultrapassar 120 graus Celsius, o sistema envia mensagens de texto para os números de telefone especificados no código.

- Configuração Inicial:

Inicialização das bibliotecas necessárias (SD, SPI, Wire, max6675, SoftwareSerial, RTCLib). Configuração dos pinos para os termopares, módulo GSM/GPRS e leitor de cartão SD. Inicialização das comunicações serial com o SIM800L e o monitor serial.

- Loop Principal:

Leitura das temperaturas dos sensores. Atualização do arquivo no cartão SD com as leituras mais recentes. Verificação se alguma temperatura ultrapassou o limite predefinido. Envio de alertas por SMS, se necessário. Aguarda 20 segundos antes de repetir o processo.

- Função de Envio de Alerta por SMS:

Configuração do modo de mensagem para texto e envio de mensagens para os números de telefone especificados

O código é demonstrado no Apêndice A.

3.4 Calibração dos termopares

Segundo (MANSO, 2013) A calibração de sensores de temperatura por comparação pode ser aplicada em termopares, termômetros de resistência e termômetros de bulbo. Trata-se de um procedimento mais simplificado quando comparado com um processo de calibração dinâmica. O termômetro de contato a ser calibrado deve ser colocado em um meio que esteja a uma temperatura uniforme juntamente com um termômetro padrão para que se possam comparar os instrumentos.

Baseado nessa premissa, foi realizado a aquisição de dados utilizando uma câmera termográfica modelo: FLIR 165. As imagens foram cruciais para determinar a diferença de temperatura medida pelos termopares e o componente real.

Abaixo segue imagens dos componentes, com descrição da temperatura medida vs a temperatura indicada pelo sistema.

Os dados comparativos foram baseados na data e hora gerados pela imagem:

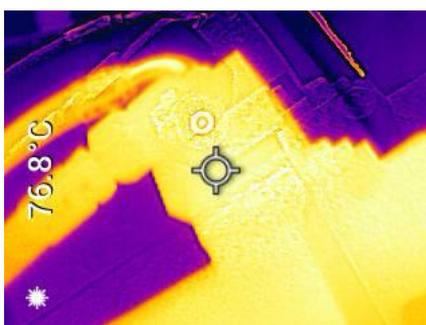


Figura 25 – Imagem termográfica, temperatura da saída do reservatório de óleo de arrefecimento. Fonte: Autor

Tabela 3 – Comparação de Temperaturas

Temperatura Imagem	Temperatura Medida	Diferença
76,8	76,7	0,1%



Figura 26 – Imagem termográfica, temperatura do comando final dianteiro direito. Fonte: Autor

Tabela 4 – Comparação de Temperaturas

Temperatura Imagem	Temperatura Medida	Diferença
50,9	49,7	2,4%



Figura 27 – Imagem termográfica, temperatura do comando final dianteiro esquerdo. Fonte: Autor

Tabela 5 – Comparação de Temperaturas

Temperatura Imagem	Temperatura Medida	Diferença
55,3	54,1	2%

A diferença de temperatura, inicialmente, é atribuída ao fato de os sensores estarem responsáveis por medir a temperatura do óleo, enquanto conduzimos amostragem térmica dos componentes específicos. Embora seja esperado que as leituras desses dois métodos estejam próximas, é natural observar discrepâncias devido às variações normais no ambiente de operação e nas características intrínsecas dos sensores.

No entanto, os resultados obtidos foram satisfatórios, o que permite dar continuidade ao projeto com confiança. A concordância entre as medições de temperatura do óleo e dos componentes, mesmo com pequenas diferenças iniciais, valida a eficácia dos sensores e do sistema de monitoramento implementado. Essa consistência nos resultados reforça a robustez do projeto e indica que os sensores estão desempenhando adequadamente sua função de medição térmica, oferecendo uma base sólida para avançar nas etapas subsequentes do projeto.

3.5 Geração de dados e análise

O sistema gera um arquivo chamado "PTData.csv" no seguinte formato:

Data e Hora	Sensor T (C)	Sensor CFDD (C)	Sensor CFDE (C)
15/12/2023 15:30	47,25	45	44,75
15/12/2023 15:50	59	48,75	51
15/12/2023 16:10	58,5	49,75	50,75
15/12/2023 16:30	58,75	49,25	50,5
15/12/2023 16:50	59	49	50,5
15/12/2023 17:10	59	49,5	50,75
15/12/2023 17:30	59	49,75	50,5
15/12/2023 17:50	58,75	49,75	50,75
15/12/2023 18:10	59	49,75	51,25
15/12/2023 18:30	58,75	49,75	50,75
15/12/2023 18:50	58,75	49	51,25
15/12/2023 19:10	58,75	49,25	50,75
15/12/2023 19:30	59	49,5	50,75
15/12/2023 19:50	58,75	49,75	50,75
15/12/2023 20:10	59	49,5	50,75
15/12/2023 20:30	58,75	49,5	50,75
15/12/2023 20:50	58,75	49,75	51
15/12/2023 21:10	58	49,75	50,75
15/12/2023 21:30	58,75	49,75	50,75
15/12/2023 21:50	58,25	49,75	51

Figura 28 – Dados gerados pelos sensores. Fonte: Autor

Devido a quantidade de dados gerados, com a utilização do software *Microsoft Excel* [®] são gerados gráficos para observar tendências da temperatura no equipamento.

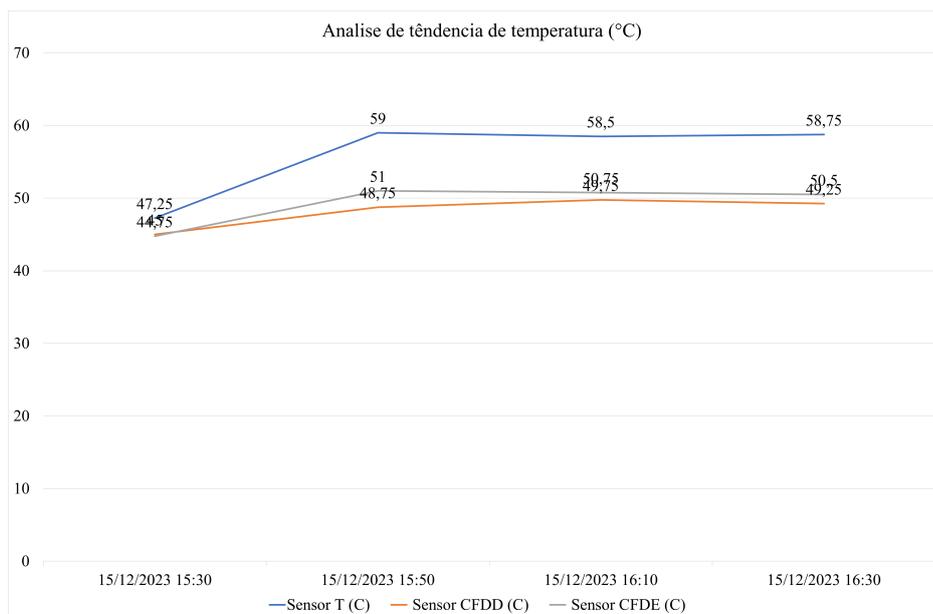


Figura 29 – Gráfico de análise de tendência de temperatura. Fonte: Autor

4 Resultados

Após implementação do sistema, houve uma melhora significativa nos índices de manutenção do MTTR e MTBF. Conforme os gráficos abaixo:

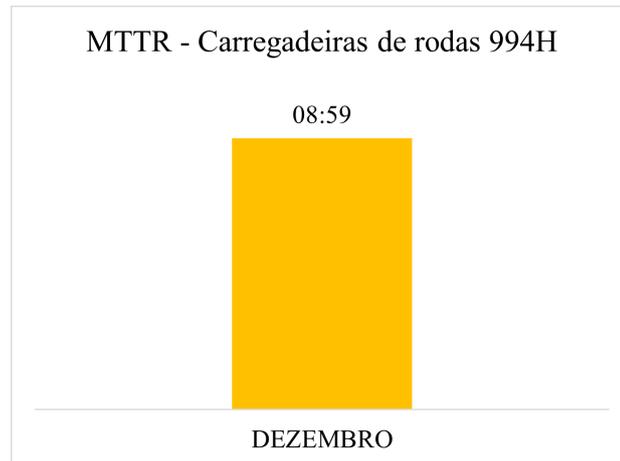


Figura 30 – MTRR - Dezembro 2023. Fonte: Autor

Tabela 6 – Análise dos ganhos de MTTR

MTTR - Média	MTTR - Pós instalação
09:51	08:59
Diferença	9%

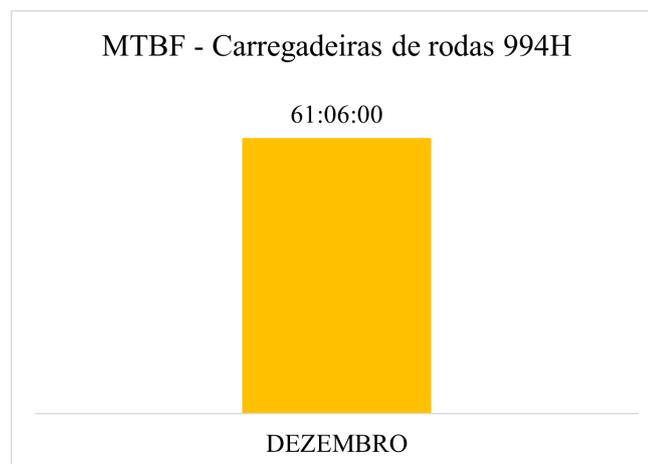


Figura 31 – MTBF - Dezembro 2023. Fonte: Autor

Tabela 7 – Análise dos ganhos de MTBF

MTBF - Média	MTBF - Pós instalação
61:09:00	61:06:00
Diferença	0,1%

Análise gráfica do Pareto das falhas referentes a dezembro de 2023:

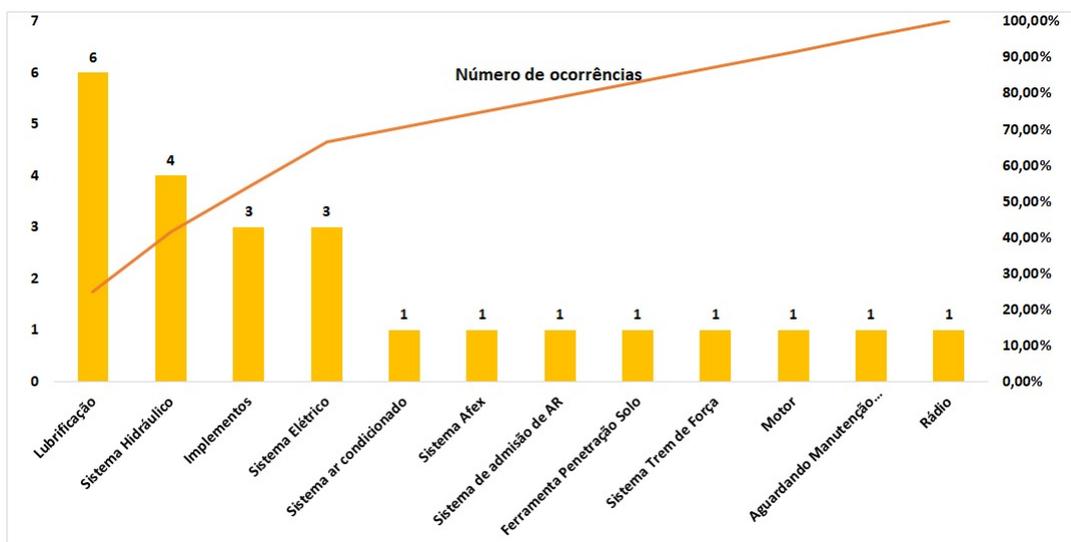


Figura 32 – Pareto - Dezembro 2023. Fonte: Autor

Conseqüentemente, tivemos um aumento significativo na disponibilidade dos ativos, apesar de sutil, contribuiu para um aumento na segurança operacional e produtividade.

Tabela 8 – Diferença entre disponibilidade física antes e depois do sistema

MTBF Médio	MTTR Médio	Disponibilidade	Diferença
61:06:00	08:59	87,18%	1%

A redução de 9% no MTTR e 0,1% no MTBF representa um progresso significativo no desempenho do sistema. O MTTR, que indica o tempo médio necessário para reparar uma falha, foi reduzido, indicando maior eficiência nos processos de reparo. Isso se deve em partes pela redução do tempo em realizar a substituição do componente de freio, aonde que o tempo de reparo era considerável. Por outro lado, a leve redução no MTBF sugere uma melhoria na confiabilidade do sistema, com intervalos ligeiramente mais longos entre as falhas.

O gráfico de Pareto, uma ferramenta valiosa para identificar e priorizar problemas, desempenhou um papel fundamental no sucesso desse trabalho. A ausência de falhas no Pareto indica que as principais fontes de problemas foram efetivamente abordadas e mitigadas. Isso demonstra uma abordagem eficiente e direcionada para resolver os principais desafios.

5 Conclusão

Com base nos resultados positivos, refletido nos indicadores de manutenção MTTR e MTBF. Os gráficos e análises apresentados proporcionam uma visão clara do progresso alcançado:

A redução significativa de 9% no MTTR é notável, indicando uma eficiência aprimorada nos processos de reparo. Esse avanço é especialmente evidente na diminuição do tempo necessário para a substituição do componente de freio, anteriormente considerado um ponto crítico. Este feito, por sua vez, contribui para uma operação mais ágil e eficaz.

Simultaneamente, mesmo com uma redução modesta de 0,1%, o MTBF revela uma melhoria na confiabilidade do sistema. Intervalos ligeiramente mais longos entre as falhas sugerem uma maior estabilidade operacional, destacando a eficácia das intervenções implementadas.

Logo, o aumento de 1% na disponibilidade física do equipamento evidenciou uma maior confiabilidade operacional, refletindo em eficiência aprimorada e redução potencial do tempo de inatividade não planejado. Este ganho sutil, mas significativo, destaca a eficácia das estratégias implementadas, reforçando a importância contínua da otimização dos tempos médios de reparo (MTTR) e períodos médios entre falhas (MTBR) para alcançar um desempenho ainda mais robusto e sustentável do sistema.

A análise de Pareto desempenhou um papel crucial no sucesso dessa empreitada. A ausência de falhas significativas no Pareto atesta que as principais fontes de problemas foram abordadas com êxito, evidenciando uma abordagem eficaz e focalizada na resolução dos problemas com maiores impactos.

Conclui-se, portanto, que as intervenções e melhorias aplicadas no sistema não apenas atingiram seus objetivos, mas também promoveram uma redução tangível no tempo de reparo e um leve aumento na confiabilidade global do sistema. Esses resultados, quando combinados, apontam para uma estabilidade operacional reforçada e uma capacidade aprimorada de lidar com eventos imprevistos.

A conclusão principal é que as intervenções e melhorias implementadas no sistema tiveram um impacto positivo, resultando em uma redução no tempo de reparo e uma pequena melhoria na confiabilidade global do sistema.

No entanto, é importante continuar monitorando e avaliando o desempenho do sistema ao longo do tempo. Isso garantirá que quaisquer tendências ou novos desafios sejam identificados e tratados de maneira proativa, contribuindo para a manutenção de um ambiente operacional robusto e eficiente. O sucesso até o momento fornece uma base

sólida para futuras melhorias e otimizações.

Como ponto de melhoria, podemos destacar a aplicação de um sistema remoto on-line de monitoramento e um sistema de posicionamento global para identificar os possíveis locais de falha.

O sistema também se mostrou ser multiversátil, aonde que pode ser utilizado em uma ampla gama de equipamentos, não necessariamente em equipamentos de mineração.

Referências

- ABNT. *Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5462: Confiabilidade e mantabilidade*. 1994. Disponível em: <https://visualstudio.microsoft.com/pt-br/#vs-section>. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 1 vez na página 15.
- ARDUINO. *Arduino Uno Datasheet*. 2023. Disponível em: <https://www.farnell.com/datasheets/1682209>. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 2 vezes na página 21.
- ARDUINO. *O que é Arduino?* 2018. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em: 22 fev. 2024. Citado 1 vez na página 16.
- AXELSON, JAN. *Serial Port Complete 2 ed.* 2007. Disponível em: <https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/7/73/USART.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 1 vez na página 25.
- CARVALHO, Thyago P. et al. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers Industrial Engineering*, n. 137, p. 5, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>. Citado 1 vez na página 16.
- CATALEX. *Micro SD Card Micro SDHC Mini TF Card Adapter Reader Module for Arduino*. 2023. Disponível em: <https://cdn.awsli.com.br/945/945993/arquivos/Datasheet-MicroSD-Module.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 0 vez nas páginas 24, 25.
- CATERPILLAR. *Manual de serviço do equipamento, Service Brakes*. 2013. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 0 vez na página 20.
- CATERPILLAR. *994H Wheel Loader*. 2013. Disponível em: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C752253>. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 1 vez nas páginas 19, 20.
- CIRCUITS, Art of. *RTC 3231*. 2023. Disponível em: <https://artofcircuits.com/product/high-accuracy-i2c-ds3231-rtc-with-at24c32-32kbit-EEPROM>. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 0 vez na página 22.
- DARLING, P. *SME Mining Engineering Handbook*. 3rd. ed. Citado 1 vez na página 11.
- DATASHEET. *RTC DS3231*. 2023. Disponível em: <https://datasheetspdf.com/datasheet/search.php?sWord=ds3231>. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 1 vez na página 22.
- DATASHEET, UMW. *LM 2596 - 3A Step-Down Voltage Regulator*. 2023. Disponível em: https://images.tuyacn.com/smart/A_TUYA/cropper/LM2596S.pdf. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 1 vez na página 24.
- DEVEX. *SmartMine*. 2020. Disponível em: <https://www.calameo.com/read/0000795894342d6923807>. Acesso em: 22 fev. 2024. Citado 1 vez na página 26.

- ELETRÔNICOS, Curto Circuito Componentes. *Conversor DC/DC - Step Down - LM2596*. 2023. Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/conversor-dc-dc-step-down-lm2596.html>. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 0 vez na página 24.
- GABRIELA F. P. GREGÓRIO, Aline M. da Silveira. *Manutenção industrial*. SAGAH EDUCAÇÃO S.A, 2018. v. 1. Revisão técnica: Henrique Martins Rocha. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595026971/pageid/1>. Citado 1 vez na página 16.
- KOCH, Richard. *O princípio 80/20 : os segredos para conseguir mais com menos nos negócios e na vida*. Editora Gutenberg, 2015. v. 1. tradução Cristina Sant'Anna. Disponível em: <https://www.casasbahia-imagens.com.br/Control/ArquivoExibir.aspx?IdArquivo=125819409&Attachment=1>. Citado 1 vez na página 27.
- MACHADO, Simone Silva. *Gestão da qualidade*. Inhumas: IFG; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. Bibliografia. Disponível em: https://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_prd_industr/tec_acucar_alcool/161012_gest_qual.pdf. Citado 1 vez na página 27.
- MANSO, Gabriel Fernandes Almeida. *Estudo da determinação da incerteza de medição na calibração dinâmica de sensores de temperatura*. 2013. Engenheiro Mecânico. – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/4878/1/2013_GabrielFernandesAlmeidaManso.pdf. Acesso em: 22 fev. 2024. Citado 1 vez na página 37.
- MATTHEW DUFF, Joseph Towey. Two Ways to Measure Temperature Using Thermocouples Feature Simplicity, Accuracy, and Flexibility. *Analog Dialogue*, v. 44-10, p. 44–, 2010. Citado 1 vez na página 23.
- MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, Inc. *MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)*. 2021. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max6675.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 1 vez na página 22.
- MECHATRONIX CENTRAL, e-Gizmo. *Technical Manual Rev. 1 SIM800L GSM Module*. 2017. Disponível em: <https://www.e-gizmo.net/oc/kits%20documents/SIM800L%20module/SIM800L%20module.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 1 vez na página 25.
- MELEGARI, L. F. et al. Sistema de aquisição de dados térmicos utilizando a placa Arduino UNO. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, v. 1, n. 1, p. 2619–2631, Maio 2023. DOI: 10.55905/revconv.16n.5-039. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/download/676/488/1356>. Citado 1 vez na página 16.
- MICROSOFT. *Visual Studio*. 2023. Disponível em: <https://visualstudio.microsoft.com/pt-br/#vs-section>. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 1 vez na página 25.

- MOUBRAY, John. *Reability-centre Maintenance*. Butterworth-Heinemann, 1997. v. 2. Disponível em: <http://www.irantpm.ir/wp-content/uploads/2013/11/Reliability-Centered-Maintenance-II.pdf>. Citado 1 vez na página 15.
- ONUR SURUCU STEPHEN ANDREW GADSDEN, John Yawney. Condition Monitoring using Machine Learning: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances. *Expert Systems With Applications*, n. 1, p. 1–2, fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119738>. Citado 1 vez na página 15.
- SANTOS, B. P. et al. Indústria 4.0: desafios e oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, Revista Produção e Desenvolvimento, v. 4, p. 111–124, 2018. Citado 1 vez na página 12.
- SAR - SOLUÇÕES DE AUTOMAÇÃO E ROBÓTICA, LDA. *TERMOPAR TIPO-K 0 800°C AÇO INOXIDÁVEL ROSCA M6 C/ CABO 2M*. 2023. Disponível em: <https://www.botnroll.com/pt/temperatura/4223-termopar-tipo-k-0-800-c-a-o-inoxid-vel-rosca-m6-c-cabo-2m.html>. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 0 vez na página 23.
- TECHNOLOGIES, Cytron. *MAX6675 K-Thermocouple to Digital Converter Module*. 2023. Disponível em: <https://www.cytron.io/p-max6675-k-thermocouple-to-digital-converter-module>. Acesso em: 10 dez. 2023. Citado 0 vez na página 22.
- VEDAN, Alex. *A inteligência artificial (IA) na manutenção*. 2024. Disponível em: <https://traction.com/blog/a-inteligencia-artificial-na-manutencao-o-futuro-das-plantas-industriais>. Acesso em: 22 fev. 2024. Citado 1 vez na página 15.

APÊNDICE A – Código

```

#includeSD.h
#include SPI.h
#include Wire.h
#include max6675.h
#include SoftwareSerial.h
#include RTCLib.h

Definições para o SIM800

define SIM800_RX 2 // Pino RX do SIM800L conectado ao pino TX do Arduino
define SIM800_TX 3 // Pino TX do SIM800L conectado ao pino RX do Arduino

SoftwareSerial sim800Serial(SIM800_RX, SIM800_TX);

// Definições para o DS3231
RTC_DS3231 rtc;

// Pinos dos sensores de temperatura
int thermoDO_T = 4, thermoCS_T = 5, thermoCLK_T = 6; // Sensor de Temperatura
int thermoDO_CFDD = 3, thermoCS_CFDD = 2, thermoCLK_CFDD = 7; // Sensor
CFDD
int thermoDO_CFDE = 9, thermoCS_CFDE = 8, thermoCLK_CFDE = 7; // Sensor CFDE

int chipSelect = 10; // ChipSelect pin para o leitor de cartão SD

float tempC_T, tempC_CFDD, tempC_CFDE; // Variáveis de temperatura
MAX6675 thermocouple_T(thermoCLK_T, thermoCS_T, thermoDO_T);
MAX6675 thermocouple_CFDD(thermoCLK_CFDD, thermoCS_CFDD, thermoDO_CFDD);
MAX6675 thermocouple_CFDE(thermoCLK_CFDE, thermoCS_CFDE, thermoDO_CFDE);
File mySensorData;

// Números de telefone para os quais enviar mensagem const char* phoneNumbers[]
=
"+55031996146010",
;

```

```
// Limiar de temperatura para envio de alerta
const float TEMPERATURE_THRESHOLD = 120.0;

void setup()
Serial.begin(115200);
sim800Serial.begin(9600);
pinMode(chipSelect, OUTPUT);
SD.begin(chipSelect);

if (!rtc.begin()) {
Serial.println("Erro ao iniciar o módulo RTC!");
while (1);
}

mySensorData = SD.open("PTData.csv", FILE_WRITE);
if(mySensorData){
mySensorData.println("SensorT(C), SensorCFDD(C), SensorCFDE(C)");
mySensorData.close();
}

voidloop(){
DateTimenow = rtc.now();

tempCT = thermocouple_T.readCelsius();
tempCCFDD = thermocouple_CFDD.readCelsius();
tempCCFDE = thermocouple_CFDE.readCelsius();

StringdateTimeString = now.toString("YYYY - MM - DDHH : mm : ss");

mySensorData = SD.open("PTData.csv", FILE_WRITE); mySensorData.print(dateTimeString);
mySensorData.print(",");
mySensorData.print(tempCT);
mySensorData.print(",");
mySensorData.print(tempCCFDD);
mySensorData.print(",");
mySensorData.println(tempCCFDE);

Serial.print("Data e Hora: ");
```

```

Serial.print(dateTimeString);
Serial.print(", Sensor T Temp (C): ");
Serial.print(tempCT);
Serial.print(", SensorCFDDTemp(C) : ");
Serial.print(tempCCFDD);
Serial.print(", SensorCFDETemp(C) : ");
Serial.println(tempCCFDE);

```

```

    Verifica se a temperatura ultrapassou o limiar
    if (tempCT > TEMPERATURETHRESHOLD || tempCCFDD >
    TEMPERATURETHRESHOLD || tempCCFDE > TEMPERATURETHRESHOLD){
    sendSMSAlert();
    }
    delay(20000);
}

```

```

voidsendSMSAlert(){
Serial.println(" Enviando alertaporSMS...");

```

```

//Enviarmensagensparaosnúmerosdetelefone
for(inti = 0; i < sizeof(phoneNumbers)/sizeof(phoneNumbers[0]); i++){
sim800Serial.print(" AT + CMGF = 1");
delay(100);
sim800Serial.print(" AT + CMGS = ");
sim800Serial.print(phoneNumbers[i]);
sim800Serial.print(" "); delay(100); sim800Serial.printTemperaturaelevada!
sim800Serial.write(26);
delay(1000);
Serial.println(" Alerta enviado com sucesso para " + String(phoneNumbers[i]));
}
}

```