

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**RENAN EMANOEL BONASSA**

**UM SISTEMA INTELIGENTE PARA A PRIORIZAÇÃO DE  
ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL**

**DOIS VIZINHOS**

**2022**

**RENAN EMANOEL BONASSA**

**UM SISTEMA INTELIGENTE PARA A PRIORIZAÇÃO DE  
ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL**

**An intelligent system for prioritizing industrial maintenance activities**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Software do Curso de Bacharelado em Engenharia de Software da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Monteiro Souza

Coorientador: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Alinne Cristinne Corrêa Souza

**DOIS VIZINHOS**

**2022**



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

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

**RENAN EMANOEL BONASSA**

**UM SISTEMA INTELIGENTE PARA A PRIORIZAÇÃO DE  
ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia de Software  
do Curso de Bacharelado em Engenharia de  
Software da Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná.

Data de aprovação: 24/junho/2022

---

Francisco Carlos Monteiro Souza  
doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Alinne Cristinne Corrêa Souza  
doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Rodolfo Adamshuk Silva  
doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Rafael Alves Paes de Oliveira  
doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**DOIS VIZINHOS**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por todas as bênçãos que derramou em minha vida e pelas pessoas incríveis que colocou em meu caminho.

Agradeço a minha família que sempre esteve comigo e me amparou em todos os meus momentos de dúvida e indecisão.

Agradeço também a minha namorada Alana, pois sempre confiou em mim e esteve ao meu lado nos momentos que mais necessitei.

Agradeço ao Bruno Oss Bocalon, pois me forneceu o suporte técnico necessário sobre a área de manutenção industrial e pelo carinho com que tratou este projeto.

Agradeço ao meu orientador o professor Francisco Carlos Souza que enxergou o potencial deste trabalho desde seu primeiro esboço, e a minha coorientadora a professora Alinne Correa Souza pela sua ajuda.

Por fim, agradeço a esta universidade pela oportunidade de obter tanto conhecimento e, a todo o corpo docente do curso de Engenharia de Software pela sua capacitação e conhecimento técnico.

## RESUMO

A área de manutenção industrial é fundamental para o pleno funcionamento de uma indústria, pois suporta todas as atividades produtivas e garante além da produtividade operacional, a qualidade dos produtos e a segurança de todos os envolvidos neste processo. Porém os recursos destinados para essa área são limitados, necessitando assim, passar por uma etapa de priorização para a sua correta destinação. Este é um processo geralmente realizado de maneira manual que muitas vezes não consegue atender às diversas exigências e garantir que os recursos destinados às manutenções sejam realmente empregados em manutenções de alto impacto. Com base nesta problemática, este trabalho apresenta uma abordagem de priorização de ordens de manutenção, utilizando um algoritmo genético, com o objetivo disponibilizar um conjunto de ordens que gerará maior impacto aos processos produtivos de uma indústria, por meio de uma manutenção mais assertiva. Os experimentos demonstraram a eficácia da solução, gerando resultados positivos e viabilizando a continuidade de trabalhos envolvendo a área de manutenção industrial e a área de engenharia de software.

**Palavras-chave:** algoritmo genético; priorização de recursos; manutenção industrial; ; .

## ABSTRACT

The industrial maintenance area is fundamental for the full functioning of an industry, as it supports all production activities and guarantees, in addition to operational productivity, the quality of products and the safety of all those involved in this process. However, the resources destined for this area are limited, thus needing to go through a prioritization stage for their correct destination, this being a process usually carried out manually that often fails to meet the various requirements and ensure that the resources destined to the maintenance are used in high-impact maintenance. Based on this problem, this study intends to present an approach to prioritizing maintenance orders, using a genetic algorithm, with the objective of providing a set of orders that will generate greater impact on the production processes of an industry, through more assertive maintenance. The experiments demonstrated the effectiveness of the solution, generating positive results and enabling the continuity of works involving the industrial maintenance area and the software engineering area.

**Keywords:** genetic algorithm; resource prioritization; industrial maintenance; ; .

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Tipos de Manutenção</b>	<b>14</b>
<b>Figura 2 – Ordem de Manutenção</b>	<b>15</b>
<b>Figura 3 – Exemplo de Situação Conflitante</b>	<b>17</b>
<b>Figura 4 – Topologia do Espaço de Busca</b>	<b>18</b>
<b>Figura 5 – Exemplificação de Máximos Locais</b>	<b>19</b>
<b>Figura 6 – Exemplificação de Cordilheiras</b>	<b>20</b>
<b>Figura 7 – Representações dos elementos de um AG</b>	<b>21</b>
<b>Figura 8 – Pseudocódigo Algoritmo Genético</b>	<b>21</b>
<b>Figura 9 – Fluxograma Algoritmo Genético</b>	<b>22</b>
<b>Figura 10 – Seleção por roleta</b>	<b>22</b>
<b>Figura 11 – Cruzamento com um ponto de corte</b>	<b>23</b>
<b>Figura 12 – Mutação em um indivíduo</b>	<b>23</b>
<b>Figura 13 – Resultado comparativo entre algoritmos paralelos</b>	<b>30</b>
<b>Figura 14 – Estratégia de Manutenção</b>	<b>34</b>
<b>Figura 15 – Processo de Priorização das Ordens de Manutenção</b>	<b>34</b>
<b>Figura 16 – Estrutura da Planilha Base</b>	<b>35</b>
<b>Figura 17 – Estrutura da Planilha de Informações</b>	<b>35</b>
<b>Figura 18 – Orçamento Disponível</b>	<b>35</b>
<b>Figura 19 – Tela Inicial da Aplicação</b>	<b>37</b>
<b>Figura 20 – Formulário de Atualização de Parâmetros do AG</b>	<b>37</b>
<b>Figura 21 – Dashboard da Aplicação</b>	<b>38</b>
<b>Figura 22 – Representação dos Indivíduos</b>	<b>39</b>
<b>Figura 23 – Mutações</b>	<b>40</b>
<b>Figura 24 – Conjunto de Ordens de Manutenção</b>	<b>41</b>
<b>Figura 25 – Base de Informações Adicionais Calibrada</b>	<b>42</b>
<b>Figura 26 – Valor Priorizado (Out/21)</b>	<b>43</b>
<b>Figura 27 – Quantidade OMs (Out/21)</b>	<b>43</b>
<b>Figura 28 – Quantidade de OMs por Criticidade de Equipamento</b>	<b>43</b>
<b>Figura 29 – Valor Priorizado (Mar/22)</b>	<b>44</b>
<b>Figura 30 – Quantidade OMs (Mar/22)</b>	<b>44</b>



<b>Figura 31 – Valor Priorizado (Abr/22)</b> . . . . .	<b>44</b>
<b>Figura 32 – Quantidade OMs (Abr/22)</b> . . . . .	<b>44</b>
<b>Figura 33 – Valor Priorizado (Mai/22)</b> . . . . .	<b>45</b>
<b>Figura 34 – Quantidade OMs (Mai/22)</b> . . . . .	<b>45</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Tipos de Atividades de Manutenção . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>Tabela 2 – Visão geral dos estudos selecionados . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>Tabela 3 – Características dos dados de teste do estudo . . . . .</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 4 – Tabela Comparativa dos Estudos . . . . .</b>	<b>32</b>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Manutenção Industrial</b>	<b>12</b>
2.1.1	Tipos de Manutenção	13
2.1.2	Ordem de Manutenção	14
2.1.3	Ativos Industriais	16
2.1.4	Priorização de Ordens de Manutenção	17
<b>2.2</b>	<b>Algoritmos baseados em Busca</b>	<b>18</b>
2.2.1	Subida da Encosta	19
2.2.2	Algoritmo Genético	20
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>PROPOSTA</b>	<b>33</b>
<b>4.1</b>	<b>Priorização de Ordens de Manutenção Baseada em Busca</b>	<b>33</b>
<b>4.2</b>	<b>Aplicação</b>	<b>36</b>
4.2.1	Funcionalidades da Aplicação	36
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>39</b>
<b>5.1</b>	<b>Definição dos Parâmetros</b>	<b>40</b>
<b>5.2</b>	<b>Condução</b>	<b>41</b>
<b>5.3</b>	<b>Análise Comparativa</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>46</b>
<b>6.1</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>47</b>
	<b>APÊNDICE A QUESTIONÁRIO AO ESPECIALISTA</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As demandas oriundas da produção industrial estão em constante crescimento e, para conseguir atendê-las, todas as áreas envolvidas no processo produtivo buscam alavancar seus desempenhos, visando tornar suas indústrias mais competitivas no mercado (FAÉ; RIBEIRO, 2005).

Um setor de grande impacto na produtividade de uma indústria é a manutenção. Esta área vem passando por grandes evoluções desde a Segunda Guerra Mundial, quando as demandas do mercado aumentaram e as fábricas passaram a ser mais mecanizadas. Desde esta época até hoje, a manutenção de equipamentos produtivos (ativos) é vista por muitas empresas como uma despesa muito alta e indesejada. Entretanto, a manutenção é um processo vital para a produção, pois está diretamente ligada à capacidade produtiva e a qualidade dos produtos fabricados (GUIMARÃES; NOGUEIRA; SILVA, 2012).

De acordo com Fuentes (2006), existe uma constante tendência de crescimento nos investimentos em manutenção. Esse crescimento é justificado devido a manutenção manter e apoiar a logística operacional da empresa, sendo este um diferencial de competitividade do sistema industrial. O gasto com manutenção pode efetivamente reduzir riscos operacionais que ocasionariam indisponibilidades das fábricas e perdas por produtos fora do padrão (MERIÑO, 2021). Assim, a gestão efetiva da manutenção é um fator de extrema importância, pois cada escolha tomada nela tem impactos diretos nos custos, prazos e na qualidade dos produtos.

Neste contexto, é importante destacar a gestão de ativos, que de acordo com Kardec (2014) consiste na possibilidade de conciliar as estratégias de manutenção com a alocação eficiente dos recursos financeiros, e assim, permitir que as empresas tomem decisões mais estratégicas. Como as manutenções podem consumir boa parte do orçamento de uma indústria, é crucial que este capital seja empregado em manutenções de alto impacto, ou seja, manutenções que sejam fundamentais para o pleno funcionamento do processo produtivo em sua total capacidade.

Contudo, o principal questionamento acerca desta atividade é como garantir que os recursos destinados às manutenções sejam realmente empregados em manutenções de alto impacto, isto é, aquelas com maiores impactos nos processos, e ainda assim otimizar os gastos para atender a um orçamento.

Para tal, no presente trabalho foi desenvolvido um sistema inteligente para a priorização de ordens de manutenção, o qual foi aplicado em um estudo de caso em uma indústria alimentícia na cidade de Dois Vizinhos no Paraná, onde a tarefa de gerenciar a estratégia de planejamento e execução de manutenção dentro do orçamento disponível fica a cargo da equipe de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM). Essa equipe realiza este processo de priorização de maneira manual, por meio de relatórios gerados no software de Planejamento de Recursos Empresariais (do inglês, *Enterprise Resource Planning - ERP*) de planejamento de manutenção e de premissas contidas na sua estratégia de manutenção.

Assim como várias outras indústrias de grande porte, o sistema utilizado por esta empresa para o gerenciamento de toda a manutenção é o módulo Planejamento da Manutenção (PM) do sistema SAP <sup>1</sup>. Esse modulo é importante para toda a gestão das tarefas de manutenção, porém, a priorização destas atividades necessita ser realizada por um humano. Por essa razão, o presente trabalho aplicou uma técnica de Inteligência Artificial (IA) denominada Algoritmo Genético (AG) para realizar essa tarefa de maneira automatizada e otimizada, além de desenvolver um sistema que permitisse que os usuários da empresa onde o trabalho decorreu utilizassem de maneira facilitada.

---

<sup>1</sup> System Analysis Program Development

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com objetivo de levantar as informações necessárias, e contextualizar sobre as áreas abordadas neste trabalho, foram realizadas pesquisas na literatura, voltadas à priorização de realizações de manutenções, e técnicas de IA para auxiliar nesse processo.

### 2.1 Manutenção Industrial

Manutenção é uma palavra derivada do latim "*manus tenere*", que significa, "manter o que se tem", e esse conceito de manutenção é muito antigo, porém a manutenção industrial teve seu início por volta do século XVI, época em que a produção artesanal começou a decair, e a produção passou a ser mais mecanizada. A partir da Segunda Guerra Mundial, a manutenção industrial tornou-se mais necessária, e por meio dessa necessidade, tiveram início as técnicas de planejamento, organização e controle de manutenções (GREGÓRIO; SILVEIRA, 2018).

Segundo Kardec e Nascif (2009) podemos perceber cinco fases na manutenção industrial:

- **Primeira Geração:** Ocorreu antes da Segunda Guerra Mundial, onde a produção não era uma prioridade, e os equipamentos eram simples, sendo realizados apenas lubrificações, limpezas e correções após as quebras.
- **Segunda Geração:** Nesta fase, houve uma ampliação da mecanização da produção e a necessidade por maior disponibilidade, confiabilidade e produtividade. O custo com manutenção aumentou e surgiu o conceito de manutenção preventiva.
- **Terceira Geração:** A partir da década de 1970, nesta fase, houve a introdução da manutenção preditiva através dos monitoramentos de condições.
- **Quarta Geração:** Houve nesta geração, a minimização das manutenções corretivas e preventivas, e maior preocupação com a segurança, qualidade e meio ambiente.
- **Quinta Geração:** Teve início a partir de 2005, nesta fase o foco é a gestão de ativos. As indústrias devem produzir com toda a sua capacidade para obter maiores retornos. A manutenção preditiva ganha mais atenção e a tecnologia é aplicada em monitoramentos de condições.

A manutenção evoluiu muito no decorrer dos anos, deixando de ser uma área que apenas conserta o que é quebrado, para realizar análises, empregar técnicas e ferramentas para garantir que os processos decorram em sua total capacidade. Visando a segurança das pessoas, a qualidade dos produtos fabricados, a produtividade e a maior vida útil dos ativos. Para melhor entender sobre a área de manutenção industrial e sua importância, é necessária a introdução de alguns conceitos aplicáveis, iniciando por termos comumente empregados.

**Confiabilidade** é a capacidade de um ativo desempenhar a sua função de forma satisfatória sob condições específicas por determinado intervalo de tempo. Este termo também é utilizado como medida de desempenho, e deve sempre estar atrelado a um período, por exemplo, a probabilidade de uma bomba operar conforme projetada é de 99,5% nas próximas 3500 horas (GREGÓRIO; SILVEIRA, 2018).

Tendo como base a confiabilidade, surgiu no ano de 1978 a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) a partir do livro de mesmo nome publicado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos. Esta abordagem prioriza o gerenciamento eficiente dos equipamentos por meio da análise de suas possíveis falhas, ou seja, são estudadas todas as formas pelas quais um ativo pode vir a falhar e então realizadas ações para evitá-las. Sendo assim ela é considerada uma ferramenta de suporte na tomada de decisões (GREGÓRIO; SILVEIRA, 2018).

**Disponibilidade** está relacionado ao tempo em que o ativo está em condições de executar uma certa função. Tempos de processo produtivo parado por manutenção, não podem ser contabilizados como de disponibilidade do equipamento.

**Qualidade** é quando um produto é fabricado de acordo com seu padrão, atendendo o que é esperado ou exigido. A realização das manutenções de forma correta, favorece que produtos de qualidade sejam fabricados pelos equipamentos.

**Eficiência** é a capacidade de um equipamento realizar seu trabalho de forma eficaz, com o mínimo desperdício possível (GREGÓRIO; SILVEIRA, 2018).

**Performance** está relacionada à capacidade de um ativo alcançar os resultados desejados em questão de produção, ou seja, é a capacidade do equipamento produzir aquilo que ele foi projetado para produzir.

Para que seja possível entregar essas características a uma indústria, a área de manutenção emprega diversas atividades de manutenção nos ativos. Estas atividades podem ser divididas em **manutenções periódicas** e **manutenções corretivas**.

### 2.1.1 Tipos de Manutenção

As manutenções corretivas são aquelas realizadas após a falha do equipamento, com o intuito de recuperar o seu estado normal de operação. Esta estratégia é aplicada geralmente em equipamentos de menor importância para o processo, onde a falha não gera um impacto no processo produtivo, ou em equipamentos importantes por diversos fatores inesperados (GREGÓRIO; SILVEIRA, 2018). Pode ser subdividida em:

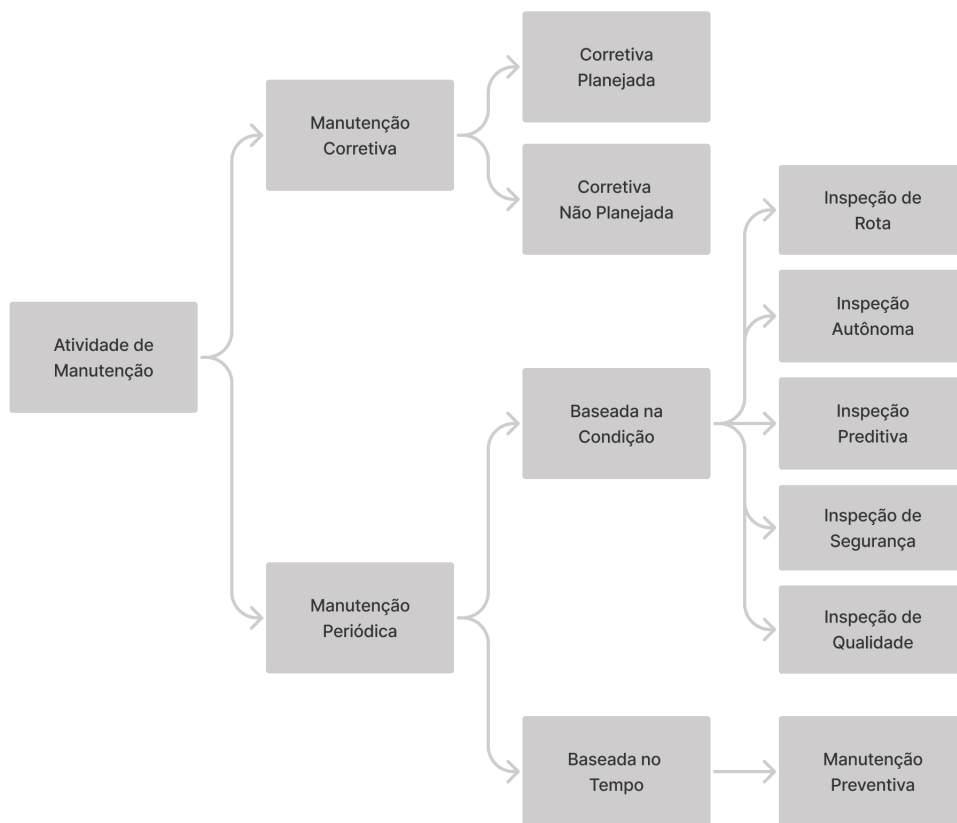
- **Manutenção Corretiva Não Programada:** Visa corrigir uma falha que ocorreu em um equipamento e que paralisou sua operação.
- **Manutenção Corretiva Programada:** Corrige um desempenho inferior ao esperado, mas que não resultou em uma falha do equipamento.

Já as manutenções periódicas são realizadas em equipamentos que não estejam em estado de falha e que são considerados importantes para o processo (a definição de importância do ativo será abordada no decorrer desta seção), podendo ser baseadas em dois fatores:

- **Baseada na Condição:** As manutenções baseadas na condição do equipamento, preconiza a realização dos serviços de manutenção no limite da vida útil dos componentes. Para isso é necessário o uso de inspeções periódicas nos equipamentos.
- **Baseada no Tempo:** São as manutenções preventivas, realizadas sem levar em consideração o estado dos componentes, apenas o tempo decorrido. Por exemplo, intervenção a cada seis meses, ou a cada 8.000 horas de operação do equipamento.

A Figura 1 exemplifica os tipos de atividades de manutenção.

**Figura 1 – Tipos de Manutenção**



**Fonte: Autoria própria.**

### 2.1.2 Ordem de Manutenção

Para que seja possível planejar, organizar e rastrear estas atividades de manutenção, as empresas utilizam uma documentação denominada Ordem de Manutenção (OM). Nesta OM



estão presentes todas as informações importantes para a realização da manutenção, e seu controle geralmente é feito por meio de módulos presentes em sistemas de gestão ERP. A Figura 2 demonstra uma ordem de manutenção do módulo de Planejamento de Manutenção do sistema SAP (SAP-PM). Os pontos destacados serão abordados a seguir:

**Figura 2 – Ordem de Manutenção**

The screenshot shows the SAP PM 'Order' (Ordem) screen. The order number is 500051449178 and the description is 'Impressora nao esta funcionando'. The cost is 5.708,00 BRL. The activity type is 'OC - Conserto Exter...'. The priority is 'Importante'. The equipment is 'IMPRESSORA 01 - IMAJE'. The start date is 10.04.2021 and the end date is 30.08.2021. The order is planned by 'PCM Manut. Abated.' and the responsible person is 'FMEBEL01 / 382'.

Fonte: Sistema SAP-PM.

1. **Número da Ordem:** Número de identificação da ordem no sistema;
2. **Descrição da Ordem:** Descrição da atividade a ser realizada nesta OM;
3. **Custos:** Neste campo estão descritos todos os custos relacionados à execução da OM;
4. **Tipo de Atividade de Manutenção (TAM):** É uma classificação relacionada a natureza da OM, uma relação com as principais TAMs está representada na Tabela 1.
5. **Prioridade:** Está relacionado a necessidade de execução da OM e é composta por cinco níveis em ordem de prioridade: Emergência, Urgência, Importante, Normal e Data Marcada.
6. **Equipamento:** Relaciona o equipamento alvo da manutenção prevista na OM, ou seja, o equipamento que irá receber a manutenção.
7. **Datas de Início e Fim:** Apresenta a data em que a ordem iniciou e a previsão execução.

**Tabela 1 – Tipos de Atividades de Manutenção**

<b>Tipo de Manutenção</b>	<b>Nome</b>	<b>Sigla</b>	<b>Descrição</b>
Manutenção Corretiva	Emergencial	EM	<i>Anomalia grave que pode gerar impacto direto em segurança, qualidade, produção ou meio ambiente, necessita atendimento imediato.</i>
Manutenção Corretiva	Corretiva Não Programada	NP	<i>Anomalia moderada que pode gerar impacto direto em segurança, qualidade, produção ou meio ambiente.</i>
Manutenção Corretiva	Corretiva Programada	CP	<i>Provenientes de anomalias do processo, mas que podem ter sua execução programada</i>
Manutenção Periódica	Preventiva	PR	<i>Manutenções periódicas baseadas no tempo</i>
Manutenção Corretiva	Auditoria	AD	<i>Correções de não conformidades observadas em auditorias</i>
Manutenção Corretiva	Melhoria de Qualidade	GM	<i>Melhorias apontadas pela equipe de Qualidade da indústria</i>
Manutenção Corretiva	Conserto Externo	OC	<i>Envio de equipamentos para reparos fora da empresa</i>
Manutenção Corretiva	Segurança	SG	<i>Anomalias que oferecem risco a segurança dos trabalhadores</i>
Manutenção Periódica	Lubrificação	LU	<i>Rotas para realizar a lubrificação dos equipamentos</i>
Manutenção Periódica	Inspeção de Rota	IR	<i>Inspeção para avaliação das condições dos equipamentos</i>
Manutenção Periódica	Inspeção Preditiva	IP	<i>Análise de pontos específicos dos equipamentos a fim de prever falhas</i>
Manutenção Periódica	Inspeção de Qualidade	IQ	<i>Buscam identificar anomalias que possam afetar a qualidade dos produtos</i>
Manutenção Periódica	Inspeção de Segurança	IS	<i>Buscam identificar anomalias que possam impactar na segurança dos trabalhadores</i>

**Fonte: Autoria Própria.**

### 2.1.3 Ativos Industriais

Um equipamento ou ativo é caracterizado por um conjunto físico de componentes interligados entre si, capaz de realizar uma transformação em um produto, ou de transportá-lo de um local para outro.

Dentro de uma indústria existem diversos equipamentos alocados, porém nem todos tem o mesmo nível de importância. Objetivando a aplicação correta dos recursos disponíveis, os ativos devem ser avaliados quanto à sua importância para o processo e os impactos em caso de falhas, permitindo assim o emprego dos recursos nos equipamentos de impacto no negócio.

Essa classificação pode ser realizada de diversas formas, uma abordagem muito utilizada, baseia-se em um sistema de quatro níveis (A - D), variando de um tratamento mais rigoroso, prioritário e abrangente (Críticidade A) onde a falha é muito custosa, até uma abordagem mais branda e simplificada (Críticidade D) onde a falha é desprezível. Essa classificação baseia-se geralmente nos seguintes aspectos:

- **Saúde e Segurança:** Equipamento pode oferecer risco a saúde e segurança dos trabalhadores;
- **Meio Ambiente:** Equipamento que utiliza recursos que podem ser nocivos ao meio ambiente (gases, graxas etc.) em casos de vazamentos;
- **Produção:** O quanto esse equipamento é importante para o funcionamento do processo produtivo;

- **Qualidade:** Uma falha no equipamento pode representar perda da qualidade do produto, ou o não atendimento de padrões estabelecidos;
- **Custo:** O quão custoso é para realizar um reparo nesse equipamento.

#### 2.1.4 Priorização de Ordens de Manutenção

Baseando-se no equipamento e nas características da OM, é realizado um processo de priorização dos serviços a serem executados, a fim de otimizar os recursos disponíveis e executar as manutenções de maior impacto. Esse processo baseia-se em três pontos cruciais:

1. **Criticidade do Equipamento:** Equipamentos mais importantes tem maior prioridade;
2. **Tipo da Atividade de Manutenção:** Atividades relacionadas à segurança dos trabalhadores e a qualidade dos produtos tem maior prioridade;
3. **Prioridade da OM:** Atividades com maior urgência tem maior prioridade.

Na indústria onde esse trabalho foi realizado, esse processo de priorização segue essas diretrizes acima mencionadas, porém é realizado de maneira manual diretamente no software de ERP, sem a aplicação de quaisquer ferramentas que auxiliem e garantam a aplicação desta diretriz. Neste processo, uma pessoa é responsável por olhar todas as OMs do *backlog* de manutenção e, juntamente com a equipe técnica, aprovar as que consideram prioritárias e que cabem no orçamento disponível para o mês.

Porém como o volume de OMs geradas e que se acumulam de meses anteriores é muito elevado, essa metodologia atualmente adotada não garante a correta aplicação da estratégia de manutenção adotada pela empresa, uma vez que estes pontos podem ser conflitantes como exemplificado pela Figura 3, necessitando assim, da aplicação de uma solução inteligente.

**Figura 3 – Exemplo de Situação Conflitante**

Ordem	Data	Criticidade Equipamento	Tipo de Atividade de Manutenção	Prioridade Ordem	Valor (R\$)
xxxxxxxxxx	01/01/2021	A	Preventiva	Data Marcada	R\$ ###,##
xxxxxxxxxx	01/01/2021	D	Segurança	Normal	R\$ ###,##
xxxxxxxxxx	01/01/2021	D	Preventiva	Emergência	R\$ ###,##

**Fonte: Autoria Própria.**

Este problema pode ser tratado, por de técnicas de busca ou metaheurísticas, um ramo da Inteligência Artificial (IA) que provê uma solução inteligente para este problema de alocação de recursos.

## 2.2 Algoritmos baseados em Busca

Algoritmos de busca são uma classe de algoritmos da área da IA que tem por objetivo buscar uma solução ideal dentre um conjunto de todas as possíveis soluções para um determinado problema. Segundo Russel e Norvig (2013), algoritmos baseados em busca são projetados para alcançar respostas por meio da exploração de um universo possível de soluções.

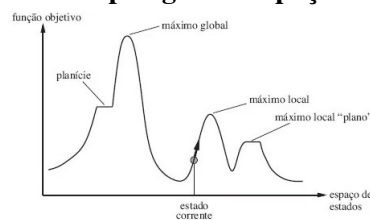
Considera-se por exemplo, o problema de procurar lentes de contato em um campo de futebol, partindo de um estado inicial em que se sabe que as lentes estão em algum lugar desse campo, porém não é conhecido o local exato, este é nosso espaço de busca. Em seguida pode ser aplicada uma técnica de procurar em cada  $\text{cm}^2$  do espaço de busca até que as lentes sejam encontradas. O  $\text{cm}^2$  onde estão as lentes é considerado um estado objetivo, pois ele satisfaz o objetivo de encontrar as lentes de contato (COPPIN, 2010).

Na literatura existem diversas técnicas de busca, como por exemplo busca em largura e em profundidade. No entanto, essas técnicas são consideradas muito custosas, uma vez que não aplicam nenhum conhecimento especial em sua busca, apenas examinam cada nó, em ordem, até que alcancem o seu objetivo. Em alguns casos isso é o melhor que pode ser feito, pois não existem dados adicionais que possam ser utilizados para guiar essa busca, como no nosso exemplo anterior da busca pelas lentes de contato (COPPIN, 2010).

Porém, em vários casos, existem informações disponíveis para auxiliar nessa busca. Essas informações são chamadas de heurísticas, e quando aplicadas a um sistema computacional, por meio de um algoritmo, podem tornar relativamente simples um problema, que de outra forma seria impossível. Nestes algoritmos são aplicadas funções de avaliação heurística, comumente conhecidas como função objetivo. Essa função quando aplicada a um nó, é capaz de calcular um valor que representa uma boa estimativa da distância desse nó para o objetivo. (COPPIN, 2010)

A Figura 4 exemplifica graficamente um espaço de busca bidimensional, e as possíveis características de sua topologia. Em seguida, detalharemos duas técnicas baseadas em buscas guiadas, ou seja, que utilizam informações disponíveis sobre a problemática para explorar o espaço de busca e encontrar boas soluções por meio de uma função objetivo.

**Figura 4 – Topologia do Espaço de Busca**



**Fonte: Russel e Norvig (2013).**

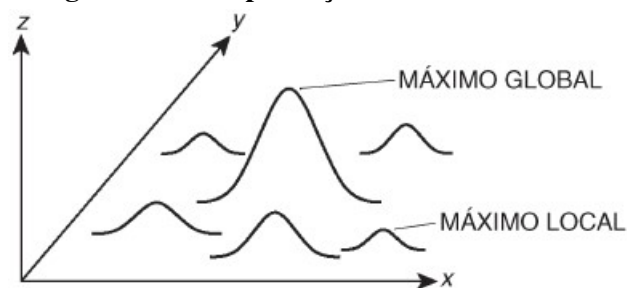
### 2.2.1 Subida da Encosta

O algoritmo subida da encosta, consiste de um laço de repetição que move-se de forma contínua em direção ao nó vizinho com maior valor de função objetivo, ou seja, encosta acima. Nessa estrutura não é armazenado o caminho que o algoritmo percorreu, apenas é registrado o estado e o valor da sua função objetivo (RUSSEL; NORVIG, 2013). A sua abordagem é próxima a de escalar uma montanha, em um dia de neblina, com um altímetro, mas sem mapa (COPPIN, 2010). Ou, como definiu Russel e Norvig (2013), é como tentar alcançar o cume do Monte Everest em meio a um nevoeiro denso durante uma crise de amnésia.

Essa abordagem também é chamada de busca gulosa local, pois ela segue o caminho para um bom vizinho, sem "pensar" para onde irá em seguida. Isso pode funcionar muito bem em vários casos, principalmente no início da execução, onde geralmente esse algoritmo progride com rapidez, porque normalmente é bem fácil melhorar um estado ruim (RUSSEL; NORVIG, 2013). Porém, a subida da encosta frequentemente fica paralisada por três motivos:

- **Máximos locais:** É um pico mais alto que todos os seus vizinhos, porém mais baixo que o máximo global do espaço de busca. Quando um algoritmo de subida da encosta alcança a vizinhança de um máximo local, ele é guiado para o topo, mas depois ficam presos sem ter para onde ir (RUSSEL; NORVIG, 2013).

**Figura 5 – Exemplificação de Máximos Locais**

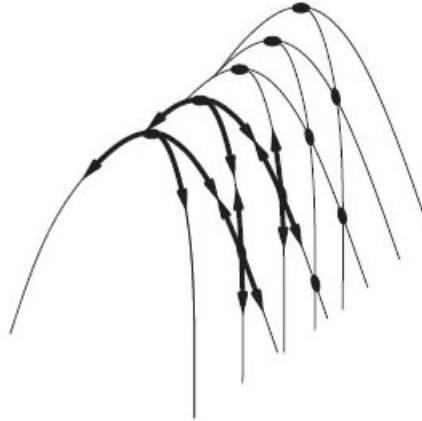


**Fonte: Coppin (2010).**

- **Platôs:** É uma área plana do espaço de dados, onde a vizinhança é igual ao valor do nó atual. Ela pode ser um máximo local plano, no qual não existe nenhuma saída encosta acima, ou pode ser uma planície, da qual é possível progredir. Essas topologias estão representadas na Figura 4. Uma possível solução para as planícies é permitir que o algoritmo faça movimentos laterais, mas é preciso ter cuidado, pois caso o algoritmo esteja em um máximo local plano, ele poderá ficar preso para sempre. Por este motivo, é aconselhável que seja definido um número máximo de movimentos laterais consecutivos permitidos. (RUSSEL; NORVIG, 2013)
- **Cordilheiras:** São constituídas de uma sequência de máximos locais, que não estão diretamente conectados uns aos outros, fazendo com que todas as ações possíveis apon-

tem para baixo, dificultando a navegação dos algoritmos ambiciosos como o subida da encosta. Essa topologia é exemplificada na Figura 6 (RUSSEL; NORVIG, 2013).

**Figura 6 – Exemplificação de Cordilheiras**



**Fonte: Russel e Norvig (2013).**

Todos esses pontos convergem para a conclusão de que o algoritmo subida da encosta em uma única execução tem alta probabilidade de ficar preso em um máximo local. Para potencializar o resultado desse algoritmo, pode ser implementado o subida da encosta com reinícios aleatórios. Este conduz uma série de buscas de subida de encosta a partir de estados iniciais gerados aleatoriamente em diversos pontos do espaço de busca (RUSSEL; NORVIG, 2013). Ao final, é retornado o maior valor encontrado pelas execuções.

Conclui-se que o algoritmo subida da encosta depende muito da topologia do espaço de busca onde é empregado. se houverem poucos máximos locais, a subida da encosta com reinício aleatório será capaz de encontrar uma boa solução em um curto intervalo de tempo.

### 2.2.2 Algoritmo Genético

Os algoritmos genéticos (AG) utilizam-se de um método de busca baseado no processo de evolução dos seres vivos, defendido pela teoria da seleção natural de Charles Darwin, para encontrar soluções para problemas complexos. Nesta teoria, a natureza evolui as criaturas que são mais capacitadas a se ajustarem aos seus ambientes, ou seja, ocorre a sobrevivência do mais adaptado. Estes algoritmos funcionam por combinar soluções potenciais a fim de produzir melhores soluções ao longo de gerações sucessivas, aplicando técnicas de mutação e cruzamento, para evitar a estagnação em máximos locais (COPPIN, 2010).

Os AGs iniciam sua execução com um conjunto de estados gerados aleatoriamente chamado **população** (Figura 7(c)). Cada um dos estados que compõem a população é denominado **indivíduo** ou **cromossomo** (Figura 7(b)), que representam uma solução completa para o problema, para tal, os cromossomos utilizam um agrupamento de **genes** (Figura 7(a)) que contém informações importantes para a resolução do problema (RUSSEL; NORVIG, 2013).

**Figura 7 – Representações dos elementos de um AG**

a) 

285
-----

b) 

285	141	62	77	914	332	12	762
-----	-----	----	----	-----	-----	----	-----

c) 

285	141	62	77	914	332	12	762
124	769	22	412	747	545	191	232
341	999	1	311	882	454	941	167
329	784	696	147	4	73	99	100

**Fonte: Autoria própria.**

O tamanho dos indivíduos varia bastante de acordo com cada problemática, e os genes podem ser representados de diversas formas. Frequentemente, os genes são representados por valores binários, onde o *bit* 1 representa presença e o *bit* 0 ausência de determinada característica, mas valores inteiros e reais também podem ser utilizados, isso depende da natureza do problema abordado (FACELI *et al.*, 2021). O pseudocódigo da Figura 8 demonstra o funcionamento de um algoritmo genético básico, e o seu fluxo de execução é exemplificado pela Figura 9.

**Figura 8 – Pseudocódigo Algoritmo Genético**

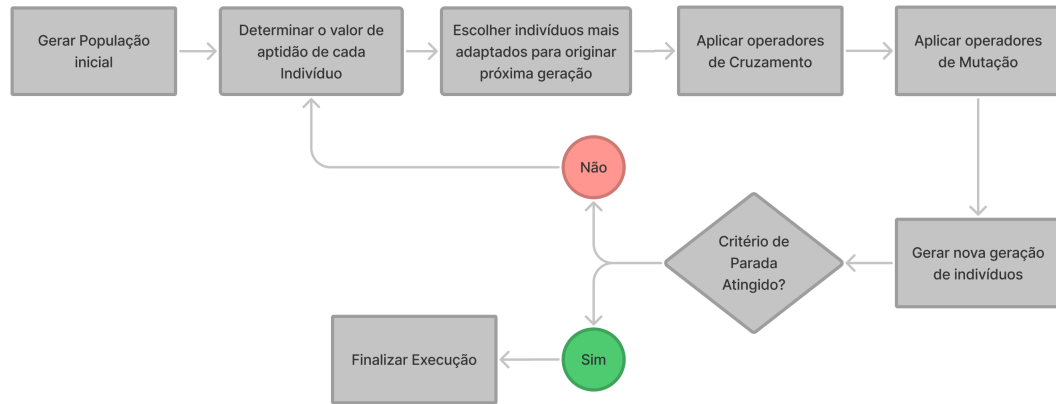
```

1 Gerar população inicial de indivíduos
2 repita
3   para cada indivíduo da população faça
4     Avaliar sua aptidão para resolver o problema
5   fim
6   Selecionar indivíduos que participarão da próxima geração
7   Aplicar operadores genéticos aos indivíduos selecionados
8 até Critério de parada ser satisfeito;
```

**Fonte: Faceli *et al.* (2021).**

**A Geração da População Inicial,** Como dito anteriormente, essa primeira população é gerada aleatoriamente e consiste em um conjunto de soluções candidatas. O tamanho da população geralmente é definido antecipadamente e mantém-se estável no decorrer das gerações. Porém existem casos em que é necessário que a população mude de tamanho no decorrer da execução (COPPIN, 2010).

**Figura 9 – Fluxograma Algoritmo Genético**

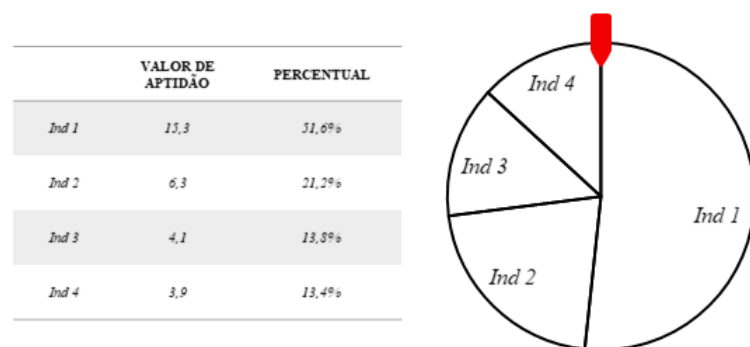


**Fonte: Autoria própria.**

Na **Avaliação da Aptidão dos Indivíduos**, o AG implementa uma busca onde os indivíduos mais aptos têm maiores chances de sobreviver e de gerar descendentes. Para que isso seja possível, cada solução deve ser avaliada quanto a sua aptidão a partir de uma função de aptidão, ou função de *fitness*. Quando aplicada à um indivíduo, essa função deve ser capaz de mensurar o quão boa é aquela solução para o problema abordado.

Na **Escolha dos Indivíduos** são selecionados os indivíduos que irão reproduzir-se na fase de cruzamento, por meio de eventos probabilísticos. Existem vários métodos de seleção, porém o mais conhecido é a seleção por roleta (FACELI *et al.*, 2021). A Figura 10 representa o método de seleção por roleta, onde cada indivíduo de uma população é representado em uma roleta por uma fatia proporcional ao valor de sua aptidão. Para selecionar  $n$  indivíduos, a roleta é girada  $n$  vezes (FACELI *et al.*, 2021).

**Figura 10 – Seleção por roleta**

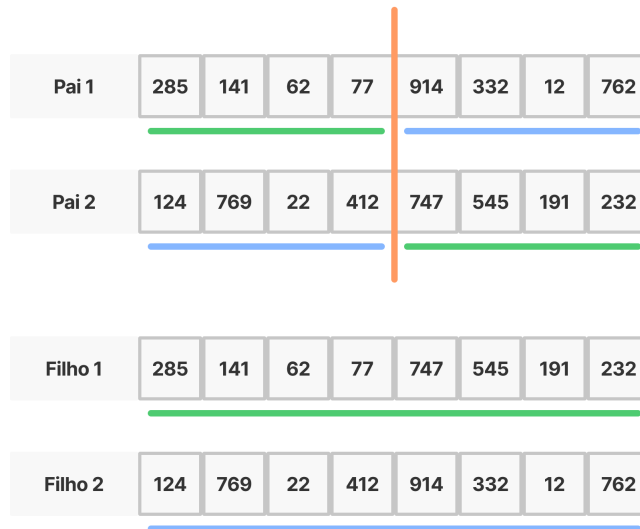


**Fonte: Autoria Própria.**



No **Cruzamento** o operador de cruzamento é aplicado nos indivíduos selecionados para reprodução, o mais tradicional produz dois novos indivíduos (filhos) a partir de dois indivíduos selecionados (pais). Existem diversas formas de cruzamento, com um ponto de corte ou diversos pontos de corte. Sua aplicação deve ser avaliada conforme as características dos indivíduos da população. A Figura 11 demonstra como ocorre o processo de cruzamento com um ponto de corte, onde cada filho recebe uma parte de cada um dos seus pais (FACELI *et al.*, 2021).

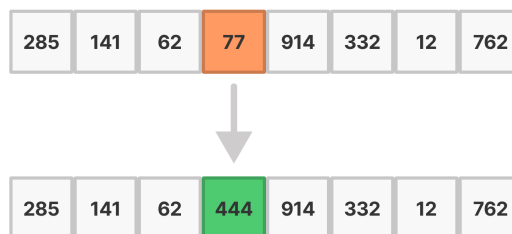
**Figura 11 – Cruzamento com um ponto de corte**



**Fonte: Autoria Própria.**

Na **Mutação** o operador de mutação é aplicado para que a população obtenha maior diversidade genética. Na mutação, um gene aleatório do indivíduo selecionado com base na taxa de mutação é alterado, assim permitindo que qualquer ponto do espaço de busca possa ser alcançado. A Figura 12 exemplifica o processo de mutação de um cromossomo (FACELI *et al.*, 2021).

**Figura 12 – Mutação em um indivíduo**



**Fonte: Autoria Própria.**

Quanto ao **Critério de Parada** no processo de avaliação, seleção e aplicação de operadores genéticos repete-se até que um determinado critério de parada seja atingido. Atualmente

diversos critérios são utilizados para determinar o fim da execução de um AG, como um número máximo de gerações, a falta de melhoria por um determinado número de gerações, ou o valor de aptidão do melhor indivíduo (FACELI *et al.*, 2021).

Uma das vantagens da utilização de AGs está no fato destes realizarem buscas em diversas partes do espaço de busca simultaneamente, encontrando soluções até mesmo em regiões complexas. Porém uma das suas principais desvantagens é o elevado custo computacional, mas isso é amenizado pela facilidade de ser paralelizado (FACELI *et al.*, 2021).

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

A área de manutenção industrial já foi pesquisada por diversos autores, e a visão de otimização de recursos e assertividade nesta área não é nova. Porém o uso de técnicas avançadas de computação como a IA ainda são recentes e necessitam de mais estudos para serem empregados em ambientes reais. Assim, o objetivo deste capítulo é apresentar uma análise de estudos já realizados na área que utilizam de técnicas e conceitos da IA, visando otimizar recursos e agregar qualidade na tomada de decisões nos processos de manutenção industrial.

Na Tabela 2 é apresentada a distribuição dos estudos selecionados. A disposição da Tabela mostra-se de tal forma que a identificação dos estudos se encontra na primeira coluna, o ano de publicação do estudo, juntamente com o nome dos autores, está na segunda coluna e, por fim, na terceira coluna são apresentadas as bases de busca de onde os estudos foram extraídos.

**Tabela 2 – Visão geral dos estudos selecionados**

<b>Estudo</b>	<b>Referência</b>	<b>Base de Busca</b>
E1	Flores, Anzanello e Vidor (2012)	Google Acadêmico
E2	Pereira <i>et al.</i> (2020)	Google Acadêmico
E3	Perng, Juan e Hsu (2007)	Google Acadêmico
E4	Aquino, Chagas e Souza (2019)	Google Acadêmico
E5	Silva e Santos (2020)	Google Acadêmico

**Fonte: Autoria própria.**

Um estudo de caso foi realizado por Flores, Anzanello e Vidor (2012) em uma empresa de transformação de bobinas de aço plano em tubos, analisando a máquina que realiza essa transformação das bobinas em tubos. O objetivo foi a otimização do cronograma de realização de manutenções preventivas e os custos relacionados a possíveis falhas no equipamento utilizando um Algoritmo Genético.

Para isso foram coletados dados das falhas, determinado junto com os especialistas os ganhos com a realização de cada manutenção parcial ou total, levantado os custos relacionados aos procedimentos e formulado uma função de avaliação (Equação 1) para determinar qual tipo de manutenção a ser utilizada.

$$F(X_1, X_2, \dots, X_k) = CMC_k + CMP \quad (1)$$

Onde  $CMC$  é o custo da manutenção corretiva, que leva em conta os custos relacionados por possíveis falhas no equipamento. Já o  $CMP$  é o custo da manutenção preventiva, determinado pela soma das homem-hora trabalhadas e os insumos consumidos na atividade.

A coleta de dados foi feita por meio das ordens de manutenção no software de gestão de manutenções utilizado pela empresa. Posteriormente com base nos conhecimentos da equipe técnica e levando em consideração fatores como segurança e desempenho, classificaram a importância das manutenções totais e de cada manutenção parcial (lubrificações, limpezas, ajustes etc.). Após foi desenvolvido o algoritmo genético em *Matlab* com critério de parada em 250

gerações, população inicial de 20 cromossomos. Ao final do estudo de caso foi gerado com sucesso um cronograma de manutenções que foi aprovado pelos especialistas da empresa, além de gerar uma economia de 20% nos custos se comparado com a programação empírica realizada até então por esta empresa. Outro ponto destacado nos resultados do artigo pelo autor é a comprovação da eficiência do uso de AGs em problemas envolvendo Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC).

Uma abordagem baseada em um algoritmo genético foi desenvolvida por Pereira *et al.* (2020) para a priorização de manutenções em uma concessionária de distribuição de energia elétrica. Este estudo teve por objetivo, determinar quais manutenções deveriam ser executadas para trazer o maior impacto possível, reduzindo a frequência de faltas de energia e atendendo ao orçamento disponível.

O estudo de caso do trabalho se deu na empresa EDP, onde até então as ordens de manutenção executadas eram determinadas de maneira manual por meio de informações compiladas em planilhas eletrônicas. Tal processo é considerado frágil para a tomada de decisão, pois demanda tempo de análise e experiência profissional, o que pode levar a conclusões subjetivas. Para a solução da problemática, cujo principal ponto é produzir um conjunto eficiente de ordens de manutenção e considerando a disponibilidade orçamentária, foi proposto uma abordagem utilizando um AG compreendendo três etapas principais:

- **Aquisição de dados de entrada:** Foram considerados dados de várias fontes como dados topográficos, leituras de dispositivos, registros de falta de energia e o *backlog* de manutenções existentes no sistema ERP da empresa;
- **Avaliação das ordens de manutenção:** Utilizando-se destes dados coletados, as ordens de manutenção são avaliadas, e atribui-se um Índice de Mérito (IM) que relaciona os benefícios da execução desta manutenção, com os custos associados para a realização;
- **Priorização das ordens de manutenção:** Por fim, a etapa de priorização visa determinar um conjunto ideal de ordens de manutenção que tragam o maior benefício possível, considerando as restrições orçamentárias. Para tal, foi considerado o AG.

O Algoritmo Genético foi desenvolvido de modo que cada cromossomo é um conjunto de ordens priorizadas em um espaço de todas as N ordens de manutenção necessárias, e cada gene é uma ordem de manutenção priorizada. O comprimento dos cromossomos foi determinado pela razão entre o orçamento disponível e o custo médio das ordens avaliadas, representado pela Equação 2

$$\text{Comprimento do Cromossomo} = \frac{\text{Orçamento Total}}{\text{Custo médio}} \quad (2)$$

A função de *fitness*, representada na Equação 3, foi determinada pela somatória dos índices de mérito (IM) das ordens priorizadas, multiplicado por um coeficiente de ponderação

( $k_{pen}$ ), que representa uma penalidade ao não atendimento do orçamento, onde o indivíduo é levemente penalizado se o custo total for inferior ao orçamento disponível, mas é severamente penalizado se o custo total exceder o orçamento.

$$f_{obj} = k_{pen} \times (IM_1 + \dots IM_i + \dots IM_m) \quad (3)$$

Os parâmetros de execução do AG foram de 5.000 gerações, 200 indivíduos, probabilidades de cruzamento e mutação iguais a 90% e 2%, respectivamente. Ao final do estudo, foi possível produzir um conjunto eficiente de ordens priorizadas, que otimizaram ao máximo o orçamento disponível, com mais de 97% de utilização. Com isso, concluiu-se que a utilização de AG representou um avanço em relação ao método até então utilizado na empresa em estudo.

No estudo executado por Perng, Juan e Hsu (2007) são discutidos problemas relativos à alocação de orçamentos para restauração de edifícios históricos na cidade de Tainan em Taiwan. A proposta do trabalho utilizou-se de algoritmos genéticos para apoiar a tomadas de decisão, visando otimizar a alocação dos orçamentos além de oferecer melhores meios de contratação. Para a otimização com o AG, foi utilizado a função de *fitness* representada na Equação 4. Onde  $X$  representa o valor de prioridade da restauração e  $Y$  o valor da sinergia do pacote.

$$\sum_{j=1}^n SK_j = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Y_{ij} \quad (4)$$

O resultado em comparação a modelos tradicionais, demonstrou oferecer decisões mais eficazes e econômicas.

No trabalho de Aquino, Chagas e Souza (2019) é abordado o planejamento de manutenções preventivas em uma indústria brasileira de beneficiamento de minério de ferro, a fim de otimizar o uso de mão de obra interna e terceira e o orçamento anual desta indústria. Neste caso de estudo, a empresa faz um planejamento das manutenções preventivas que serão executadas durante as 52 semanas do ano. O estudo decorre em volta do Problema de Planejamento de Ordens de Manutenção Preventiva de Longo Prazo (PPOMPLP), que consiste na atribuição das ordens de manutenção para as equipes de execução no horizonte das 52 semanas anuais. Esse planejamento é desenvolvido por uma gerência de engenharia de manutenção, utilizando o módulo de manutenção do sistema SAP.

Na construção da solução desta problemática, diversas restrições tiveram de ser consideradas, a maioria delas relacionadas a problemas de escalonamento e sequenciamento. Cada ordem de manutenção deve ser atribuída tanto a equipe de manutenção quanto ao equipamento, pois uma equipe não pode executar duas manutenções simultaneamente e um equipamento não pode ter mais de uma ordem de manutenção sendo executada ao mesmo tempo, sem contar outras limitações como jornadas de trabalho máxima da equipe, especificidades técnicas para cada tarefa, dentre outras limitações.

Todas estas limitações foram transcritas em uma formulação de programação matemática, que descreve matematicamente todas estas condicionantes do PPOMPLP. Possui o objetivo de determinar o plano de execução das manutenções que minimiza o número de equipes de trabalho necessárias respeitando todas as regras definidas para o problema no modelo matemático. Formulando assim a função objetivo dos algoritmos de busca, apresentada na Equação 5.

$$\min \sum_{k \in W} z_k + \sum_{i \in T_k} w_i \left( 1 - \sum_{k \in W_i} y_{ik} \right) \quad (5)$$

A função objetivo busca reduzir a quantidade de mão de obra necessária para executar o máximo de ordens de manutenção possível, e aplica uma penalidade  $w_i$  pela não execução de cada manutenção.

Em seguida foram comparados diversos algoritmos baseados em busca, a fim de encontrar uma solução de boa qualidade e capaz de ser executada em um tempo computacional viável. Em todos os algoritmos, o conjunto solução  $s$  é representado por  $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$  das  $n$  ordens de manutenção selecionadas pelo algoritmo, em ordem de prioridade. Optou-se por essa representação pois facilita na geração de soluções iniciais, bem como na exploração do espaço de busca por operadores de vizinhança se comparado com a representação direta, que seria uma lista do número das ordens de manutenção. A seguir uma breve contextualização dos algoritmos aplicados na solução do PPOMPLP.

- **A1 - Alocação de Ordens de Manutenção:** Um algoritmo simples, que por meio de estruturas de repetição e de condição, cobre todas as restrições do sistema e visa alocar as ordens de manutenção para as equipes.
- **A2 - *Simulated Annealing* (SA):** É um algoritmo probabilístico inspirado no processo metalúrgico termodinâmico de recozimento de metais, onde quanto maior for a temperatura, mais provável de o algoritmo aceitar uma solução de piora.

Para reproduzir essa analogia em um algoritmo SA, o algoritmo em início de execução recebe em uma temperatura elevada, que vai diminuindo gradativamente de acordo com o fator de resfriamento, até atingir uma determinada temperatura (condição de parada). É um algoritmo de busca em vizinhança, onde em cada iteração de uma dada temperatura. Se a solução vizinha for melhor que a atual, ela é aceita, senão, ela tem uma probabilidade de ser aceita, baseada na temperatura atual e na variação da função objetivo.

- **A3 - *Variable Neighborhood Search* (VNS):** Os algoritmos VNS consistem em duas fases: 1) fase de melhoria onde é aplicado uma busca local para, a partir de uma solução inicial, percorrer a vizinhança até encontrar um ótimo local, 2) fase de perturbação denominada SHAKE para que o algoritmo não fique preso em ótimos locais. Estas fases são aplicadas alternadamente até que um critério de parada seja atingido.

- **A4 - *Multi-Start Variable Neighborhood Search (MSVNS)***: Os algoritmos MSVNS são uma variante do VNS, porém iniciados em diversos pontos diferentes do espaço de busca. Por meio de buscas locais em cada um desses pontos de início, retornam a melhor solução que encontraram. A maior vantagem deste modelo em comparação ao VNS é que ele pode facilmente ser paralelizado. Por meio da grande capacidade de multiprocessamento oferecida pelos computadores atuais, conseguem percorrer um espaço de busca maior.
- **A5 - *Biased Random-Key Genetic Algorithm (BRKGA)***: É uma variante do algoritmo genético introduzido por Bean (1994) denominado *Random-Key Genetic Algorithm - RKGA*. Neste algoritmo a representação de cada indivíduo é realizada por meio de um vetor de chaves aleatórias entre o intervalo contínuo de  $[0, 1)$ , o que facilita a geração de uma população inicial, porém necessita da aplicação de um algoritmo de decodificação para a transformação das chaves aleatórias em uma solução. Para a geração de descendentes, é realizado um *crossover* uniforme, onde são selecionados dois pais aleatórios e para cada gene do filho é realizado um sorteio para determinar de qual pai ele irá herdar.

Uma característica interessante deste algoritmo é que não são aplicados os conceitos originais de mutações do GA, mas sim o de mutantes. Estes são gerados de mesmo modo da população inicial e inseridos nas soluções candidatas. A evolução é realizada por meio da avaliação de toda a geração atual e a separação desta em três grupos. 1) Grupo de elite contendo as melhores soluções, estes são adicionados diretamente na próxima geração; 2) Um grupo de mutantes é gerado e adicionado à próxima geração; 3) É realizado o cruzamento entre dois indivíduos aleatórios e adicionado à próxima geração.

O BRKGA difere o RKGA na forma em que os pais são escolhidos para a reprodução e na forma com que a reprodução acontece. Estas ocorrem de maneira tendenciosa, a favorecer o indivíduo melhor, tanto no momento de escolha dos pais que irão se reproduzir, quanto na escolha de cada gene.

- **A6 - *Biased Random-Key Memetic Algorithm (BRKMA)***: Algoritmo baseado no BRKGA porém com o incremento de algoritmos matemáticos (AMs). Estes AMs basicamente incluem funções de busca local entre o processo de evolução dos algoritmos genéticos. O objetivo dessa busca local é encontrar ótimos locais da população de elite, assim possibilitando soluções mais promissoras.

Estes algoritmos foram implementados em linguagem C++, e submetidos a testes com diversas instâncias de teste conforme apresentado na Tabela 3. Dentre elas o caso real fornecido pela equipe de engenharia da empresa (conjunto GG), em um *hardware* padronizado, e as variáveis dos algoritmos foram calibradas utilizando uma ferramenta chamada Irace.

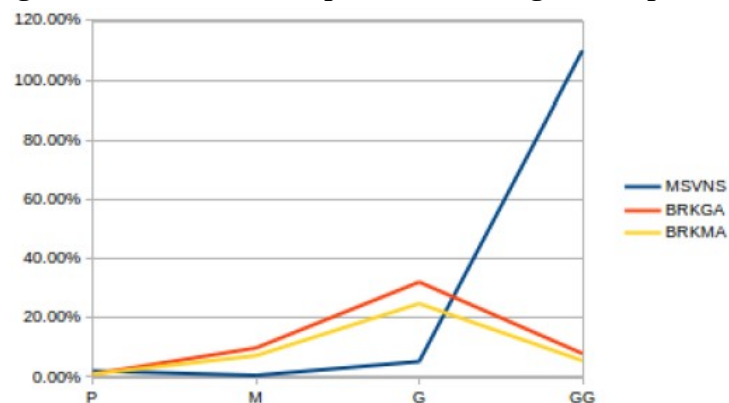
**Tabela 3 – Características dos dados de teste do estudo**

Conjunto	# Instância	# Ordens	# Equipes	# Equipamentos
P	100	20 a 80	2 a 5	2 a 14
M	18	150 a 600	57 a 256	91 a 388
G	18	1200 a 4800	88 a 283	252 a 1286
GG	3	9600 a 33484	132 a 145	816 a 1032

**Fonte: Aquino, Chagas e Souza (2019).**

Primeiramente o autor comparou os algoritmos A1, A2 e A3 para resolução das instâncias do conjunto P. E pôde perceber uma melhor performance do algoritmo SA e VNS em relação ao primeiro, constatando que este algoritmo não seria capaz de chegar a uma solução para os conjuntos com maior número de dados. Ao utilizar estes dois algoritmos que comprovaram eficácia na resolução do conjunto P no conjunto real de dados da empresa (conjunto GG), os resultados obtidos foram então comparados com o indicador controlado pela empresa o percentual de ordens executadas pela programada, que no histórico da empresa é próximo de 50%. Com o SA foi possível alcançar um indicador de 90% em 162 horas de processamento, já com o VNS foi possível alcançar 95,5% nesse mesmo tempo.

Após a comprovação de que os algoritmos heurísticos funcionam para a solução do PPOMPLP, foram testados os algoritmos que podem ser paralelizados, os algoritmos A4, A5 e A6. Os resultados mostraram não haver um algoritmo melhor para a resolução do problema, pois em cada conjunto, um algoritmo mostrou-se superior como demonstra a Figura 13.

**Figura 13 – Resultado comparativo entre algoritmos paralelos**

**Fonte: Aquino, Chagas e Souza (2019).**

Outro estudo realizado por Silva e Santos (2020) comprova a viabilidade do uso de técnicas de IA para a redução de custos operacionais no setor aeronáutico, por meio de uma gestão e planejamento das manutenções com uso de *Machine Learning*.

No estudo em questão, a IA mostrou-se uma alternativa altamente viável no âmbito de manutenção, sendo utilizada como uma ferramenta de suporte na tomada de decisões estratégicas, e sua aplicação foi dividida em três frentes:



- **Planejamento e Programação de Manutenção:** O processo logístico operacional das manutenções já é realizado com sucesso por meio de sistemas consolidados de MRO (*Maintenance, Repair, Overhaul*), entretanto as tarefas técnicas de manutenção são realizadas manualmente, e nesse ponto pode ser aplicado técnicas de IA;
- **Manutenção Preditiva:** Através da capacidade de analisar grandes quantidades de dados, é possível empregar IA para detectar o melhor momento de realizar uma manutenção antes da falha;
- **Coordenação das Operações de Manutenção:** Como a manutenção de uma aeronave envolve vários departamentos, a IA pode ser aplicada ao fluxo de trabalho, agilizando a comunicação entre estes setores, gerando maior eficiência operacional.

Por meio deste estudo de Silva e Santos (2020), é possível observar que o uso da IA aplicada ao problema de gestão de manutenções e na tomada de decisões estratégicas obteve resultados positivos, como a redução de custos e maior eficiência operacional.

O estudo de Flores, Anzanello e Vidor (2012) vem muito de encontro com a proposta do presente TCC, pois nele é discutido e aplicado um AG para gerar um cronograma de manutenções. Considerando requisitos de prioridade para classificar as atividades de manutenção. Um ponto onde o autor não explora com profundidade é o AG, pois não são apresentados quantas vezes o algoritmo foi executado, nem como os parâmetros foram calibrados.

O estudo de Aquino, Chagas e Souza (2019) contribui muito ao tema, pois realiza um estudo aplicando diversos algoritmos baseados em busca, embora sua aplicação seja mais complexa do que a deste trabalho, os resultados comprovam que a aplicação de algoritmos genéticos provou-se funcional para a resolução do problema. Além de que a empresa que serviu de embasamento para este estudo, utiliza o mesmo software para a gestão das manutenções que a empresa onde será testada a viabilidade da solução proposta no presente trabalho.

Porém, como mencionado anteriormente, sua aplicação é voltada para o planejamento de longo prazo da execução das manutenções, diferente do objetivo deste trabalho, onde se visa otimizar a aprovação de ordens de manutenção de um *backlog* existente para execução, tendo em vista os recursos orçamentários disponíveis.

Tendo em vista a abordagem pretendida neste trabalho, o estudo de Pereira *et al.* (2020) é o que mais se aproxima do conteúdo que aqui será abordado. Nele foi realizado um estudo de caso em uma empresa que utiliza de métodos manuais para a realização da priorização das manutenções que devem ser executadas tendo como limitante o orçamento disponível para tais manutenções. A abordagem também utilizou-se de um AG, e a metodologia de determinação da função de avaliação, juntamente com a penalização dos indivíduos que não atendem ao orçamento, serviu de embasamento para o desenvolvimento da solução deste trabalho.

Para melhor sintetizar os conteúdos abordados nos trabalhos selecionados, a Tabela 4 apresenta uma relação das técnicas utilizadas, a função de avaliação e os parâmetros dos trabalhos quando aplicável, além dos resultados obtidos com o emprego destas técnicas.

Tabela 4 – Tabela Comparativa dos Estudos

Estudo	Técnicas Utilizadas	Função de Fitness	Parâmetros	Resultados Obtidos
E1	Algoritmo Genético	$F(X_1, X_2, \dots, X_k) = CMC_k + CMP$	Gerações: 250 População: 20 Indivíduos Representação dos Indivíduos: Binária	Um cronograma aprovado, com redução de 20% nos custos
E2	Algoritmo Genético	$F_{obj} = K_{pen} \times (IM_1 + \dots + IM_i + \dots + IM_m)$	Gerações: 5.000 População: 200 Indivíduos Probabilidade de Cruzamento: 90% Probabilidade de Mutação: 2% Representação dos Indivíduos: Cada gene uma ordem de manutenção	Conjunto eficiente de ordens de manutenção à serem realizadas, otimizando os recursos financeiros disponíveis
E3	Algoritmo Genético	$\sum_{j=1}^n SK_j = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Y_{ij}$	Representação dos Indivíduos: Matriz, posição representa o trabalho de restauração e o valor representa o número do pacote	O uso de AG se mostrou mais eficiente que os métodos tradicionalmente utilizados
E4	Simulated Annealing Variable Neighborhood Search Multi-Start Variable Neighborhood Search Biased Random-Key Genetic Algorithm Biased Random-Key Memetic Algorithm	$\min \sum_{k \in W} z_k + \sum_{i \in T_k} w_i \left( 1 - \sum_{k \in W_i} y_{ik} \right)$	População: 20 Indivíduos Representação dos Indivíduos: Cada gene representa uma ordem de manutenção, ordenadas por prioridade de execução	Não foi possível determinar um melhor algoritmo para a resolução do problema, pois a eficiência depende da complexidade das instâncias de teste
E5	Machine Learning	Não Aplicável	Não Aplicável	A aplicação de IA se mostrou eficiente no planejamento e priorização de manutenções, reduzindo custos.

Fonte: Autoria Própria.

## 4 PROPOSTA

A manutenção de ativos industriais desempenha um papel crucial dentro de uma indústria, pois impacta em aspectos fundamentais como qualidade, produtividade e custos. Realizar essas manutenções de maneira otimizada é uma necessidade para uma empresa que deseja destacar-se competitivamente no mercado.

No entanto, em uma empresa de grande porte, mensalmente são geradas várias ordens de manutenções, todas elas com características e prioridades diferentes, baseadas em diversos aspectos. Porém, o processo de priorizar a execução destas ordens de acordo com os recursos financeiros disponíveis, é realizado manualmente por uma equipe de planejamento.

Tendo em vista a necessidade de uma indústria ser assertiva na realização das manutenções baseadas em suas estratégias e recursos disponíveis, e de que este processo ocorre em sua maioria de maneira manual, oportuniza-se a aplicação de técnicas de IA a fim de viabilizar uma solução para tal problemática. Neste contexto, é importante salientar que essa problemática foi observada em um caso real em uma indústria alimentícia da cidade de Dois Vizinhos no Paraná.

Este capítulo tem como objetivo apresentar o projeto desenvolvido, descrevendo seus principais objetivos. Na Seção 4.1 está descrita a proposta realizada que está relacionada à automatização da priorização de ordens de manutenção. Por fim, na Seção 4.2 estão descritas as informações sobre a aplicação desenvolvida para facilitar a utilização da solução pelos usuários.

### 4.1 Priorização de Ordens de Manutenção Baseada em Busca

Em uma indústria, o processo de priorização das ordens de manutenção que devem ser realizadas com o recurso financeiro disponível é conduzido por meio de um relatório do *backlog* de ordens de manutenção (ordens que estão no sistema esperando execução) e seguindo as diretrizes de prioridades definidas na estratégia de manutenção.

Na indústria onde esse trabalho foi aplicado, a gestão de todas as ordens de manutenção é realizada pelo módulo PM do sistema SAP. Neste sistema o relatório do *backlog* pode ser gerado em formato de planilha eletrônica (.xlsx). Com base neste relatório e nas diretrizes da estratégia de manutenção demonstradas na Figura 14, as ordens de manutenção são priorizadas, dando maior preferência para: 1) equipamentos de maior criticidade para o processo; 2) atividades que envolvam a segurança das pessoas, ou a qualidade dos produtos; e 3) a urgência da execução das Ordens de Manutenção (OMs).

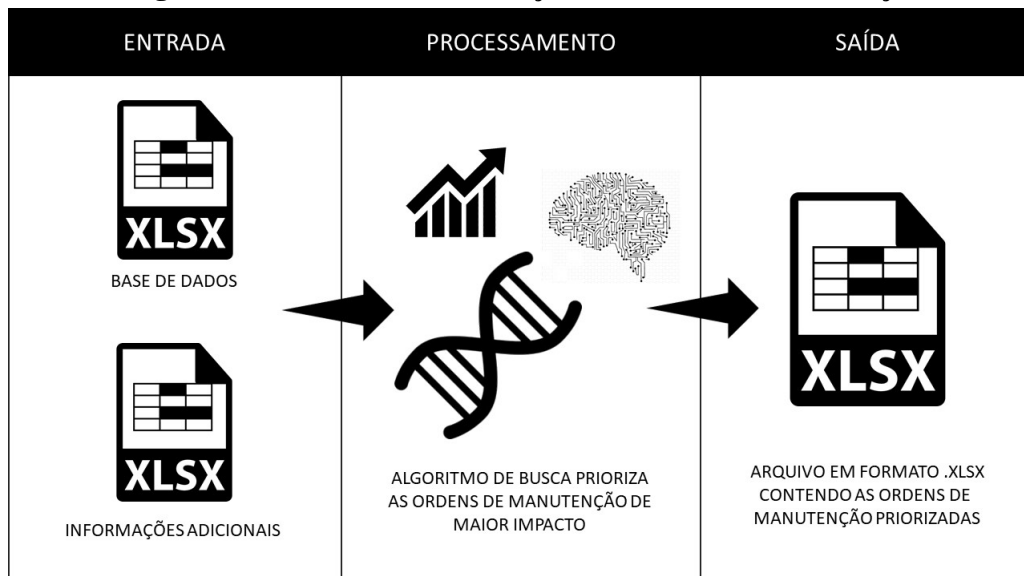
Neste contexto, foi desenvolvido um sistema inteligente para auxiliar na tomada de decisões quanto a realização de manutenções em uma indústria alimentícia, por meio de um algoritmo genético que objetiva melhorar a destinação dos recursos financeiros disponíveis, além de reduzir o tempo despendido no processo manual que atualmente é empregado. A Figura 15 ilustra o processo proposto de priorização das OMs.

**Figura 14 – Estratégia de Manutenção**



Fonte: Autoria Própria.

**Figura 15 – Processo de Priorização das Ordens de Manutenção**



Fonte: Autoria Própria.

Conforme demonstrado na Figura 15, o processo de priorização das ordens de manutenção é baseado em três etapas: (1) Entrada, (2) Processamento; (3) Saída, as quais serão detalhadas a seguir.

1. **Entrada:** é composta por duas bases:

- **Base de Dados:** relatório gerado em formato de planilha eletrônica (.xlsx) no software ERP da empresa, que contém todo o *backlog* de manutenção, e posteriormente inserido na aplicação. Essa planilha irá, de maneira padronizada, conter as informações essenciais sobre as ordens de manutenção, conforme apresentadas na Figura 16.

**Figura 16 – Estrutura da Planilha Base**

Ordem	Data	Criticidade Equipamento	Tipo de Atividade de Manutenção	Prioridade Ordem	Valor (R\$)
<i>Número da Ordem de Manutenção</i>	<i>Data de criação da OM no sistema</i>	<i>Escala que representa a importância do equipamento alvo da OM</i>	<i>Classificação relacionada a natureza da OM</i>	<i>Escala que representa a necessidade de execução da OM</i>	<i>Valor total em reais (R\$) necessário para a execução da OM</i>

**Fonte: Aatoria Própria.**

- **Informações Adicionais:** estas informações estarão contidas dentro da aplicação, e servirão de pré-processamento e transformação das nomenclaturas existentes na base de dados para os pesos atribuídos a cada item, conforme demonstrado na Figura 17.

Essas informações foram calibradas com as diretrizes da estratégia de manutenção da indústria onde esse trabalho se aplica, e validadas pelo supervisor responsável pela equipe de PCM. Esta planilha viabiliza a aplicação deste trabalho em outras indústrias com diretrizes e estratégias diferentes, pois permite uma fácil atualização.

**Figura 17 – Estrutura da Planilha de Informações**

Criticidade Equipamento		Tipo de Atividade		Prioridade Ordem	
Original	Pontos	Original	Pontos	Original	Pontos
<i>Lista com todas as nomenclaturas presentes na base</i>	<i>Valor a ser utilizado pela função de avaliação</i>	<i>Lista com todas as nomenclaturas presentes na base</i>	<i>Valor a ser utilizado pela função de avaliação</i>	<i>Lista com todas as nomenclaturas presentes na base</i>	<i>Valor a ser utilizado pela função de avaliação</i>

**Fonte: Aatoria Própria.**

Outra informação importante que está presente nesta base é o valor do orçamento a ser utilizado para essas manutenções, conforme apresentado na Figura 18.

**Figura 18 – Orçamento Disponível**

Orçamento
<i>Valor disponível em reais (R\$) para a execução das OM priorizadas pelo Algoritmo Inteligente</i>
<i>(Ex: R\$ 800.000,00)</i>

**Fonte: Aatoria Própria.**

2. **Processamento:** O processamento é realizado pelo algoritmo genético, que utiliza como base as ordens inseridas na aplicação e as informações adicionais de prioridades também contidas na aplicação, e realiza o processo de priorização.
3. **Saída:** Ao final de todo o processamento, o algoritmo retornará ao usuário um arquivo em formato de planilha eletrônica, contendo uma relação de todas as ordens de manutenção que devem ser executadas com o recurso disponível, além de estar disponível dentro da aplicação um *dashboard* que permite uma análise gráfica da solução. A utilização dos arquivos em formato de planilha eletrônica ocorre pela maior aceitação e familiaridade dos usuários das áreas administrativas e técnicas, responsáveis por esse processo de priorização.

## 4.2 Aplicação

Para a construção do algoritmo genético, foi utilizada a linguagem Python, uma linguagem muito simples e eficaz, que por contar com uma grande quantidade de bibliotecas adicionais, oferece várias funções já implementadas. A construção do AG utilizou a biblioteca DEAP (FORTIN *et al.*, 2012), a qual já fornece as ferramentas necessárias para a construção do algoritmo. Mais informações sobre os parâmetros utilizados serão apresentadas no Capítulo 5.

Porém, a execução do código implementado necessitava de conhecimentos básicos sobre programação, algo que poderia não ser encontrado nos usuários finais. Objetivando facilitar a utilização da solução pelos usuários da empresa onde esse trabalho foi aplicado, foi desenvolvido um sistema por meio de uma planilha automatizada com programação na linguagem Visual Basic for Applications (VBA), nativa do Microsoft Excel.

Nesta aplicação foi possível utilizar todo o potencial do algoritmo genético, em uma ferramenta disponível no ambiente de trabalho dos usuários finais, com uma interface amigável e de fácil utilização. Suas funcionalidades serão abordadas a seguir.

### 4.2.1 Funcionalidades da Aplicação

A Figura 19 demonstra a tela inicial exibida ao abrir a aplicação, nela temos um menu onde o usuário pode selecionar qual atividade deseja realizar.

- **Atualizar Base:** Quando selecionada, esta função redireciona o usuário à uma planilha com o formato descrito na Figura 16, onde deve ser atualizada a base extraída do sistema ERP com as ordens de manutenção para priorização. Esta base é a utilizada pelo AG para a priorização.

**Figura 19 – Tela Inicial da Aplicação**



**Fonte: Aatoria Própria.**

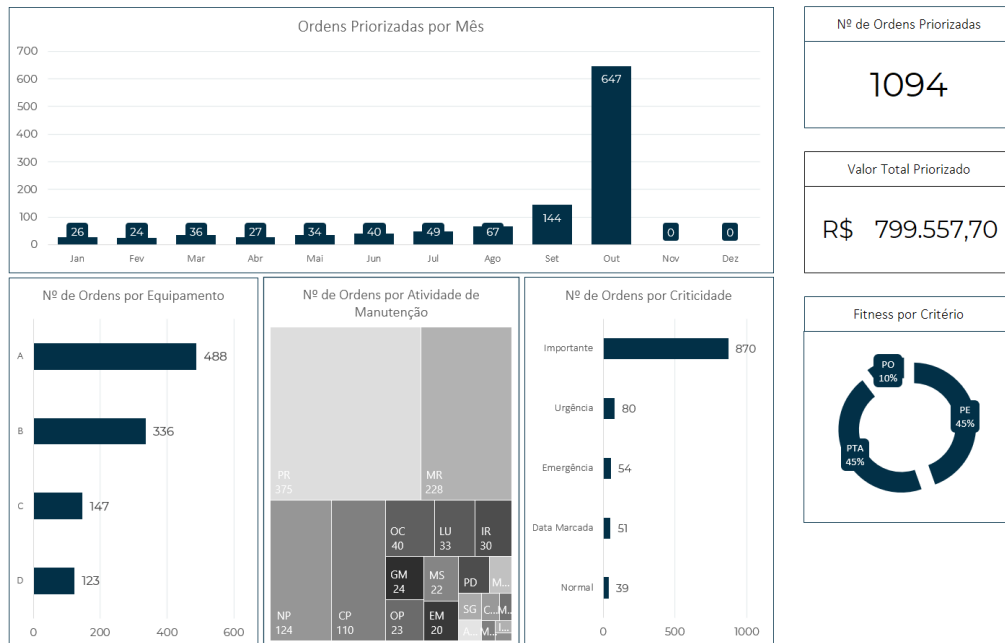
- **Parâmetros:** Nesta função é realizada a atualização da planilha de informações adicionais descrita na Figura 17. Sendo possível atualizar os critérios de priorização de uma maneira fácil e prática.
- **Priorizar Ordens:** Função para iniciar a execução do AG, ao clicar neste botão é inicializado o *script* em python.
- **Parâmetros AG:** Ao selecionar essa função, é exibido o formulário apresentado na Figura 20, permitindo ao usuário selecionar o número de gerações do AG e a população inicial.

**Figura 20 – Formulário de Atualização de Parâmetros do AG**

**Fonte: Aatoria Própria.**

- **Dashboard:** Após finalizar a execução do *script*, as informações sobre o resultado estarão disponíveis para análise na guia de *dashboard* como demonstra a Figura 21 que foi gerada a partir de dados fictícios.

**Figura 21 – Dashboard da Aplicação**



**Fonte: Autoria Própria.**



## 5 RESULTADOS

O processo de priorização das OMs utilizando um algoritmo baseado em busca visa maximizar a qualidade das ordens de manutenção que são executadas em uma indústria mensalmente, por meio da utilização de alguns critérios estabelecidos. A partir da utilização de um AG, esse problema foi modelado da seguinte maneira:

- **Espaço de Busca:** é determinado a partir base de dados, sendo representado pela combinação de todas as OMs presentes no *backlog* de manutenção e passíveis do processo de priorização.
- **Representação dos Genes:** por meio dos conhecimentos adquiridos com os estudos relacionados, optou-se por uma modelagem binária para a resolução deste problema. Sendo assim, cada gene pode somente ter dois valores, 0 (zero) indicando que a determinada OM não é priorizada, ou 1 (um) indicando a priorização de determinada OM.
- **Representação dos Indivíduos:** cada indivíduo é representado por um conjunto de  $n$  genes, onde  $n$  é igual ao número de OMs presentes no espaço de busca (Figura 22).

**Figura 22 – Representação dos Indivíduos**

	OM 1	OM 2	OM 3	OM 4	OM 5	...	OM n
Indivíduo 1	0	1	0	0	1	0	1

**Fonte: Autoria Própria.**

Optou-se por essa representação, pois nela não é especificado um número de OM por indivíduos, intensificando a diversidade do conjunto de OMs priorizadas.

- **Função de Aptidão:** a função pela qual os indivíduos são avaliados é de demonstrada na Equação 6.

$$Fitness = \sum_{j=1}^n \left( \frac{P_{EQP} + P_{TAM} + P_{ORD}}{Valor} \right) \quad (6)$$

Onde:

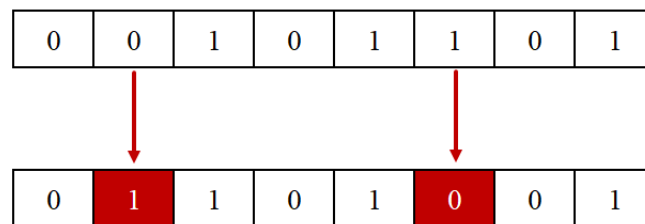
- $n$ : número de OMs priorizadas no indivíduo;
- $P_{EQP}$ : valor que representa a importância do equipamento ao qual se atribui a OM;
- $P_{TAM}$ : valor que representa a importância do tipo de atividade da OM;

- $P_{ORD}$ : valor que representa o nível de urgência da execução desta OM;
- **Valor**: valor monetário necessário para a execução da OM.

Além da função matemática apresentada na Equação 6, a função de avaliação aplica uma punição severa aos indivíduos que ultrapassam o valor limite de orçamento.

- **Operadores de Cruzamento**: o processo de cruzamento entre os indivíduos é realizado por meio de uma probabilidade de cruzamento (**CXPB**) e de um cruzamento com dois pontos de corte. Optou-se pelo cruzamento com mais de um ponto de corte, devido ao tamanho mais elevado dos indivíduos.
- **Operadores de Mutações**: as mutações ocorrem por meio de uma probabilidade de mutação (**MUTPB**) que define se um indivíduo irá sofrer mutações ou não, e de uma probabilidade de cada gene sofrer a mutação (**INDPB**). O processo de mutação ocorre por meio da negação do gene escolhido como representado na Figura 23, ou seja, os genes escolhidos invertem seu valor.

**Figura 23 – Mutações**



**Fonte: A autoria Própria.**

- **Seleção dos Indivíduos**: o método de seleção dos indivíduos que foi adotado no AG é a seleção por torneio, pois se mostrou mais eficiente que a seleção por roleta nos experimentos conduzidos. O torneio ocorre selecionando  $n$  indivíduos aleatórios da população atual. Esse valor é atribuído pela variável *toursize*.
- **Operador de Elitismo**: o indivíduo de melhor desempenho é automaticamente selecionado para a próxima geração, evitando modificações deste indivíduo pelos operadores de cruzamento e mutação (FACELI *et al.*, 2021).

## 5.1 Definição dos Parâmetros

Para a condução do experimento nas bases disponibilizadas pela empresa onde ocorreu o estudo de caso, foram utilizados os seguintes parâmetros e seus respectivos valores:

- **Probabilidade de Cruzamento (CXPB)** = 80%
- **Probabilidade de Mutação (MUTPB)** = 20%

- **Probabilidade de um Gene sofrer Mutação (*INDPB*) = 5%**
- **Número de Gerações = 1000**
- **Número de indivíduos na população inicial = 300**
- **Número de genes por indivíduos = Quantidade de OM presentes na base**
- **Número de indivíduos por Torneio (*turnsize*) = 3**

Com a realização de estudos iniciais, pode-se perceber que os atributos de "número de gerações" e "número de indivíduos na população inicial" eram os atributos que mais no tempo de execução do algoritmo, então optou-se por disponibilizar a funcionalidade de alterar esses parâmetros na aplicação, caso o usuário julgue necessário. Uma vez que valores superiores aos informados nestes atributos acima, se mostraram eficientes em encontrar uma solução melhor, porém necessitam de um tempo maior para finalizar a execução.

## 5.2 Condução

O procedimento adotado para a execução do experimento consistiu em quatro etapas: 1) extração da base de ordens de manutenção providas pela empresa; 2) calibração dos pesos das informações contidas na planilha de informações adicionais com o especialista de manutenção; 3) aplicação do algoritmo genético para a priorização das OMs; e 4) comparação da solução inteligente com a realizada manualmente.

Na primeira fase foi obtida uma base contendo 3379 OMs que estavam pendentes de execução até o final do mês de outubro de 2021. Destas, 1308 OMs foram priorizadas manualmente pela equipe de planejamento no mês de outubro de 2021, sendo esse um subconjunto do *backlog*, conforme apresentado na Figura 24.

**Figura 24 – Conjunto de Ordens de Manutenção**



**Fonte: Autoria Própria.**

Esse conjunto de ordens manualmente priorizadas, tiveram um valor de execução de R\$ 853.874,02. No entanto, o orçamento desta indústria para manutenção neste mês era da apenas

R\$ 800.000,00, gerando assim, um desvio no orçamento de R\$ 53.874,02. Ademais, o valor necessário para executar todo o *backlog* de 3379 OMs era de R\$ 5.758.195,75.

Na etapa de calibração da base de informações adicionais, com o auxílio do especialista de manutenção, foram atribuídos pesos aos atributos: 1) Criticidade do Equipamento; 2) Tipo de Atividade de Manutenção; 3) Urgência de execução da OM. A Figura 25 apresenta os resultados obtidos nessa etapa, onde em cada um destes três pontos foram informadas a nomenclatura que o algoritmo encontrará na base (coluna "Original") e o valor desse atributo (coluna "Peso"), sendo uma função de maximização, quanto maior o valor, mais prioritário é o item.

**Figura 25 – Base de Informações Adicionais Calibrada**

Criticidade Equipamento		Tipo de Atividade		Prioridade Ordem	
Original	Pontos	Original	Pontos	Original	Pontos
<i>A</i>	<i>15</i>	<i>PR</i>	<i>7</i>	<i>Emergência</i>	<i>10</i>
<i>B</i>	<i>10</i>	<i>MR</i>	<i>10</i>	<i>Urgência</i>	<i>5</i>
<i>C</i>	<i>5</i>	<i>IR</i>	<i>15</i>	<i>Importante</i>	<i>2</i>
<i>D</i>	<i>2</i>	<i>CP</i>	<i>10</i>	<i>Normal</i>	<i>1</i>
		<i>AD</i>	<i>20</i>	<i>Data Marcada</i>	<i>0</i>
		<i>PD</i>	<i>12</i>		
		<i>GM</i>	<i>10</i>		
		<i>MP</i>	<i>2</i>		
		<i>NP</i>	<i>20</i>		
		<i>OC</i>	<i>5</i>		
		<i>EM</i>	<i>25</i>		
		<i>MS</i>	<i>20</i>		
		<i>SG</i>	<i>20</i>		
		<i>MA</i>	<i>9</i>		
		<i>IP</i>	<i>12</i>		
		<i>LU</i>	<i>18</i>		
		<i>MV</i>	<i>7</i>		
		<i>CI</i>	<i>3</i>		
		<i>RC</i>	<i>3</i>		
		<i>OP</i>	<i>9</i>		
		<i>RV</i>	<i>7</i>		
		<i>TR</i>	<i>1</i>		
		<i>IS</i>	<i>20</i>		

**Fonte: Autoria Própria.**

Essas informações serviram de base para o processamento do AG, e os resultados obtidos serão abordados na sequência.

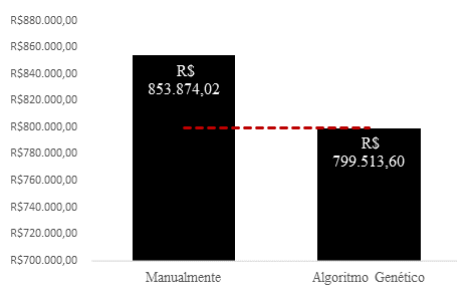
### 5.3 Análise Comparativa

Primeiro ponto a ser analisado na solução encontrada pelo AG é o atendimento ao orçamento estipulado, um ponto onde a priorização manual demonstrou não ser eficaz. Juntamente

com a análise do orçamento, é possível analisar a quantidade de OMs que foram priorizadas com cada um dos métodos.

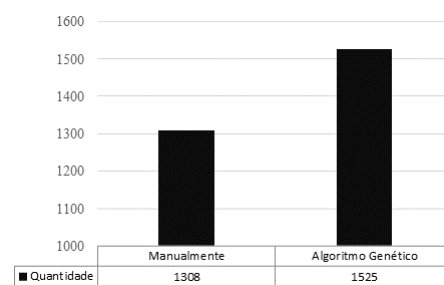
A Figura 26 ilustra o comparativo entre os valores priorizados manualmente e por meio do AG. Nesta figura é possível notar a eficiência da solução inteligente em comparação com o processo manual, pois foi possível otimizar o orçamento sem ultrapassar o limite estipulado de R\$ 800.000,00. Ademais, a Figura 27 demonstra que mesmo utilizando um valor menor, o AG foi capaz de priorizar um número maior de OMs.

**Figura 26 – Valor Priorizado (Out/21)**



**Fonte: Autoria Própria.**

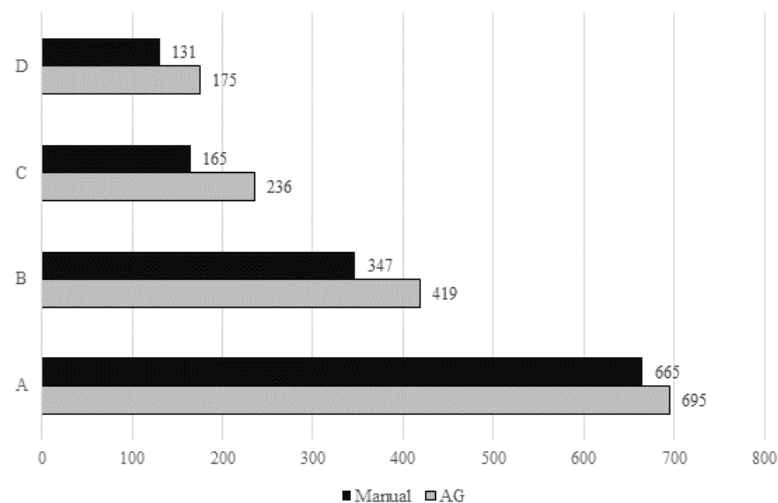
**Figura 27 – Quantidade OMs (Out/21)**



**Fonte: Autoria Própria.**

Além de observarmos estes dois pontos (quantidade e valor), com o auxílio da Figura 28, podemos analisar a aderência à estratégia de manutenção adotada pela companhia. Analisando a quantidade de ordens priorizadas por tipos de equipamentos, percebe-se que em ambos os casos a estratégia de alocar maiores esforços em equipamentos com maior prioridade para os processos está sendo seguida.

**Figura 28 – Quantidade de OMs por Criticidade de Equipamento**



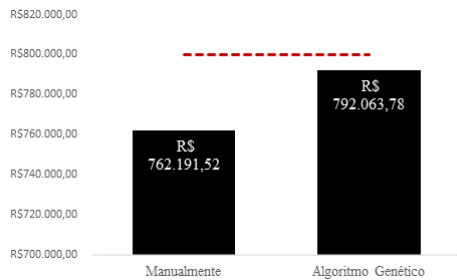
**Fonte: Autoria Própria.**

Após a aplicação do algoritmo de priorização na base disponibilizada pela empresa em outubro de 2021, e os resultados promissores obtidos, os mesmos experimentos foram realizados nos meses de março, abril e maio do ano de 2022, com o objetivo de confirmar se a solução

proposta se provaria eficiente em um período maior de análise. Para estes experimentos foram utilizados os mesmos parâmetros definidos na Seção 5.1.

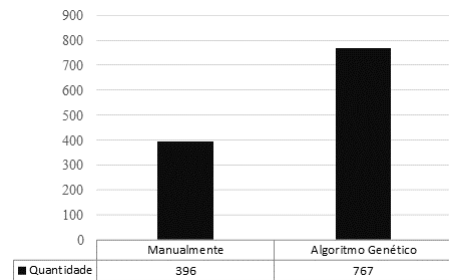
Primeiramente no mês de março de 2022, nesta empresa havia 1091 ordens de manutenção em *backlog*, com um valor total necessário para completar a execução de R\$ 2.168.647,86, sendo que o orçamento permaneceu em R\$ 800.000,00 por mês. Por meio da priorização manual, foram priorizadas 396 OMs, que custaram R\$ 762.191,52 para serem executadas, um valor dentro do orçamento estipulado, porém que poderia ser otimizado conforme demonstram as Figuras 29 e 30.

**Figura 29 – Valor Priorizado (Mar/22)**



**Fonte: Autoria Própria.**

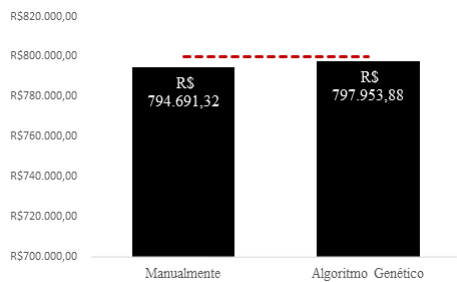
**Figura 30 – Quantidade OMs (Mar/22)**



**Fonte: Autoria Própria.**

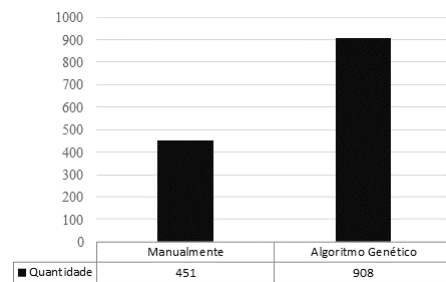
No mês de abril de 2022, o *backlog* contava com 1507 ordens de manutenção, que totalizavam R\$ 3.066.092,48. Neste mês, por meio da priorização manual foram obtidas 451 OMs no valor de R\$ 794.691,32. As Figuras 31 e 32 apresentam os resultados obtidos pelo AG na base deste mês.

**Figura 31 – Valor Priorizado (Abr/22)**



**Fonte: Autoria Própria.**

**Figura 32 – Quantidade OMs (Abr/22)**

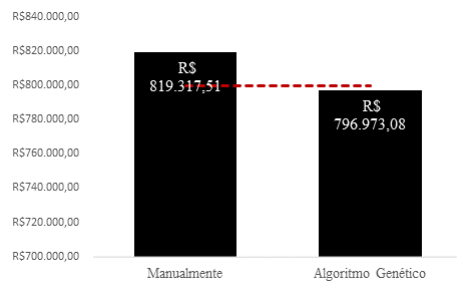


**Fonte: Autoria Própria.**

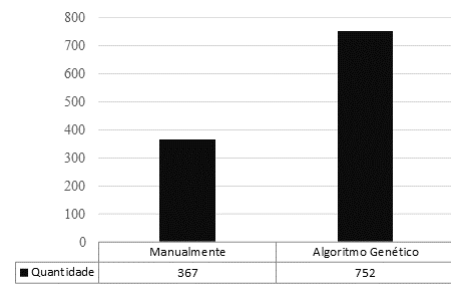
Percebe-se que o valor priorizado foi muito próximo em ambos os métodos, porém o AG é capaz de encontrar uma solução com mais do dobro de OMs que o processo manual.

Por fim, no mês de maio havia 1187 OMs no *backlog* as quais necessitavam de R\$ 2.759.753,66 para serem realizadas. Neste mês, assim como em outubro de 2021, o processo manual extrapolou o orçamento previsto com um total gasto de R\$ 819.317,51 em 367 OMs. Já com a utilização do AG, foi possível priorizar 752 OMs e ficar dentro do orçamento, com um gasto de R\$ 796.973,08.

Ao final do mês de maio de 2022, foi enviado um questionário para o especialista de manutenção e supervisor de PCM da empresa onde este trabalho decorreu, indagando sobre a

**Figura 33 – Valor Priorizado (Mai/22)**

**Fonte: Autoria Própria.**

**Figura 34 – Quantidade OMs (Mai/22)**

**Fonte: Autoria Própria.**

eficiência da solução desenvolvida. Obteve-se uma resposta muito positiva, afirmando a eficiência do algoritmo em solução ao problema, bem como os benefícios em relação ao tempo de mão de obra que era utilizada neste processo, maior fidelidade à estratégia de manutenção da companhia e controle eficiente dos gastos.

Porém, ainda percebe-se que a solução não substituiu o processo manual em algumas atividades, como por exemplo a conferência da abertura das OMs no sistema, uma vez que o AG assume que as informações estão corretas e não realiza uma checagem de erros nas ordens. O questionário na íntegra está disponível no Apêndice A.

## 6 CONCLUSÃO

A área de manutenção é fundamental para o pleno funcionamento de uma indústria, pois suporta toda as atividades produtivas e garante além da produtividade operacional, a qualidade dos produtos e a segurança de todos os envolvidos neste processo. Porém os recursos destinados para essa área são limitados, necessitando assim, passar por uma etapa de priorização para a sua correta destinação.

Tendo em vista que em uma indústria de grande porte, o volume de manutenções necessárias é muito elevado, e de que esse processo ocorre de maneira manual e empírica, surge a necessidade de aplicar técnicas de IA para facilitar esse processo, torná-lo mais eficiente e reduzir a mão de obra empregada nesta tarefa.

Sendo assim, este trabalho apresentou uma abordagem utilizando um algoritmo genético para auxiliar nesse processo de priorização de OMs. Os resultados obtidos e o *feedback* do especialista em manutenção da empresa onde o trabalho decorreu comprovaram a eficiência da abordagem proposta. Com isso, espera-se que este trabalho fomente a inovação e novos trabalhos de pesquisa na área de manutenção industrial em conjunto com a engenharia de software possam ser originados.

### 6.1 Trabalhos Futuros

Um dos pontos reforçados pelo especialista de manutenção da empresa, é a falta de confiabilidade no processo de abertura de ordens de manutenção, nesta área é possível a implementação de soluções que validem estas informações, comunique aos responsáveis ou até mesmo ajuste o sistema, pois este processo é realizado de forma manual.

Outro trabalho pode ser realizado estendendo a aplicação desenvolvida para algo online, como um *web site*, possibilitando o acesso de diversas pessoas de outras empresas, ou até mesmo transformar a proposta em uma plataforma que preste esse serviço de priorização para empresas.



## REFERÊNCIAS

- AQUINO, R. D.; CHAGAS, J. B. C.; SOUZA, M. J. F. Abordagem exata e heurísticas para o problema de planejamento de ordens de manutenção de longo prazo: Um estudo de caso industrial de larga escala. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v. 11, n. 3, p. 159–182, 2019.
- BEAN, J. C. Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization. **ORSA journal on computing**, INFORMS, v. 6, n. 2, p. 154–160, 1994.
- COPPIN, B. **Inteligência artificial**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2010.
- FACELI, K. *et al.* **Inteligência Artificial: Uma abordagem de aprendizado de máquina**. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2021.
- FAÉ, C. S.; RIBEIRO, J. L. D. Um retrato da engenharia de produção no brasil. **Revista Gestão Industrial**, v. 1, n. 3, p. 24–33, 2005.
- FLORES, D.; ANZANELLO, M. J.; VIDOR, G. Determinação de cronograma de manutenção preventiva utilizando algoritmo genético. **Produto & Produção**, v. 13, n. 3, 2012.
- FORTIN, F.-A. *et al.* DEAP: Evolutionary algorithms made easy. **Journal of Machine Learning Research**, v. 13, p. 2171–2175, jul 2012.
- FUENTES, F. F. E. Metodologia para inovação da gestão de manutenção industrial. Florianópolis, 2006.
- GREGÓRIO, G. F. P.; SILVEIRA, A. M. **Manutenção Industrial**. São Paulo: SAGAH EDUCAÇÃO S.A, 2018.
- GUIMARÃES, L. M.; NOGUEIRA, C. F.; SILVA, M. D. B. da. Manutenção industrial: implementação da manutenção produtiva total (tpm). **e-xacta**, v. 5, n. 1, 2012.
- KARDEC, A. **GESTÃO DE ATIVOS**. [S.l.]: Editora Qualitymark, 2014.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. Manutenção: função estratégica. 3ª edição. **Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás**, 2009.
- MERIÑO, C. R. de Vasconcellos e Alberto Eduardo Freitag e Marcelle Cordeiro e M. Gestão de ativos: Proposta de otimização de investimento no processo de manutenção. **South American Development Society Journal**, v. 7, n. 20, p. 278, 2021. ISSN 2446-5763. Disponível em: <http://www.sadsj.org/index.php/revista/article/view/440>.
- PEREIRA, D. de S. *et al.* Uma metodologia baseada em algoritmo genético para priorização de ações de manutenção de concessionárias de distribuição de energia elétrica. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 1, n. 1, 2020.
- PERNG, Y.-H.; JUAN, Y.-K.; HSU, H.-S. Genetic algorithm-based decision support for the restoration budget allocation of historical buildings. **Building and Environment**, v. 42, n. 2, p. 770–778, 2007. ISSN 0360-1323. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132305003835>.
- RUSSEL, S.; NORVIG, P. **Inteligência Artificial 3ª.ed.** Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2013.

SILVA, D. G. M. da; SANTOS, L. H. Aspectos positivos do uso da inteligência artificial/machine learning na gestão e planejamento da manutenção aeronáutica. **ACADEMIA**, 2020.

**APÊNDICE A – Questionário ao Especialista**

**1. O conjunto de ordens priorizadas pelo algoritmo atende a necessidade do processo?**

**R:** A priorização depende muito da classificação da ordem de acordo com a natureza da anomalia no momento da abertura por parte dos manutentores e inspetores, certamente o algoritmo atende necessidade, porém quando a ordem acaba sendo classificada de forma incorreta o algoritmo não vai conseguir identificar e depende do planejador de manutenção identificar essas falhas, porém surtiu uma melhora muito significativa na priorização reduzindo a frequência e quantidade ordens prioritárias que não entravam na programação semanal.

**2. Por meio do algoritmo de priorização, foi possível melhorar o atendimento à estratégia de manutenção da companhia?**

**R:** Com a aplicação do algoritmo foi possível que as os tipos de atividades de manutenção prioritários na programação tivessem 100% de efetividade, salvo excessos onde ocorreram erros de classificação e abertura de ordens.

**3. O uso do algoritmo possibilita a redução do tempo necessário para realizar a atividade de priorização?**

**R:** Com o uso do algoritmo foi possível reduzir o tempo em tarefas operacionais possibilitando o planejador e o gestor de informações dedicarem o seu tempo em temas estratégicos visando planejamento em longo prazo e trabalhos de redução de custo.

**4. Em sua opinião, o orçamento disponível foi otimizado por meio do uso do algoritmo de priorização?**

**R:** Com uma correta interpretação do *backlog* de manutenção e com os planejadores tendo uma visão mais clara de custo e priorização, foi possível observar maior assertividade na priorização olhando do ponto de vista de cumprimento de orçamento e estratégia de manutenção.

**5. Quais são as melhorias que você julga necessárias para que este projeto possa ser adotado pela organização?**

**R:** O próximo passo acredito que seja identificar falhas de abertura de ordens para que tenha um *backlog* mais confiável e que a gerência tenha segurança que todas as anomalias da fábrica estejam mapeadas com a correta classificação e priorização de atendimento.