

JOSIAS JOSÉ SIQUEIRA DE MAGALHÃES

**UM MODELO MATEMÁTICO PARA A PRIORIZAÇÃO DE ORDENS
DE MANUTENÇÃO**

**Ouro Preto, MG
2023**

JOSIAS JOSÉ SIQUEIRA DE MAGALHÃES

**UM MODELO MATEMÁTICO PARA A PRIORIZAÇÃO DE ORDENS
DE MANUTENÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos
requisitos para obtenção do título de especialista
em Sistemas Inteligentes: Ênfase Em Ciência De
Dados.

Área de concentração: Otimização

Orientador: Prof. Luciano Perdigão Cota, D.Sc.
Coorientadora: Profa. Tatianna A. P. Beneteli,
D.Sc.

**Ouro Preto, MG
2023**

Título: Um modelo matemático para a priorização de ordens de manutenção
Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (X) Pública

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M166m

Magalhães, Josias José Siqueira de
Um modelo matemático para a priorização de ordens de manutenção. Josias José Siqueira de Magalhães... [et al.] - Ouro Preto, MG: ITV, 2023.

38 p.: il.

Monografia (Especialização latu sensu) - Instituto Tecnológico Vale, 2023.
Orientador: Luciano Perdigão Cota
Coorientadora: Tatianna A. P. Beneteli

1. Ordem de Manutenção. 2. Priorização. 3. Critérios de Desempe. I. Cota, Luciano Perdigão. II. Beneteli, Tatianna A. P. III. Título.

CDD.23. ed. 629.892

Josias Magalhães

UM MODELO MATEMÁTICO PARA A PRIORIZAÇÃO DE ORDENS DE MANUTENÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Sistemas Inteligentes: Ênfase em Ciência de Dados].

Orientador: Prof. D.Sc. Luciano Perdigão Cota

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 21 de novembro de 2023 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. D.Sc. Luciano Perdigão Cota
Orientador – Instituto Tecnológico Vale

Prof.^a D.Sc. Tatianna Aparecida Pereira Beneteli
Coorientadora – Instituto Tecnológico Vale

Prof. MSc. Thomás Vargas Barsante e Pinto
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale

MSc. Diego Gomes Coelho
Membro externo – Stellantis

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).

PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/13C6-AB42-1BEE-42CC> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale . To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/13C6-AB42-1BEE-42CC> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: 13C6-AB42-1BEE-42CC



Hash do Documento

7F9BEFA0D2C4D960D6B00A78213A9C07429FE2CFA53603CB128D72A9DDE3593C

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 26/12/2023 é(são) :

- ☒ Thomás Vargas Barsante e Pinto (Signatário) - 115.302.536-16 em 22/12/2023 10:05 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: Thomas.Pinto@itv.org; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Fri Dec 22 2023 14:05:41 GMT+0100 (Horário Padrão da Europa Central)

Geolocation Location not shared by user.

IP 81.36.148.124

Hash Evidências:

1DCFE5F6EFE90B432F82767D33AAA64C43C7E152CE5B87CF54BC544AFD1C8DAC

- ☒ Diego Gomes Coelho (Signatário) - em 22/12/2023 09:24 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: diegogomescoelho@gmail.com; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Fri Dec 22 2023 09:24:10 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -20.4044357 Longitude: -43.5026035 Accuracy: 15.081

IP 187.0.254.50

Hash Evidências:

64D6810B4E5D1F65B8C74159B2059371FA083E9F8E20E13BBF495D586D0ABD77

☒ Luciano Perdigão Cota (Signatário) - 067.976.936-67 em 22/12/2023 09:06 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: luciano.p.cota@itv.org; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Fri Dec 22 2023 09:06:29 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -20.406107 Longitude: -42.887608 Accuracy: 73

IP 170.83.69.116

Hash Evidências:

6626D739436D2B47C78951361BDB8B9B1A584D073C5C98345B8717F66B364A20

☒ Tatianna Aparecida Pereira Beneteli (Signatário) - em 22/12/2023 08:38 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: tatianna.beneteli@pq.itv.org; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Fri Dec 22 2023 08:38:51 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -21.7725517 Longitude: -43.3095468 Accuracy: 100

IP 187.16.181.47

Hash Evidências:

AFAFE4BD0270445CBB7DEF27B07D7DBA40E2A6D1E3A5B57B81FB963FAF414DD3



Dedico a todos os colegas de trabalho com os quais durante todos estes anos aprendi sobre as dificuldades do processo de Planejamento e Controle da Manutenção na priorização de ordens de manutenção.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e irmãos por todo o apoio de sempre, à minha esposa e filha pela convivência e parceria, ao apoio e confiança dos meus líderes da Vale, aos colegas de trabalho, alunos e professores do ITV com os quais aprendi muito durante esta jornada, em especial a Tatianna Beneteli e Luciano Cota que me orientaram e apoiaram no trabalho de conclusão.

Agradeço o apoio da Vale S.A., do Instituto Tecnológico Vale e das agências brasileiras de fomento CAPES e CNPq.

“Passado, presente e futuro devem coexistir harmonicamente na mente humana. Quando um deles é priorizado e os demais são totalmente esquecidos surge alguma espécie de desequilíbrio, ou, no mínimo, a hipótese de que algo não está correto, não está bem.”

Machado de Assis

RESUMO

Manutenção é o conjunto de atividades realizadas para manter a disponibilidade e confiabilidade dos ativos de uma indústria, devendo ser executada com segurança e de forma sustentável. Uma das etapas do processo de planejamento e controle da manutenção é a priorização nas ordens de manutenção utilizando diversos critérios. O objetivo desse trabalho é descrever, de forma detalhada, todos os critérios existentes em uma ordem de manutenção (OM) que podem ser usados em sua priorização, auxiliando, posteriormente na etapa de programação das OMs. Os principais critérios que serão abordados são: ativo crítico, prioridade do ativo, prioridade da ordem, tipo de ordem, tipo de atividade e data de vencimento. Atualmente, a equipe de Usina Cauê trabalha com um modelo de priorização de ordens de manutenção criado pela equipe de Engenharia Ferrosos. Nesse trabalho, iremos explicar o modelo implementado, apresentando um exemplo didático. Por fim, possíveis adaptações e melhorias serão discutidas, buscando tornar o modelo replicável as demais gerências de manutenção da Vale. Um novo método de cálculo de prioridade é proposto e critérios de desempate são definidos. Conjuntos de ordens de manutenções da equipe de automação dos Corredores Sudeste e Norte são utilizados para validar a proposta.

Palavras-chave: Ordem de Manutenção. Priorização. Critérios de desempate.

Fase da Cadeia: Manutenção.

ABSTRACT

Maintenance is the set of activities performed safely and sustainably to maintain the availability and reliability of an industry's assets. One of the steps in the maintenance planning and control process is prioritizing maintenance orders using various criteria. This work aims to describe, in detail, all the existing criteria in a maintenance order that can be used in prioritizing these orders, subsequently helping in the maintenance planning. The main criteria that will be covered are a critical asset, asset priority, maintenance order priority, order type, activity type, and due date. Currently, the Cauê processing plant Plant team works with a maintenance order prioritization model created by the Ferrous Engineering team. In this work, we will explain the implemented model, including a didactic example. Finally, possible adaptations and improvements will be discussed to make the model replicable to other Vale maintenance departments. A new priority calculation method is proposed, and tiebreaker criteria are defined. Maintenance orders from the automation team for the Southeast and North Areas are used to validate the proposal.

Keywords: Maintenance order. Prioritization. Tie-breaker criterion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de Manutenção	16
Figura 2 – Macroprocesso do PCM	17
Figura 3 – Matriz de prioridade do ativo	26
Figura 4 – Interface gráfica da ferramenta de priorização de ordens de manutenção	29
Figura 5 – Etapas do desenvolvimento da ferramenta de priorização de OMs . . .	30
Figura 6 – Visualização de uma OM no sistema	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais status de sistema	24
Tabela 2 – Status de usuário numerado	25
Tabela 3 – Combinação de Status para Priorização	25
Tabela 4 – Status de usuário não numerado	25
Tabela 5 – Combinação de status de usuário	26
Tabela 6 – Prioridade do ativo	26
Tabela 7 – Tipos de OM	27
Tabela 8 – Prioridade da OM	28
Tabela 9 – Pesos atribuídos a cada critério avaliado	31
Tabela 10 – Pesos atribuídos de acordo com relação entre data atual e a data de vencimento da OM	32
Tabela 11 – Campos da OM	33
Tabela 12 – Pesos da OM	33
Tabela 13 – Pesos globais	34
Tabela 14 – Pesos criticidade do ativo	34
Tabela 15 – Pesos prioridade do ativo	35
Tabela 16 – Pesos tipo de ordem	35
Tabela 17 – Pesos prioridade da ordem	35
Tabela 18 – Pesos status da ordem	36
Tabela 19 – Pesos data de vencimento	36
Tabela 20 – 15 OMs prioritárias da instância 1	39
Tabela 21 – 15 OMs prioritárias da instância 2	39

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABER	-	Aberto
AGDO	-	Aguardando
AGPL	-	Aguardando planejamento
AGPR	-	Aguardando Programação
AGRP	-	Aguardando Reprogramação
AHP	-	Analytic Hierarchy Process
AMC	-	Aderência a Manutenção Condicional
AMS	-	Aderência a Manutenção Sistemática
ANVISA	-	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
APM	-	Aderência ao Plano de Manutenção
ATCR	-	Status que define o Ativo como Crítico
CAPES	-	Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq	-	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EAS	-	Estabelecimentos Assistenciais de Saúde
EMAs	-	Equipamentos Médicos Assistenciais
ENCE	-	Encerrado
ENCR	-	Encerrado
ENTE	-	Concluído tecnicamente
ERP	-	Sistema de Gestão Integrado do inglês Enterprise Resource Planning
EXEC	-	Em execução
GB	-	Gigabyte
Ghz	-	Gigahertz
GRASP	-	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
ILS	-	Iterated Local Search
ITV	-	Instituto Tecnológico Vale
JPA	-	Job Positioning Algorithm
KPIs	-	Indicadores-Chave de Desempenho do inglês "Key Performance Indicators"
LIB	-	Liberado
MAMB	-	Meio ambiente
MCDA-G	-	Multicriteria Decision Aid Constructivist
MI	-	Mineração
OM	-	Ordem de Manutenção
OMs	-	Ordens de Manutenção
OS	-	Ordem de Serviço
OSs	-	Ordens de Serviço
PCM	-	Planejamento e Controle da Manutenção
PM	-	Módulo de Manutenção do inglês Plant Maintenance
RAM	-	Memória de Acesso Aleatório do inglês Random Access Memory
RELG	-	Requisito legal
REPR	-	Reprogramado
RETR	-	Retrabalho
SAP	-	Empresa Desenvolvedora de Softwares

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

SAUD	-	Saúde
SEGU	-	Segurança
SILS	-	Smart Iterated Local Search
TOPSIS	-	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
URGT	-	Urgente
YCA	-	Serviço de Calibração e Aferição
YCM	-	Manutenção Condicional
YCO	-	Manutenção Corretiva não Emergencial
YEM	-	Manutenção Corretiva Emergencial
YIM	-	Serviço de Melhoria ou Modificação
YOP	-	Serviço de Operação
YPM	-	Manutenção Preventiva Sistemática
YPW	-	Reforma com Valoração de Estoque
YRR	-	Reforma de Componentes
YSS	-	Serviço de Apoio

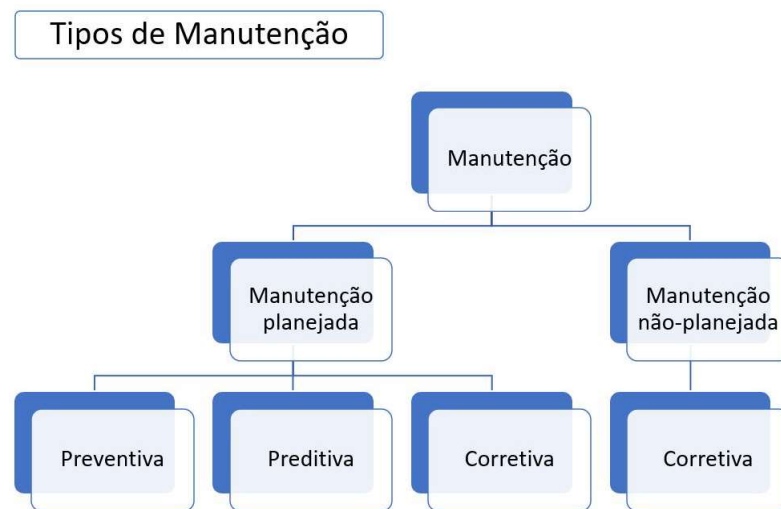
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivo Geral	18
1.3	Objetivos Específicos	18
1.4	Organização do Trabalho	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	23
3.1	Criticidade do ativo	24
3.2	Status da ordem	24
3.3	Prioridade do ativo	25
3.4	Tipo de ordem	26
3.5	Prioridade da ordem	28
3.6	Data de vencimento	28
4	FERRAMENTA DE PRIORIZAÇÃO	29
4.1	Exemplo do problema de priorização de ordens de manutenção	32
5	MÉTODO DE CÁLCULO PROPOSTO	34
5.1	Critérios de desempate	36
6	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	38
6.1	Cenários	38
6.2	Resultados	38
7	CONCLUSÕES	40
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

A missão da manutenção é reestabelecer as condições originais dos equipamentos e sistemas, garantindo a disponibilidade e confiabilidade destes equipamentos (KARDEC et al., 2014). O processo de manutenção pode ser dividido em manutenção planejada (preventiva, preditiva e condicional) e manutenção não-planejada (corretiva), conforme a Figura 1.

Figura 1 – Tipos de Manutenção



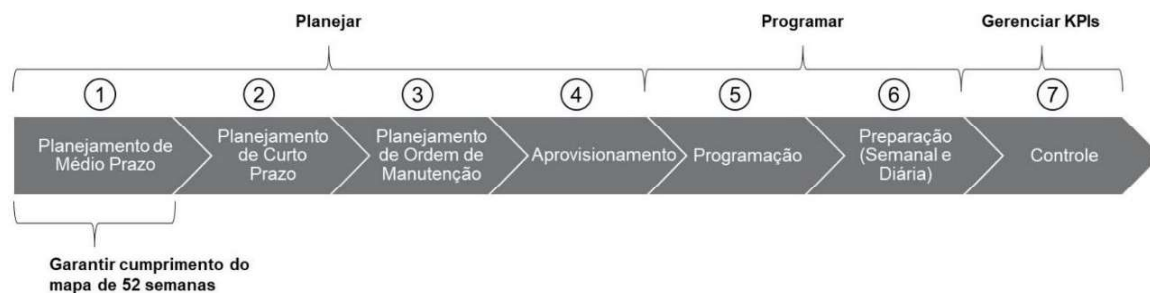
Fonte: Elaboração própria.

Diversas áreas atuam em conjunto para gerenciar as atividades de manutenção, como Engenharia de Processos, Engenharia de Fase e Planejamento e Controle da Manutenção (PCM). A equipe do PCM é responsável pela aplicação das estratégias definidas pela Engenharia no planejamento de médio e curto prazo, no planejamento das demandas criadas a partir das inspeções sensíveis e preditivas e na programação semanal, além de controlarem os indicadores da manutenção.

A programação semanal das atividades de manutenção consiste em definir as tarefas a serem executadas de forma otimizada considerando o tempo de parada dos ativos, a utilização dos recursos e a capacidade do centro de trabalho.

A Figura 2 apresenta o macroprocesso do PCM, que é dividido em “Planejar”, “Programar” e “Gerenciar KPIs”. A equipe de Planejamento recebe as demandas da Inspeção e Sistemas Especialistas através da nota de manutenção que posteriormente será transformada em uma OM para manutenções não sistemáticas. As demandas também podem ser inseridas através de OMs geradas pelo sistema de forma automática provenientes dos Planos de Manutenção. Após o processo de planejamento, a OM é enviada para a equipe de provisionamento de recursos. Ao fim desta etapa a OM fica disponível para ser programada e executada.

Figura 2 – Macroprocesso do PCM



Fonte: Elaboração própria.

A etapa de priorização das ordens de manutenção antecede à programação das atividades de manutenção que serão executadas e buscar definir a ordem de prioridade em que as atividades devem ser executadas. A priorização de cada atividade é realizada de acordo com critérios previamente cadastrados na ordem de manutenção. Neste trabalho foram utilizados 6 critérios que serão apresentados a seguir. Estes representam bem o processo de manutenção realizado na Vale S.A. e são os mesmos analisados pela ferramenta de priorização existente.

1. Criticidade do ativo: sua falha causa impactos no processo, pessoas e ou meio ambiente;
2. Status da ordem: indica em que etapa e situação a demanda se encontra;
3. Prioridade do ativo: define a representatividade do ativo no processo da companhia;
4. Tipo de ordem: define o tipo de manutenção que será realizada;
5. Prioridade da ordem: está ligada à execução da manutenção, tendência de falha e dados preditivos;
6. Data de vencimento: define prazo para a execução e está diretamente relacionado a confiabilidade do ativo.

1.1 Motivação

Atualmente, o planejamento das ordens de manutenção é realizado de forma manual na Vale S.A. pela equipe de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM). Após definirem o horizonte de planejamento, a equipe extrai as ordens de manutenção do sistema SAP. O sequenciamento das ordens extraídas é realizado de forma manual, baseado na experiência da equipe e em informações como critérios de prioridade, restrições e disponibilidade das equipes. Considerando os diversos setores da companhia e os tipos de OMs abordadas nesse trabalho, temos atualmente cerca de 570 mil OMs em carteira.

Sabendo que a prioridade estabelecida para cada ordem de manutenção é um dos principais parâmetros que auxiliam a estabelecer a ordem de execução das OMs, esse trabalho busca fazer um levantamento dos critérios que podem ser utilizados para definir uma ordem de priorização mais assertiva. Um planejamento feito sem obedecer os critérios

de priorização pode levar a perdas consideráveis relacionadas a segurança, confiabilidade dos ativos, custo e produção.

Outro ponto a ser observado é que no modelo utilizado atualmente para a priorização das OMs, um dos principais problemas é a existência de empates após a aplicação dos pesos para os critérios de priorização.

Dessa forma, atualmente ordens com maior prioridade de execução, considerando os critérios estabelecidos, podem ser preteridas, levando a execução de ordens com menor prioridade e impactando o processo de manutenção da empresa.

1.2 Objetivo Geral

O principal objetivo desse trabalho é desenvolver um modelo matemático para a priorização das ordens de manutenção, estabelecendo os critérios que devem ser analisados e os pesos de cada um desses critérios na priorização.

1.3 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre sequenciamento de ordem de manutenção com foco na etapa de priorização;
- Caracterizar o problema estudado;
- Caracterizar a ferramenta existente para a priorização das ordens de manutenção;
- Propor um modelo matemático para a priorização das ordens de manutenção;
- Propor e implementar critérios de desempates para a priorização das OMs;
- Validar a formulação matemática proposta com um conjunto de ordens de manutenção reais da equipe de automação dos Corredores Sudeste e Norte.

1.4 Organização do Trabalho

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 2 - Referencial Teórico:** apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema;
- **Capítulo 3 - Caracterização do problema:** apresenta a caracterização do problema, detalhando todos os critérios considerados na priorização;
- **Capítulo 4 - Ferramenta de priorização:** apresenta a ferramenta de priorização de ordens de manutenção existente e um exemplo didático do problema (Seção 4.1);
- **Capítulo 5 - Método de cálculo proposto:** nesse capítulo, o novo modelo matemático para priorização de ordens de manutenção é detalhado;
- **Capítulo 6 - Experimentos computacionais:** os experimentos computacionais são apresentados nesse capítulo;

- **Capítulo 7 - Conclusões:** nesse capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho;
- **Capítulo 8 - Sugestões:** o capítulo final apresenta os trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir serão apresentados alguns trabalhos da literatura que tratam do problema de sequenciamento de ordens de manutenção. Muitos desses trabalhos abordam critérios de priorização das ordens em seu texto. Daremos foco nesse conteúdo.

Pazeto (2016) propôs a criação de um modelo de priorização de ordens de serviço (OS) em Estabelecimentos Assistenciais de Saúde (EAS). A proposta visa a melhora do atendimento realizado pelo setor de engenharia clínica, aumentando a disponibilidade dos Equipamentos Médicos Assistenciais (EMA). O levantamento dos requisitos para a criação do modelo de priorização foi feito a partir de literatura, interface com os profissionais da área e acompanhamento da rotina de manutenção, são eles: valor do EMA, importância do EMA, recursos financeiros, serviços programados, ANVISA, e peso de cada família de EMA. Com base nos critérios foi formulada equação onde é possível calcular o valor final da prioridade da OS. Quanto maior o resultado, maior a prioridade. Após os testes comparativos entre o método proposto e o utilizado pela engenharia clínica, obteve-se um índice de similaridade de 89%, considerando dois EASs durante três meses.

Aplicando a metodologia e os critérios de priorização desenvolvidos por Pazeto (2016), Silva (2018) criou um software protótipo. Foram realizadas simulações utilizando solicitações de manutenção no Hospital das Clínicas da Universidade Federal de Uberlândia. Com os testes realizados, nos três primeiros meses, chegou-se à média de 91,21% de similaridade entre a análise intuitiva dos técnicos e a aplicação do sistema. Mesmo com a definição direcionada de critérios, há alguns que devem ser considerados por gestores de manutenção para um bom funcionamento dos estabelecimentos assistenciais de saúde.

Mota (2020) desenvolveu um modelo multicritério para apoiar a tomada de decisão em grupo, usando como base os métodos AHP (do termo em inglês *Analytic Hierarchy Process*), TOPSIS (do termo em inglês *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) e o procedimento de borda para priorização de ordens de manutenção corretivas em uma empresa de logística. O modelo foi proposto em três etapas, começando com a ponderação dos critérios por meio de uma análise hierárquica dos processos e estabelecimento do ranqueamento pelos decisores. Foi utilizada uma amostra de 24 ordens e as decisões eram tomadas pelo Diretor Operacional, Diretor Comercial, Chefe de Oficina e Coordenador de Segurança. Eles definiram os critérios e posteriormente os pesos para cada um. Os critérios são carga perigosa, custo de indisponibilidade, disponibilidade de peças, disponibilidade de veículo reserva, serviços por área de manutenção: mecânica, elétrica, borracharia e limpeza, hodômetro, hora-máquina mensal, idade do veículo, número de itens de segurança, número de itens operacionais, tipo de veículo: truck, traçado, semi-reboque e toco. Após a votação de cada um dos decisores em 64,81% dos testes as posições do ranking não sofreu alteração em relação ao resultado do modelo.

Barros, Caliman e Gonçalves (2022) propuseram a utilização de ferramentas para planejamento e programação das ordens de uma oficina de Usina Siderúrgica, à época não existia nenhuma definição de prioridade. Foi utilizado o modelo de tomada de decisão MCDA-C (do termo em inglês *Multicriteria Decision Aid Constructivist*). O objetivo é utilizar a metodologia para definir o grau de urgência e sequenciar as ordens. Os critérios utilizados são segurança, meio ambiente, produção, qualidade do produto, tipo de manutenção, sobressalente, complexidade e equipe executante. O impacto varia de 0 a 100, podendo assumir os seguintes valores: 0, 20, 30, 50 e 100. Para os testes foi considerada uma amostra de 28 ordens. Os autores propõem como próximas etapas a implementação da ferramenta, treinamento e acompanhamento através de KPIs.

Em Coelho, Cota e Souza (2022) o objetivo é programar a execução de ordens de manutenção levando em consideração a disponibilidade do ativo (janela de início e fim de parada), pesos por não execução da tarefa, duração da manutenção e disponibilidade da equipe de manutenção, de forma que se execute a maior quantidade de tarefas utilizando a menor quantidade de equipes de manutenção. Para isso é usado um algoritmo JPA (do termo em inglês *Job Positioning Algorithm*) para fazer sequenciamento das tarefas. Como critérios de desempate são utilizados o peso por não execução da tarefa, duração da tarefa e menor janela fim. A metodologia aplicada apresentou soluções de qualidade e com boa performance computacional.

Bonassa (2022) trata o problema de priorização de ordens de manutenção em uma indústria alimentícia. Os critérios utilizados são: criticidade do equipamento, tipo de atividade e prioridade da ordem. O objetivo principal é otimizar recursos disponíveis e um fator de punição é aplicado nas ordens que ultrapassam o limite de orçamento mensal. O sistema foi construído utilizando a linguagem Python. Comparando o processo manual e o algoritmo proposto, os resultados mostram que em outubro de 2021 houve a redução de 6,4% para o valor total orçado e o aumento de 14,2% na quantidade de ordens executadas, ou seja, o algoritmo priorizou mais ordens com um orçamento menor.

Magnago, Cota e Souza (2023) abordam o sequenciamento de ordens de manutenção de tecnologia em horizonte de curto prazo. Os parâmetros levados em consideração são: horizonte de planejamento, equipes de manutenção, deslocamento das equipes, duração da tarefa, tipo de manutenção (preventiva, corretiva e melhoria) e prioridade do ativo. Foram propostos dois algoritmos heurísticos para tratar o problema: um com critério de desempate dado pela soma das penalidades por tipo de manutenção e criticidade do ativo; outro que possui 3.840 combinações de critérios de desempate. A formulação proposta foi validada em 7 instâncias de casos reais da Vale S.A.

Na revisão bibliográfica realizada foi possível identificar que a maior parte dos trabalhos encontrados focam em um tipo específico de manutenção: preventiva ou corretiva. Além disso, poucos critérios são levados em consideração na hora de priorizar as OMs. Nesse trabalho identificamos vários critérios presentes nas OMs que podem ser utilizados

no processo de priorização e, posteriormente, auxiliar na etapa de programação das OMs. Ao todo foram considerados 6 critérios de priorização e 8 diferentes tipos de manutenção.

3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Este trabalho trata o problema da aplicação dos critérios de priorização nas ordens de manutenção, buscando ordená-las de acordo com sua prioridade e auxiliar na etapa de planejamento das atividades a serem executadas.

Uma ordem de manutenção é um documento formal que detalha a atividade de manutenção a ser realizada em determinado ativo. Cada OM possui diversos campos que, além de indicar a etapa em que a OM se encontra, podem ser utilizados para definir a prioridade da OM em relação as demais.

Atualmente, na Vale S.A., todas as atividades de manutenção devem obrigatoriamente possuir uma OM registrada no sistema informatizado de manutenção. O sistema informatizado utilizado é o SAP cuja sigla em português significa *Sistemas, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados*. o SAP é um software de Gestão Empresarial (ERP) criado por uma empresa alemã de mesmo nome. Ele fornece soluções que integram os dados e a comunicação entre os diferentes departamentos de uma empresa através de módulos. Na manutenção o módulo usado é o *Plant Maintenance* (PM), que possibilita a gestão da manutenção dentro do SAP. O PM engloba o gerenciamento de todas as atividades de manutenção, como inspeção, notificações, manutenção corretiva e preventiva.

O problema de priorização das ordens de manutenção possui as seguintes características:

1. Orden de manutenção (OM):

- Cada atividade de manutenção a ser executada deve ser formalizada por meio de ordem de manutenção $i \in OM$;
- Cada ordem de manutenção $i \in OM$ possui os seguintes campos:
 - Criticidade do ativo CA_i ;
 - Status da ordem SO_i ;
 - Prioridade do ativo PA_i ;
 - Tipo de ordem TO_i ;
 - Prioridade da ordem PO_i ;
 - Data de vencimento DV_i .

2. Centro de trabalho (CT):

- Cada centro de trabalho $j \in CT$ possui uma capacidade de execução de ordens de manutenção C_j

Os diversos campos que compõe as ordens de manutenção possuem um ou mais valores de preenchimento e serão utilizados como critérios em seu processo de priorização. A seguir, detalhamos cada um desses campos e os possíveis valores de preenchimento.

3.1 Criticidade do ativo

Ativo crítico é aquele que, em caso de falha, pode causar riscos ou efeitos negativos à produtividade de uma empresa. A materialização de um cenário de risco crítico pode impactar diferentes setores: Pessoas, Meio Ambiente, Social e Direitos Humanos, Reputacional e Financeiro. É possível visualizar na ordem de manutenção se um ativo é crítico através do termo ATCR.

3.2 Status da ordem

Os status desempenham um papel importante no acompanhamento do progresso e da etapa atual de uma OM. Existem diferentes tipos de status em uma ordem de manutenção, incluindo status de sistema, status de usuário numerado e status de usuário não numerado.

Os status de sistema indicam o estágio em que a OM se encontra no processo de manutenção, são alterados de forma automática pelo sistema ou manualmente pelo usuário. Os status de sistema mais representativos no processo de uma OM são apresentados na Tabela 1. Neste trabalho estabeleceu-se que as OMs avaliadas devem obrigatoriamente apresentar o campo status de sistema igual a Liberado (LIB).

Tabela 1 – Principais status de sistema

Status	Descrição
ABER	Aberto
ENCE	Encerrado
ENTE	Concluído tecnicamente
LIB	Liberado

Fonte: Elaboração própria.

Os status de usuário são utilizados para definir a etapa atual do processo ou uma situação específica durante a execução de uma OM. Uma ordem pode ter status de usuário numerados que se combinam com os status de usuário não numerados para auxiliar na definição de sua situação.

Os status de usuário numerados são aqueles que representam o processo e não podem ser usados simultaneamente entre si, vide Tabela 2. Neste trabalho estabeleceu-se que as OMs avaliadas devem obrigatoriamente apresentar o campo status de usuário numerado igual a Aguardando (AGDO) ou Em execução (EXEC).

Neste trabalho estabeleceu-se que as OMs avaliadas devem obrigatoriamente apresentar o campo status de usuário não numerado igual a Aguardando Programação (AGPR), Aguardando Reprogramação (AGRP) ou Reprogramado (REPR). Conforme apresentado na Tabela 3, os status AGPR e AGRP estarão associados ao status de usuário numerado AGDO, enquanto o status REPR ao EXEC.

Tabela 2 – Status de usuário numerado

Status	Usuário Numerado	Descrição
	AGPL	Aguardando planejamento
	AGDO	Aguardando
	EXEC	Em execução
	ENCR	Encerrado

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3 – Combinação de Status para Priorização

Status Numerado	Status Não Numerado
AGDO	AGPR
AGDO	AGRP
EXEC	REPR

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4 são apresentados os status de usuário não numerados que serão considerados na etapa de priorização, devido a sua representatividade no processo de manutenção.

Tabela 4 – Status de usuário não numerado

Status	Descrição	Detalhamento
URGT	Urgente	Data da conclusão desejada for menor que 30 dias
SEGU	Segurança	Atividade relacionada à segurança
SAUD	Saúde	Atividade destinada a garantir que não haja impacto à saúde das pessoas
MAMB	Meio ambiente	Atividade destinada a garantir que não haja impacto ao meio ambiente
AGRP	Aguardando reprogramação	Atividade já foi programada anteriormente, não foi executada e retornou para a programação
RETR	Retrabalho	Atividade atual é uma atividade que necessitou ser refeita
RELG	Requisito legal	A atividade está relacionada a atender um requisito legal

Fonte: Elaboração própria.

Os status de usuário não numerado podem ser utilizados simultaneamente entre si desde que respeitada as combinações permitidas conforme a Tabela 5. Nessa tabela serão apresentados apenas as combinações permitidas entre os status de usuário numerado e não numerados que serão considerado nesse trabalho.

3.3 Prioridade do ativo

A prioridade do ativo é determinada com base na correlação do maior nível de severidade encontrado e sua respectiva escala de probabilidade de falha. É um campo obrigatório no cadastro dos ativos do tipo M (ativo móvel ou planta) no SAP e é replicado na OM.

Tabela 5 – Combinação de status de usuário

Status Numerado	Status Não Numerado
AGDO - Aguardando	URGT - Urgente
	SEGU - Segurança
	SAUD - Saúde
	MAMB - Meio Ambiente
	AGRP - Aguardando reprogramação
	RETR - Retrabalho
	RELG - Requisito Legal
EXEC - Em execução	AGPR - Aguardando programação
	REPR - Reprogramado

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 3 temos um exemplo de matriz de definição da prioridade do ativo com base nos critérios probabilidade da falha, pessoas, meio ambiente, social e direitos humanos, reputacional e financeiro.

Figura 3 – Matriz de prioridade do ativo

Matriz de Classificação da Prioridade de Ativos													
Local de Instalação / Equipamento	Descrição do ativo	Localidade	Especialidade	É stand by?	Ativo atende a requisitos legais?	Descrição da pior caso razoavelmente provável considerado na análise	Probabilidade da falha	Pessoas	Meio Ambiente	Social e Direitos Humanos	Reputacional	Financeiro	Prioridade do ativo
PEVT-US7-FEL-TRANS- 7P15TC	Transportador de correia 7P 15TC	Usina 7	Mecânica	Não	Não	Rompimento de emenda da correia transportadora	Provável	3-Moderado	1-Muito Leve	1-Muito Leve	1-Muito Leve	3-Moderado	B
													3-Moderado e Provável

Fonte: Elaboração própria.

Os possíveis valores para o campo prioridade do ativo são apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 – Prioridade do ativo

Prioridade do ativo	Descrição
A	Alta
B	Média
C	Baixa
Em branco	Situação encontrada em posição de estrutura

Fonte: Elaboração própria.

3.4 Tipo de ordem

Os tipos de ordens de manutenção são como classificamos os tipos de manutenções que realizamos, tem relação com a estratégia de manutenção e metodologias utilizadas. Os principais tipos de manutenção são:

- Manutenção preventiva: consiste em realizar atividades de manutenção antes que uma falha ocorra, com o objetivo de evitar quebras e garantir a disponibilidade e

confiabilidade do equipamento. É realizada com base em planos de manutenção e em intervalos predeterminados.

- Manutenção condicional: é baseada na análise de dados e indicadores, que permitem avaliar o estado de saúde do equipamento e determinar o momento mais adequado para a realização da manutenção. Essa análise é feita por meio de técnicas de monitoramento e permite a identificação de problemas antes que eles se tornem críticos, evitando paradas não planejadas e aumentando a confiabilidade do equipamento.
- Manutenção corretiva: consiste em corrigir falhas ou defeitos após sua ocorrência, ou seja, é a ação de consertar algo que quebrou. Pode ser classificada como corretiva não emergencial, quando a correção da falha é programada, ou corretiva emergencial, quando a falha ocorre de forma inesperada e a manutenção é realizada de forma emergencial.

Os seguintes tipos de ordens de manutenção são considerados:

Tabela 7 – Tipos de OM

Tipo de manutenção	Tipo de OM	Descrição
Manutenção sistemática	YPM	Manutenção preventiva sistemática baseada em tempo ou contadores. Realizadas em intervalos de tempo pré definidos.
	YCA	Serviço de calibração e aferição periódica. Deve ser oriunda de um plano de manutenção.
Manutenção não sistemática	YCM	Manutenção condicional realizada no ativo que apresentou um defeito que não interrompeu o desempenho da função. A intervenção deverá ser planejada e programada com previsibilidade.
	YRR	Serviço de reforma de componente
	YPW	Serviço de reforma com valorização de estoque
	YIM	Serviço de melhoria ou modificação
Manutenção corretiva	YEM	Manutenção corretiva emergencial realizada no ativo que apresentou uma falha que interrompeu o desempenho da sua função. A intervenção deverá ser imediata.
	YCO	Manutenção corretiva não emergencial realizada no ativo que apresentou uma falha que interrompeu o desempenho da sua função. A intervenção não é imediata, devendo ser planejada e considerada na programação.
Operação	YOP	Serviço de operação
Apoio	YSS	Serviço de suporte, ou seja, atividades que não estão diretamente ligadas à solução do modo de falha ou perda operacional e suportam a ordem principal de manutenção.

Fonte: Elaboração própria.

3.5 Prioridade da ordem

A prioridade da ordem de manutenção no SAP é definida com base em vários fatores, como a data de conclusão desejada, tendência da falha, dados preditivos, de telemetria entre outros. É uma das formas de se mostrar que uma OM deve ser considerada como prioritária em relação a outras. Este campo preenchido de forma empírica pelo responsável pela abertura da nota ou ordem de manutenção.

Na Vale S.A., esse campo pode ser preenchido com os seguintes valores:

Tabela 8 – Prioridade da OM

Prioridade da OM	Descrição
Alta	Representa a prioridade de execução mais alta
Média	Representa a prioridade de execução intermediária
Baixa	Representa a prioridade de execução mais baixa

Fonte: Elaboração própria.

3.6 Data de vencimento

Uma ordem de manutenção possui três datas muito importantes - data alvo (planejada ou conclusão desejada), data de tolerância mínima e data de tolerância máxima - aplicáveis a manutenções condicionais e sistemáticas. Estas datas definem prazos e períodos para a execução da ordem e estão diretamente relacionados a confiabilidade do ativo a ser mantido. Os principais indicadores de manutenção relacionados ao cumprimento destes prazos são Aderência ao Plano de Manutenção (APM), Aderência a Manutenção Sistemática (AMS) e Aderência a Manutenção Condicional (AMC). A seguir, cada uma dessas datas citadas é detalhada:

- Data planejada: é a data “alvo” da manutenção preventiva;
- Data de conclusão desejada: é a data informada na nota de manutenção com base na necessidade de intervenção do ativo;
- Data de tolerância mínima: é a data mínima para realizar a intervenção com base na estratégia definida no plano de manutenção ou parâmetro técnico da equipe de inspeção;
- Data de tolerância máxima: é a data máxima para realizar a intervenção com base na estratégia definida no plano de manutenção ou parâmetro técnico da equipe de inspeção.

Atualmente, na priorização das ordens de manutenção, considera-se a data alvo como a data de vencimento da OM. A relação entre o dia corrente e a data de vencimento permite classificar as ordens de manutenção em ordens *no prazo* e ordens *vencidas*.

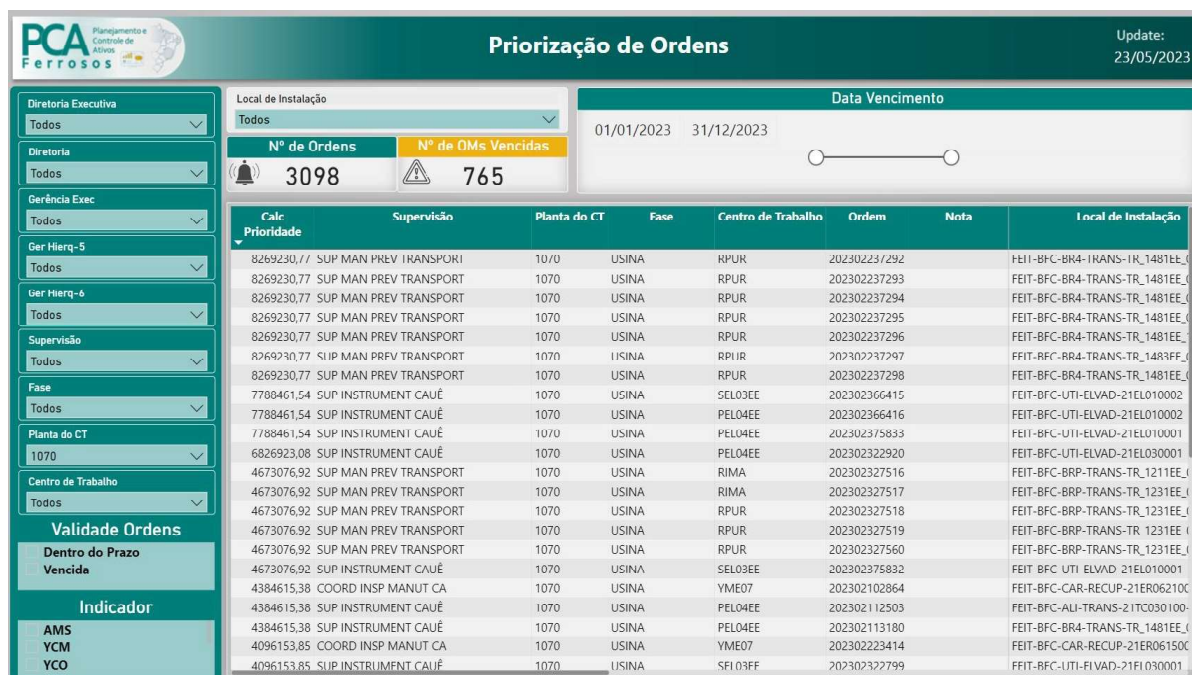
4 FERRAMENTA DE PRIORIZAÇÃO

Para auxiliar no processo de priorização das ordens de manutenção foi criada uma ferramenta utilizando a plataforma do *PowerBI*, que é uma plataforma de análise de negócios da *Microsoft*, e utilizando uma conexão de serviço em nuvem direta com os KPI's do SAP que contêm a base das OMs abertas.

A ferramenta analisa os preenchimento dos campos citados seção anterior em cada ordem de manutenção e apresenta o “cálculo de prioridade” para cada OM. O cálculo de prioridade é o resultado da multiplicação dos pesos definidos para cada um dos critérios citados anteriormente e ordena as demandas de maior prioridade para menor. Portanto, a ferramenta permite ordenar as OMs de acordo com a prioridade de execução, auxiliando na tomada de decisão sobre qual OM deve ser realizada primeiro.

Essa ferramenta foi desenvolvida pela equipe do Planejamento e Controle de Ativos e foi utilizada na unidade de Itabira no período de 2022. A interface gráfica dessa ferramenta pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 – Interface gráfica da ferramenta de priorização de ordens de manutenção

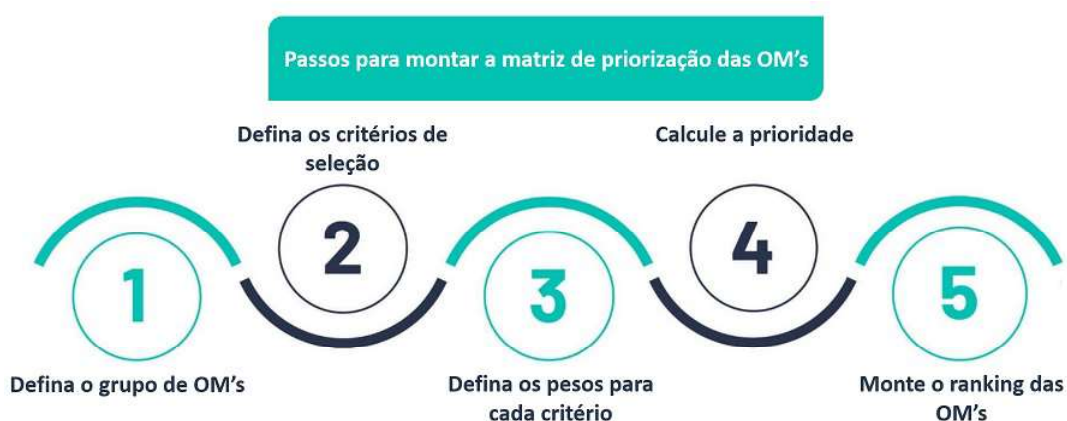


Fonte: Elaboração própria.

O desenvolvimento da ferramenta considerou as diversas etapas do processo de manutenção. Conforme apresentado na Figura 5, o primeiro passo consiste em definir o grupo de ordens de manutenção que serão analisados na ordenação de prioridade. Na Seção 3.2 foram estabelecidos os status de sistema, status de usuário numerado e status de usuário não numerado que as OMs devem obrigatoriamente apresentar. Além disso, o conjunto de ordens a serem analisadas deve ser restringido a área de atuação de uma

determinada equipe de manutenção. Os critérios que serão analisados também devem ser definidos, conforme apresentado no Capítulo 3. As próximas etapas a serem realizadas incluem a definição dos pesos para cada critério, o cálculo de prioridade e a ordenação das OM's de acordo com o resultado obtido. A seguir, abordaremos essas etapas com mais detalhes.

Figura 5 – Etapas do desenvolvimento da ferramenta de priorização de OM's



Fonte: Elaboração própria.

O processo de definição de pesos para priorização de ordens de manutenção é uma etapa importante. A escolha desses pesos influencia fortemente na precisão e eficiência do modelo implementado e deve refletir a prioridade das demandas de manutenção. Tal definição deve ser baseada em critérios objetivos que devem ser avaliados para garantir que as atividades de manutenção sejam realizadas de forma eficiente.

Na ferramenta desenvolvida, os pesos para cada critério foram estabelecidos considerando a sua prioridade relativa. Por exemplo, se o critério “prioridade do ativo” for preenchido com valor A deve-se considerar uma prioridade maior do que se esse campo fosse preenchido com o valor B. Portanto, ele deve receber um peso maior. Essa análise pode ser realizada entre os valores de um mesmo critério, assim como entre os valores de critérios diferentes.

A Figura 6 ilustra a visualização de uma ordem de manutenção no sistema e destaca os campos que devem ser analisados.

Na ferramenta em análise, os pesos foram definidos para cada um dos critérios baseando-se no trabalho realizado anteriormente pela equipe do Porto Sudeste. Os valores utilizados foram reavaliados e alterados, nos casos necessários, além de terem sido acrescentadas faixas e critérios. A Tabela 9 apresenta os pesos atribuídos para os critérios criticidade do ativo, status da ordem, prioridade do ativo, tipo de ordem e prioridade da ordem. Já a Tabela 10 apresenta os pesos atribuídos para a data de vencimento, determinado pela relação entre data atual e a data de vencimento da OM.

Após a definição dos pesos para cada critério, o cálculo de prioridade é realizado. Nessa etapa, a matriz de pesos composta pelos valores atribuídos a cada um dos critérios

Figura 6 – Visualização de uma OM no sistema

The screenshot displays a complex software interface for managing maintenance orders. The title bar reads 'Exibir Manutenção Condicional 202206394489: cabeçalho central'. The interface is divided into several sections:

- Order Header:** Includes fields for 'Ordem' (202206394489), 'Status' (RETR), and 'Tipo de Ordem' (YCM).
- Responsíveis:** Lists personnel such as 'PGUON' and 'KISLEY ADAMS CATAZINO'.
- Dados de localização:** Contains location details like 'Cen.localiz.' (4254) and 'Localização' (Conceição Itabirito MPL:1001).
- Dados:** Shows dates like 'Inic. base' (01.05.2023) and 'Fim base' (02.05.2023).
- Objeto de referência:** Details the equipment and location, such as 'CHAVE DE EMERGENCIA 7 TR-1260CH-05'.
- Data de Vencimento:** Highlights the due date as '30.04.2023 23:59:59'.
- 1ª operação:** Provides information for the programmer, including 'Operação' (YPM) and 'ChvContr' (YPM).

 Red boxes are used to highlight specific fields: 'Tipo de Ordem' (YCM), 'Status' (RETR), 'Prioridade da OM' (Média), 'Prioridade do Ativo' (A), and 'Data de Vencimento' (30.04.2023 23:59:59).

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 9 – Pesos atribuídos a cada critério avaliado

Parâmetro	Valor	Peso
Criticidade do ativo	ATCR	10000
	RELG	100
	MAMB	100
	SAUD	100
	SEGU	100
	URGE	50
	AGRP	50
Status da ordem	RETR	50
	A	5
	B	4
	C	2
Prioridade do ativo		1
	YPM	10
	YCA	10
	YCO	4
	YCM	3
	YIM	2
	YSS	1
	YOP	1
	YRR	1
Tipo de ordem	Alta	5
	Média	3
	Baixa	1

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10 – Pesos atribuídos de acordo com relação entre data atual e a data de vencimento da OM

Parâmetro	Dias entre data atual e data de vencimento (x)	Peso
Vencida	$x < -63$	5,00
	$-63 \leq x < -56$	4,83
	$-56 \leq x < -49$	4,67
	$-49 \leq x < -42$	4,50
	$-42 \leq x < -35$	4,33
	$-35 \leq x < -28$	4,17
	$-28 \leq x < -21$	4,00
	$-21 \leq x < -14$	3,83
	$-14 \leq x < -7$	3,67
	$-7 \leq x < 0$	3,50
No prazo	$0 \leq x < 7$	3,31
	$7 \leq x < 14$	3,12
	$14 \leq x < 21$	2,92
	$21 \leq x < 28$	2,73
	$28 \leq x < 35$	2,54
	$35 \leq x < 42$	2,35
	$42 \leq x < 49$	2,15
	$49 \leq x < 56$	1,96
	$56 \leq x < 63$	1,77
	$63 \leq x < 70$	1,58
	$70 \leq x < 77$	1,38
	$77 \leq x < 84$	1,19
	$84 \leq x$	1,00

Fonte: Elaboração própria.

é utilizada para determinado o cálculo de prioridade de cada OM. Esse valor é obtido multiplicando cada um dos pesos atribuído a uma OM. Por fim, a ordenação das OMs é realizada. As atividades com os valores mais altos para o “*cálculo de prioridade*” devem ser consideradas como prioritárias.

4.1 Exemplo do problema de priorização de ordens de manutenção

Nesta seção, apresentamos um pequeno exemplo do problema de priorização de ordens de manutenção para facilitar o entendimento. Nesse exemplo, existe uma lista de 10 OMs para serem ordenadas. Todos os critérios apresentados na Seção 3 serão analisados: criticidade do ativo; status da ordem, prioridade do ativo, tipo de ordem, prioridade da ordem e data de vencimento. A Tabela 11 apresenta a lista de OMs e os valores para cada um dos critérios analisados.

A partir dos valores de preenchimento de cada um dos critérios das OMs apresentados na Tabela 11, é possível determinar os pesos para cada um dos critérios de cada uma das OMs. A multiplicação dos pesos de cada um dos critérios permite o cálculo de

Tabela 11 – Campos da OM

Índice	OM	Ativo crítico	RELG	MAMB	SAUD	SEGU	URGT	AGRP	RETR	Prior. ativo	Tipo OM	Prior. OM	Data venc.
1	202202325848	-	-	-	-	-	-	✓	-	A	YCM	Alta	10 dias
2	202205237413	-	-	-	-	-	-	-	✓	A	YCM	Média	8 dias
3	202300143927	-	-	-	-	✓	-	-	✓	B	YCM	Média	29 dias
4	202300324489	✓	-	-	-	-	-	-	-	A	YCM	Média	-7 dias
5	202300786105	-	-	-	-	✓	-	✓	-	B	YCM	Alta	31 dias
6	202301114059	-	-	✓	-	✓	✓	-	-	A	YCM	Média	37 dias
7	202301400011	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YPM	Média	51 dias
8	202301670629	✓	-	-	-	-	-	-	-	A	YPM	Média	33 dias
9	202301866597	✓	-	-	-	-	-	-	-	B	YPM	Média	-70 dias
10	202302150129	-	-	-	-	-	-	-	✓	A	YCM	Alta	12 dias

Fonte: Elaboração própria.

prioridade. Tanto os pesos para cada um dos critérios, como o cálculo de prioridade são apresentados na Tabela 12. Observe que as ordens já são apresentadas ordenadas da de maior prioridade para a de menor prioridade.

Tabela 12 – Pesos da OM

Índice	OM	Ativo crítico	RELG	MAMB	SAUD	SEGU	URGT	AGRP	RETR	Prior. ativo	Tipo OM	Prior. OM	Data venc.	Cálculo Prior.
6	202301114059	1	1	100	1	100	10	1	1	4	3	5	2,35	14100000
9	202301866597	10000	1	1	1	1	1	1	1	5	10	5	5	12500000
8	202301670629	10000	1	1	1	1	1	1	1	5	10	5	2,54	6350000
4	202300324489	10000	1	1	1	1	1	1	1	5	3	3	3,5	1575000
3	202300143927	1	1	1	1	100	1	1	50	4	3	3	2,54	457200
5	202300786105	1	1	1	1	100	1	50	1	4	3	3	2,54	457200
2	202205237413	1	1	1	1	1	1	1	50	5	3	3	3,12	7020
1	202202325848	1	1	1	1	1	1	50	1	5	3	3	3,12	7020
10	202302150129	1	1	1	1	1	1	1	50	5	3	3	3,12	7020
7	202301400011	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	3	1,96	58,8

Fonte: Elaboração própria.

A ferramenta implementada utiliza a multiplicação dos pesos de cada critério para a realização do cálculo de prioridade de cada OM. Esse é um método de fácil implementação, mas que pode levar a resultados incorretos. Se observarmos a Tabela 12, a ordem de manutenção 6 obteve o maior valor para o cálculo de prioridade, apesar de não estar ligada a um ativo crítico. Já as ordens 9, 8 e 4 foram classificadas nas posições 2 à 4, mesmo sendo relacionadas a um ativo crítico. Isso pode indicar uma inconsistência da ferramenta.

Além disso, na ferramenta utilizada atualmente para a priorização das OMs, um dos principais problemas observados é a existência de empates após a aplicação dos pesos para os critérios de priorização. Para que isso não ocorra, os pesos atribuídos a cada um dos valores de preenchimento dos critérios analisados precisam ser analisados com maior cuidado, além da possível implementação de critérios de desempate.

5 MÉTODO DE CÁLCULO PROPOSTO

Nesse capítulo, propomos algumas alterações no método de cálculo utilizado para priorizar as ordens de manutenção. O objetivo é priorizar as ordens com maior eficiência, de forma a refletir a prioridade operacional, e minimizar a ocorrência de empates entre as OMs. Para tanto, utilizaremos uma média ponderada dos critérios previamente definidos.

$$Prioridade_i = \bar{\alpha} CA_i + \bar{\gamma} PA_i + \bar{\delta} TO_i + \bar{\eta} PO_i + \bar{\beta} SO_i + \bar{\omega} DV_i \quad (1)$$

Após diversas análises, os pesos globais foram definidos de forma empírica. Os pesos adotados para cada um dos seis critérios de priorização utilizados podem ser observados na Tabela 13.

Tabela 13 – Pesos globais

Critério			Peso		
Criticidade do ativo	-	CA_i	$\bar{\alpha}$	=	3,8
Prioridade do ativo	-	PA_i	$\bar{\gamma}$	=	2,0
Tipo de ordem	-	TO_i	$\bar{\delta}$	=	1,6
Prioridade da ordem	-	PO_i	$\bar{\eta}$	=	1,2
Status da ordem	-	SO_i	$\bar{\beta}$	=	0,8
Data de vencimento	-	DV_i	$\bar{\omega}$	=	0,6

Fonte: Elaboração própria.

Cada um dos seis critérios de prioridade podem ser preenchidos por diversos argumentos, conforme descrito anteriormente. Cada um desses argumentos recebeu um peso que deverá ser multiplicado pelo peso global do respectivo critério. Os valores adotados serão descritos a seguir.

- Referente à **criticidade do ativo**, uma ordem de manutenção poderá ser ou não ligada a um ativo crítico. Portanto, esse critério só possui dois argumentos, conforme descrito na Tabela 14.

Tabela 14 – Pesos criticidade do ativo

Critério	Argumento	Peso
Criticidade do ativo	ATCR	10
(CA_i)	-	0

Fonte: Elaboração própria.

- O critério **prioridade do ativo** pode receber quatro diferentes argumentos, de forma individual. Cada um desses argumentos terá um peso diferente no cálculo de prioridade, conforme Tabela 15.

Tabela 15 – Pesos prioridade do ativo

Critério	Argumento	Peso
Prioridade do ativo (PA_i)	A	4,5
	B	3,5
	C	2,0
	-	

Fonte: Elaboração própria.

- Nesse trabalho, estamos considerando oito diferentes tipos de ordem de manutenção. Dessa forma, o critério **tipo de ordem** pode ser preenchido por oito diferentes argumentos, de forma individual. Cada um desses argumentos terá um peso diferente no cálculo de prioridade, conforme Tabela 16.

Tabela 16 – Pesos tipo de ordem

Critério	Argumento	Peso
Tipo de Ordem (TO_i)	YPM	$\bar{\delta}_1 = 2,40$
	YCA	$\bar{\delta}_2 = 2,40$
	YCO	$\bar{\delta}_3 = 1,50$
	YCM	$\bar{\delta}_4 = 1,20$
	YIM	$\bar{\delta}_5 = 1,00$
	YSS	$\bar{\delta}_6 = 0,75$
	YOP	$\bar{\delta}_7 = 0,50$
	YRR	$\bar{\delta}_8 = 0,25$

Fonte: Elaboração própria.

- No que se refere à **prioridade da ordem**, existem três possíveis valores para o preenchimento desse argumento, de forma individual, conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Pesos prioridade da ordem

Critério	Argumento	Peso
Prioridade da ordem (PO_i)	alta	5,0
	média	3,5
	baixa	1,5

Fonte: Elaboração própria.

- O preenchimento do critério **status da ordem** é realizado de forma distinta dos demais, uma vez que pode conter mais de um argumento. Nesse trabalho foram definidos sete diferentes argumentos com pesos apresentados na Tabela 18. Caso uma ordem tenha mais de um argumento para esse critério, os pesos de cada um dos argumentos deverão ser somados.

Tabela 18 – Pesos status da ordem

Critério	Argumento	Peso
Status da ordem (SO_i)	RELG	2,0
	URGE	1,8
	SEGU	1,4
	MAMB	1,4
	SAUD	1,4
	AGRP	1,0
	RETR	1,0

Fonte: Elaboração própria.

- Por fim, o último critério que teve pesos atribuídos aos argumentos foi a **data de vencimento** da ordem. Para esse critério, foram discretizados valores de 0 a 10 de acordo com a relação data de vencimento e data atual. A Tabela 19 apresenta os valores adotados.

Tabela 19 – Pesos data de vencimento

Critério	Argumento ($x = \text{dias entre data atual e data de vencimento}$)	Peso
Data de vencimento (DV_i)	$x < -63$	10,00
	$-63 \leq x < -56$	9,10
	$-56 \leq x < -49$	8,20
	$-49 \leq x < -42$	7,30
	$-42 \leq x < -35$	6,40
	$-35 \leq x < -28$	5,50
	$-28 \leq x < -21$	4,60
	$-21 \leq x < -14$	3,70
	$-14 \leq x < -7$	2,80
	$-7 \leq x < 0$	1,90
	$0 \leq x < 7$	1,00
	$7 \leq x < 14$	0,75
	$14 \leq x < 21$	0,50
	$21 \leq x < 28$	0,25
	$28 \leq x$	0,00

Fonte: Elaboração própria.

5.1 Critérios de desempate

O método de cálculo proposto para a priorização das ordens de manutenção conta ainda com um critério de desempate. Foi estabelecido que, nos casos em que duas OMs distintas obtenham o mesmo valor para o cálculo de prioridade, terá prioridade a ordem com maior tempo de vencimento (para as ordens já vencidas) ou menor prazo para a execução (para as ordens ainda a vencer). Ou seja, a ordem com maior prioridade, entre as

que tenham o mesmo valor para o cálculo de prioridade, será aquela que possuir o menor valor para o critério “*data de vencimento*”.

6 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

O modelo de priorização de ordens de manutenção foi implementado usando o software MATLAB[®] versão R2019a e os experimentos foram realizados em um computador Intel Xeon 2,3 Ghz com 16 GB de RAM e sistema operacional Windows Server 2019.

As instâncias com os dados das ordens de manutenção a serem priorizadas foram armazenados em uma planilha de Excel[®] e inseridos como dados de entrada do modelo implementado.

Após a priorização das OMs, o modelo implementado no software MATLAB[®] retorna um novo arquivo de Excel[®] contendo as ordens de manutenção ordenadas pela ordem de prioridade: da mais prioritária para a de menor prioridade.

6.1 Cenários

Para avaliar o método de cálculo proposto, duas instâncias foram analisadas. As instâncias correspondem a ordens de manutenção da equipe de automação dos Corredores Sudeste e Norte, respectivamente. A primeira instância corresponde a ordens de manutenção destinadas a equipe ISDHU10 da AUTOMAÇÃO USINA CONCEIÇÃO da GER AUTOMACAO CORREDOR SUDESTE e possui 198 OMs. Já a segunda instância é a INTGN30 da AUTOMAÇÃO TERCEIRO - TSA da COORD AUTOMAÇÃO PORTO NORTE e possui 151 OMs. A base de ordens foi extraída do sistema da Vale S.A. em 09/08/2023.

O modelo implementado permite que o usuário informe as ordens que deverão ser consideradas na priorização, dentro do conjunto de ordens utilizadas como dado de entrada, de acordo com dois parâmetros: ordens vencidas a no máximo x dias e ordens que faltam no máximo y dias para vencer. Nesses experimentos adotou-se $x = 365$ e $y = 30$.

Devido as grandes dimensões, uma planilha com os dados de entrada do problema é disponibilizada em <<https://acesse.dev/instanciasOM>>.

6.2 Resultados

Após restringir as ordens de manutenção que seriam consideradas na análise, filtrando apenas ordens vencidas a no máximo 365 dias e ordens que faltam no máximo 30 dias para vencer, a instância 1 passou a ter 97 OMs e a instância 2, 81 OMs.

Devido as grandes dimensões, não é possível apresentar nessa seção a ordem de prioridade de todas as OMs de cada um dos cenários analisados. Dessa forma, optamos por apresentar as 15 OMs que obtiveram maior valor para o cálculo de prioridade e, portanto, devem ser priorizadas no planejamento da manutenção. A ordem completa de priorização pode ser encontrada em <<https://acesse.dev/ResultadoPriorizacaoOM>>.

A Tabela 20 apresenta o resultado para a instância 1, enquanto a Tabela 21 retrata o resultado obtido para a instância 2.

Tabela 20 – 15 OMs prioritárias da instância 1

Índice	OM	Ativo crítico	RELG	MAMB	SAUD	SEGU	URGT	AGRP	RETR	Prior. ativo	Tipo OM	Prior. OM	Data venc.	Cálculo Prior.
1	202302633968	✓	-	-	-	-	-	-	-	A	YSS	Média	29 dias	52,40
2	202303254260	✓	-	-	-	-	-	-	-	A	YSS	Média	29 dias	52,40
3	202301620114	-	-	-	-	-	-	✓	-	A	YIM	Alta	-94 dias	23,40
4	202301082753	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YCO	Alta	-124 dias	23,40
5	202301082923	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YCO	Alta	-124 dias	23,40
6	202206233287	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YIM	Alta	-275 dias	22,60
7	202206233289	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YIM	Alta	-155 dias	22,60
8	202301818926	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YIM	Alta	-96 dias	22,60
9	202302922949	-	-	-	-	-	-	✓	-	A	YCO	Alta	-33 dias	21,50
10	202301082756	-	-	-	-	-	-	-	-	B	YCO	Alta	-124 dias	21,40
11	202301082759	-	-	-	-	-	-	-	-	B	YCO	Alta	-124 dias	21,40
12	202301082925	-	-	-	-	-	-	-	-	B	YCO	Alta	-124 dias	21,40
13	202301082927	-	-	-	-	-	-	-	-	B	YCO	Alta	-124 dias	21,40
14	202204814573	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YCM	Média	-252 dias	21,12
15	202301681714	-	-	-	-	-	-	✓	-	A	YIM	Média	-63 dias	21,06

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 21 – 15 OMs prioritárias da instância 2

Índice	OM	Ativo crítico	RELG	MAMB	SAUD	SEGU	URGT	AGRP	RETR	Prior. ativo	Tipo OM	Prior. OM	Data venc.	Cálculo Prior.
1	202303196922	✓	-	-	-	-	-	-	-	A	YPM	Alta	15 dias	57,14
2	202303444601	✓	-	-	-	-	-	-	-	A	YPM	Alta	29 dias	56,84
3	202303444613	✓	-	-	-	-	-	-	-	A	YPM	Alta	29 dias	56,84
4	202301039016	✓	-	-	-	-	-	-	-	A	YCM	Alta	25 dias	55,07
5	202301753145	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YPM	Alta	-69 dias	24,84
6	202203243404	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YCO	Alta	-337 dias	23,40
7	202204235043	-	-	-	-	-	-	✓	-	A	YCO	Média	-276 dias	22,40
8	202203187581	-	-	-	-	-	-	✓	-	A	YCO	Média	-125 dias	22,40
9	202204377469	-	-	-	-	-	-	✓	-	A	YCO	Média	-125 dias	22,40
10	202300973872	-	-	-	-	-	-	✓	-	A	YCM	Média	-104 dias	21,92
11	202203660089	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YCO	Média	-238 dias	21,60
12	202203581309	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YCO	Média	-211 dias	21,60
13	202200391848	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YCM	Média	-312 dias	21,12
14	202205986705	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YCM	Média	-139 dias	21,12
15	202205986706	-	-	-	-	-	-	-	-	A	YCM	Média	-139 dias	21,12

Fonte: Elaboração própria.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo matemático para a priorização das ordens de manutenção, estabelecendo os critérios que devem ser analisados e os pesos de cada um desses critérios na priorização.

A etapa de priorização das ordens de manutenção antecede ao planejamento das atividades de manutenção e buscar definir a ordem de prioridade em que as atividades devem ser executadas. A priorização de cada atividade é realizada de acordo com critérios previamente cadastrados na ordem de manutenção, como: criticidade do ativo, status da ordem, prioridade do ativo, tipo de ordem, prioridade da ordem e data de vencimento.

Atualmente, na Vale S.A., o planejamento das ordens de manutenção é realizado de forma manual, baseado na experiência da equipe e em informações como critérios de prioridade, restrições e disponibilidade das equipes. Sabendo que a prioridade estabelecida para cada ordem de manutenção é um dos principais parâmetros que auxiliam a estabelecer a ordem de execução das OMs, esse trabalho realizou um levantamento dos critérios que podem ser utilizados para definir uma ordem de priorização mais assertiva.

A ferramenta implementada anteriormente na Vale, descrita no Capítulo 4, utiliza a multiplicação dos pesos de cada critério para a realização do cálculo de prioridade de cada OM. Esse é um método de fácil implementação, mas que pode levar a resultados incorretos. Além disso, um dos principais problemas observados nessa ferramenta é a existência de empates após a aplicação dos pesos para os critérios de priorização.

Buscando solucionar esse problema e fornecer uma ferramenta que possa auxiliar a tomada de decisão de forma mais assertiva, propomos algumas alterações no método de cálculo utilizado para priorizar as ordens de manutenção. O objetivo é priorizar as ordens com maior eficiência, de forma a refletir a prioridade operacional, e minimizar a ocorrência de empates entre as OMs.

Os pesos atribuídos a cada um dos critérios foram analisados com maior cuidado e a média ponderada dos critérios previamente definidos passou a ser utilizado no cálculo da prioridade. Além disso, foi estabelecido como critério de desempate o tempo de vencimento (para as ordens já vencidas) ou o prazo para a execução (para as ordens ainda a vencer).

O método de cálculo proposto foi aplicado à duas instâncias, que correspondem às ordens de manutenção da equipe de automação dos Corredores Sudeste e Norte. Os resultados obtidos validam a ferramenta proposta como uma ferramenta de suporte à decisão, podendo tanto auxiliar o planejamento manual das ordens de manutenção, quanto integrar um algoritmo para o planejamento otimizado.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No contexto deste estudo, foram identificadas diversas direções promissoras para pesquisas futuras na priorização de ordens de manutenção. Como trabalhos futuros, sugere-se os seguintes estudos:

1. Avaliar novos critérios de priorização que possam ser incluídos no cálculo de prioridade, deixando o processo cada vez mais eficiente;
2. Expandir a utilização para outras áreas, avaliando critérios específicos de cada área;
3. Tornar o cálculo de priorização das ordens de manutenção uma ferramenta de suporte à decisão que auxilie o planejamento das OMs. Essa ferramenta pode auxiliar de forma direta a equipe ou fazer parte de um modelo de programação de ordens de manutenção que inclui outras questões, como disponibilidade de material, equipe de execução e parada de ativos.

REFERÊNCIAS

BARROS, D. A.; CALIMAN, R. L.; GONÇALVES, T. J. M. **Aplicação de metodologia multicritério para apoio à decisão de priorização de ordens de serviço da oficina central de uma usina siderúrgica**. Cariacica: Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Produção com Ênfase em Tecnologias da Decisão - Instituto Federal do Espírito Santo, 2022. Citado na página 21.

BONASSA, R. E. **Um sistema inteligente para a priorização de atividades de manutenção industrial**. Dois Vizinhos: Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Software - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022. Citado na página 21.

COELHO, D. G.; COTA, L. P.; SOUZA, M. J. F. Um estudo de algoritmos heurísticos construtivos e de posicionamento para um problema de planejamento de ordens de manutenção. In: Congresso Brasileiro de Automática (CBA) 2022. Fortaleza-CE: Sociedade Brasileira de Automática (SBA), 2022. Citado na página 21.

KARDEC, A.; ESMERALDO, J.; LAFRAIA, J.; NASCIF, J. Gestão de ativos. **Quality-mark**, Rio de Janeiro, 2014. Citado na página 16.

MAGNAGO, B. A. K.; COTA, L. P.; SOUZA. Algoritmos heurísticos para o sequenciamento de ordens de manutenção de tecnologia em um horizonte de curto prazo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL(2023). Vitoria-ES: Simpósio Brasileiro de Pesquisa operacional(2023), 2023. Citado na página 21.

MOTA, W. M. **Modelo multicritério de apoio à decisão em grupo para priorização de ordens de serviço de manutenção corretiva em uma empresa de transporte e logística**. Mossoró: Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Produção - Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, 2020. Citado na página 20.

PAZETO, A. C. **Modelo de priorização da manutenção corretiva em ambientes hospitalares**. Uberlândia: Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Biomédica - Universidade Federal de Uberlândia, 2016. Citado na página 20.

SILVA, M. M. d. O. **Desenvolvimento de um software protótipo para priorização de ordens de serviço no HC-UFU**. Uberlândia: Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Biomédica - Universidade Federal de Uberlândia, 2018. Citado na página 20.