

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**JONATAS SANTANA OBAL**

**METODOLOGIA HEURÍSTICA NA OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DOS  
PLANOS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA E PREDITIVA NA AGROINDÚSTRIA**

**PONTA GROSSA**

**2023**

**JONATAS SANTANA OBAL**

**METODOLOGIA HEURÍSTICA NA OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DOS  
PLANOS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA E PREDITIVA NA AGROINDÚSTRIA**

**Heuristic methodology in the optimization of the schedule of preventive and  
predictive maintenance plans in agroindustry**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia de  
Produção, do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção, da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco

**PONTA GROSSA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Ponta Grossa**



JONATAS SANTANA OBAL

**METODOLOGIA HEURÍSTICA NA OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DOS PLANOS DE MANUTENÇÃO  
PREVENTIVA E PREDITIVA NA AGROINDÚSTRIA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 23 de Fevereiro de 2023

Dr. Antonio Carlos De Francisco, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Cassiano Moro Piekarski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Jovani Taveira De Souza, Doutorado - Universidade Estadual Paulista - Unesp

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 23/02/2023.

Dedico este trabalho a Deus, minha esposa Thalita e meus filhos Isabela e Pedro, pelos momentos de ausência.

## RESUMO

As manutenções preventiva e preditiva são realizadas de modo a evitar que falhas aconteçam, assim melhorando o desempenho das máquinas e da produção da indústria. Porém, o planejamento da manutenção preventiva e preditiva é um desafio nas indústrias, pois devem considerar questões como, por exemplo, os custos destinados à manutenção, o tempo de cada equipamento disponível para manutenção e o levantamento prévio das considerações do fabricante. Além destas questões, a programação dos planos de manutenção é uma tarefa humanamente difícil no que tange à distribuição das tarefas pela sua criticidade aos técnicos nos dias de trabalho, sujeito a restrições de tempo de trabalho, dia de execução, entre outras. Neste sentido, este trabalho propõe uma metodologia heurística na otimização da programação dos planos de manutenção preventiva e preditiva na agroindústria. Considerando os dados dos planos de manutenção, o pré-processamento destes verifica a disponibilidade de *staff*, tanto para planos que devem ocorrer em dias específicos quanto para os que podem ser realizados em qualquer dia da semana. Com os dados pré-processados, a heurística proposta deverá ser executada semanalmente, e sua saída é uma lista de planos que serão realizados em cada dia da semana. A heurística foi aplicada em um caso de teste e posteriormente replicado em um caso real de uma agroindústria. A aplicação da heurística em caso fictício permitiu a verificação de seu funcionamento, enquanto sua aplicação em dados reais demonstrou sua eficiência e respondeu questões que estavam além das expectativas. Os dados do caso real foram extraídos de 1680 ativos do SAP (do alemão: *Systemanalysis Programmentwicklung*, que, em português, significa Desenvolvimento de Programas para Análise de Sistema) para aplicação na heurística. Desta aplicação verificou-se a necessidade de treze semanas para colocar todos os planos em dia, ou seja, para que nenhum plano fique com *deadline* negativo. A média de planos programados por semana é de 432, sendo programadas, em média, em 3 segundos pela heurística. Os resultados foram apresentados ao gestor de manutenção, o qual recebeu com surpresa que 75% dos planos de manutenção estavam com *deadline* negativo. Em relação ao output, a rapidez de solução apresentada pela heurística foi um ponto muito positivo. Isto irá diminuir drasticamente o tempo de planejamento do planejador, que hoje leva em torno de dois dias para planejar a semana, enquanto a heurística o faz quase instantaneamente.

Palavras-chave: manutenção; heurística; programação.

## ABSTRACT

Preventive and predictive maintenance are carried out to prevent failures, thus improving the performance of machines and industry production. However, the planning of preventive and predictive maintenance is a challenge in industries, as they must consider issues such as, the allocated cost to maintenance, the available maintenance time of each equipment and the previous survey of the manufacturer's considerations. In addition, programming maintenance plans is a humanly difficult task in terms of the distribution of tasks due to their criticality to technicians on working days, subject to restrictions on working time, day of execution, among others. In this sense, this work proposes a heuristic methodology to optimize the programming of preventive and predictive maintenance plans in the agroindustry. Considering maintenance plan data, their pre-processing verifies the availability of *staff*, both for plans that must occur on specific days and for those that can be carried out on any day of the week. With pre-processed data, the proposed heuristic should be executed weekly, and its output is a list of plans that will be carried out on each day of the week. The heuristic was applied in a test case and later replicated in a real case of an agroindustry. The application of the heuristic in a fictitious case allowed the verification of its operation, while its application in real data demonstrated its efficiency and answered questions that were beyond expectations. The real case data was extracted from 1680 SAP assets (from the German: Systemanalysis Programmentwicklung). From this application it was verified the need of thirteen weeks to update the plans, that is, no plan has a negative *deadline*. The average of plans in a week is 432, which is planned using around 3 seconds by the heuristic. The results were presented to the maintenance manager, who received with surprise that 75% of the maintenance plans were with negative *deadline*. Regarding the output, the speed of solution presented by the heuristic was a very positive point. This will drastically decrease the planner's planning time, which currently takes around two days to plan the week, while the heuristic does it almost instantly.

Keywords: maintenance; heuristic; scheduling.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Estrutura da dissertação .....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 2 - Tipos da manutenção .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 3 - Processo de solução de um problema de Pesquisa Operacional .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 4 - Etapas para o desenvolvimento da metodologia proposta .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 5 - Panorama geral do processo de seleção de artigos .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 6 - Nuvem de palavras baseada nas palavras-chave utilizadas pelos autores da revisão sistemática .....</b>	<b>28</b>

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Criticidade 1ª Semana .....	44
Gráfico 2 - Criticidade 13ª Semana .....	44
Gráfico 3 - Criticidade por semana .....	45
Gráfico 4 - <i>Deadline</i> 1ª Semana.....	45
Gráfico 5 - <i>Deadline</i> 13ª Semana.....	46
Gráfico 6 - <i>Deadline</i> Semanal .....	46
Gráfico 7 - <i>Staff</i> 1ª semana .....	47
Gráfico 8 - <i>Staff</i> 13ª semana .....	47
Gráfico 9 - Total de Operações por <i>Staff</i> .....	48



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação de trabalhos e a relação de abordagens encontradas com aderência ao tema da pesquisa .....	29
Quadro 2 - Informações de um plano de manutenção .....	31
Quadro 3 - Destaque de 5 linhas da tabela de dados de input.....	36
Quadro 4 - <i>Staff</i> disponíveis para o caso fictício .....	36
Quadro 5 - Resultado da aplicação da heurística no caso fictício - Semana 1..	38
Quadro 6 - Horas de trabalho de cada especialidade .....	38
Quadro 7 - Resultado da aplicação da heurística no caso fictício - Semana 2..	40
Quadro 8 - Programação dos planos de manutenção preventive.....	40
Quadro 9 - <i>Staff</i> disponíveis nos cinco dias úteis.....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampére
ANPV	Analista de Preditiva
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
°C	Grau Celsius
ELEG	Elétrica
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedures</i>
INSG	Instrumentação
LUBG	Lubrificação
MACG	Civil
MECG	Mecânica
mm	Milímetro
NBR	Norma Brasileira
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
SAP	<i>Systemanalysis Programmentwicklung</i>
T_GL	Terceirizado de compressores
T_MCM	Terceirizado de ar-condicionado
TAG	Etiqueta
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>12</b>
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos .....	12
<b>1.2</b>	<b>Justificativa da pesquisa</b> .....	<b>12</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura da dissertação</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Manutenção industrial</b> .....	<b>16</b>
2.1.1	Corretiva .....	17
2.1.2	Preventiva .....	18
2.1.3	Preditiva .....	19
<b>2.2</b>	<b>Heurísticas no auxílio à tomada de decisão</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Trabalhos relacionados</b> .....	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Etapas para o desenvolvimento da pesquisa</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>Revisão de literatura</b> .....	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>Definição dos ativos e suas respectivas peças sobressalentes (<i>spare parts</i>)</b> .....	<b>29</b>
<b>3.4</b>	<b>Definição de criticidade dos ativos</b> .....	<b>30</b>
<b>3.5</b>	<b>Definição dos planos de manutenção</b> .....	<b>30</b>
<b>3.6</b>	<b>Definição dos parâmetros, critérios e variáveis da heurística</b> .....	<b>32</b>
<b>3.7</b>	<b>Descrição da heurística</b> .....	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultados obtidos em instância de teste</b> .....	<b>35</b>
<b>4.2</b>	<b>Resultados obtidos com dados reais</b> .....	<b>41</b>
<b>4.3</b>	<b>Validação dos resultados e discussões</b> .....	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE A - Planilha com os planos de manutenção extraídos do SAP</b> .....	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A manutenção é uma combinação de ações técnicas e administrativas associadas, que são pretendidas para manter um ativo ou restaurá-lo em um estado no qual ele possa executar sua função exigida (BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016). Até 1940 a manutenção era considerada um gasto desnecessário e era realizada apenas para correção de ativos, quando este falhava. A manutenção não era considerada parte do sistema de produção, nem reconhecida como parte impactante no faturamento (BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016). Mas, ao longo dos anos, juntamente com a evolução das indústrias e o aumento da competitividade, houve o avanço das manutenções que foram divididas em três principais linhas: corretiva, preventiva e preditiva (ABRAMAN, 2017).

A manutenção corretiva é realizada após uma pane e tem como objetivo recolocar o ativo em operação novamente. Já a manutenção preventiva é realizada em intervalos pré-determinados, com o intuito de reduzir as falhas e a degradação do ativo. Na linha de antecipação, a manutenção preditiva é baseada em técnicas sistemáticas de análise, utilizando monitoramento da saúde dos componentes, assim podendo antecipar as ações de manutenção, evitando uma falha e conseqüentemente as manutenções corretivas (ABNT, 1994).

Outro desafio é o planejamento da manutenção, que precisa ser feito em três níveis: estratégico, tático e operacional (BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016). No nível estratégico, são consideradas, dentre outras, a missão e visão da empresa e os custos destinados à manutenção. No nível tático encontram-se as questões de tempo de cada equipamento disponível para manutenção, o levantamento prévio das considerações do fabricante, a disponibilidade de técnicos em cada especialidade necessária e as ferramentas apropriadas. No nível operacional a questão chave é a programação, que se realizado em período apropriado irá aumentar a disponibilidade do ativo. A programação da manutenção é um desafio para os especialistas tomadores de decisão, que realizam uma tarefa humanamente difícil.

Considerando a agroindústria, programar as manutenções preventiva e preditiva na sua periodicidade é importante pois além de considerar a necessidade do equipamento leva em conta as oportunidades de sua realização com a indústria parada (total ou parcialmente) nos períodos entre safras.

Diante disto, o controle da manutenção é fundamental para garantir que o planejado seja executado, e de forma correta. Isso envolve monitoramento, coleta de dados, análises e tomadas de decisão para resolver os desvios encontrados e garantir a melhoria contínua.

Neste contexto, surge a seguinte questão de pesquisa:

Como avaliar os ativos e propor a programação de ordens de serviço para realização dos planos de manutenção preventiva e preditiva de modo mais eficiente?

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Propor uma metodologia heurística na otimização da programação dos planos de manutenção preventiva e preditiva na agroindústria.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Para atingir o objetivo geral foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- i. definir os ativos e suas respectivas peças sobressalentes (*spare parts*);
- ii. aplicar metodologia para definição de criticidade dos ativos;
- iii. definir os planos de manutenção;
- iv. definir os critérios, variáveis e parâmetros para heurística de programação de planos de manutenção;
- v. propor heurística para definição da programação de planos de manutenção;
- vi. aplicar a heurística proposta em dados fictício e reais;
- vii. validar os resultados obtidos.

Após os objetivos definidos, serão apresentadas as justificativas para o desenvolvimento da pesquisa.

## **1.2 Justificativa da pesquisa**

Esta pesquisa se justifica nos seguintes aspectos: ineditismo, relevância e contribuição para a área de conhecimento e setor a que se aplica.

Quanto ao ineditismo, até onde se tem conhecimento, não há heurística para programação de ordens de serviço para realização dos planos de manutenção. Esta

heurística irá otimizar a distribuição dos planos de manutenção, além de impactar o desempenho do planejamento do especialista, que deixará a tarefa de programar por tentativa e erro as ordens de serviço, e poderá se dedicar ao controle da manutenção.

O estudo de caso apresentado nesta pesquisa é um modelo relevante para outras indústrias, no que se refere à avaliação da saúde dos equipamentos e à aplicação da heurística proposta para programação das ordens de serviço, aumentando a competitividade entre elas.

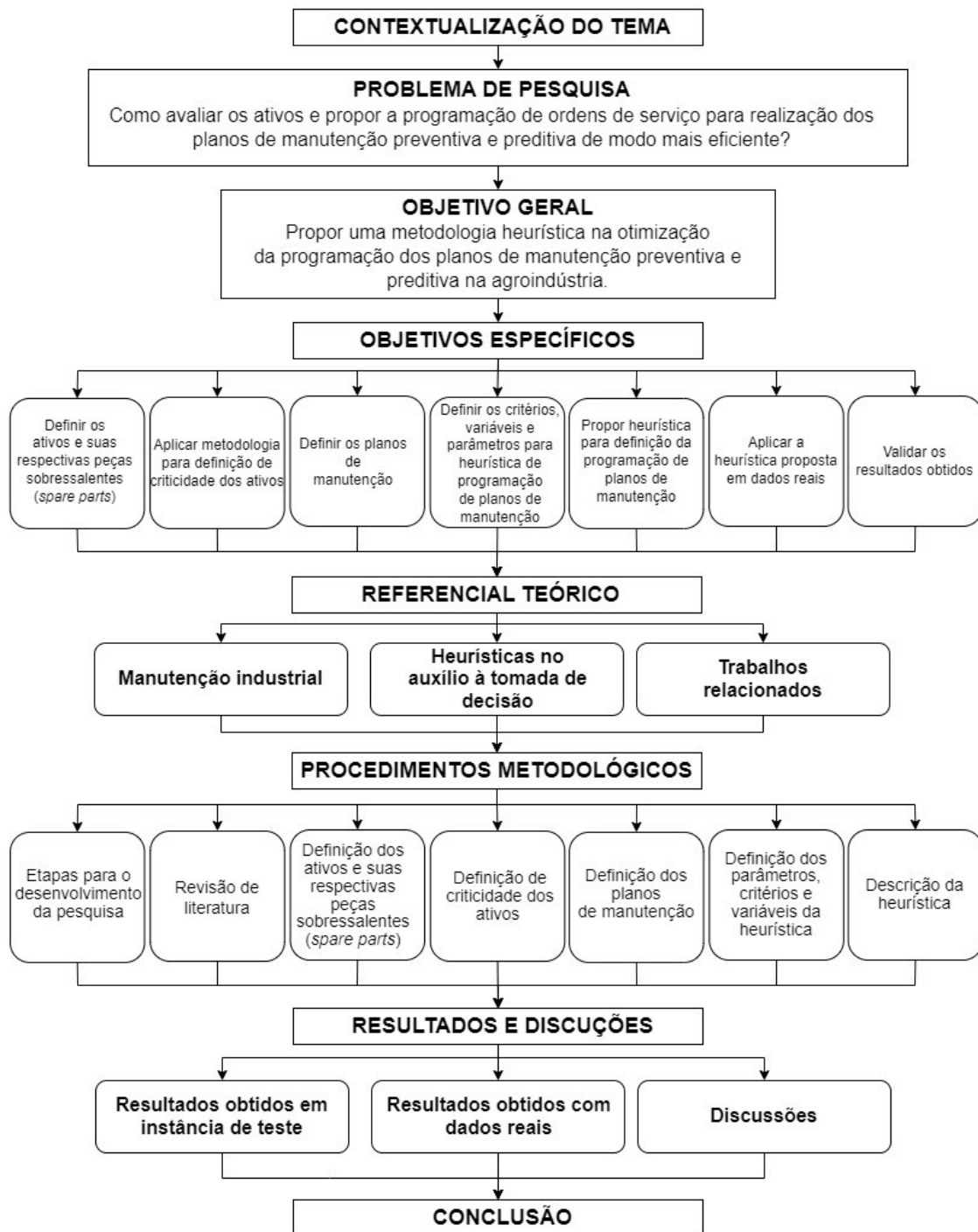
Este trabalho impacta o setor a que se aplica economicamente, sustentavelmente e socialmente. Quando o planejamento de manutenção é realizado de forma otimizada, papel da heurística proposta na pesquisa, reduz-se o número de panes e, como consequência, há um aumento da disponibilidade do equipamento, reduzindo assim o custo por unidade produzida - impacto econômico. Além disso, utiliza-se menos materiais para manutenção e tem-se um produto final mais confiável, já que o número de falhas nos equipamentos é menor - impacto sustentável. Socialmente há um ganho significativo no trabalho do gestor da manutenção, do planejador e dos técnicos que executam o planejamento, haja vista melhor desempenho das três áreas de trabalho.

Em relação aos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS), três se aplicam à pesquisa: (8) Trabalho decente e crescimento econômico; (9) Indústria, inovação e infraestrutura; (12) Consumo e produção sustentáveis.

Com a justificativa do estudo apresentada, a seção seguinte apresenta a estrutura da dissertação para alcançar os objetivos apresentados em 1.1

### 1.3 Estrutura da dissertação

Figura 1 - Estrutura da dissertação



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 1 nos mostra a estrutura da dissertação e baseado na pergunta apresentada na seção 1 e considerando os objetivos traçados na seção 1.1, a seção 2 apresenta o referencial teórico em três partes, sendo elas: 2.1 Manutenção industrial, na qual os tipos de manutenção serão detalhados e sua importância para a

indústria; 2.2 Heurísticas no auxílio à tomada de decisão, onde está apresentada a definição deste procedimento metodológico, enfatizando as heurísticas para *scheduling* (programação); culminando com a apresentação dos trabalhos relacionados ao tema da pesquisa em 2.3, com a revisão sistemática do tema.

Os procedimentos metodológicos são apresentados na seção 3, e irão descrever como os dados de entrada do problema serão explorados (seções 3.1 e 3.2); a definição dos ativos e suas respectivas peças sobressalentes (*spare parts*), assim como a sua respectiva criticidade (seção 3.3 e 3.4); como a programação do planejamento dos planos de manutenção será realizada de maneira otimizada pela heurística proposta (seções 3.5, 3.6 e 3.7).

Na seção 4 apresenta resultados obtidos com a aplicação da heurística num caso teste (seção 4.1) e posterior aplicação a um caso real (seção 4.2), com a validação dos resultados e discussões na seção 4.3.

Por fim, a conclusão é apresentada na seção 5, assim como sugestões de trabalhos futuros.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo retrata a fundamentação teórica sobre manutenção industrial, heurísticas e os principais trabalhos relacionados ao presente estudo.

### 2.1 Manutenção industrial

Segundo Tavares (1999), a manutenção industrial seguiu e teve seus avanços juntamente com as revoluções industriais. Inicialmente, com a mecanização no século XVIII, apenas a manutenção corretiva era executada, ou seja, realizados os reparos somente após a pane. Com a Taylorização no início do século XX, a manutenção industrial também evoluiu e iniciaram-se os serviços de limpeza, lubrificação e reparos após a pane, ou seja, em sua essência, corretiva. Nesta época as indústrias não possuíam equipes especializadas em manutenção e a produtividade não era algo prioritário.

Com a Segunda Guerra Mundial surgiu a necessidade de aumentar a produtividade das indústrias e assim foram criados os departamentos de manutenção, e com eles o questionamento de como evitar as panes, assim passando a se preocupar não somente em reparar algo já danificado, mas em como evitar estas falhas para produzir ao máximo (GUIMARÃES; NOGUEIRA; SILVA, 2012).

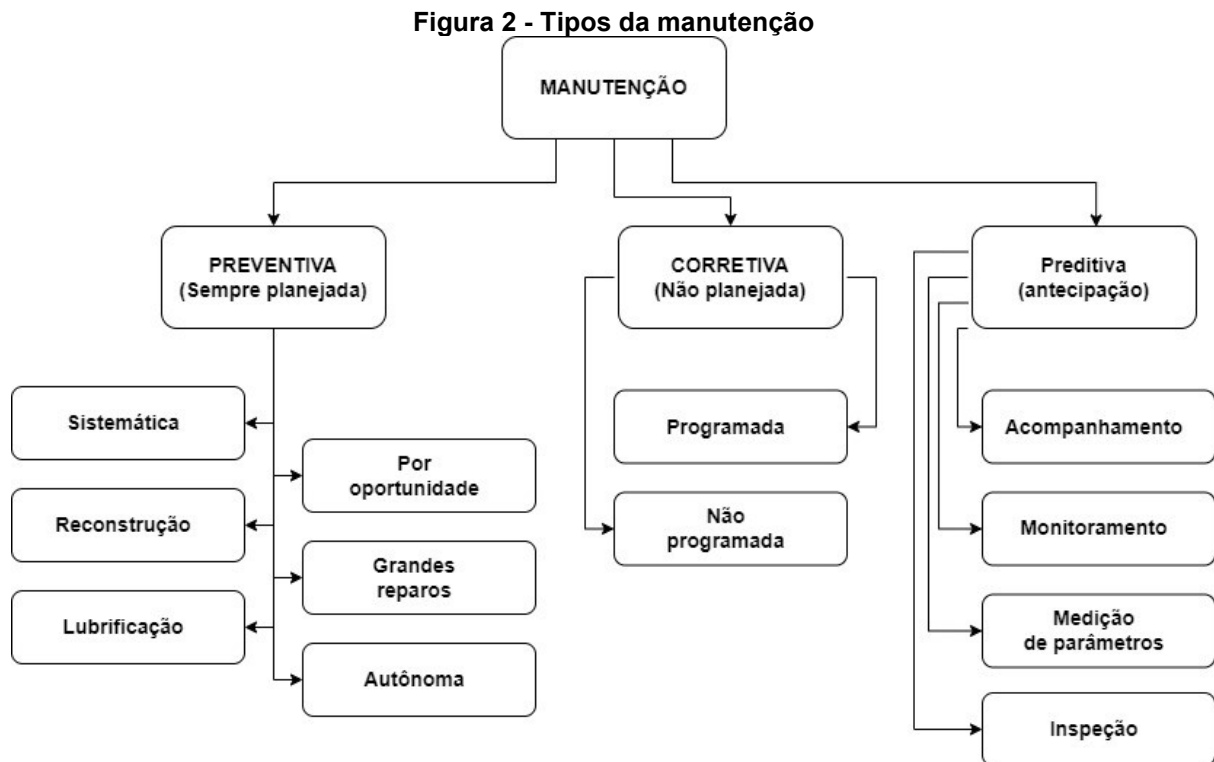
Com o desenvolvimento da aviação comercial, houve mais um avanço na manutenção, agora com novos critérios de manutenção preventiva, pois não havia a possibilidade de realizar uma manutenção corretiva durante um voo. Neste período, a manutenção inicia a realizar as análises de falhas para antecipar-se às falhas, deixando de ser algo apenas para reparar e passando a ser algo técnico (RICCO, 2020).

Com a expansão do uso dos computadores, a automação se fortaleceu e a manutenção inseriu-se em todos os processos de controle e análise, passando a utilizar de outros meios para reparar além da caixa de ferramentas, assim antecipando-se às falhas e indicando os melhores períodos para a execução da manutenção preventiva (OTANI; MACHADO, 2008).

A era atual, é da manutenção condicionada ou manutenção preditiva, que consiste em executar a manutenção nos componentes quando houver a necessidade. A manutenção é realizada preventivamente ao ser detectado por sensores um

desgaste, a elevação de temperaturas, o desalinhamento e assim evitando a degradação do equipamento.

Dentro destas três principais linhas de manutenção, a manutenção corretiva, preventiva e preditiva há outras subdivisões, como mostra a Figura 2 (TROJAN; MARÇAL; BARAN, 2013).



Fonte: Adaptado de Trojan, Marçal e Baran (2013).

Para uma melhor compreensão das divisões e subdivisões, as seções a seguir mostram o detalhamento de cada um dos tipos de manutenção apresentados na Figura 2.

### 2.1.1 Corretiva

Segundo Guimarães, Nogueira e Silva (2012), a manutenção corretiva tem como objetivo, restaurar o objeto ao seu estado operacional por meio de ações corretivas após uma pane, ou seja, este tipo de manutenção só é realizada após a quebra do equipamento. Os reparos podem ser realizados de duas formas, a corretiva programada e não programada.

Na manutenção corretiva programada, o equipamento é reparado após um planejamento de manutenção, aguardando o levantamento dos recursos necessários e a inclusão em um cronograma de manutenções.

Já a manutenção corretiva não programada, a equipe é mobilizada para agir logo após a pane, ignorando qualquer cronograma de manutenção.

### 2.1.2 Preventiva

Para Marques (2009), a manutenção preventiva ocorre sempre de maneira planejada e tem como objetivo aumentar a vida útil e/ou a confiabilidade do equipamento. Pode ser realizada através de manutenções relativamente pequenas, exigindo um curto tempo, como inspeções visuais, lubrificações, testes e substituições de peças ou componentes, ou por meio de grandes revisões que requerem uma quantidade maior de tempo, planejamento e recursos para a execução.

Na manutenção sistemática, é pré-determinado um prazo para a execução desta manutenção, por exemplo, a cada seis meses substitui-se os filtros do ar-condicionado, ou ainda, uma vez por semana é realizada uma rota de inspeção das condições da barragem (ABREU, 2022).

A manutenção por oportunidade, é executada em ocasiões em que pode-se adiantar uma manutenção sistemática por uma ocorrência interna ou externa. Interna ocorre quando há uma falha em um componente e utiliza-se deste período de reparo para realizar a manutenção preventiva nos demais componentes. Já a ocorrência externa o equipamento está ocioso, por exemplo, acabou a matéria prima, ou o estoque está cheio, assim pode-se adiantar o plano de manutenção, respeitando o período de tolerância do plano (TROJAN; MARÇAL; BARAN, 2013).

A reconstrução normalmente é realizada de duas formas, a parcial e a total, um exemplo é a pavimentação de uma rodovia, pode-se realizar a reconstrução do trecho danificado ou pavimentar toda a via novamente. Para determinar qual a forma de reconstrução, deve-se levar em consideração alguns aspectos: estudar o estado atual do equipamento ou objeto e projetar o estado ao decorrer do tempo, para então apresentar uma priorização e um orçamento. Com o estado do objeto, priorização e orçamento, cria-se o cronograma detalhando as execuções (BRANCO FILHO, 2008).

### 2.1.3 Preditiva

A manutenção preditiva está associada às práticas de manutenção com caráter preventivo e antecipado. Para tal manutenção se requer instrumentos e técnicas mais qualificadas para a execução, como por exemplo, a qualificação do técnico de preditiva, ele deve possuir um bom conhecimento de espectros de frequência de vibração de rolamentos para a elaboração de um prognóstico da falha (ABREU, 2022).

O acompanhamento periódico de equipamentos ou máquinas por inspeções e coletas de dados foram criadas e utilizadas atualmente, dentre as principais, estão: Análise de vibração, ultrassom, balanceamento dinâmico, termografia, análise de óleo lubrificante e hidráulico, alinhamento, análise de óleo isolante (utilizado principalmente em disjuntores e transformadores) e a assinatura elétrica (OTANI; MACHADO, 2008).

Monitoramento é uma técnica que ocorre periodicamente e os dados coletados são armazenados para obter histórico e comparar com as coletas mais recentes, analisando a evolução dos sintomas da máquina monitorada.

Medição de parâmetros de vibração, temperatura, corrente, qualidade de lubrificantes são o resultado dos monitoramentos realizados, estes resultados são comparados com os obtidos quando a máquina está em ótimo estado, ou se baseia em uma galeria de resultados ótimos, por exemplo, resultado de uma análise de óleo é realizado a contagem do número de partículas encontradas no lubrificante, assim determinando o desgaste do equipamento (NEPOMUCENO, 2014).

## 2.2 Heurísticas no auxílio à tomada de decisão

A tomada de decisões é o processo pelo qual são escolhidas algumas ou apenas uma entre muitas alternativas para as ações a serem realizadas (FÁVERO, 2012). Alguns exemplos de decisões podem ser listados: a escolha de uma alternativa de localização dentre várias disponíveis; a determinação da melhor composição de uma carteira de ações; a escolha de uma entre diversas alternativas que balanceiam os recursos de produção, como mão de obra disponível, contratação, demissão e estoque.

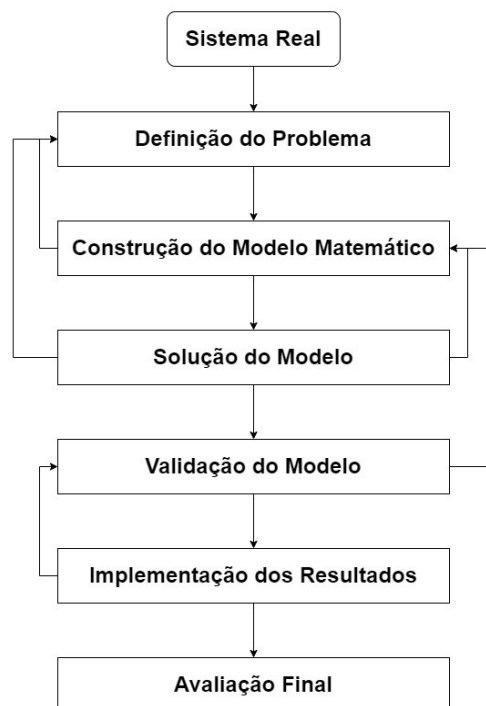
Diante da necessidade e complexidade de tomada de decisão de alguns problemas, a Pesquisa Operacional consiste na utilização de métodos de apoio com objetivo de guiar o tomador de decisões a uma solução otimizada.

Otimização é um procedimento estratégico que envolve, por exemplo, a minimização do tempo de execução de um processo, do custo de produção ou risco, ou a maximização da qualidade e eficiência. Há inúmeras aplicações de otimização a problemas reais nas ciências, engenharias, economia e negócios, que são complexas e de difícil solução, mas que podem ser matematicamente tratadas por meio de um modelo quantitativo.

Segundo Moreira (2018), um modelo é a representação simplificada de um sistema real por meio da relação matemática entre as variáveis do problema, as limitações impostas a ele e seu objetivo.

O comportamento de um sistema real é influenciado por diversas variáveis envolvidas no processo de tomada de decisão. Devido à grande complexidade desse sistema, torna-se necessária à sua simplificação, a partir de um modelo, de forma que as principais variáveis envolvidas no sistema ou projeto que se pretende entender ou controlar sejam consideradas na sua construção, conforme mostra a Figura 3.

**Figura 3 - Processo de solução de um problema de Pesquisa Operacional**



**Fonte: Fávero (2012).**

Sob a perspectiva da Pesquisa Operacional, a partir da modelagem matemática do problema, métodos exatos, heurísticos ou metaheurísticos podem ser utilizados na busca de solução.

Os métodos exatos são algoritmos de busca à solução ótima através da combinação ou comparação de todas as soluções possíveis. Tem a grande vantagem de apresentar solução ótima para o modelo, porém a desvantagem de alto custo computacional, pelo tempo despendido na obtenção de solução.

Os problemas reais dificilmente podem ser resolvidos por métodos exatos num tempo computacional adequado. Desta forma, lança-se mão de algoritmos aproximativos, dentre os quais estão as heurísticas (TALBI, 2009).

A palavra heurística deriva do grego *heurisken*, que significa encontrar ou descobrir. Por definição, heurística é uma coleção de regras e passos que guiam uma solução à outra melhor, a qual pode (ou não) ser a solução ótima. Assim, as heurísticas encontram “boas” soluções de problemas de larga escala, com desempenho aceitável a custos aceitáveis em uma ampla gama de problemas, porém sem a garantia de alcançar a solução ótima (TALBI, 2009).

As regras intrínsecas às heurísticas são usualmente baseadas nas características do problema, na intuição, em boas ideias e processos razoáveis de busca (LAGUNA; MARTÍ, 2013). Como as heurísticas normalmente tendem a apresentar um certo grau de conhecimento acerca do comportamento do problema, geram um número menor de soluções, se comparado aos métodos exatos, por isso tendem a ser mais rápidas.

Elas podem ser classificadas em duas categorias: heurísticas específicas e metaheurísticas (CORDESSONI, 2008; FÁVERO, 2012). Heurísticas específicas são adaptadas e desenhadas para resolver um problema específico, guiada pela intuição, por regras e ideias, visando encontrar uma boa solução. Já as metaheurísticas representam uma combinação de procedimentos de busca com estratégias de mais alto nível, incluindo intensificação e diversificação, buscando escapar de ótimos locais com intuito de encontrar soluções muito próximas do ótimo global, porém sem a garantia da otimização. São exemplos de metaheurísticas: busca tabu, *simulated annealing greedy randomized adaptive search procedures* (GRASP), os algoritmos genéticos, a colônia de formigas, o enxame de partículas, entre outros.

O presente trabalho propõe uma heurística baseada no conhecimento e experiência do tomador de decisão para solucionar o problema da definição da programação de planos de manutenção.

A programação de planos de manutenção pode ser definida como o clássico problema de *scheduling*. *Scheduling* é a alocação de recursos limitados a tarefas

durante um período de tempo, com o objetivo de garantir eficiência e efetividade no uso dos recursos disponíveis (BRANKE *et al.*, 2015). Na perspectiva do *scheduling* (ou programação) dos planos de manutenção, os recursos são os mantenedores que devem ser alocados às tarefas correspondentes aos planos de manutenção, durante um período de tempo, com o objetivo de atender os planos de manutenção prioritários, respeitando limites de horas de trabalho e recurso financeiro.

Devido à complexidade, em geral, os problemas de *scheduling* são difíceis de serem resolvidos por métodos exatos, considerando seu custo computacional. Além disso, os problemas são estáticos e dinâmicos, isto é, estão sujeitos a mudanças ao longo do tempo, devido a eventos estocásticos, como a entrada de uma nova tarefa (BRANKE *et al.*, 2015). Assim, esta pesquisa propõe uma heurística, que apresenta soluções personalizadas e otimizadas (mas não necessariamente ótima), num curto espaço de tempo.

### **2.3 Trabalhos relacionados**

Os trabalhos relacionados ao tema da presente pesquisa foram definidos a partir da metodologia apresentada na seção 3.2, onde apresenta-se no Quadro 1 a relação dos artigos que serão brevemente descritos aqui.

O agendamento da manutenção é uma parte importante na gestão de ativos (MIRSAEEDI *et al.*, 2018). A definição dos intervalos de tempo entre as ações de manutenção e a priorização de suas atividades é um desafio nas redes de distribuição de energia elétrica, segundo Mirsaeeedi *et al.* (2018), o que também é fato na indústria.

Mirsaeeedi *et al.* (2018) propõe um modelo de otimização com objetivo de melhorar a confiabilidade do sistema de distribuição elétrica através do planejamento ótimo das tarefas de manutenção preventiva e alocação dos automatic switches. O modelo é aplicado em cenários de confiabilidade padrão e a análise de sensibilidade realizada demonstra a eficácia da proposta.

Guiras *et al.* (2018), propõe um modelo de otimização que é resolvido por métodos diferentes, para comparação, para solucionar o problema de planejamento de produção de manutenção de forma integrada. A abordagem tem como objetivo analisar o risco de perda de lucro seguido das decisões feitas em manufatura, sob incertezas. O modelo matemático se adequa para um único sistema de manufatura, que produz um único produto. Os resultados obtidos mostram que cada método de solução difere um do outro e pode influenciar o lucro obtido pela empresa, portanto, a

pesquisa auxilia gestores na escolha e análise de suas decisões, por apresentar informações acerca da eficiência dos métodos computacionais.

A contribuição de Long *et al.* (2018) é o estudo e desenvolvimento metodológico para solução do problema da influência das atividades de manutenção junto ao *scheduling* da produção na indústria de aço e metal. Propõe um algoritmo genético adaptado, que combina uma heurística de decodificação eficiente para resolver o novo problema de *scheduling*. Os resultados experimentais da aplicação em dados reais mostraram a eficiência da metodologia proposta.

Wan *et al.* (2018) também propõe um modelo de otimização conjunta da gestão da manutenção preventiva e preditiva, e incorpora além destes, a política de controle da produção. O modelo considera a minimização do custo geral de implementação desta integração e é resolvido com algoritmo genético. Os resultados da aplicação da metodologia mostraram um benefício econômico de aproximadamente 3% além de implicações práticas para os especialistas.

Bangalore e Patriksson (2018) apresentam um modelo de otimização para o planejamento para manutenção preventiva baseada no tempo e na informação do monitoramento da condição do equipamento (manutenção preditiva) de turbinas de vento. O desempenho é demonstrado num estudo de caso que ilustra a vantagem da metodologia proposta.

Goti *et al.* (2019a) e Goti *et al.* (2019b) propõem um modelo de otimização não-linear que tem o objetivo de determinar os valores ótimos de limites de intervenção na manutenção preventiva de equipamentos, considerando restrições de custo de manutenção preventiva e corretiva. A metodologia é aplicada com sucesso a um caso da indústria.

Wang, Li e Xie (2019) investiga atualizações e melhorias de estratégias do planejamento de manutenção preventiva para equipamentos industriais que são sucessivamente disponibilizados em contratos de aluguel. O grau de atualização ideal e o número e nível ideais de ações de manutenção preventiva são atualizados progressivamente para cada próximo período de locação para minimizar o custo total de serviço de locação esperado, considerando a taxa de uso e o histórico de implementação de manutenção. Estudos numéricos demonstraram que as atividades periódicas de manutenção preventiva superam as ações de atualização pré-aluguel.

Com a perspectiva central de incorporação da manutenção à produção, Wang, Lu e Ren (2019) propõe um modelo que considera a degradação do sistema



sob incertezas. Em cada ponto de produção, a demanda é prevista considerando novas informações dos clientes, e a degradação do sistema é confirmada por inspeção. Com a vantagem da atualização das incertezas, em cada ponto de decisão, o plano de manutenção é determinado por um balanceamento entre a antecipação/adiamento e o plano de produção é otimizado pela aplicação de uma heurística a um modelo estocástico em dois estágios. Os resultados numéricos mostram que a metodologia proposta apresenta melhorias em termos de custo total e nível de serviço.

Um dos objetivos da pesquisa de Guiras *et al.* (2019) é encontrar as datas ideais de liberação de pedidos para os diferentes componentes do processo produtivo em conjunto com o plano ideal de manutenção preventiva. Outro objetivo é quantificar o risco produtivo devido à falhas da máquina, o que impacta diretamente no tempo de espera do produto finalizado. Diferentes metaheurísticas são utilizadas para ilustrar a eficiência do modelo proposto, apresentando um plano de manutenção preventiva otimizado.

Zhang *et al.* (2020) formulam um modelo de otimização conjunta para o cronograma de horários e rotas de trens e a manutenção das linhas. Aplicam o modelo e algoritmo a um caso real numa rede ferroviária da China, que contribui com um cronograma de alta qualidade para os passageiros a um custo de manutenção reduzido. Os resultados computacionais ilustram a eficiência do modelo e algoritmo proposto.

O estudo de Liu *et al.* (2020) desenvolve um mapa e modelo de visitas de manutenção planejadas, com objetivo de reduzir tempo de manutenção, o custo e a distância, utilizando o algoritmo colônia de formigas. Os resultados mostraram consistência com o ponto de vista da qualidade organizacional da empresa.

Para além da indústria, Kamal, Taghaddos e Karimi (2021) desenvolve uma metodologia de auxílio a gerentes de manutenção de instalações prediais em hospitais, baseada em BIM (do inglês, modelagem de informações baseada em construção). A proposta apresenta um eficiente *scheduling* de planos de trabalho de manutenção, que leva em consideração a situação corrente dos pacientes, dos espaços e facilidades de manutenção, o que é demonstrado no estudo de caso de um centro de saúde no Irã.

Os eventos de manutenção podem ser otimizados se guiados pela manutenção inteligente. Segundo Nordal e El-Thalji (2021), inteligência neste contexto

significa que o sistema de gerenciamento de manutenção é capaz de usar análises de detecção (manutenção preditiva), previsão e agendamento (manutenção preventiva) para otimizar os eventos de manutenção e utilizar intervalos oportunistas. Para isto, Nordal e El-Thalji (2021) apresenta um novo modelo de simulação que permite estimar os benefícios de duração de uma peça industrial quando um misto de estratégias de manutenção e de manutenção preditiva é aplicado. O estudo de caso demonstrou que o uso desta estratégia aumentou a disponibilidade operacional, enquanto reduziu o tempo de trabalho em manutenção.

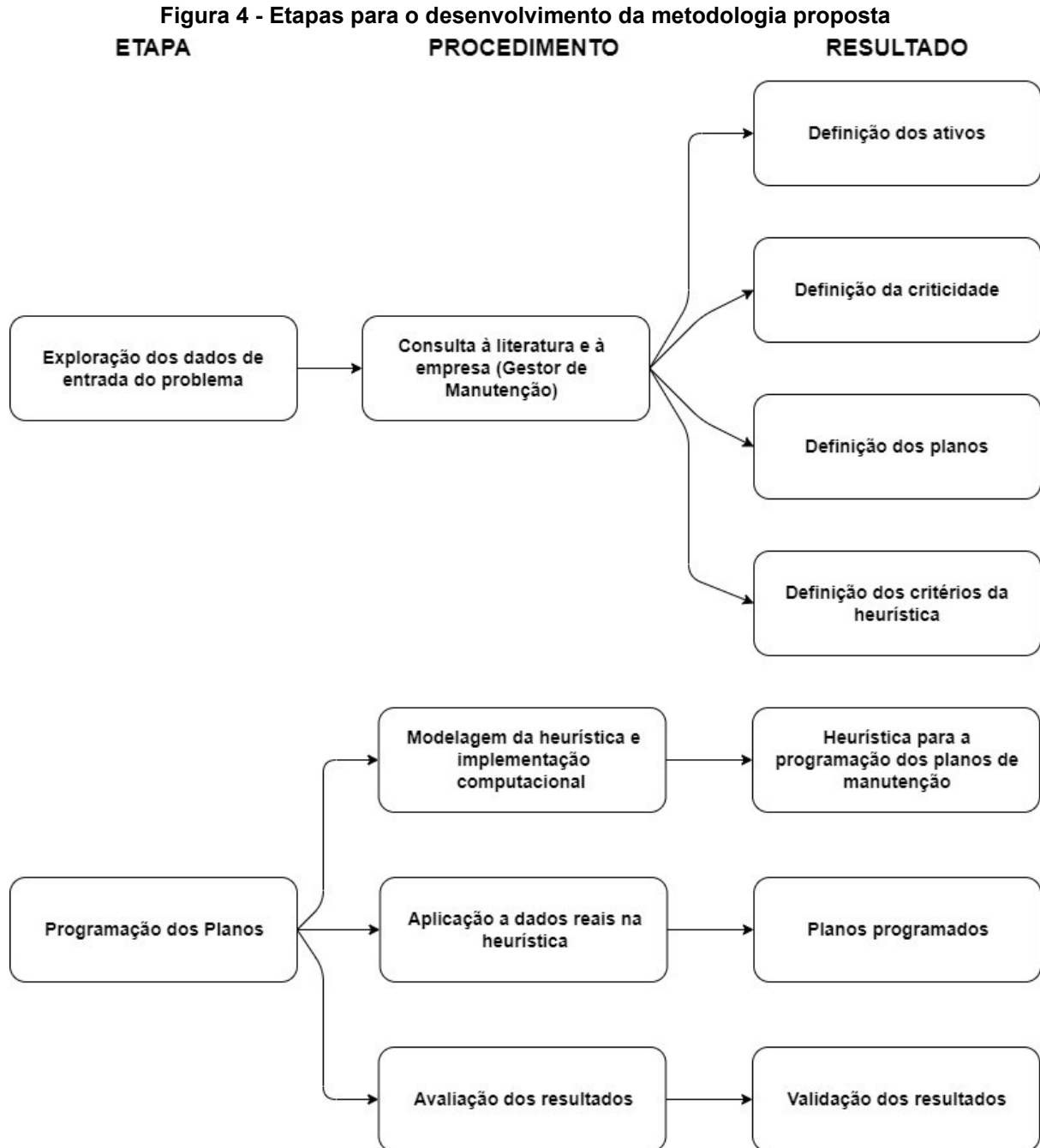
Em Hardt *et al.* (2021), uma modificação na metodologia TPM (*total production maintenance*), aplicada à dados reais numa indústria. O objetivo central do trabalho foi modificar a fase de planejamento da manutenção, tornando o esforço individual mais eficiente, já que agora é parcialmente automatizado, o que pode aumentar a produção e a eficiência da manutenção em uma companhia de interesse.

Diante deste cenário, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma heurística para programação de planos de manutenção aplicados na indústria, o qual incorpora resultados da manutenção preditiva e resulta em benefícios à gestão de manutenção e produção.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

#### 3.1 Etapas para o desenvolvimento da pesquisa

A presente pesquisa está subdividida em duas etapas, conforme demonstrado na Figura 4.



Fonte: Autoria própria (2023).

Na primeira etapa, os dados de entrada do problema são explorados, por meio de consulta à literatura e ao gestor de manutenção da indústria. Nesta etapa, os resultados esperados são a definição dos ativos, suas respectivas criticidades, a definição dos planos e os critérios a serem considerados na heurística.

A segunda etapa é a programação dos planos de manutenção, que ocorrerá com a modelagem e implementação computacional da heurística, a aplicação dos dados reais e sua validação, com o cálculo de índices de disponibilidade e confiabilidade. Os resultados gerados na segunda etapa é uma heurística para planejamento de planos de manutenção, a qual poderá ser implementada em diferentes indústrias, e o planejamento validado para um estudo de caso.

### 3.2 Revisão de literatura

A programação de manutenção é considerada uma parte importante das práticas de gerenciamento de ativos (MIRSAEEDI *et al.*, 2018). Considerando seu impacto direto com a rentabilidade da empresa, os gestores têm especial atenção ao tema, sendo uma pesquisa aplicada difundida também na academia.

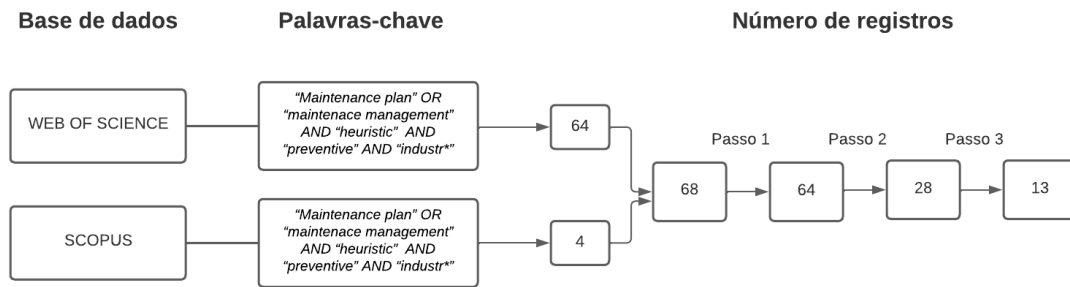
A revisão sistemática da literatura considerou a busca de artigos em inglês em duas bases de dados (*Web of Science* e *Scopus*). Primeiramente as palavras-chave utilizadas foram: “*Maintenance plan*” OR “*maintenance management*” AND “*heuristic*” AND “*preventive*” AND “*industr\**”.

A pesquisa bibliográfica demonstra que este é um tema recente, com 64 publicações registradas no *Web of Science*, tendo o primeiro registro em 2013.

O panorama geral do processo de seleção de artigos está demonstrado na Figura 5. Inicialmente os artigos duplicados foram excluídos no passo 1 e, subsequentemente, foram mantidos os artigos em inglês dos últimos 5 anos (2018-2022), no passo 2. No passo 3 mantiveram-se os artigos com aderência ao tema, resultando em 13 artigos.

Analisando as publicações disponíveis na *Web of Science* nos últimos cinco anos, foram registradas 38 categorias em 29 diferentes países, sendo as dez principais categorias e países que mais publicam.

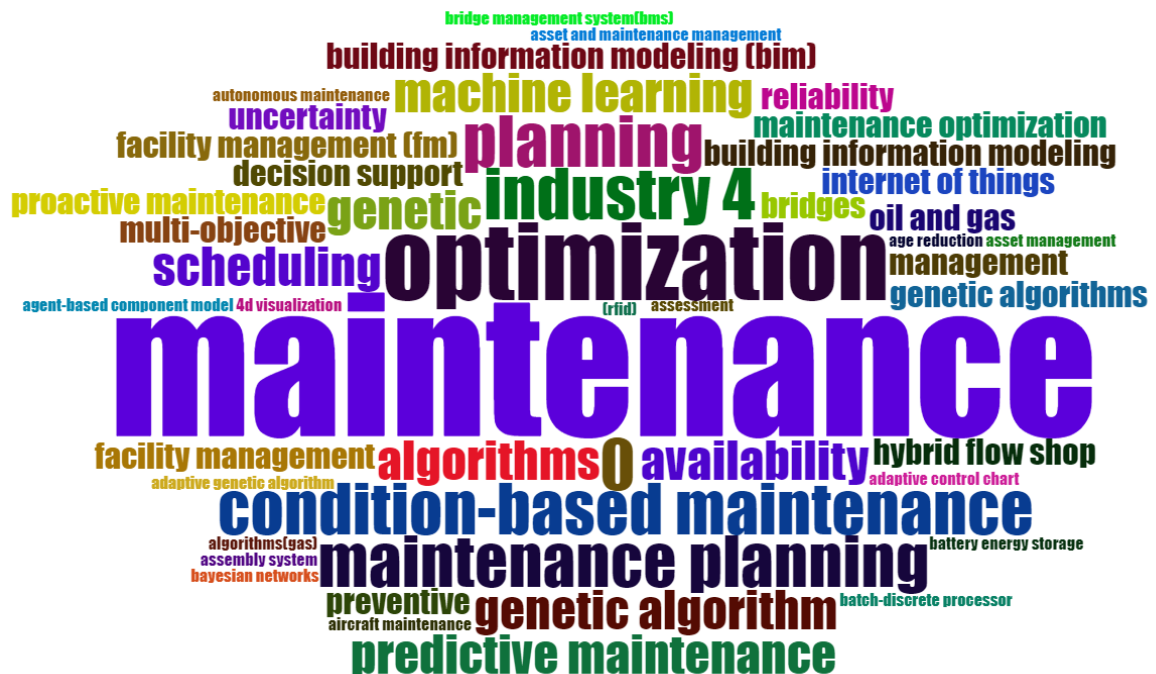
Figura 5 - Panorama geral do processo de seleção de artigos



Fonte: Autoria própria (2023).

As palavras-chave utilizadas pelos autores da revisão sistemática estão apresentadas na Figura 6. Após a observação destas, foi incorporada a palavra-chave “*scheduling*” na busca, o que permitiu a obtenção de outros dois diferentes artigos que não estavam na relação anterior. Sendo assim, consideram-se nesta revisão 15 artigos. Com base no panorama apresentado, pode-se notar que é um tema recente e pouco explorado no Brasil.

Figura 6 - Nuvem de palavras baseada nas palavras-chave utilizadas pelos autores da revisão sistemática



Fonte: Autoria própria (2023).

O Quadro 1 apresenta um resumo dos trabalhos disponíveis nas bases de dados e sua relação ao tema da presente pesquisa que serão brevemente apresentados seguindo sua principal abordagem.

**Quadro 1 - Relação de trabalhos e a relação de abordagens encontradas com aderência ao tema da pesquisa**

<b>Abordagem</b>	<b>Referência</b>
Gestão da manutenção incorporada à gestão da produção	Wan <i>et al.</i> (2018); Long <i>et al.</i> (2018); Guiras <i>et al.</i> (2018), Wang, Lu e Ren (2019); Guiras <i>et al.</i> (2019)
Agendamento de planos de manutenção	Guiras <i>et al.</i> (2018); Mirsaeedi <i>et al.</i> (2018); Guiras <i>et al.</i> (2019); Wang, Lu e Ren (2019); Goti <i>et al.</i> (2019a); Goti <i>et al.</i> (2019b); Wang, Li e Xie (2019); Liu <i>et al.</i> (2020); Zhang <i>et al.</i> (2020); Kamal, Taghaddos e Karimi (2021)
Manutenção preventiva e preditiva	Wan <i>et al.</i> (2018); Bangalore e Patriksson (2018); Wang, Lu e Ren (2019); Nordal e El-Thalji (2021)
Aplicação na indústria	Wan <i>et al.</i> (2018); Long <i>et al.</i> (2018); Guiras <i>et al.</i> (2018); Guiras <i>et al.</i> (2019); Wang, Lu e Ren (2019); Wang, Li e Xie (2019); Hardt <i>et al.</i> (2021)

Fonte: Autoria própria (2023).

Os trabalhos descritos no Quadro 1 estão apresentados na seção 2.4 do presente trabalho.

### **3.3 Definição dos ativos e suas respectivas peças sobressalentes (*spare parts*)**

Para melhor definir os ativos e suas peças podemos subdividir uma planta até chegar aos *spare parts* (BRANCO FILHO, 2008):

**Planta (ou fábrica):** é a junção de setores que tem como resultado a saída de um produto (roupas, alimentos, móveis, etc) proveniente da manipulação de matéria prima e outros.

**Setores:** são os agrupamentos de ativos ou máquinas que tem uma função na planta (como, por exemplo, setor de classificação, setor de moagem, setor de refino, etc).

**Ativos:** são compostos por um ou vários conjuntos de componentes, por exemplo, um laminador, um trocador de calor, um transportador por corrente, etc.

**Componentes:** são compostos pelas *spare parts*, (como, por exemplo, o motor, caixa redutora, bomba de óleo, etc).

**Peças (*spare parts*):** São partes ou pedaços de um todo (componente). Utilizando como exemplo a caixa redutora, as peças são: carcaça, rolamentos, engrenagens, eixos, retentores, juntas, etc.

O desempenho de cada um dos (ativos, componentes ou peças) podem afetar diretamente o processo produtivo. Desta forma, o funcionamento ideal destas deve ser garantido para, naquilo que esteja no seu limite, mantenha a qualidade do processo produtivo.

### **3.4 Definição de criticidade dos ativos**

A criticidade do ativo determina o quanto um equipamento é importante para o processo. Esta importância pode ter focos diferentes, considerando o processo produtivo (todo foco em volume de produção, os ativos que são vitais ao processo produtivo), a necessidade de manutenção (foco na execução das manutenções preventivas), a qualidade do produto (os ativos que afetam a qualidade ou não), entre outros. A forma utilizada de criticidade foi a de priorizar o processo produtivo, a qual subdivide-se em três principais linhas de criticidade (BRANCO FILHO, 2008):

Criticidade A – Quando o ativo é único, sem nenhum tipo de redundância ou possibilidade de parada, mesmo que por pequenos intervalos de tempo, sendo vitais ao processo produtivo, ocasionando paradas totais em caso de falhas ou panes.

Criticidade B – Neste caso o ativo é vital ao processo produtivo, porém possui uma redundância ou a possibilidade de parada por um determinado intervalo de tempo, afetando diretamente no rendimento da produção, sem ocasionar paradas totais em caso de uma falha ou pane, apenas reduzindo o volume produzido.

Criticidade C – São os ativos não vitais, não afetam a produção e a produtividade ao entrarem em falha ou pane.

A partir da definição da criticidade dos ativos, a programação da manutenção preventiva ou preditiva pode ser realizada, dando prioridade aos ativos de criticidade A.

### **3.5 Definição dos planos de manutenção**

Os planos de manutenção são conjuntos de atividades de manutenção preventiva e são elaborados a partir de algumas informações do fabricante dos equipamentos, como por exemplo, o tempo para lubrificação, o ciclo de acionamentos, espessuras de material, alertas em sensores, etc. O Quadro 2 mostra as principais informações que um plano de manutenção deve conter.

Quadro 2 - Informações de um plano de manutenção

Plano	Críticidade	Dia específico	Staff					Duração estimada	Periodicidade	Tolerância
			Elétrica	Mecânica	Civil	Automação	Instrumentação			

Fonte: Autoria própria (2023).

A duração que este plano de manutenção será executado, depende dos dados dos fabricantes e o grau de criticidade que foi determinada para cada ativo. É determinado a especialidade ou especialidades que irão atuar no plano de manutenção (*staff*), assim como se estima o tempo para sua execução, que é determinado pela experiência de execução. Já a periodicidade pode levar em consideração o ambiente em que este ativo está alocado, o tempo de funcionamento e a criticidade do ativo.

A tolerância para a execução do plano de manutenção depende diretamente da periodicidade do plano, assim determinando um intervalo aceitável que um plano de manutenção pode ser executado, por exemplo:

Mensal: + ou – 01 semana;

Bimestral: + ou – 02 semanas;

Trimestral: + ou – 03 semanas;

Quadrimestral: + ou – 04 semanas;

Semestral: + ou – 06 semanas;

Anual: + ou – 03 meses;

Bianual: + ou – 04 meses;

Todas as periodicidades acima de bianual: + ou – 6 meses.

Esta tolerância é importante, pois nem sempre é possível parar o equipamento na data exata em que deveria passar pela manutenção.

Além das informações contidas no Quadro 2, nas ordens de manutenção geradas a partir de um plano de manutenção, devem conter um mínimo de informações técnicas a respeito do ativo e parâmetros para os técnicos seguirem, por exemplo, a folga do rolamento deve ser de  $\pm 0,08$  mm, a espessura da chapa deve estar no mínimo em 3 mm, a corrente do motor deve estar entre 6,1 A e 11,4 A, a temperatura do mancal pode estar até 90°C, entre outras informações.



### 3.6 Definição dos parâmetros, critérios e variáveis da heurística

O objetivo central do problema em estudo consiste na definição da programação dos planos de manutenção. Considerando que os planos sejam definidos como em 3.5 e classificados pela criticidade utilizando a metodologia proposta em 3.4, a seguir estão descritos os parâmetros, critérios e variáveis do problema.

#### Parâmetros

Os parâmetros do problema são equivalentes aos dados de entrada dos planos de manutenção, conforme descritos em 3.5 e elencados a seguir:

- Classificação do plano de manutenção em relação à criticidade.
- Especialidade necessária para realização da tarefa (por exemplo: elétrica, mecânica, etc)
- Tempo disponível do *staff* de cada especialidade para execução de planos de manutenção, em horas.
- Periodicidade indicada para execução do plano de manutenção, em semanas.
- Necessidade ou não de execução do plano de manutenção em dia específico.
- Duração estimada para realização dos planos de manutenção, em horas.
- *Deadline* para execução do plano, em semanas, que quantifica o tempo para a próxima manutenção, baseada na última data de realização.

O parâmetro de *deadline* para execução do plano é frequentemente atualizado por meio de medição do(s) equipamento(s) e pode ser ajustado mediante a inspeção da saúde da máquina.

- Tolerância relativa à periodicidade, em semanas.

#### Variável

$$P_{ij} = 1, \text{ se o plano } i \text{ for executado no dia } j$$

$$0, \text{ caso contrário}$$

### Critérios

A criticidade é o parâmetro prioritário para definição da programação de manutenção, seguido do *deadline* de periodicidade.

A programação dos planos de manutenção é semanal.

### 3.7 Descrição da heurística

Considerando os dados dos planos de manutenção, o pré-processamento destes verifica a disponibilidade de *staff*, tanto para planos que devem ocorrer em dias específicos quanto para os que podem ser realizados em qualquer dia da semana. Caso haja planos infactíveis de serem realizados por falta de *staff* disponíveis, uma lista é gerada para o gestor, que deverá decidir entre a alocação de mais *staff* para execução do plano ou alteração de dia da semana para realização do referido plano, caso esta nova situação seja factível.

Com os dados pré-processados, a heurística proposta apresentada no Algoritmo 1 é executada. O algoritmo deverá ser executado semanalmente, e sua saída é uma lista de planos que serão realizados em cada dia da semana.

---

#### Algoritmo 1: Heurística para definição da programação dos planos de manutenção

---

1. Determine o *deadline* de periodicidade dos planos  $i$  por (1)

$$deadline_i = hoje + periodicidade_i - data da ultima manutencao_i \quad (1)$$

2. Ordene os planos de manutenção pelo *deadline* da periodicidade
3. Ordene os planos de manutenção pela criticidade
4. Crie lista de *staff* disponíveis conforme (2)

$$lista\ staff < - tempo\ disponivel\ por\ dia \\ * [staff\ Elétrica, staff\ Mecânica, staff\ Civil,$$

$$staff\ Automação, staff\ Instrumentação, staff\ Montagem, staff\ Lubrificação] \\ (2)$$

5. Para  $d = 1:7$ 
  - a. Enquanto a lista de *staff* tiver funcionários disponíveis
  - b. Se o plano  $i$  puder ser executado no dia  $d$
  - c. Se  $deadline_i - tolerancia_i \leq 0$

Para os planos prioritários em relação à periodicidade, faça:

- i. verifique a disponibilidade de *staff* de todas as especialidades para executar o plano de manutenção
  - ii. aloque o plano de manutenção no dia  $d$
  - iii. subtraia o tempo de trabalho nas listas de *staff* do dia  $d$
  - iv. atribua periodicidade à *deadline* do plano que será realizado
  - v. subtraia 1 à *deadline* dos demais planos de manutenção.
-

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A heurística proposta foi implementada em R, por ser um software livre em linguagem de alto nível. A heurística foi simulada utilizando-se dados teste para verificação de seu desempenho e os resultados obtidos são apresentados na seção 4.1. A seção 4.2 descreve como será realizada a aplicação da heurística em dados reais.

### 4.1 Resultados obtidos em instância de teste

Dados de simulação foram propostos, considerando 30 planos de manutenção, com dados aleatórios referentes à:

- número do plano;
- criticidade do plano;
- quantitativo de *staff* de cada especialidade (elétrica, mecânica, civil, automação, instrumentação, montagem e lubrificação);
- duração prevista da execução do plano;
- *deadline* de execução do plano;
- periodicidade.

A planilha gerada encontra-se no Apêndice A. O quantitativo de planos considerados (30) foi definido, pois em diferentes simulações pode-se perceber variabilidade nas situações de entrada dos planos, sem a necessidade de um número maior de planos, o que poderia dificultar a análise dos resultados.

Cinco linhas da tabela estão destacadas no Quadro 3, permitindo a discussão dos dados de entrada. O Quadro 4 apresenta o número disponível de *staff* por especialidade para cada dia da semana.

Foram considerados três níveis de criticidade (A, B ou C), sendo a A o plano mais crítico. Os planos podem ser executados nos sete dias da semana, e alguns deles devem ser executados em dias específicos. Quando não há restrição em relação ao dia de execução do plano, o dia específico é considerado zero.

Quadro 3 - Destaque de 5 linhas da tabela de dados de input

Plano	Criticidade	Dia específico	Staff							Duração (h)	Deadline (semanas)	Periodicidade (semanas)
			Elétrica	Mecânica	Civil	Automação	Instrumentação	Montagem	Lubrificação			
1	A	0	8	2	4	5	1	4	3	2	2	4
2	B	2	0	3	1	1	1	3	7	1	4	4
3	C	0	2	7	1	3	3	1	1	6	-1	8
4	B	1	1	2	0	5	2	8	2	5	8	12
5	A	0	4	9	3	1	2	5	3	2	5	12

Fonte: Autoria própria (2023).

Quadro 4 - Staff disponíveis para o caso fictício

Staff Dia	Elétrica	Mecânica	Civil	Automação	Instrumentação	Montagem	Lubrificação
1	10	15	8	10	10	15	7
2	10	15	8	10	10	15	7
3	10	15	8	10	10	15	7
4	10	15	8	10	10	15	7
5	10	15	8	10	10	15	7
6	2	2	1	2	2	1	0
7	2	2	1	2	2	1	0

Fonte: Autoria própria (2023).

O *deadline* para realização do plano será sempre menor ou igual à periodicidade. Valores de *deadline* negativos referem-se a planos que estão em atraso em relação à periodicidade, como é o que ocorre com o plano 3 (ver Quadro 4), por

exemplo. Para os planos executados na semana corrente, o valor de *deadline* receberá a periodicidade.

O caso de teste levou em consideração valores dos parâmetros de tempo disponível por dia de trabalho e tolerância de execução do plano de manutenção obtidos de uma indústria exemplo. Foram consideradas 8,05h de tempo disponível de trabalho, considerando 92% de 8h45min. Quanto à tolerância, considerou-se que cada plano tem 25% da periodicidade, para mais ou para menos.

Após a etapa de pré-processamento, constatou-se que os planos 20 e 24 são ineficazes por não ter *staff* disponível para realização destes nos dias em que estão alocados. Esta lista de planos ineficazes deverá ser reportada ao gestor, que avaliará qual o melhor cenário para factibilidade do plano em algum dia (ou aumento de *staff* no dia ou mudança de dia). Para efeito de simulação teste, estes planos são retirados da base de dados e os 28 restantes são considerados no algoritmo 1.

Os resultados obtidos da aplicação dos dados da Tabela 1 do Apêndice A (com exceção dos planos 20 e 24) no Algoritmo 1, encontram-se no Quadro 5. As cores no Quadro 5 separam por dia de execução.

Doze dos vinte e oito planos de manutenção, serão executados na semana 1. Estes são os planos que, ou tinham valor de *deadline* igual a zero, ou seja, estavam em tempo exato para manutenção; ou estavam com *deadline* negativo, ou seja, já tinha passado do prazo limite de periodicidade; ou estavam dentro do prazo de tolerância, ou seja, o intervalo de periodicidade com antecipação ou atraso tolerado.

Apenas dois planos críticos A não foram realizados no primeiro dia da semana 1, pois tinham dia específico para sua realização, um no dia 3 e outro no dia 6. Dos planos com *deadline* negativo, apenas o plano 6 não foi realizado no dia 1, pois deveria ser programado para o dia 6. Todos os planos críticos B foram alocados para realização no dia 1, enquanto os planos críticos C estão distribuídos entre os dias 1, 2 e 3.

A contabilização das horas trabalhadas em cada dia, de cada especialidade, para realização dos planos está apresentada no Quadro 6. Em nenhum dos dias, as horas trabalhadas na execução dos planos de manutenção foram ultrapassadas, ou seja, não há hora extra de trabalho, pois o algoritmo não permitia esta flexibilização.

Quadro 5 - Resultado da aplicação da heurística no caso fictício - Semana 1

Plano	Criticidade	Dia específico	Staff							Duração (h)	Deadline (semanas)	Periodicidade (semanas)	Tolerância (semanas)	Dia de execução do plano
			Elétrica	Mecânica	Civil	Automação	Instrumentação	Montagem	Lubrificação					
8	A	0	2	2	0	0	2	1	0	7	4	104	26	1
29	A	0	5	8	4	0	3	8	0	1	5	26	6.5	1
28	B	0	5	3	4	0	5	6	1	2	6	52	13	1
14	B	0	8	7	1	2	4	4	1	2	10	52	13	1
17	C	0	1	2	1	6	1	3	0	6	-4	104	26	1
3	C	0	2	7	1	3	3	1	1	6	-1	8	2	1
11	C	0	1	4	3	0	1	10	1	5	10	52	13	1
18	C	0	8	7	2	0	9	2	3	4	1	52	13	2
23	C	0	0	0	1	0	5	5	6	7	8	104	26	2
7	A	3	6	8	2	0	1	1	3	8	8	52	13	3
27	C	0	1	8	1	1	6	5	3	5	8	52	13	3
6	A	6	2	1	1	1	1	1	0	5	-3	52	13	6

Fonte: Autoria própria (2023).

Quadro 6 - Horas de trabalho de cada especialidade

Staff Dia	Elétrica	Mecânica	Civil	Automação	Instrumentação	Montagem	Lubrificação
1	68	116	41	58	64	109	15
2	32	28	15	0	71	43	54
3	5	40	5	5	30	25	15
6	10	5	5	5	5	5	0

Fonte: Autoria própria (2023).

Para programação dos demais planos de trabalho, o Algoritmo 1 deve ser executado novamente, considerando a atualização do *deadline* dos planos. Esta atualização considera que, para os planos que foram executados na semana 1, será atribuído o valor da periodicidade como *deadline*. Além disso, a cada manutenção

preditiva nas máquinas, o valor de *deadline* poderá ser atualizado, considerando a saúde do equipamento.

O Quadro 7 apresenta o resultado da programação dos planos de manutenção para a semana 2.

Oito, dos vinte e oito planos de manutenção serão executados na semana 2. Estes são os planos em que a diferença entre o *deadline* e a tolerância é menor ou igual a zero. Todos os planos executados no dia 1 são críticos A, pois são prioridade. Apenas um plano crítico A deverá ser realizado no dia 2, devido à falta de disponibilidade de *staff* no dia 1 para realização deste. Quatro planos serão executados no segundo dia e o plano 15 será executado no dia 5, pois é requisito.

O processo foi repetido iterativamente até que todos os 28 planos fossem planejados. No Quadro 8 pode-se verificar em qual dia/semana cada um dos planos está alocado.

O plano 4 é o que mais demora para ser alocado, e isto ocorre na semana 6. Os planos 9, 15, 16 e 30 são os que mais se repetem (3 vezes cada um deles), pois sua periodicidade é igual a 1. Além destes, os planos 1 e 2 tem periodicidade menor que o número de semanas planejadas, mas apenas o plano 1 se repete duas vezes (semanas 2 e 6), já que o *deadline* do plano 2 se inicia com o valor equivalente à periodicidade. Todos os demais planos têm periodicidade maior que o número de semanas planejados, 6, logo não se repetem.

Com os resultados apresentados para a instância de testes, verificou-se que a heurística é eficiente para auxiliar na programação dos planos de manutenção preventiva, sendo capaz de distribuir todos os planos factíveis nos dias de semana, respeitando as condições de que alguns planos deveriam ocorrer em dias específicos, assim como o limite de tempo de trabalho disponível de *staff* de cada especialidade. Além disso, registra a ocorrência de planos infactíveis e que necessitam da decisão do gestor para sua execução.



Quadro 7 - Resultado da aplicação da heurística no caso fictício - Semana 2

z	Criticidade	Dia específico	Staff							Duração (h)	Deadline (semanas)	Periodicidade (semanas)	Tolerância (semanas)	Dia de execução do plano
			Elétrica	Mecânica	Civil	Automação	Instrumentação	Montagem	Lubrificação					
1	A	0	8	2	4	5	1	4	3	2	1	4	1	1
10	A	0	3	7	0	7	5	4	9	5	2	8	2	1
26	A	0	6	0	1	1	2	10	0	3	6	26	6.5	1
22	A	0	4	4	3	0	0	1	5	7	3	12	3	2
9	B	0	5	3	2	1	8	3	3	2	0	1	0.25	2
30	B	0	3	2	3	2	5	0	3	3	0	1	0.25	2
16	C	0	7	6	4	0	2	6	2	3	0	1	0.25	2
15	B	5	5	8	4	4	3	0	5	3	1	1	0.25	5

Fonte: Autoria própria (2023).

Quadro 8 - Programação dos planos de manutenção preventiva

Semana	Dia						
	1	2	3	4	5	6	7
1	8, 29, 28, 14, 17, 3, 11	18, 23	7, 27	#	#	6	#
2	1, 10, 26	22, 9, 30, 16	#	#	15	#	#
3	5	#	#	#	#	#	#
4	21, 9, 30, 19, 16	2	#	#	15	#	#
5	13, 25, 12	#	#	#	#	#	#
6	1, 9, 30, 4, 16	#	#	#	15	#	#

Fonte: Autoria própria (2023).

A heurística também é capaz de se adaptar à atualização de dados de entrada, no que se refere ao *deadline* de periodicidade devido à avaliação da saúde da máquina.

## 4.2 Resultados obtidos com dados reais

Os dados para aplicação em um caso real foram obtidos de uma cooperativa agroindustrial no centro-oeste do Paraná. Esta empresa possui cinco indústrias, quatro unidades armazenadoras de grãos, uma produtora de sementes, um centro de pesquisa e uma usina hidroelétrica. Os dados aplicados neste trabalho referem-se a dados coletados dos 1680 ativos que compõem duas das indústrias e duas unidades armazenadoras de grãos.

A planilha foi extraída por meio do SAP (do alemão: *Systemanalysis Programmentwicklung*, que, em português, significa Desenvolvimento de Programas para Análise de Sistema) para aplicação na heurística, e contém as seguintes informações, as quais estão brevemente detalhadas:

- Ordem: número da ordem de manutenção, que é gerado a cada execução do plano de manutenção;
- Operação: Número referente à atividades do plano;
- Plano de manutenção: número de identificação do plano de manutenção;
- Centro de trabalho principal: especialidade necessária para execução do plano, isto é, *staff*, sendo eles: elétrica (ELEG), mecânica (MECG), civil (MACG), instrumentação (INSG), lubrificação (LUBG), analista de preditiva ANPV, terceirizado de ar-condicionado (T\_MCM), terceirizado de compressores (T\_GL);
- Pacotes vencidos: periodicidade da operação do plano;
- Texto plano manutenção: texto de cabeçalho da ordem de manutenção;
- Equipamento: TAG de identificação do equipamento;
- Denominação do objeto técnico: nome do equipamento;
- Texto breve operação: descrição da tarefa;
- Centro de manutenção: número relacionado ao local (indústria ou unidade cerealista) da realização do plano;
- Denominação do local de instalação: descrição do local na indústria ou unidade cerealista da realização do plano;
- Status da solicitação: descrição do estado da operação do plano;
- Data planejada: data da última vez em que o plano foi executado;
- Duração normal: duração, em horas, do plano;

- Código ABC: criticidade.

A criticidade dos ativos foi previamente definida pelo gestor da indústria, de acordo com a seção 3.4.

A planilha foi obtida em 13 de janeiro de 2023, e os dados foram utilizados para simular a programação dos planos até que todos os planos que estão atrasados tenham sido programados pelo menos uma vez. Observou-se nesta planilha que o registro é realizado de modo que o mesmo plano pode ter mais de uma operação, sendo assim, a operação do plano é que de fato é programada.

A planilha obtida continha 17.099 operações de planos de manutenção a serem programadas, porém, destas, 6.911 não tinham a informação da duração de realização da operação. Estas foram incluídas numa lista para ser apresentada ao gestor da indústria, e desconsideradas para aplicação na indústria, restando 10.188 operações de planos.

Percebeu-se também que a planilha continha repetição das operações dos planos de manutenção, considerando suas realizações nos dois últimos anos. Para que apenas a última execução da operação do plano ficasse registrada, considerou-se a última data planejada. Com isto, reduziu-se para 6.294 operações de planos a serem programadas.

Observou-se que algumas operações de planos não tinham a informação da sua criticidade. Para estas, atribui-se a criticidade "C", para tornar possível a aplicação na heurística, e encaminhou-se ao gestor da indústria a relação destas para conhecimento e ajuste, caso necessário. Para aplicação neste trabalho, não foram ajustadas as criticidades.

No pré-processamento dos dados, foram elencados quatro planos ineficazes, ou seja, planos que não eram possíveis de se realizar devido a limitação de *staff* disponível. Estes planos também foram relacionados e repassados ao gestor da indústria, e desconsideradas para programação. Assim, 6290 operações foram programadas pela heurística, das quais: 30,29% são críticos A, 29,78%, B e 39,94%, C, das quais 596 foram não continham a priori informação de criticidade.

Posteriormente, a tolerância foi calculada, considerando 25% da periodicidade (para mais ou para menos). O *deadline* também foi determinado, considerando a data presente como 13/01/2023.

Além disto, não foi levado em consideração a informação de dia específico para realização do plano, pois isto depende muito mais da dinâmica da indústria e das janelas de oportunidades abertas para realização de manutenção em dias específicos.

Embora a indústria funcione 7 dias da semana, 24h por dia, foram programadas operações de planos de manutenção para 5 dias da semana (de segunda a sexta-feira), no horário comercial, definido pelo gestor da indústria, que considera que nos demais períodos são destinados exclusivamente à manutenção corretiva. O Quadro 9 apresenta o número de *staff* disponível, que se repete nos 5 dias de programação do plano. Como *staff* T\_GL e T\_MCM são terceirizados, considera-se ilimitado.

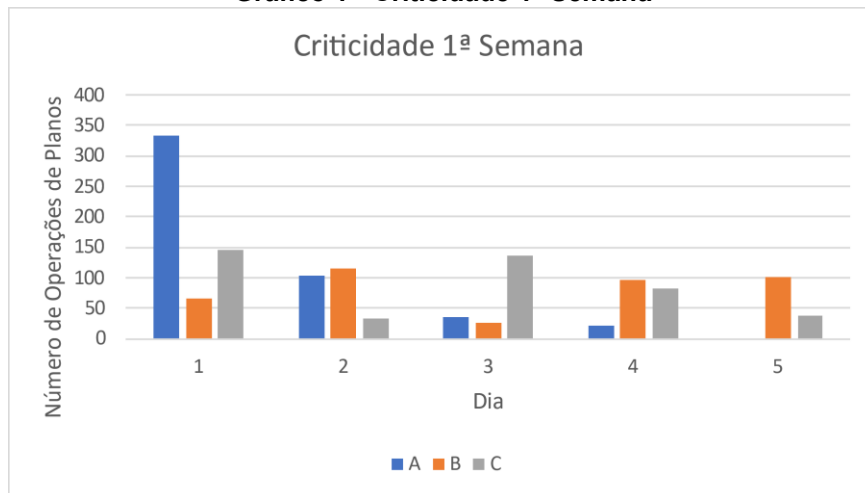
**Quadro 9 - Staff disponíveis nos cinco dias úteis**

ELEG	INSG	LUBG	MACG	MECG	T_GL	T_MCM	PREDV	ANPV
17	2	3	2	19	ilimitado	ilimitado	2	5

Fonte: Autoria própria (2023).

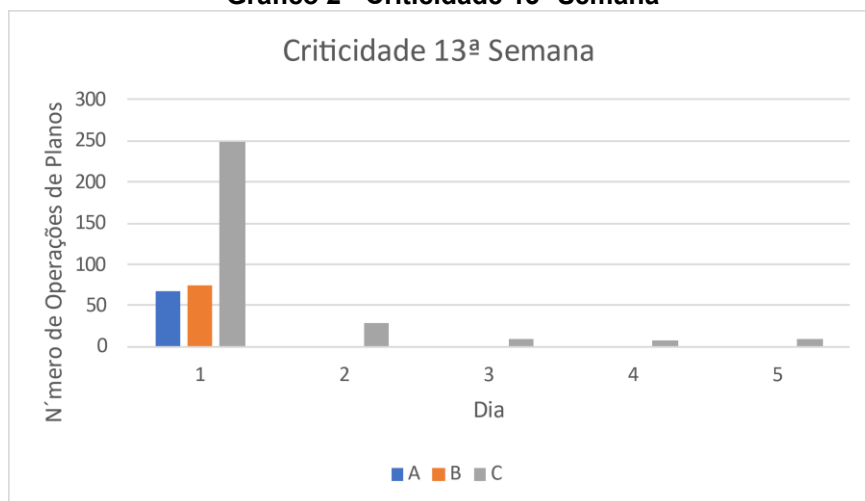
Foram necessárias treze semanas para colocar todos os planos em dia, ou seja, para que nenhum plano fique com *deadline* negativo. Na primeira semana, foram programadas a realização de 1331 operações de planos de manutenção, programadas em 30 segundos pela heurística. As demais semanas foram programadas, em média, em 3 segundos, e o número de planos a cada semana foram: 364, na semana 2; 464, na semana 3; 539, na semana 4; 506, na semana 5; 229, na semana 6; 556, na semana 7; 446, na semana 8; 381, na semana 9; 321, na semana 10; 604, na semana 11; 321, na semana 12; 445, na semana 13. A Tabela 1 e os gráficos de 1 a 9 apresentam os resultados obtidos.

Os gráficos 1 e 2 apresentam resultados de duas semanas (1 e 13) para demonstrar a variação da criticidade por dia.

**Gráfico 1 - Criticidade 1ª Semana**

Fonte: Autoria própria (2023).

Podemos notar no Gráfico 1 que a heurística priorizou os planos de criticidade A (mais alta) para executar no início da semana. Esta tomada de decisão vem em encontro com as práticas utilizadas pelo programador, pois se houver algum imprevisto (por exemplo, manutenção corretiva) no dia programado para a execução do plano crítico A, tem-se mais dias para ainda executar o plano.

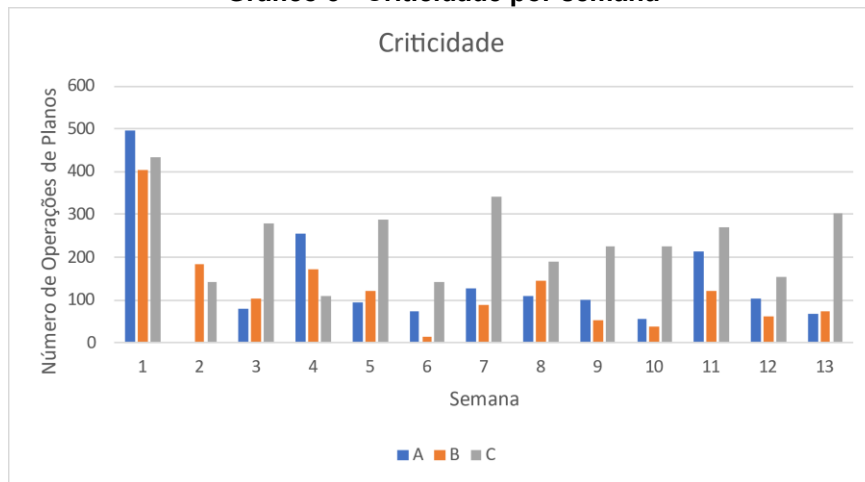
**Gráfico 2 - Criticidade 13ª Semana**

Fonte: Autoria própria (2023).

No Gráfico 2 a heurística seguiu o mesmo princípio, priorizar os planos crítico A no início da semana, além de mostrar que restaram poucos planos de criticidade A para a programação ao decorrer das semanas.

O Gráfico 3 apresenta a variação da criticidade nas 13 semanas. Observa-se que não há uma tendência de variação de criticidade.

**Gráfico 3 - Criticidade por semana**

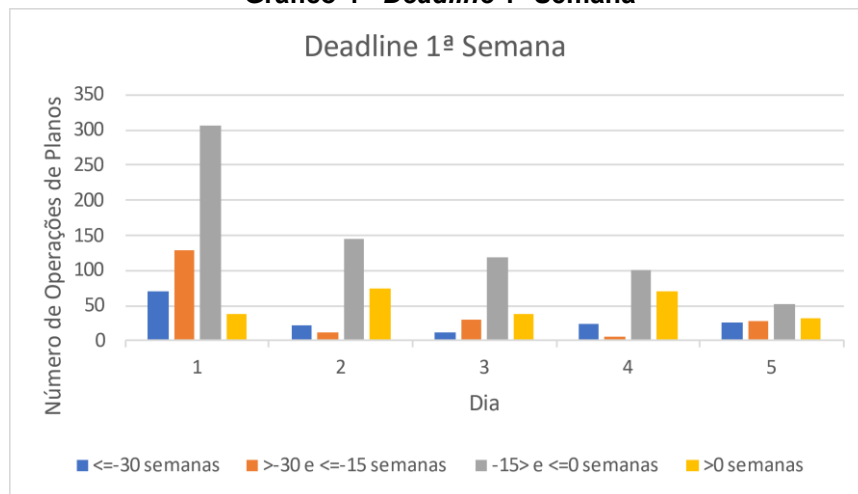


**Fonte: Autoria própria (2023).**

O Gráfico 3 nos mostra uma grande redução da primeira semana, a qual apresentou um alto número de planos programados nas três criticidades, já nas demais semanas podemos notar que se destaca algumas criticidades, não as três como na primeira.

Em relação ao *deadline*, os resultados referentes às semanas 1 e 13 são apresentados nos gráficos 4 e 5.

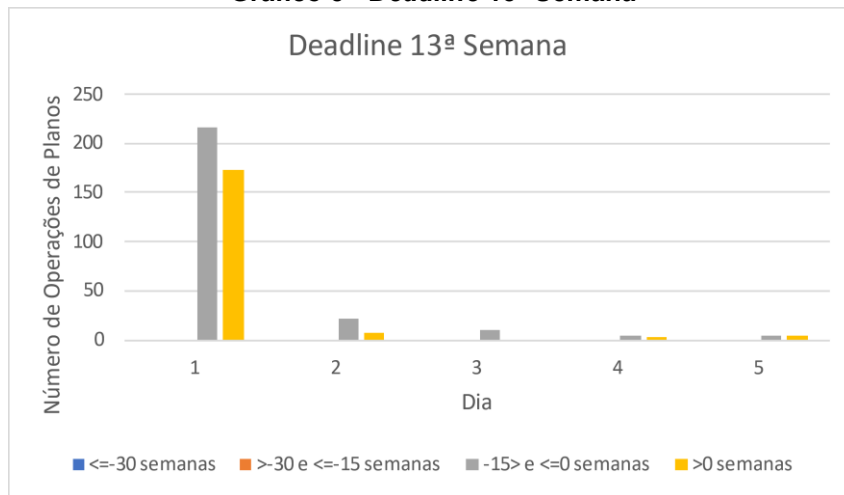
**Gráfico 4 - Deadline 1ª Semana**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Nota-se no Gráfico 4 um grande volume de planos com mais de 30 semanas de atraso (70 planos). Já no Gráfico 5 apresenta a última semana com *deadline* negativo.

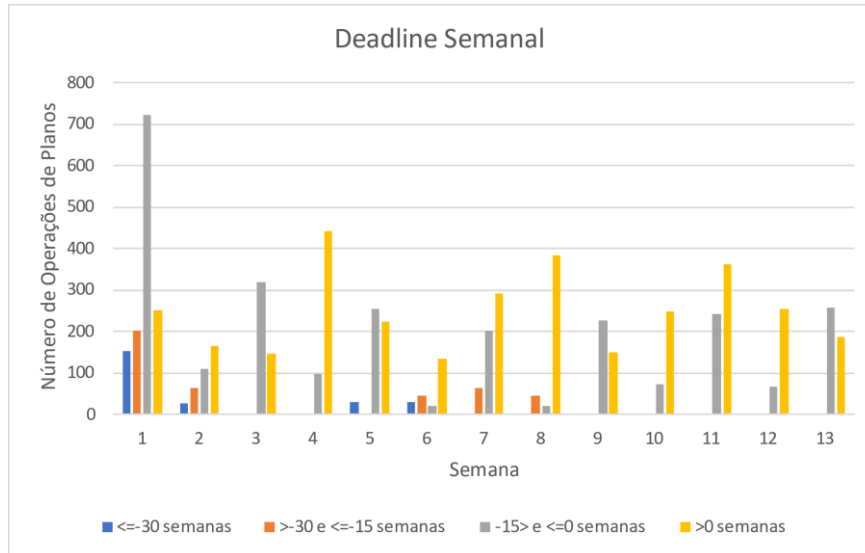
**Gráfico 5 - Deadline 13ª Semana**



Fonte: Autoria própria (2023).

No Gráfico 6, observa-se a diminuição do número de planos com *deadline* menor ou igual a -30 a cada semana, até sua eliminação na semana 7, o que acontece na semana 8, para *deadline* menor ou igual a -15, e na semana 14, para *deadline* menor ou igual a zero.

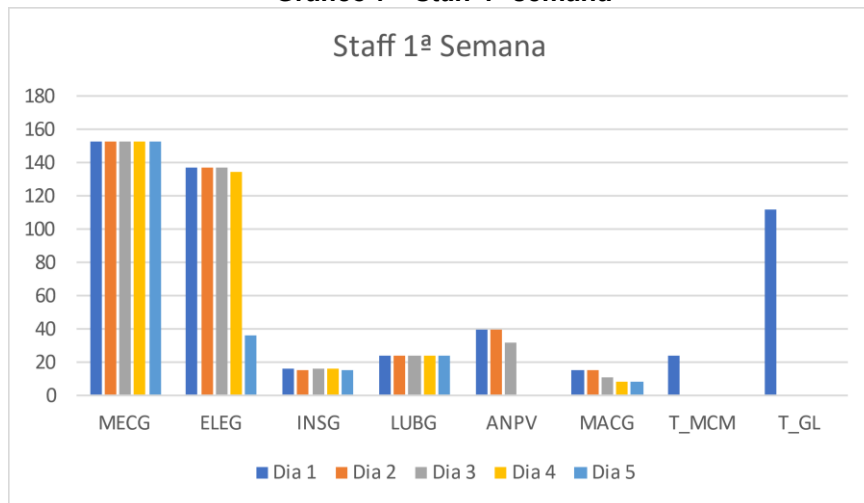
**Gráfico 6 - Deadline Semanal**



Fonte: Autoria própria (2023).

Os gráficos 7 e 8 apresentam os dados referentes ao *staff* necessário à realização dos planos programados nas semanas 1 e 13.

Gráfico 7 - Staff 1ª semana

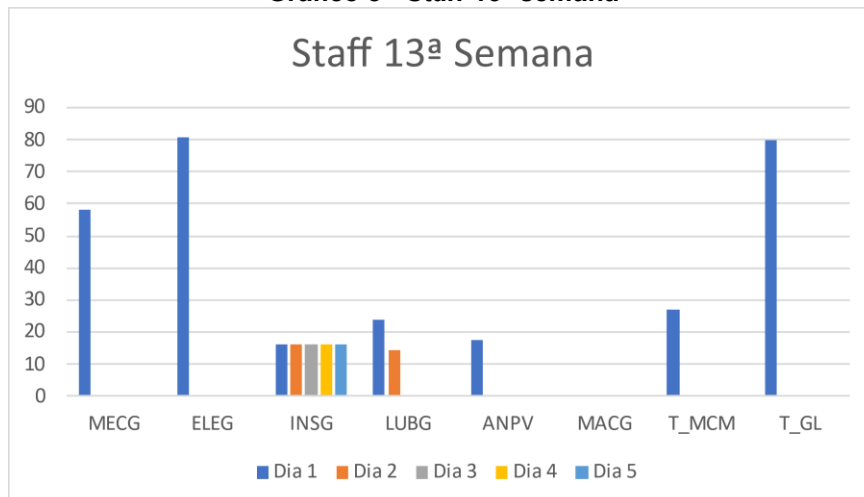


Fonte: Autoria própria (2023).

Devido ao grande volume de planos com *deadline* negativo, a heurística buscou todos os recursos para tratar, utilizando de praticamente toda a mão de obra disponível.

No Gráfico 8 observa-se uma redução considerável da utilização do tempo da *staff* nos planos de manutenção, exceto a instrumentação que mantém uma constância de planos ao decorrer das semanas.

Gráfico 8 - Staff 13ª semana

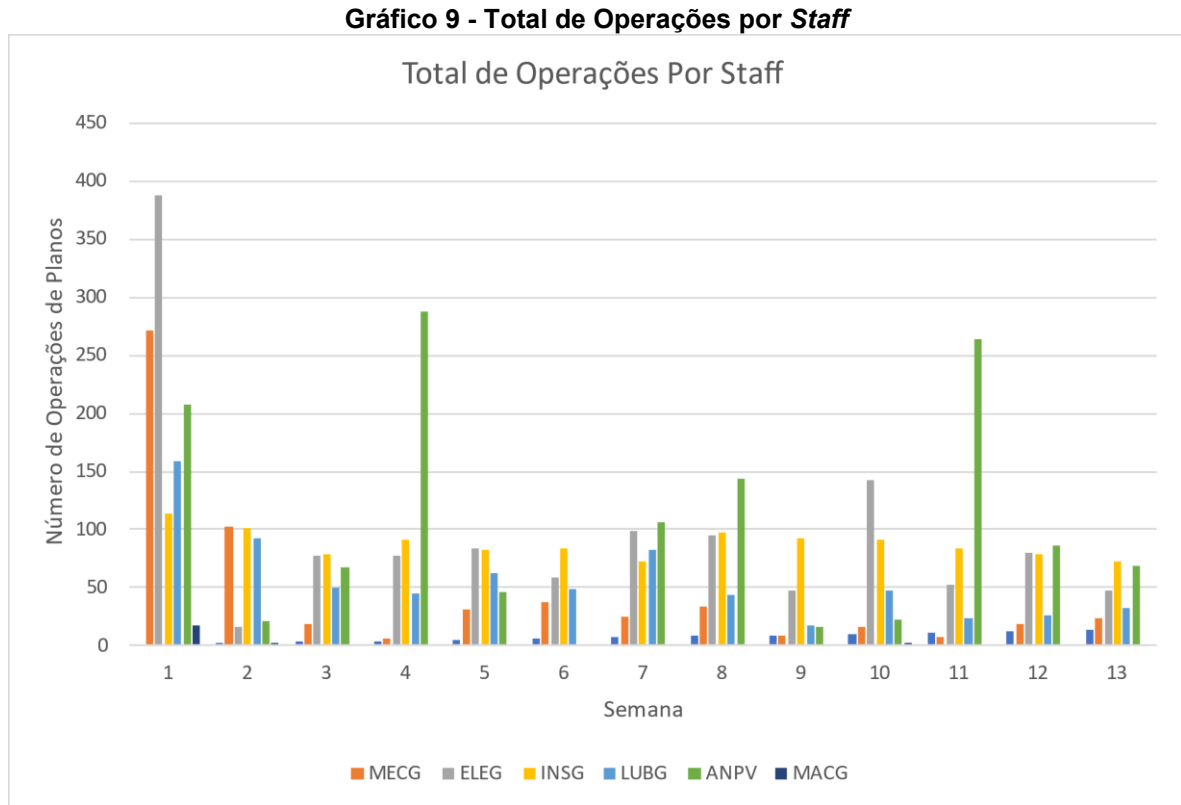


Fonte: Autoria própria (2023).

No Gráfico 9 o total de operações por *staff*, observa-se que na primeira semana, quase todo *staff* necessita próximo do tempo total disponível para realização dos planos em todos os dias. Nas semanas subsequentes, observa-se a diminuição do tempo necessário de trabalho, sendo que o primeiro dia é o que depende de mais tempo do *staff*, excetuando-se INSG, que utiliza quase todo tempo disponível todos



os dias até a oitava semana. Em relação ao número de operações por *staff* observa-se que na primeira semana é alto o número de operações de todos o *staff*, diminuindo para certa estabilidade nas semanas subsequentes.



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 1 - Resultados obtidos

Semana	Dia	Número de operações de planos programadas	Criticidade			Deadline				Staff							
			A	B	C	≤ -30 semanas	> -30 e ≤ -15 semanas	> -15 e ≤ 0 semanas	>0 semanas	MECG	ELEG	INSG	LUBG	ANPV	MACG	T_MCM	T_GL
1	1	545	334	66	145	70	129	307	39	152,9	136,8	16,1	24	40,2	16	24,2	112,1
	2	252	104	115	33	22	12	144	74	152,9	136,8	16	24	40,2	16	0	0
	3	198	36	26	136	12	29	119	38	152,8	136,8	16,1	24,1	32	11,5	0	0
	4	199	21	96	82	23	6	100	70	152,8	134,6	16,1	24,1	0	8,5	0	0
	5	137	0	100	37	26	27	53	31	152,8	36	16	24	0	8,5	0	0
2	1	204	36	77	91	22	1	68	113	152,7	26,7	16	24,1	5,9	8,5	0	79,9
	2	69	0	49	20	0	20	2	47	41,4	0	16,1	24	0	8,5	0	0
	3	31	0	23	8	5	22	1	3	0	0	16,1	24	0	0	0	0
	4	20	0	14	6	0	10	10	0	0	0	16,1	24	0	0	0	0
	5	40	0	22	18	0	9	30	1	0	0	16,1	24	0	0	0	0
3	1	368	74	49	245	0	0	231	137	30,6	136,2	16,1	24	17,4	0	28,9	0
	2	20	5	4	11	0	0	15	5	0	0	16,1	24	0	0	0	0
	3	26	1	18	7	0	0	24	2	0	0	16	24	0	0	0	0
	4	28	0	17	11	0	0	27	1	0	0	16,1	23,9	0	0	0	0
	5	22	0	16	6	0	0	21	1	0	0	16,1	24	0	0	0	0
4	1	330	247	14	69	0	0	9	321	14	95	16,1	24	40,2	0	0	112,1
	2	130	9	104	17	0	0	24	106	0	0	16	24	23	0	0	0
	3	23	0	15	8	0	0	23	0	0	0	16	24	0	0	0	0
	4	28	0	16	12	0	0	27	1	0	0	16	24,1	0	0	0	0
	5	28	0	23	5	0	0	13	15	0	0	16	24	0	0	0	0
5	1	398	96	91	211	0	0	212	186	147,5	132,3	16,1	23,8	12,2	0	26,9	79,9
	2	36	0	17	19	0	0	19	17	0	0	16,1	24	0	0	0	0
	3	22	0	10	12	0	0	12	10	0	0	16	23,8	0	0	0	0

	4	24	0	3	21	13	0	7	4	0	0	16	24	0	0	0	0
	5	26	0	0	26	17	0	3	6	0	0	16,1	23,7	0	0	0	0
6	1	116	73	14	29	2	0	6	108	89,3	94,4	16,1	24	0	0	0	0
	2	24	0	1	23	10	0	13	1	0	0	16,1	24	0	0	0	0
	3	31	0	0	31	18	4	2	7	0	0	16	24	0	0	0	0
	4	26	0	0	26	0	15	0	11	0	0	16	24	0	0	0	0
	5	32	0	0	32	0	25	0	7	0	0	16,1	24	0	0	0	0
7	1	449	126	88	235	0	5	203	241	49,8	135,6	15,9	24,1	26,6	0	28,9	0
	2	32	0	0	32	0	19	0	13	0	9,8	16	24	0	0	0	0
	3	20	0	0	20	0	11	0	9	0	0	16	23,8	0	0	0	0
	4	29	0	0	29	0	17	0	12	0	0	16,1	24	0	0	0	0
	5	26	0	0	26	0	10	0	16	0	0	16	21,2	0	0	0	0
8	1	338	103	119	116	0	0	9	329	51	113,1	16,1	23,7	39,7	0	0	112,1
	2	34	8	14	12	0	0	6	28	0	0	15,9	23,5	0	0	0	0
	3	30	0	11	19	0	9	0	21	0	0	16,1	23,5	0	0	0	0
	4	30	0	0	30	0	26	0	4	0	0	16	16	0	0	0	0
	5	14	0	0	14	0	10	4	0	0	0	16,1	0	0	0	0	0
9	1	334	102	36	196	0	0	203	131	16,8	44,4	16,1	23,2	3,2	0	26,9	79,9
	2	21	0	16	5	0	0	1	20	0	0	16,1	9	0	0	0	0
	3	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0
	4	14	0	0	14	0	1	13	0	0	0	16	0	0	0	0	0
	5	11	0	0	11	0	0	11	0	0	0	16	0	0	0	0	0
10	1	195	57	29	109	0	0	1	194	25	136,8	16	23,8	40,2	3,5	0	0
	2	73	0	8	65	0	0	26	47	0	51,5	16,1	24	12,2	0	0	0
	3	22	0	0	22	0	0	16	6	0	0	16	18	0	0	0	0
	4	15	0	0	15	0	0	15	0	0	0	16,1	0	0	0	0	0
	5	16	0	0	16	0	0	16	0	0	0	16	0	0	0	0	0
11	1	458	214	38	206	0	0	203	255	9,4	91,8	16	24	40,2	0	28,9	0
	2	100	0	76	24	0	0	1	99	0	0	16	13	15,5	0	0	0

	3	15	0	7	8	0	0	8	7	0	0	16,1	0	0	0	0	0
	4	8	0	0	8	0	0	8	0	0	0	16	0	0	0	0	0
	5	23	0	0	23	0	0	23	0	0	0	16,1	0	0	0	0	0
12	1	247	98	59	90	0	0	14	233	86,4	110,4	16,1	23,2	25,8	0	0	112,1
	2	25	7	3	15	0	0	7	18	0	0	15,9	22	0	0	0	0
	3	10	0	0	10	0	0	8	2	0	0	16	6,5	0	0	0	0
	4	18	0	0	18	0	0	18	0	0	0	16,1	0	0	0	0	0
	5	21	0	0	21	0	0	21	0	0	0	16,1	0	0	0	0	0
13	1	389	67	74	248	0	0	216	173	58,1	80,7	16	23,7	17,6	0,5	26,9	79,9
	2	29	0	0	29	0	0	22	7	0	0	16,1	14,2	0	0	0	0
	3	10	0	0	10	0	0	10	0	0	0	16,1	0	0	0	0	0
	4	8	0	0	8	0	0	5	3	0	0	16,1	0	0	0	0	0
	5	9	0	0	9	0	0	4	5	0	0	16,1	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria (2023).

### 4.3 Validação dos resultados e discussões

A etapa de validação dos resultados obtidos pela heurística deu-se pela apresentação destes ao gestor de manutenção da indústria, na pessoa do coordenador de manutenção, o qual apresentou avaliação de aspectos em relação ao input e output da heurística.

Em relação ao input, observou-se que 75% dos planos de manutenção estavam com *deadline* negativo, o que foi recebido com negativa surpresa pelo gestor, por evidenciar falta de organização no planejamento e execução dos planos de manutenção.

Outra questão apontada pelo gestor, é a organização incoerente de sua equipe em relação aos dados de entrada da planilha. Primeiro pela falta de informação de criticidade e de tempo de execução de alguns planos, e também pela repetição de planos para cada especialidade, quando deveria ser um plano por ativo, considerando o registro de todos as especialidades necessárias.

Em relação ao output, a rapidez de solução apresentada pela heurística foi um ponto muito positivo. Isto irá diminuir drasticamente o tempo de planejamento do planejador, que hoje leva em torno de dois dias para planejar a semana, enquanto a heurística o faz quase instantaneamente. O tempo de trabalho do planejador poderá ser mais bem utilizado, avaliando os dados da planilha, revisando e complementando as informações contidas nos planos, verificando e ajustando os tempos de execução de cada plano de manutenção, assim alimentando a planilha com os dados necessários de maneira mais assertiva, analisando os resultados de sua programação (por exemplo, a aderência do *staff* a programação semanal), entre outras atividades de melhoria do planejamento.

O número de semanas necessários para corrigir o *deadline* negativo foi muito alto, mas conhecendo este valor, ações podem ser tomadas para mitigar o problema. Assim, a heurística foi positiva ao diagnosticar o problema de planos com *deadline* negativo e o tempo necessário para ajustar este *deadline*.

Em relação ao tempo do *staff* dedicado à execução do plano, percebeu-se elevado tempo nas primeiras semanas e primeiros dias da semana. É natural que a programação seja desta forma, tendo em vista o número de planos com *deadline* negativo. É bom que o planejamento da manutenção preditiva e preventiva aconteça nos primeiros dias da semana, pois na ocorrência de manutenção corretiva, que não

é planejada, as programadas podem ser realizadas nos dias subsequentes, não atrasando em demasiado a realização dos demais planos. Por outro lado, o tempo de “sobra” de trabalho do *staff* não é real, pois o tempo dedicado à manutenção corretiva é muito alto.

Finalmente, é importante observar que o planejamento deve ser feito semanalmente devido a dinâmica da indústria, onde nem sempre o que é planejado pode ser executado, por conta da necessidade de realocação da equipe de trabalho. Assim, se faz necessária a execução da heurística em tempo real, aguardando as atualizações na planilha pela ocorrência de fatos externos ao planejamento.

## 5 CONCLUSÕES

O planejamento da manutenção é um desafio nas indústrias, considerando o esforço em manter os ativos em boas condições, ao mesmo tempo que permite a disponibilidade do ativo para operação, e fazendo isto com o balanço adequado dos recursos. Especificamente na agroindústria, foco deste trabalho, a sazonalidade da colheita abre janelas de oportunidades para a manutenção que devem ser seguidas periodicamente.

A heurística proposta neste trabalho veio ao encontro das necessidades de promover um planejamento adequado na agroindústria, determinando a programação diária otimizada dos planos de manutenção preditiva e preventiva.

Para tanto, definiu-se inicialmente os ativos que passariam por manutenção preventiva e preditiva e sua respectiva criticidade, que foi determinada pela priorização do ativo no processo produtivo. Na sequência, detalhou-se o plano de manutenção dos ativos, os quais contém informações relevantes ao processo de planejamento.

A programação proposta pela heurística determina quais planos de manutenção devem ser executados pelo *staff*, limitando-se à disponibilidade de tempo e considerando a priorização dos planos mais críticos e que estão mais atrasados. Assim, a heurística permite tempo disponível ao planejador para analisar, corrigir e verificar o planejamento e realização da programação dos planos de manutenção preventiva e preditiva, e tira dele uma tarefa que é humanamente difícil, a de programar os planos.

A aplicação da heurística em caso fictício permitiu a verificação de seu funcionamento, enquanto sua aplicação em dados reais demonstrou sua eficiência pela avaliação do gestor da indústria, e respondeu questões que estavam além das expectativas, que foi o diagnóstico da programação dos planos de manutenção.

Como perspectivas futuras, a aplicação da heurística considerando as atualizações dos dados de input em decorrência de fatores externos da programação trará benefícios à indústria, que utilizará o tempo de seu *staff*, tanto de programação quanto de execução, de maneira mais eficiente.

Como melhorias, o desenvolvimento de aplicativo que incorpore a heurística e integre os dados do SAP permitirá o uso mais amigável desta e facilitará sua aplicabilidade.

## REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ABRAMAN (Associação Brasileira de Manutenção). Gestão de manutenção e ativos. **Revista Oficial da Abraman**, v. 28, n. 163, 2017.

ABREU, T. R. Principais conceitos na implantação da sistemática de manutenção nas indústrias. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e23911124652-e23911124652, 2022.

BANGALORE, P.; PATRIKSSON, M. Analysis of SCADA data for early fault detection, with application to the maintenance management of wind turbines. **Renewable Energy**, v. 115, p. 521-532, 2018.

BEN-DAYA, M.; KUMAR, U.; MURTHY, D.N. P. **Introduction to maintenance engineering: modelling, optimization and management**. London: John Wiley & Sons, 2016.

BRANCO FILHO, G. **A organização, o planejamento e o controle da manutenção**. São Paulo: Ciência Moderna, 2008.

BRANKE, J; NGUYEN, S; PICKARDT, C. W; ZHANG, M. Automated design of production *scheduling* heuristics: a review. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 20, n. 1, p. 110-124. 2015.

CORDESSONI, A. Z. **Ambientes, objetos e dialogicidade: uma estratégia de ensino superior em heurísticas e metaheurísticas**. 2008. Tese (Doutorado em Informática na Educação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia**. São Paulo: Grupo Gen, 2012.

GOTI, A.; OYARBIDE-ZUBILLAGA, A.; ALBERDI, E.; SANCHEZ, A.; GARCIA-BRINGAS, P. Optimal maintenance thresholds to perform preventive actions by using multi-objective evolutionary algorithms. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 15, 2019a.

GOTI, A.; OYARBIDE-ZUBILLAGA, A.; SANCHEZ, A.; AKYAZI, T.; ALBERDI, E. (2019b). Multi equipment condition based maintenance optimization using multi-objective evolutionary algorithms. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 22, 2019b.



GUIMARÃES, L. M.; NOGUEIRA, C. F.; SILVA, M. D. B. Manutenção industrial: implementação da manutenção produtiva total (TPM). **E-xacta**, v. 5, n. 1, 2012.

GUIRAS, Z.; HAJEJ, Z.; REZG, N.; DOLGUI, A. Comparative analysis of heuristic algorithms used for solving a production and maintenance planning problem (PMPP). **Applied Sciences**, v. 8, n. 7, p. 1088, 2018.

GUIRAS, Z.; TURKI, S.; REZG, N.; DOLGUI, A. Optimal maintenance plan for two-level assembly system and risk study of machine failure. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 8, p. 2446-2463, 2019.

HARDT, F.; KOTYRBA, M., VOLNA, E.; JARUSEK, R. Innovative approach to preventive maintenance of production equipment based on a modified TPM methodology for industry 4.0. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 15, 2021.

KAMAL, Z.; TAGHADDOS, H.; KARIMI, H. BIM-based maintenance management system for healthcare facilities. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 35, n. 4, 2021.

LAGUNA, M.; MARTÍ, R. Heuristics. *In*: GASS, S. I.; FU, M.C. (Eds.) **Encyclopedia of Operations Research and Management Science**. Boston (EUA): Springer, 2013.

LONG, J.; HONG, Y.; BAI, Y.; ZHANG, S.; SUN, Z. Practical production scheduling for hot metal pretreatment-steelmaking-continuous casting process involving preventive maintenance consideration. **IEEE Access**, v. 6, p. 57017-57029, 2018.

LIU, Q.; LIAN, Z.; GUO, Y.; TANG, S.; YANG, F. Heuristic decision of planned shop visit products based on similar reasoning method: From the perspective of organizational quality-specific immune. **Open Physics**, v. 18, n. 1, p. 126-138, 2020.

MARQUES, P. J. D. **Implementação de um sistema de manutenção preventiva**. 2009. Tese (Doutorado) - Universidade de Aveiro, Aveiro (POR), 2009.

MIRSAEEDI, H.; FEREDUNIAN, A.; MOHAMMADI-HOSSEININEJAD, S. M.; DEHGHANIAN, P.; LESANI, H. Long-term maintenance scheduling and budgeting in electricity distribution systems equipped with automatic switches. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 14, n. 5, p. 1909-1919, May 2018.

MOREIRA, D. A. **Pesquisa operacional**: curso introdutório. Rio de Janeiro: Cengage Learning Brasil, 2018.

NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de manutenção preditiva**. São Paulo: E. Blucher, 2014. v. 1.

NORDAL, H.; EL-THALJI, I. Lifetime benefit analysis of intelligent maintenance: simulation modeling approach and industrial case study. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 8, 2021.

OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**, v. 4, n. 2, 2008.

RICCO, M. F. F. A aviação e a segurança de voo em um contexto evolutivo da ciência. **Revista da UNIFA**, v. 33, n. 1, 2020.

TALBI, E.-G. **Metaheuristics: from design to implementation**. Hoboken (EUA): John Wiley & Sons, 2009.

TAVARES, L. A. **Administração moderna da manutenção**. Rio de Janeiro: Novo Polo, 1999.

TROJAN, F.; MARÇAL, R. F. M.; BARAN, L. R. Classificação dos tipos de manutenção pelo método de análise multicritério ELECTRE TRI. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, **Anais [...]**, 2013, p. 343-357, 2013.

WAN, Q.; WU, Y.; ZHOU, W.; CHEN, X. Economic design of an integrated adaptive synthetic x chart and maintenance management system. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, v. 47, n. 11, p. 2625-2642, 2018.

WANG, L.; LU, Z.; REN, Y. A rolling horizon approach for production planning and condition-based maintenance under uncertain demand. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability**, v.233, n. 6, p. 1014-1028, 2019.

WANG, X.; LI, L.; XIE, M. Optimal preventive maintenance strategy for leased equipment under successive usage-based contracts. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 18, p. 5705-5724, 2019.

ZHANG, C.; GAO, Y.; YANG, L.; GAO, Z.; QI, J. Joint optimization of train scheduling and maintenance planning in a railway network: a heuristic algorithm using Lagrangian relaxation. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 134, p. 64-92, 2020.

**APÊNDICE A - Planilha com os planos de manutenção extraídos do SAP**

A planilha com os planos de manutenção extraídos do SAP está disponível em: [https://github.com/ThaObal/Dados\\_reais\\_Jonatas](https://github.com/ThaObal/Dados_reais_Jonatas)