



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLÓGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CARLOS RENAN LOPES GALVÃO

**DIMENSIONAMENTO DE UMA POLÍTICA FLEXÍVEL DE MANUTENÇÃO
PREVENTIVA POR IDADE PARA UMA INJETORA DE TERMOPLÁSTICO**

Recife
2025

CARLOS RENAN LOPES GALVÃO

**DIMENSIONAMENTO DE UMA POLÍTICA FLEXÍVEL DE MANUTENÇÃO
PREVENTIVA POR IDADE PARA UMA INJETORA DE TERMOPLÁSTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia de Produção da Universidade
Federal de Pernambuco – UFPE, como
requisito parcial para a obtenção do grau
de Engenheiro de Produção.

Orientador (a): Alexandre Ramalho Alberti

Recife

2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE**

Galvão, Carlos Renan Lopes.

Dimensionamento de uma Política Flexível de Manutenção Preventiva por
Idade para uma Injetora de Termoplástico / Carlos Renan Lopes Galvão. -
Recife, 2025.

49 p. : il., tab.

Orientador(a): Alexandre Ramalho Alberti
(Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e
Geociências, , 2025.
Inclui referências.

1. Manutenção Preventiva. 2. Manutenção Oportuna. 3. Postergação da
Manutenção. 4. Otimização. I. Alberti, Alexandre Ramalho. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

CARLOS RENAN LOPES GALVÃO

**DIMENSIONAMENTO DE UMA POLÍTICA FLEXÍVEL DE MANUTENÇÃO
PREVENTIVA POR IDADE PARA UMA INJETORA DE TERMOPLÁSTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia de Produção da Universidade
Federal de Pernambuco – UFPE, como
requisito parcial para a obtenção do grau
de Engenheiro de Produção.

Aprovado em: 16/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Ramalho Alberti (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virginio Cavalcanti (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. João Mateus Marques de Santana (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha mãe, Rosemary Lopes, pelo apoio constante e amor incondicional ao longo de todos esses anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir vivenciar momentos únicos e incríveis ao longo desses anos de universidade.

A minha mãe, Rosemary Lopes dos Santos Galvão, por todo o apoio incondicional durante esse período. Sem ela, nada disso seria possível.

Ao meu padrasto e minhas irmãs, Deivid Ernesto, Camyla Galvão e Wegilla Galvão, pelo constante apoio e pelas palavras de motivação.

Às minhas amigas, Laura Emily, Tatiana Aires, Gabriela Farias e Brenda Amaral por toda a parceria, amor, compreensão e, principalmente, por tornarem essa jornada mais leve e feliz.

Ao grupo Random, especialmente a Yan Ribeiro, Augusto Rodrigues, Rafael Paiva, Maria Luiza, e ao professor Cristiano Cavalcante, por todos os bons momentos, pela amizade e pelos ensinamentos compartilhados ao longo da minha trajetória acadêmica.

Aos amigos que fiz durante o período de iniciação científica, Hellen Oliveria, Hellen Rayssa e Eduardo Silva, por cada momento compartilhado e pelo apoio que me foi dado.

Agradeço ao meu orientador, Alexandre Alberti, por cada orientação, cada puxão de orelha, e por toda a dedicação em me ensinar.

E, por fim, a todos os colegas de curso que encontrei ao longo dessa jornada. Vocês foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e para a construção da minha identidade.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar a aplicação de uma política flexível de manutenção preventiva, a política STZ, para uma máquina injetora de termoplástico, com foco na otimização dos custos de manutenção e no aumento da confiabilidade do sistema. A política STZ caracteriza-se pela integração de três abordagens complementares: a manutenção baseada na idade do equipamento, a manutenção oportuna que permite antecipar intervenções em janelas favoráveis e a possibilidade de postergação da manutenção preventiva quando há impedimentos operacionais, conferindo maior flexibilidade ao planejamento da manutenção. A pesquisa se concentra na implementação de diferentes abordagens, como a manutenção por idade, manutenção oportuna e postergação da manutenção, com o intuito de maximizar a eficiência operacional. O estudo foi conduzido com uma máquina injetora de termoplástico, responsável pela produção de componentes para baterias automotivas, escolhida como objeto de análise. A coleta de dados de confiabilidade do equipamento foi realizada por meio de elicitação do conhecimento de especialistas, seguida pela aplicação de um modelo de otimização para identificar os parâmetros ideais para a política de manutenção. Os resultados demonstraram que a combinação dessas estratégias de manutenção possibilitou uma gestão mais eficiente do sistema estudado, contribuindo para a redução dos custos operacionais e a melhoria da disponibilidade do sistema. Além disso, a política proposta contempla casos especiais, como a política clássica de substituição por idade e políticas puramente oportunas, mostrando-se adaptável a diferentes contextos industriais.

Palavras-chave: Manutenção Preventiva, Manutenção Oportuna, Postergação da Manutenção, Otimização.

ABSTRACT

. This study aims to present the application of a flexible preventive maintenance policy, known as the STZ policy, to a thermoplastic injection molding machine, with a focus on maintenance cost optimization and system reliability improvement. The STZ policy is characterized by the integration of three complementary approaches: age-based maintenance, opportunistic maintenance, which allows maintenance actions to be anticipated during favorable time windows and the possibility of postponing preventive maintenance when operational constraints occur, thus providing greater flexibility in maintenance planning. The research focuses on the implementation of these approaches in order to maximize operational efficiency. The case study was conducted on a thermoplastic injection molding machine used in the production of automotive battery components, selected due to its relevance within the production process. Reliability data were obtained through expert knowledge elicitation, followed by the application of an optimization model to determine the optimal parameters of the maintenance policy. The results indicate that the combination of these maintenance strategies enables more efficient system management, contributing to reduced operational costs and increased system availability. Furthermore, the proposed policy encompasses special cases, such as the classical age-based replacement policy and purely opportunistic maintenance policies, demonstrating its adaptability to different industrial contexts.

Keywords: Age Based Maintenance, Opportunistic Maintenance, Postponed Maintenance, Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Máquina injetora de termoplástico.....	27
Figura 2 – Procedimento para dimensionamento de política de manutenção para um sistema técnico real.....	30
Figura 3 -Método de transformação linear para estimar os parâmetros da distribuição Weibull	31
Figura 4- Cenários de estudo da Política de Manutenção STZ	36
Figura 5 – Algoritmo para otimização da política STZ	37
Figura 6 – Software para otimização da política STZ	37
Figura 7 – Software para análise de sensibilidade da política STZ.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Probabilidade acumulada de falha maior.....	28
Tabela 2 - Dados de Confiabilidade da Injetora obtidos a partir da elicitação do conhecimento de especialistas	29
Tabela 3 – estatísticas descritivas da amostra de valores de η (em horas) e β (adimensional para a distribuição Weibull).....	31
Tabela 4 – Otimização das políticas STZ, taxa de custo medido em \$/un..	40
Tabela 5 – Resultados da Análise de Sensibilidade das soluções encontradas. Média e desvio-padrão da taxa de custo, medidos em \$/un.	41
Tabela 6 – Comparação do custos de manutenção para diferentes políticas. Média e desvio-padrão da taxa de custo, medidos em \$/un.	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	13
1.2 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS	15
1.3 METODOLOGIA.....	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1 MANUTENÇÃO	18
2.1.1 POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO	20
2.1.1.1 MANUTENÇÃO POR IDADE	22
2.1.1.2 MANUTENÇÃO OPORTUNA	23
2.1.1.3 POSTERGAÇÃO DA MANUTENÇÃO.....	24
2.1.2 MÁQUINAS INJETORAS DE PLÁSTICO.....	25
3. ESTUDO DE CASO: OTIMIZAÇÃO DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA FLEXÍVEL PARA UMA MÁQUINA INJETORA	27
3.1. APRESENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO	27
3.2. ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	28
3.3. APRESENTAÇÃO DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO	32
3.4. MODELAGEM MATEMÁTICA	33
3.5. ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	36
3.6. BUSCA DE SOLUÇÕES	39
3.7. RECOMENDAÇÃO DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO	42
3.8. COMPARAÇÃO COM OUTRAS POLÍTICAS.....	42
3.9. SÍNTESE CONCLUSIVA.....	43
4. CONCLUSÃO.....	44
4.1. LIMITAÇÕES DO ESTUDO E INDICAÇÕES PARA TRABALHO FUTUROS	45
REFERÊNCIAS.....	46

1. INTRODUÇÃO

A manutenção é uma atividade crucial para indústrias de todos os setores, independentemente do tipo de produção. Seu papel principal é garantir o bom estado de funcionamento do sistema produtivo, prevenindo falhas e aumentando a vida útil dos equipamentos. Uma manutenção bem executada não apenas assegura a eficiência na produtividade do sistema, mas também promove maior segurança para os trabalhadores envolvidos. Além disso, a gestão eficaz da manutenção contribui para melhorar o desempenho dos sistemas produtivos, seja através da contenção da degradação da qualidade dos produtos, seja pelo aumento da confiabilidade e disponibilidade do processo (Shi et al., 2023; Fogliato; Ribeiro, 2009).

No atual ambiente industrial, caracterizado por alta competitividade e exigência, a manutenção passou a ser vista como uma função estratégica crucial para assegurar a eficiência, continuidade e produtividade das operações. Ela vai além da simples correção de falhas, desempenhando um papel preventivo e de sustentação da performance dos ativos industriais, o que impacta diretamente o desempenho da produção e os resultados da organização (Pinto; Xavier, 2009).

A manutenção eficaz contribui para a redução de paradas não programadas, evita quebras inesperadas, além garantir uma maior disponibilidade dos equipamentos, que são fatores que impactam diretamente nos índices de produtividade. Parida e Kumar (2009) apontam que, os custos com manutenção em setores produtivos podem representar entre 20% a 50% dos custos operacionais totais. Portanto, a gestão eficiente da manutenção pode proporcionar ganhos significativos na redução de custos e no aumento da produção útil ao evitar desperdícios, retrabalho e interrupções indesejadas.

A negligência na área de manutenção não apenas compromete a confiabilidade dos processos, mas também acarretam prejuízos econômicos e riscos operacionais. Situações como falas em equipamentos críticos impactam não somente no setor de manutenção, mas também logística, compras, almoxarifado e toda a cadeia produtiva, exigindo resposta rápidas que elevem os custos e comprometem os prazos e a qualidade dos produtos produzidos e entregues (Dieter, 2022).

Ademais, o investimento em manutenção qualificada, que possuem uma mão de obra capacitada e planejamento adequado, possibilita o aumento da vida útil dos ativos, a padronização dos processos produtivos e maior confiabilidade operacional, criando um ambiente propício para o crescimento sustentado da produtividade ao longo do tempo

(Simatupang, 2020).

Dessa forma, a manutenção deve ser vista como uma alavanca para a competitividade industrial, com impactos significativos sobre os indicadores de produção, custos e qualidade, sendo parte integrante das estratégias de excelência operacional. Este trabalho tem como objetivo geral a aplicação de uma política de manutenção que auxilie na tomada de decisão voltada ao planejamento da manutenção de uma máquina injetora. As máquinas injetoras são essenciais em diversos setores da indústria, a automotiva, eletrônica e de produtos plásticos, sendo responsáveis pela produção de componentes com alta precisão e eficiência (Ribeiro *et al.*, 2024).

As injetoras são equipamentos complexos que operam de forma contínua, estando sujeitas a desgaste e a falhas ao longo do tempo. Falhas operacionais podem comprometer seriamente a produtividade e gerar aumento nos custos operacionais. Diante disso, a manutenção dessas máquinas se torna um fator decisivo para o bom desempenho da produção. Nesse contexto caracterizado por exigência de alta produtividade, estratégias de manutenção preventiva com abordagens flexíveis envolvendo manutenção por oportunidade e postergação da ação de manutenção tem potencial para melhor o desempenho de ativos como as injetoras de termoplástico estudadas. A manutenção preventiva tem como foco antecipar falhas e agir antes que ocorram problemas, já a abordagem de manutenção por oportunidade busca tirar proveito de momentos mais favoráveis para adiantar a manutenção preventiva, viabilizando a sua execução com menor custo e impacto operacional a possibilidade de postergação da manutenção, por sua vez, traz um elemento de flexibilidade que permite adiar uma ação de manutenção programada caso as condições para tal não sejam favoráveis, evitando assim possíveis conflitos com a gestão da produção, por exemplo.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A justificativa para o desenvolvimento desta pesquisa está diretamente relacionada à relevância das máquinas de moldagem por injeção nos processos de produção industrial, uma vez que garantir a consistência e a eficiência operacional desses equipamentos é fundamental para preservar a competitividade das empresas no mercado. Essas máquinas são amplamente utilizadas em diferentes setores, como o automotivo e o de bens de consumo, o que reforça a necessidade de assegurar seu desempenho ideal por meio da adoção de práticas de manutenção eficazes (Ribeiro *et al.*, 2024).

A gestão eficiente da manutenção em sistemas industriais é essencial para maximizar a

vida útil dos ativos e minimizar os custos operacionais. No contexto atual, em que a competitividade é cada vez mais intensa e a sustentabilidade se torna uma prioridade, entender e aplicar estratégias de manutenção eficazes pode ser a chave para garantir a continuidade operacional de sistemas complexos. Entre as diversas abordagens disponíveis, a manutenção baseada na idade, a manutenção oportuna e a postergação da manutenção se destacam por otimizar custos e aumentar a eficiência dos sistemas.

A manutenção oportuna envolve a realização de atividades de manutenção preventivas ou corretivas durante períodos planejados, aproveitando falhas que ocorrem perto de períodos de manutenção já programados. Essa abordagem é fundamental, pois permite que manutenções preventivas e corretivas sejam realizadas juntas, evitando períodos de inatividade prolongados e reduzindo custos com manutenções emergenciais. Li et al. (2021) explicam que a manutenção oportuna permite a execução de manutenções em componentes antes que se tornem críticos, aproveitando janelas de oportunidade para reduzir o tempo de inatividade e os custos associados a falhas imprevistas. Ao integrar a manutenção preventiva e corretiva, além de reduzir os custos operacionais, ela melhora a confiabilidade do sistema, contribuindo para a longevidade dos ativos. Esse tipo de abordagem foi analisado por Zhou e Yin (2019), que mostraram que a adoção de manutenção oportuna pode reduzir em até 39% os custos anuais de manutenção, especialmente em sistemas de energia renovável.

Por outro lado, a manutenção baseada em idade toma como base a vida útil dos componentes, realizando manutenções preventivas ou substituições conforme a idade dos equipamentos. A principal vantagem dessa estratégia é que ela ajuda a evitar falhas catastróficas, realizando intervenções antes que ocorra uma falha crítica e evitando assim custos elevados com reparos emergenciais. Berrade *et al.* (2017) argumentam que a manutenção baseada em idade resulta em uma utilização mais eficiente dos ativos, evitando substituições prematuras e maximizando a utilização do tempo útil restante dos componentes. Contudo, a principal desvantagem dessa abordagem é o risco de realizar substituições prematuras, o que pode gerar custos desnecessários. Zhang e Yang (2020) sugerem que a manutenção baseada em idade deve ser complementada com outras estratégias, como a manutenção oportuna, para garantir que as substituições ocorram apenas quando realmente necessário, sem comprometer a confiabilidade do sistema.

A manutenção adiada, por sua vez, surge como uma solução estratégica ao permitir que a execução de intervenções seja adiada até que as condições ideais ou os recursos necessários estejam disponíveis. Wang *et al.* (2024) mostram que, em sistemas com características de deterioração de dois estágios, a manutenção adiada pode otimizar a vida útil

dos componentes, permitindo que os sistemas continuem operando até que as condições para uma manutenção efetiva se concretizem. Essa abordagem é vantajosa especialmente em situações onde a falha do sistema não comprometeria a operação, permitindo um planejamento mais eficiente das manutenções. Zhang *et al.* (2012) destacam que, ao integrar a manutenção adiada com a manutenção oportuna, é possível otimizar ainda mais os custos operacionais, realizando as manutenções preventivas e corretivas em janelas de menor impacto para o sistema.

Estudar essas estratégias e sua aplicação é crucial, pois a manutenção de ativos industriais representa uma parte significativa dos custos operacionais e tem um impacto direto na competitividade das empresas. Em um mundo onde os custos de operação precisam ser constantemente otimizados e a confiabilidade dos sistemas não pode ser comprometida, entender a interação entre a manutenção oportuna, baseada em idade e adiada pode oferecer soluções práticas para problemas complexos de manutenção. Além disso, essas estratégias contribuem para a sustentabilidade, pois ajudam a reduzir o desperdício de recursos e o impacto ambiental, prolongando a vida útil dos ativos e evitando substituições prematuras. Dessa forma, o estudo e a implementação dessas estratégias de manutenção são não apenas relevantes, mas essenciais para a otimização de processos industriais em setores críticos, e para a gestão eficaz de sistemas complexos. A combinação da manutenção oportuna, baseada em idade e adiada permite uma abordagem holística que não só reduz custos, mas também aumenta a confiabilidade e a sustentabilidade operacional.

1.2 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral da pesquisa proposta é uma aplicação de uma política flexível de manutenção preventiva para um sistema técnico real: uma máquina injetora de termoplástico utilizada na fabricação de polos para baterias de carro.

Quanto aos objetivos específicos, temos:

- Levantamento do estado da arte no que tange a manutenção do sistema sob o estudo.
- Aplicação de uma política flexível de manutenção por idade, e também aplicação de duas ferramentas de análise.
- Realização da análise de sensibilidade dos resultados gerados pela política de manutenção aplicada.
- Análise comparativa com políticas de manutenção já existentes na

literatura.

1.3 METODOLOGIA

Esta pesquisa será desenvolvida por meio de um levantamento bibliográfico focado nas áreas de manutenção oportuna, manutenção preventiva e postergação da ação de manutenção. Esse levantamento permitirá identificar aspectos relevantes, proporcionando uma compreensão mais profunda da realidade enfrentada pelo sistema em estudo. A pesquisa é classificada como aplicada quanto à sua finalidade, pois visa a aplicação prática de conceitos em um contexto real, com o objetivo de tornar o sistema mais eficiente e eficaz (Gil, 2002).

Além disso, em termos de classificação, esta pesquisa é quantitativa, uma vez que busca mensurar e otimizar o desempenho de políticas de manutenção. O caráter aplicado é evidenciado pelo interesse prático da pesquisa, que busca gerar soluções para problemas reais. De acordo com Cauchick (2019), uma característica distintiva dessa abordagem quantitativa é a mensuração das variáveis de pesquisa, com ênfase na causalidade, generalização e replicação dos resultados obtidos. Dessa forma, o estudo alia a profundidade da análise de caso com o rigor quantitativo da modelagem matemática, garantindo que as conclusões obtidas sejam fundamentadas em evidências empíricas e possam ser replicadas em contextos semelhantes.

A metodologia adotada utiliza a Pesquisa Operacional para otimização, focando em fatores como a minimização dos custos de manutenção, a maximização da disponibilidade do sistema, ou uma combinação de ambos (Paulo *et al.*, 2012). Algoritmos desenvolvidos em Python serão empregados para a solução do modelo.

Além disso, a pesquisa é classificada como explicativa, pois busca identificar causalidades entre variáveis. As políticas de manutenção a serem desenvolvidas dependerão de parâmetros do contexto real para definir as variáveis de decisão que melhor atendem à função objetivo da problemática da pesquisa operacional, com o objetivo de revelar as relações causais entre as variáveis através da modelagem matemática. A técnica predominante será a documentação indireta, que permitirá a coleta de informações sobre o campo de interesse, especialmente por meio de fontes secundárias.

No que se refere aos métodos técnicos empregados, Gil (2022) ressalta que o estudo é desenvolvido na forma de Estudo de Caso, o qual consiste em uma análise aprofundada e minuciosa de um ou poucos objetos, possibilitando um conhecimento mais amplo e detalhado

sobre eles. Essa escolha metodológica justifica-se pelo fato de que o estudo busca compreender de maneira detalhada o comportamento e o desempenho de um sistema técnico real sob diferentes políticas de manutenção, permitindo a validação prática do modelo proposto.

Por fim, o método científico adotado será o dedutivo, uma vez que o estudo parte de leis e teorias universais para derivar explicações e previsões específicas. Assim, busca-se aplicar um conhecimento geral para alcançar conclusões mais específicas (Marconi; Lakatos, 2010).

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em cinco capítulos, introdução, referencial teórico e revisão da literatura, estudo de caso e otimização de política de manutenção preventiva flexível para uma máquina injetora, e, por conseguinte, a conclusão. O primeiro capítulo trata as considerações iniciais do trabalho, da justificativa e relevância da pesquisa, bem como seus objetivos e a metodologia adotada. O segundo capítulo reúne o referencial teórico necessário para o desenvolvimento da pesquisa, e estudos recentes que dialogam com o que se propõe nesta pesquisa. São apresentados conceitos relacionados à manutenção preventiva e oportunamente e postergação da ação de manutenção. No terceiro capítulo, é apresentada a caracterização do sistema sob estudo e a análise da confiabilidade desse sistema. Além disso é realizada a aplicação da política de manutenção no contexto analisado, com análises e discussões sobre sua implementação, incluindo comparações com políticas já consolidadas na literatura. Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas na pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, serão apresentados os fundamentos teóricos e a revisão de literatura que embasam o desenvolvimento da pesquisa proposta. Inicialmente, discutiremos as principais políticas de manutenção, com foco nas abordagens de manutenção por idade, manutenção oportuna e postergação da manutenção.

2.1 MANUTENÇÃO

Com a crescente competitividade industrial e a exigência de produção em massa com maior qualidade, as máquinas e equipamentos nas plantas industriais passaram a ser desafiados a oferecer mais desempenho. Nesse cenário, a manutenção, que antes era vista como um desperdício, é agora reconhecida como uma função estratégica essencial dentro dos processos produtivos. O cenário econômico atual exige que as empresas ofereçam produtos de alta qualidade, capazes de atender plenamente às expectativas dos clientes e se manter competitivas em um mercado cada vez mais desafiador. Para alcançar esses objetivos, é imprescindível que as organizações busquem constantemente aprimorar seus processos, otimizando recursos, reduzindo custos e garantindo eficiência operacional. A manutenção industrial, ao impactar diretamente no desempenho, confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, se posiciona como um elemento fundamental para o sucesso da produção (Cardoso *et al.*, 2011).

Segundo De Almeida et al. (2015), a manutenção compreende um conjunto de atividades planejadas e coordenadas que têm como finalidade preservar os níveis de desempenho necessários para o cumprimento das metas de produção. A ausência de uma política de manutenção adequada pode comprometer significativamente o funcionamento do sistema produtivo, ocasionando paradas inesperadas, desperdício de recursos, atrasos e perda de qualidade dos produtos finais.

A integração entre a manutenção e o processo produtivo é essencial para garantir a excelência da planta industrial. Uma abordagem eficiente de manutenção não apenas reduz falhas e amplia a vida útil dos equipamentos, mas também assegura que as operações ocorram de forma contínua, previsível e segura. A análise sistemática de falhas e a implementação de ações preventivas e corretivas são práticas que refletem diretamente na confiabilidade dos equipamentos e na produtividade geral da organização.

De acordo com Xenos (1998), o principal propósito da manutenção é evitar a degradação dos equipamentos, que pode se manifestar de diversas maneiras, desde o desgaste físico e a má aparência até perdas de desempenho, interrupções de produção, redução da qualidade dos produtos e aumento da poluição ambiental. Tais fatores têm impacto direto na competitividade empresarial, uma vez que afetam a imagem, a produtividade e a lucratividade das organizações.

De acordo com Pinjela, Pintelona e Vereecke (2006), uma manutenção bem-sucedida deve ser adaptada às necessidades particulares de cada empresa, alinhando-se à estratégia organizacional e às particularidades do processo produtivo. Isso significa que as atividades de manutenção devem ser planejadas de maneira estratégica, levando em conta aspectos técnicos, econômicos e humanos. Nesse sentido, Palmer (2005) complementa ao destacar que a eficácia das práticas de manutenção deve considerar não apenas os aspectos técnicos, mas também os custos operacionais, buscando sempre equilibrar o desempenho com a rentabilidade.

Com o avanço tecnológico e o aumento da automação industrial, as exigências sobre as máquinas e equipamentos tornaram-se ainda maiores. A produção em massa e a busca por maior qualidade e produtividade levaram as indústrias a enxergar a manutenção sob uma nova ótica: antes tratada como um gasto ou desperdício, hoje é reconhecida como um fator estratégico para o alcance dos objetivos organizacionais (Cardoso; Peres; Neto, 2011).

Kardec e Nascif (2009) ressaltam que a manutenção deve ser planejada de forma proativa, buscando manter os equipamentos disponíveis e operacionais por mais tempo, evitando falhas e paradas não programadas. Os autores enfatizam a importância da definição clara da missão e dos conceitos da manutenção, bem como a aplicação de seus princípios de forma coerente com as metas da organização. Quando bem aplicada, essa gestão contribui para o aumento da competitividade e para a sustentabilidade do negócio.

Essas práticas são vitais para assegurar a operação contínua, reduzir custos e evitar prejuízos relacionados a falhas ou quebras de equipamentos. A falta de manutenção adequada pode acarretar atrasos nas entregas, perdas de qualidade, aumento do desperdício e queda na confiabilidade do processo produtivo. Assim, a manutenção eficiente se consolida como um dos pilares da gestão industrial moderna, contribuindo para o aumento da competitividade, da sustentabilidade e da longevidade das organizações.

Em síntese, a manutenção deixou de ser vista como uma atividade reativa e passou a representar uma função estratégica essencial para o sucesso das operações industriais. Integrar a manutenção aos objetivos corporativos e às práticas de gestão de desempenho é um passo

indispensável para que as empresas alcancem altos níveis de eficiência, segurança e rentabilidade em um mercado em constante transformação.

2.1.1 POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO

De acordo com Moubray (1997), a evolução da manutenção acompanha as transformações do ambiente industrial e pode ser compreendida em diferentes gerações. A primeira geração, predominante até a Segunda Guerra Mundial, caracterizava-se por uma abordagem corretiva, com intervenções realizadas apenas após a ocorrência de falhas, em um contexto de baixa mecanização e menor impacto das paradas produtivas. A segunda geração, desenvolvida no período pós-guerra até a década de 1960, surgiu a partir do aumento da complexidade dos equipamentos e da dependência dos sistemas produtivos, impulsionando a adoção da manutenção preventiva por meio de intervenções periódicas. A partir da década de 1970, consolida-se a terceira geração, marcada pela incorporação de técnicas de monitoramento de condição e análise de falhas, com foco no aumento da confiabilidade e da disponibilidade dos ativos, culminando na abordagem da Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), que busca definir as políticas de manutenção mais adequadas a partir das funções, modos de falha e consequências associadas aos sistemas.

Sendo assim, existem três tipos de manutenção distintas na literatura sendo esses: manutenção corretiva (planejada ou não planejada), manutenção preventiva e manutenção preditiva (Cavalcante; Lopes, 2015).

A manutenção corretiva é definida como a ação de manutenção realizada após a falha operacional do sistema, seja por reparo ou substituição do equipamento. Esse tipo de manutenção é reativo, sendo executado conforme as falhas ocorrem. A dificuldade surge quando a gestão de manutenção depende exclusivamente dessa abordagem, o que pode ser ineficiente em vários aspectos. Tsang (1995) aponta que esse modelo pode resultar em altos custos para restaurar os equipamentos em situações de crise, além de causar danos secundários e riscos à saúde e segurança devido à falha, sem mencionar as penalidades associadas à perda de produção. Pinto e Xavier (2001) também destacam que a manutenção corretiva implica em custos elevados, pois a falha inesperada pode acarretar perdas de produção, redução da qualidade do produto e custos indiretos significativos de manutenção.

A manutenção preventiva, conforme Pinto e Xavier (2001) e Moubray (1997), é um conjunto de ações planejadas com o objetivo de minimizar ou evitar falhas e a degradação do desempenho dos equipamentos. Esses planos são elaborados com base em intervalos de tempo

predefinidos, levando em consideração as especificações dos fabricantes, permitindo a antecipação de falhas potenciais e a tomada de medidas para evitá-las. Essa abordagem é caracterizada por uma busca contínua e sistemática para prevenir falhas, mantendo um controle rigoroso sobre os equipamentos e realizando as intervenções necessárias para garantir seu bom funcionamento.

Segundo Moubray (1997), todos os ativos físicos destinados a realizar uma função específica estão sujeitos a uma série de esforços, os quais causam fadiga e levam à deterioração do equipamento. Ao longo do tempo, a resistência desse ativo à fadiga diminui, até chegar a um ponto em que o equipamento pode não conseguir manter o desempenho desejado, resultando em uma falha. Dessa forma, a manutenção preventiva se torna essencial para preservar a funcionalidade e prolongar a vida útil dos ativos.

A manutenção preditiva, conforme descrita por Camara et al. (2001) e Xenos (1998), envolve a realização de inspeções periódicas, utilizando dados que fornecem informações detalhadas sobre o estado real de funcionamento das máquinas, como desgaste e degradação. Diferente da manutenção preventiva, que se baseia no tempo estimado de vida útil dos componentes, a preditiva foca na análise das condições do equipamento, permitindo que ele opere continuamente por mais tempo, antes de exigir uma intervenção corretiva planejada. Além disso, a manutenção preditiva permite otimizar a troca de peças e estender os intervalos de manutenção, identificando com precisão o momento em que um componente se aproxima do limite de sua vida útil. Considerada uma extensão da manutenção preventiva, a prática preditiva se integra ao seu planejamento, complementando a abordagem preventiva. O avanço da tecnologia aplicada à manutenção tem possibilitado o desenvolvimento de técnicas simples e eficazes, resultando em melhorias significativas. Com a ajuda da tecnologia, é possível prever com maior precisão o momento ideal para reformar ou substituir componentes mecânicos. No entanto, é importante destacar que a manutenção preditiva não é aplicável a todos os tipos de componentes de um sistema.

Essas ações de manutenção podem compor políticas de manutenção, desde que aplicados a partir de uma definição gerencial ou política global da instituição, baseados em estudos técnicos e econômicos. Entretanto, além dos tipos de manutenção amplamente discutidos na literatura, este estudo aborda práticas de manutenção adicionais aplicáveis aos sistemas produtivos, como a manutenção por idade, a manutenção oportuna e a postergação da manutenção.

2.1.1.1 MANUTENÇÃO POR IDADE

A política de manutenção por idade (ou *age-based replacement*) é uma das abordagens mais tradicionais na engenharia de confiabilidade e gestão de ativos, sendo amplamente empregada para planejar a substituição preventiva de componentes antes que falhem. Em sua forma clássica, um componente é substituído de forma preventiva ao atingir uma idade predefinida T , ou de forma corretiva se falhar antes desse ponto. Essa estratégia visa minimizar o custo médio por unidade de tempo, equilibrando os custos de manutenção corretiva e preventiva. Conforme Scarf *et al.* (2009), essa política é fundamental para a otimização dos custos em sistemas que exigem substituições programadas, baseadas no tempo de operação dos componentes.

Historicamente, modelos de substituição por idade foram fortemente influenciados pela suposição de distribuições contínuas de falha, especialmente a distribuição exponencial. No entanto, como apontado por Zhao *et al.* (2022), a aplicação direta da política de manutenção por idade em unidades com distribuição de falha exponencial pura resulta em uma idade de substituição ótima tendendo ao infinito, invalidando a substituição preventiva tradicional nesse contexto. Para contornar essa limitação, os autores introduziram o conceito de "custo de desvio" (*deviation cost*), que considera os impactos econômicos do intervalo entre o tempo de falha e a substituição planejada, viabilizando a formulação de uma política com horizonte finito mesmo sob falhas com taxa constante.

Além disso, políticas mais recentes vêm considerando estruturas de sistemas mais complexas. Eryilmaz (2023) estendeu a análise da política de manutenção por idade para sistemas coerentes de tempo discreto com múltiplos componentes independentes e identicamente distribuídos. O estudo evidenciou a complexidade adicional envolvida na modelagem de sistemas multicomponentes, onde a expectativa do número de componentes falhos antes da substituição é uma variável fundamental para determinar os custos envolvidos.

Com o avanço dos modelos, também foram incorporadas variações como as políticas de substituição por oportunidade. Wu *et al.* (2024) propuseram modelos de substituição por idade baseados em oportunidade em tempo discreto, onde o componente pode ser substituído em momentos aleatórios chamados "slots", com probabilidade associada à disponibilidade de recursos. Essa abordagem é especialmente relevante em contextos práticos onde o acesso ao sistema é restrito e a execução da manutenção depende de condições logísticas ou ambientais.

Paul (2022) complementa essa discussão ao tratar da estimativa do tempo ótimo de substituição quando os custos de manutenção variam de forma linear ou não linear com o

tempo. O autor propõe o uso de estimadores baseados em métodos de kernel para definir esse tempo ótimo mesmo em cenários com aumento progressivo dos custos de manutenção, mostrando que a decisão de substituir por idade pode ser mais econômica do que continuar arcando com altos custos operacionais.

Por fim, Cavalcante *et al.* (2024) reforçam a relevância prática da manutenção por idade ao propor políticas simplificadas com substituição periódica e oportunidade limitada, refletindo a realidade de planejamentos de manutenção com recursos restritos. O modelo assume que as oportunidades de substituição ocorrem em intervalos fixos, mas com uma chance probabilística de serem viabilizadas, e mostra que antecipar a substituição em ciclos iniciais pode ser vantajoso quando há incerteza na disponibilidade futura de recursos.

2.1.1.2 MANUTENÇÃO OPORTUNA

A manutenção oportuna, também conhecida como manutenção oportunística ou proativa, é uma abordagem estratégica que busca maximizar a disponibilidade e a eficiência operacional por meio da realização de ações de manutenção no momento mais favorável, seja ele determinado por condições internas ou externas ao sistema. Diferentemente da manutenção tradicional, que segue cronogramas rígidos, a manutenção oportuna considera a oportunidade e o contexto operacional, minimizando custos e evitando paradas inesperadas.

Diversos estudos têm explorado a aplicação de modelos matemáticos, simulações e técnicas de aprendizado de máquina para otimizar a manutenção oportuna. Por exemplo, Budiono *et al.* (2021) propõem um modelo baseado em simulação de eventos discretos para representar a dinâmica de falhas e janelas de manutenção, incorporando variáveis como o nível de estoque e o bloqueio do processo subsequente, permitindo a identificação de “janelas de oportunidade” para a manutenção sem impacto na produção.

Valet *et al.* (2022) destacam a utilização de algoritmos de aprendizado por reforço (Reinforcement Learning) para integrar o agendamento de manutenção oportuna com o despacho de ordens de produção em sistemas complexos, como o setor de semicondutores. Essa abordagem possibilita o desenvolvimento de políticas adaptativas que consideram custos de oportunidade e minimizam paradas de máquina, demonstrando melhorias significativas na performance operacional em comparação a estratégias convencionais.

Li *et al.* (2023) avançam a discussão ao propor um modelo híbrido de manutenção oportuna que combina estratégias unitárias (CM, SM e CBM) com a consideração de manutenção imperfeita. Esse modelo utiliza simulações de Monte Carlo para otimizar a estratégia de manutenção oportuna em sistemas multicomponentes, demonstrando que a

flexibilidade do modelo permite reduzir significativamente os custos de manutenção em cenários complexos.

Outro avanço relevante é apresentado por Baoshan *et al.* (2024), que introduzem uma abordagem dinâmica baseada na “janela oportunística” (opportunistic window - OW). Essa metodologia emprega algoritmos de aprendizado não supervisionado e maximização da expectativa para ajustar em tempo real a idade de serviço e os intervalos de manutenção preventiva, permitindo a execução de manutenções oportunas mesmo em sistemas com alta interdependência entre os componentes.

Essas abordagens reforçam o papel central da manutenção oportuna no contexto industrial contemporâneo, especialmente em setores de alta tecnologia e alta demanda, como a manufatura avançada e os sistemas energéticos. A capacidade de identificar e aproveitar janelas de oportunidade, seja por meio de inspeções, dados de degradação ou análise preditiva, permite não apenas a redução de custos, mas também o aumento da confiabilidade e a disponibilidade operacional dos sistemas.

2.1.1.3 POSTERGAÇÃO DA MANUTENÇÃO

A postergação da ação de manutenção, também chamada de manutenção diferida ou adiada, tem sido objeto de crescente interesse na literatura devido à sua relevância prática e às implicações para a confiabilidade e o custo de operação dos sistemas. A postergação se baseia na ideia de que, ao identificar defeitos ou sinais de falha iminente, pode-se adiar a intervenção imediata e, assim, aproveitar ao máximo a vida útil residual do ativo. Essa estratégia é especialmente atrativa em ambientes industriais complexos, onde os ativos operam sob estresse ambiental significativo e condições de carga variáveis.

Dentre as abordagens recentes, destaca-se o trabalho de Zhang e Yang (2020), que propõem uma política de manutenção postergada baseada no estado do ativo e nos impactos do ambiente. Essa abordagem integra a variação do estado de saúde do ativo e os efeitos de choques ambientais aleatórios, definindo janelas de manutenção postergada que equilibram o risco de falha e o aproveitamento da vida útil residual. O modelo considera dois níveis de janelas: uma pré-definida, com base em inspeções periódicas, e outra reativa, ativada após a detecção de defeitos. Essa abordagem permite melhor alocação de recursos e controle do risco de falhas inesperadas.

Shaulagara *et al.* (2023) apresentam uma metodologia de priorização baseada em risco para o reagendamento de manutenções preventivas atrasadas em ativos de transmissão de

energia elétrica. A proposta enfatiza a necessidade de avaliação sistemática do risco associado à postergação, considerando a criticidade do ativo e os impactos potenciais da falha. Esse enfoque quantitativo auxilia na tomada de decisão quanto ao adiamento ou à execução imediata da manutenção.

A metodologia de avaliação rápida de riscos associada à postergação proposta por Baldissone e Demichela (2021) destaca a utilização de lógica fuzzy para considerar variáveis múltiplas e incertas, como severidade das condições operacionais, carga de trabalho e efetividade do monitoramento. Essa abordagem torna possível categorizar rapidamente os riscos associados à postergação, permitindo decisões mais ágeis e informadas.

Por sua vez, Asadi (2024) propõe uma política de manutenção preventiva em sistemas coerentes que permite a postergação da substituição com base na avaliação do número de componentes falhos, demonstrando que essa estratégia pode reduzir custos e minimizar a indisponibilidade do sistema.

Essas pesquisas evidenciam a relevância e o potencial da postergação da manutenção como alternativa eficiente em cenários de operação sob incerteza e restrições operacionais. A adoção de abordagens adaptativas e baseadas em risco para decidir sobre a postergação permite mitigar riscos, otimizar recursos e manter a disponibilidade e a confiabilidade dos sistemas.

2.1.2 MÁQUINAS INJETORAS DE PLÁSTICO

A manutenção de injetoras plásticas é crucial para garantir tanto a segurança dos operadores quanto a eficiência da produção. As máquinas injetoras estão sujeitas a desgaste contínuo durante o processo de injeção, o que pode comprometer a qualidade das peças produzidas e a segurança no ambiente de trabalho. A manutenção preventiva desempenha um papel fundamental, pois ajuda a identificar e corrigir problemas antes que se tornem falhas graves. De acordo com Costa (2022), a manutenção preventiva envolve práticas como a inspeção regular de todas as partes móveis da máquina, a lubrificação de componentes críticos, como a rosca de injeção, e a calibração do sistema de injeção para garantir que a quantidade e a pressão do material sejam adequadas. Essas ações evitam o desgaste prematuro das peças e minimizam o risco de falhas operacionais.

Além disso, a manutenção corretiva é necessária quando ocorrem falhas imprevistas. Embora a manutenção corretiva seja essencial para corrigir problemas imediatamente, ela resulta em custos operacionais mais altos e pode causar períodos de inatividade não

planejados, o que impacta diretamente a produção. Ribeiro (2009) destaca que a dependência excessiva da manutenção corretiva é um sinal de que a manutenção preventiva não está sendo adequadamente implementada.

É importante observar que a manutenção de injetoras envolve riscos específicos, como a exposição dos operadores a temperaturas elevadas e pressões altas durante os processos de aquecimento e injeção, o que pode causar queimaduras ou outros acidentes graves. A manutenção inadequada também pode resultar em falhas nos dispositivos de segurança, como sensores de intertravamento, aumentando o risco de lesões mecânicas (Dourado, 2012). Além disso, a exposição a substâncias químicas, como vapores liberados por plásticos aquecidos, pode representar um perigo à saúde dos operadores.

3. ESTUDO DE CASO: OTIMIZAÇÃO DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA FLEXÍVEL PARA UMA MÁQUINA INJETORA

3.1. APRESENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Neste estudo de caso, é apresentada a aplicação de uma política de manutenção flexível por idade em uma máquina injetora de plástico (Figura 1), da marca ROMI. Trata-se de um equipamento de grande porte e de elevada importância para a linha de produção de uma fábrica de baterias automotivas. A máquina injetora foi selecionada em função de sua longa trajetória operacional e de sua expressiva capacidade produtiva, que pode ultrapassar 100.000 unidades mensais, a depender do tipo de produto fabricado, como tampas para baterias automotivas. A avaliação da aplicação da política de manutenção e de sua eficácia no contexto desse equipamento tem como base o estudo desenvolvido por Neves (2024).

Figura 1 – Máquina injetora de termoplástico



Fonte: Neves (2024)

De acordo com Neves (2024), a máquina injetora iniciou suas operações em 2007 e, desde então, tem desempenhado um papel essencial no parque fabril da empresa. Ao longo deste período, a máquina se destacou pela sua alta capacidade de produção, tornando-se um dos principais ativos da linha de produção. O desempenho da máquina injetora foi analisado durante um mês de operação, com foco nas estimativas do tempo necessário para a realização das intervenções de manutenção, bem como na disponibilidade do equipamento.

Para a coleta de dados relativo à confiabilidade dos equipamentos, foi considerado um intervalo de tempo de 624 horas, equivalente a um mês de produção, com base nesse tempo máximo foram definidos como marcos temporais para essa análise: 104, 208, 312, 416, 520 e 624 horas de operação. Para cada um desses marcos de idade, estimou-se a probabilidade de ocorrência de falha sistêmica (que exige a renovação do sistema), com o objetivo de realizar a análise de confiabilidade que será apresentada na próxima seção. Os dados coletados podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Probabilidade acumulada de falha maior
Mantenedor 1

Idade (horas)	Probabilidade acumulada de falha maior (%)	
	Mínimo	Máximo
104	10	15
208	20	28
312	25	40
520	50	75
624	80	85

Fonte: Neves (2024)

3.2. ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

Com o aumento da demanda por produtos seguros e de alta qualidade, a avaliação da confiabilidade e o planejamento da manutenção em sistemas industriais assumem papel cada vez mais estratégico. A análise de confiabilidade constitui elemento central na mensuração do desempenho de sistemas técnicos, sobretudo em ambientes industriais, onde a continuidade operacional está diretamente vinculada à eficiência das práticas de manutenção. Nesse contexto, o trabalho de Neves (2024) destaca a análise de confiabilidade como etapa indispensável à definição de indicadores de desempenho da manutenção, com ênfase na garantia da disponibilidade dos sistemas.

No estudo de caso da Injetora, foi identificada a necessidade de estimar a confiabilidade do sistema, uma vez que não estavam disponíveis dados objetivos suficientes para essa análise. Como os dados históricos de tempo até a falha não puderam ser coletados e as informações do fabricante se tornaram obsoletas devido a modificações realizadas ao longo dos 10 anos de operação do equipamento, recorreu-se à abordagem proposta por Neves (2024)

de elicitação de conhecimento de especialistas. Essa abordagem permitiu que estimativas subjetivas fossem fornecidas sobre os parâmetros de falha do sistema.

A confiabilidade foi analisada considerando dois tipos de falha: as falhas menores, que podem ser corrigidas com intervenções corretivas pontuais, e as falhas maiores, que exigem intervenções mais complexas. Para cada tipo de falha, as probabilidades de ocorrência foram determinadas com base nas respostas dos especialistas, o que possibilitou a construção de uma distribuição de probabilidade empírica. Esses dados foram essenciais para a avaliação do desempenho da manutenção. Os resultados tratados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de Confiabilidade da Injetora obtidos a partir da elicitação do conhecimento de especialistas

Tempo de operação (t)	104 h	208 h	312 h	520 h	624 h
Probabilidade acumulada de falha $F(t)$ (valor mínimo)	85%	72%	60%	25%	15%
Probabilidade acumulada de falha $F(t)$ (valor máximo)	90%	80%	75%	50%	20%

Fonte: Esta pesquisa (2025)

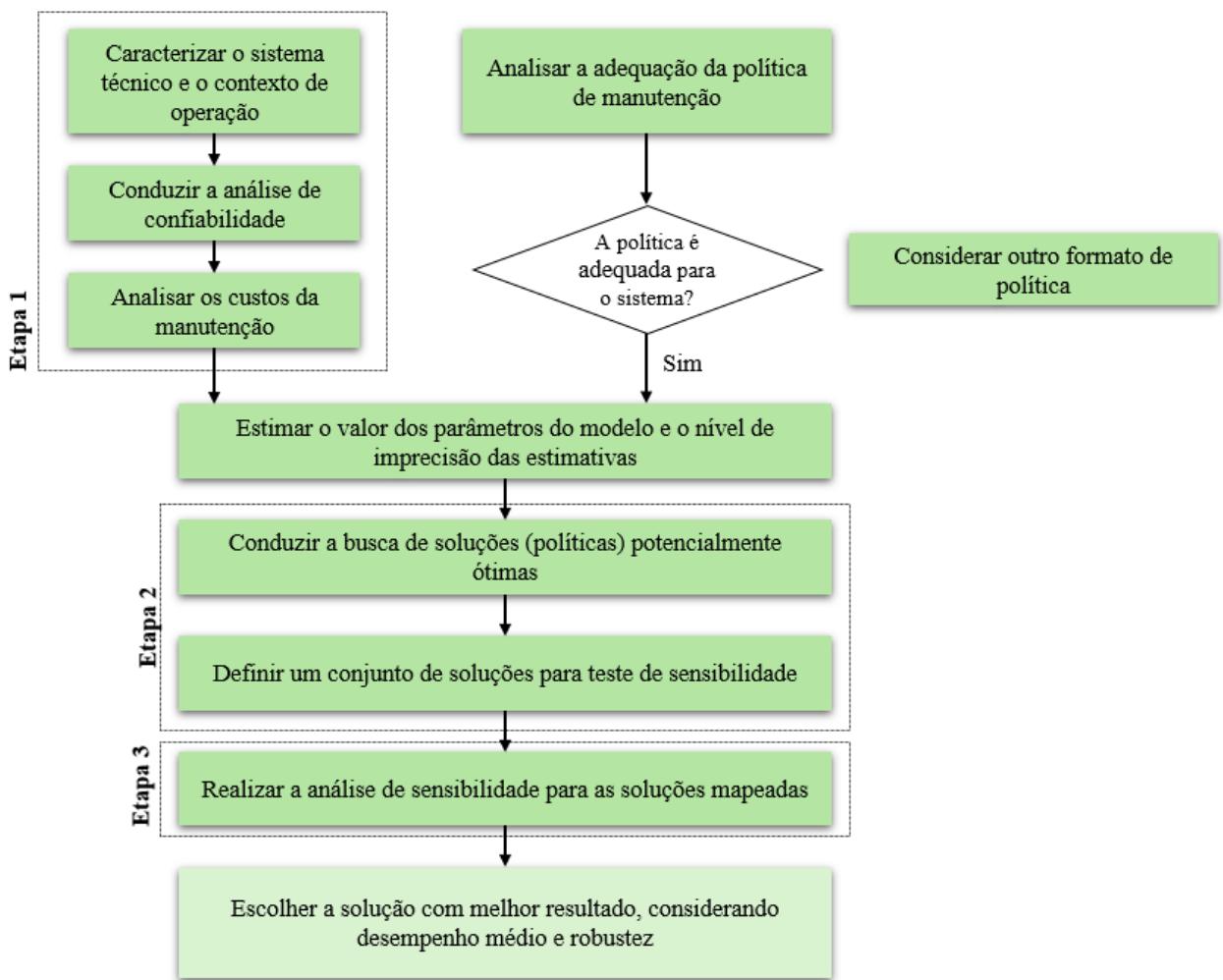
Para utilizar esses dados, é necessário adaptar a política de manutenção que será aplicada neste estudo de caso, a qual será apresentada na subseção seguinte. Políticas de manutenção podem ser ajustadas para qualquer sistema técnico que atenda às condições mínimas exigidas. No entanto, o dimensionamento da política deve ser específico para cada situação, levando em consideração as características particulares do problema, como as propriedades de confiabilidade do equipamento, os custos de manutenção e outros fatores relevantes. Essas características devem ser refletidas no modelo matemático utilizado para estimar o desempenho da manutenção, sendo descritas por meio de parâmetros de entrada para o modelo. Cada combinação de valores para os parâmetros do modelo resulta em uma instância numérica. A partir dessas instâncias, processos de otimização são realizados com o objetivo de identificar as políticas mais eficazes para cada caso específico (Alberti *et al.*, 2022).

O processo de dimensionamento de uma política de manutenção deve começar com a caracterização do sistema técnico para o qual ela será aplicada. Após a definição dos parâmetros que melhor caracterizam o problema em questão, busca-se a política ótima. Entretanto, na prática, a primeira etapa deste processo está sempre sujeita a erros, o que coloca sob dúvida qualquer recomendação obtida a partir de ferramentas baseadas em

modelos matemáticos e algoritmos de otimização. Uma boa recomendação de política de manutenção deve, então, se mostrar robusta, o que significa que seu desempenho varia pouco mesmo diante de erros na definição dos parâmetros de entrada do modelo de referência. Ferramentas de análise de sensibilidade são úteis para avaliar a robustez de tais recomendações, dando um suporte extra para a tomada de decisões (Alberti *et al.*, 2022) (Alberti *et al.*, 2025).

O passo a passo do procedimento realizado no estudo de caso da Injetora foi esquematizado e apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Procedimento para dimensionamento de política de manutenção para um sistema técnico real.



Fonte: Esta pesquisa(2025)

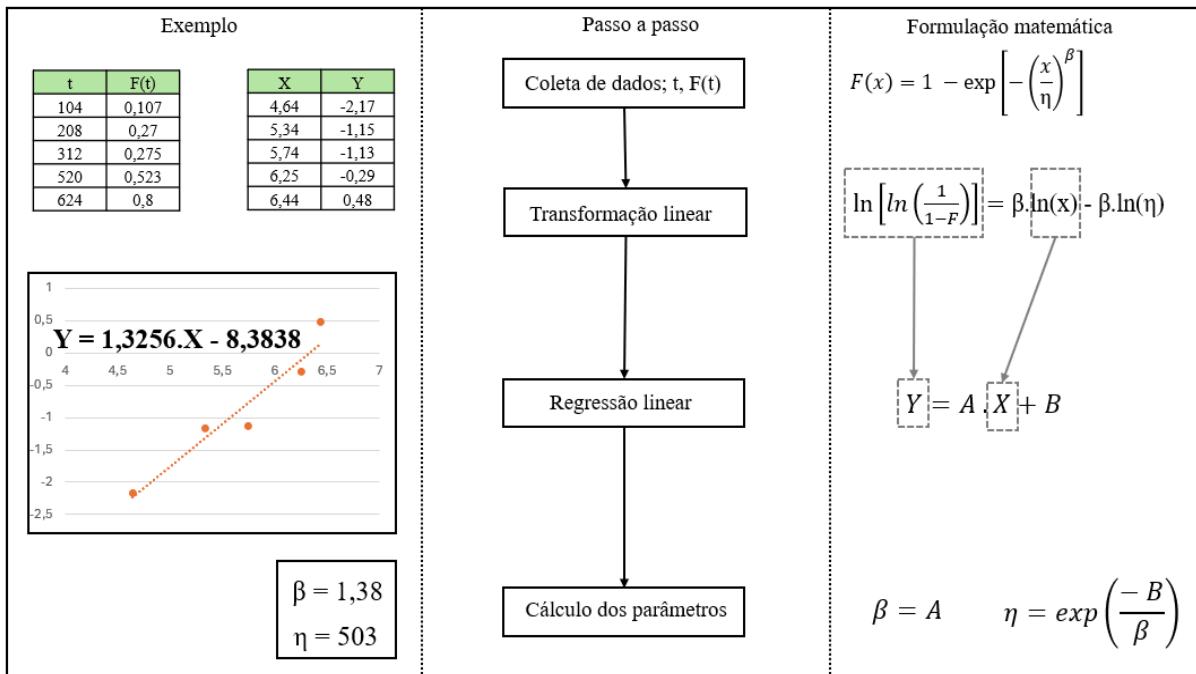
Para caracterizar a aleatoriedade da variável ‘tempo até a falha’, optamos por utilizar a distribuição de probabilidade Weibull, visto que é uma distribuição flexível e frequentemente apropriada para caracterizar processos de deterioração e falha de sistemas técnicos. Esta distribuição pode ser caracterizada a partir de dois parâmetros básicos: de escala (η) e de

forma (β) (Khan *et al.*, 2023).

A fim de transformar os dados obtidos por meio de elicitação em faixas de valores para os parâmetros η e β da distribuição Weibull, foi utilizado um procedimento baseado em simulação de Monte Carlo, que funciona da seguinte forma: para a valor de t apresentado na primeira linha da Tabela 1, é sorteado um valor para a probabilidade $F(t)$, considerando uma distribuição de probabilidade uniforme definida sobre a faixa de valores apresentada pelos especialistas. Depois, por meio do método de transformação linear, apresentado na Figura 2, estima-se os valores de η e β que melhor se ajustam aos dados. Este procedimento foi repetido 1000 vezes, e as estatísticas descritivas para a amostra de valores de η e β são apresentadas na Tabela 3.

A partir dos resultados obtidos na etapa de análise de confiabilidade, foram adotadas como estimativas pontuais η igual a 503 horas e β igual a 1,38, com nível de imprecisão em torno de 10%.

Figura 3 - Método de transformação linear para estimar os parâmetros da distribuição Weibull



Fonte: Esta pesquisa (2025)

Tabela 3 – estatísticas descritivas da amostra de valores de η (em horas) e β (adimensional para a distribuição Weibull)

Estatística Descritiva	Parâmetro de escala(η)	Parâmetro de forma(β)
Média	503	1,38

Percentil 05	459	1,24
Percentil 25	479	1,32
Percentil 50 (mediana)	502,23	1,38
Percentil 75	524,74	1,44
Percentil 95	555,75	1,53

Fonte: esta pesquisa (2025)

3.3. APRESENTAÇÃO DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO

A política tradicional de substituição por idade é uma abordagem simples de manutenção, definida por uma única variável de decisão: T , que representa a idade máxima para a substituição preventiva. Quando aplicada a um determinado componente, essa política estabelece que ele deve ser substituído por um novo assim que ocorrer uma falha ou quando atingir a idade T , prevalecendo o evento que ocorrer primeiro (Scarf *et al.*, 2024). Apesar de sua simplicidade ser considerada uma vantagem, esse tipo de política mostra-se limitada para contextos mais complexos, pois seu dimensionamento baseia-se exclusivamente nas propriedades de confiabilidade do componente, desconsiderando fatores externos que podem influenciar a execução da manutenção, como condições operacionais, disponibilidade de recursos e restrições de produção.

Com o intuito de superar essas limitações, Alberti *et al.* (2024) propuseram uma política mais flexível de substituição por idade, caracterizada por três variáveis de decisão: S , T e Z . Nessa formulação, T corresponde à idade planejada para a substituição preventiva do componente ou sistema. Se não houver imprevistos nem oportunidades de antecipação, a substituição é realizada nesse ponto. Já S representa o início de uma janela de oportunidade: a partir dessa idade, caso surja uma chance de antecipar a manutenção com menor custo, ela pode ser aproveitada. Por fim, Z indica o limite máximo de adiamento da substituição preventiva, isto é, quando há impedimentos na data programada e nenhuma oportunidade anterior de intervenção. Se o componente atingir Z , a substituição deve ser feita obrigatoriamente, mesmo que implique custos adicionais ou interrupção da produção. Essa abordagem é conhecida como política STZ, devido à relação lógica entre as variáveis ($S \leq T \leq Z$).

3.4. MODELAGEM MATEMÁTICA

A política STZ, desenvolvida por Alberti *et al.* (2024), contempla sete cenários operacionais, ilustrados na Figura 4, que representam diferentes ciclos de renovação sob condições específicas de operação e manutenção. Esses cenários são exaustivos e mutuamente exclusivos, ou seja, cobrem todas as possibilidades de ocorrência sem sobreposição, garantindo que a soma de suas probabilidades seja sempre igual a 1. Para cada cenário, calcula-se a probabilidade de ocorrência ($P_{\text{cenário}}$), e com esses valores, derivam-se as equações para determinar o custo esperado ($EC_{\text{cenário}}$) e o tempo médio ($EL_{\text{cenário}}$) de um ciclo de renovação. Alberti *et al.* (2024) definem os seguintes cenários:

1º Cenário: A falha ocorre antes de S , ou seja, o componente falha antes de atingir a janela de oportunidade, impossibilitando a prorrogação da substituição preventiva, já que não há tempo para aproveitamento da oportunidade.

$$P_1(S) = F_x(S)$$

$$EC_1(S) = C_f \cdot F_x(S)$$

$$EL_1(S) = \int_0^S x \cdot f_x(x) dx$$

2º Cenário: A falha ocorre entre S e T , antes de surgir uma oportunidade para adiamento da substituição preventiva.

$$P_2(S, T) = R_h(T - S)[F_x(T) - F_x(S)] + \int_0^{(T-S)} \int_S^{(S+h)} f_h(h) f_x(x) dx dh$$

$$EC_2(S, T) = C_f \cdot P_2(S, T)$$

$$EL_2(S, T) = R_h(T - S) \int_S^T x \cdot f_x(x) dx + \int_0^{(T-S)} \int_S^{(S+h)} x \cdot f_h(h) f_x(x) dx dh$$

3º Cenário: A falha ocorre entre S e T , sem que haja uma janela de oportunidade nesse intervalo. Isso impede a realização da substituição preventiva em T .

$$P_3(S, T, Z) = p \cdot R_h(Z - S)[F_x(Z) - F_x(T)] + p \cdot \int_{(T-S)}^{(Z-S)} \int_T^{(h+S)} f_h(h) f_x(x) dx dh$$

$$EC_3(S, T, Z) = C_f \cdot P_3(S, T, Z)$$

$$EL_3(S, T, Z) = p \cdot R_h(T - S) \int_T^Z x \cdot f_x(x) dx + p \cdot \int_{(T-S)}^{(Z-S)} \int_T^{(h+S)} x \cdot f_h(h) f_x(x) dx dh$$

4º Cenário: A substituição preventiva ocorre dentro da janela de oportunidade entre S e T , desde que não haja falha antes desse momento.

$$P_4(S, T) = \int_0^{(T-S)} f_h(h) R_x(S + h) dh$$

$$EC_4(S, T) = C_o \cdot P_4(S, T)$$

$$EL_4(S, T) = \int_0^{(T-S)} (S + h) f_h(h) R_x(S + h) dh$$

5º Cenário: A substituição preventiva ocorre entre T e Z , uma vez que não foi possível realizá-la em T devido à falta de oportunidade prévia e à ausência de falhas.

$$P_5(S, T, Z) = p \cdot \int_{(T-S)}^{(Z-S)} f_h(h) R_x(S + h) dh$$

$$EC_5(S, T) = C_w \cdot P_5(S, T, Z)$$

$$EL_5(S, T, Z) = p \cdot \int_{(T-S)}^{(Z-S)} (S + h) f_h(h) R_x(S + h) dh$$

6º Cenário: A manutenção preventiva ocorre em T , sob a condição de que não tenha ocorrido falhas nem haja oportunidade de adiamento antes desse ponto.

$$P_6(S, T) = (1 - p) \cdot R_h(T - S) \cdot R_x(T)$$

$$EC_6(S, T) = C_p \cdot P_6(S, T)$$

$$EL_6(S, T, Z) = T \cdot P_6(S, T)$$

7º Cenário: A manutenção preventiva é realizada em Z , desde que não haja oportunidade ou falhas antes de Z , e que a manutenção em T não tenha sido interrompida.

$$P_7(S, T, Z) = p \cdot R_h(Z - S) \cdot R_x(Z)$$

$$EC_7(S, T) = C_v \cdot P_7(S, T, Z)$$

$$EL_7(S, T, Z) = Z \cdot P_7(S, T, Z)$$

Após o mapeamento dos cenários definidos por Alberti *et al.* (2024), calculam-se o custo e a duração esperados de um ciclo de renovação, somando as contribuições de cada cenário, conforme a equação abaixo:

$$EC(S, T, Z) = \sum_{i=1}^7 EC_i(S, T, Z)$$

$$EL(S, T, Z) = \sum_{i=1}^7 EL_i(S, T, Z)$$

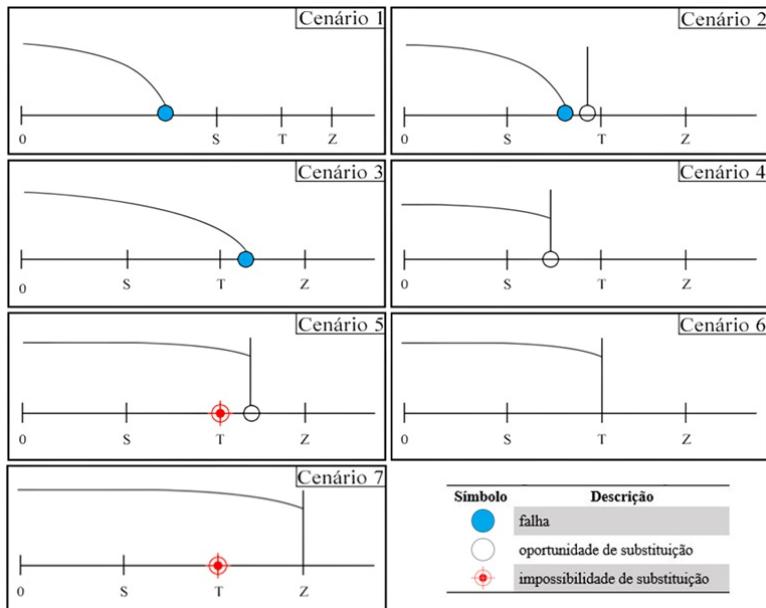
Também é calculada a taxa de custo (ou custo esperado por unidade de tempo no longo prazo) associada à implementação de uma política de manutenção, que pode ser determinada da seguinte forma, de acordo com o Teorema da Renovação por Recompensa apresentado por Tijms (1994):

$$C_\infty(S, T, Z) = \frac{EC(S, T, Z)}{EL(S, T, Z)}$$

No estudo realizado por Alberti *et al.* (2024), a taxa de custo foi adotada como o principal parâmetro para a avaliação do desempenho. Como critério secundário, foi analisado o tempo médio entre falhas operacionais (MTBOF – *Mean Time Between Operational Failures*), o qual pode ser estimado pela razão entre a duração esperada de um ciclo de renovação e a probabilidade de que um ciclo termine em falha, conforme descrito por Scarf *et al.* (2009), conforme apresentado a seguir:

$$MTBOF(S, T, Z) = \frac{EL(S, T, Z)}{\sum_{i=1}^3 P_i(S, T, Z)}$$

Figura 4- Cenários de estudo da Política de Manutenção STZ



Fonte: Alberti *et al.* (2024)

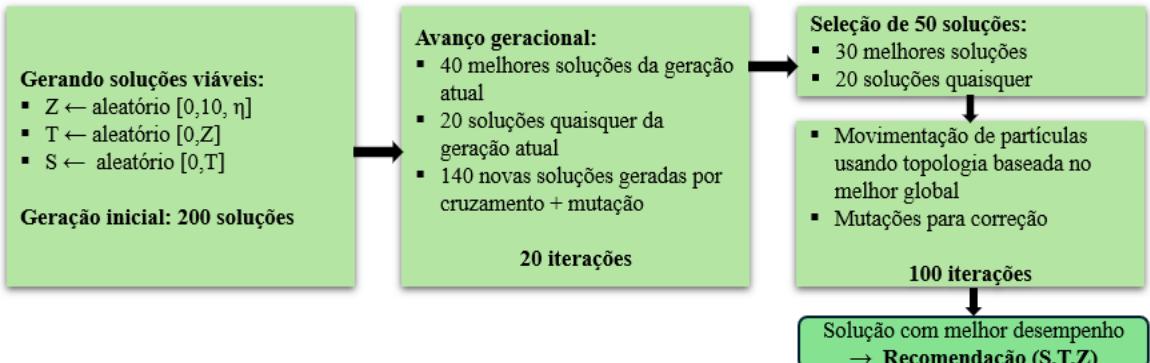
3.5. ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O processo de otimização da política STZ foi conduzido por meio de um algoritmo desenvolvido especificamente para este estudo, que combina Algoritmo Genético (GA) e Otimização por Nuvem de Partículas (PSO). Essa abordagem híbrida foi escolhida devido às vantagens complementares dos dois métodos: o GA, com forte capacidade de busca global, mas com a desvantagem de não ter memória e ser relativamente ineficiente, e o PSO, que possui memória e é eficiente na busca local, mas pode ficar preso em ótimos locais. Segundo Duan *et al.* (2022), a combinação dessas abordagens pode unir a boa capacidade de otimização global do GA e a eficiência do PSO, resultando em um processo de busca mais robusto e eficiente. O algoritmo foi estruturado para evoluir soluções ao longo de várias gerações e iterações, ajustando os parâmetros S , T e Z conforme os resultados intermediários obtidos. O processo de busca considera a combinação de soluções para encontrar a política de manutenção que minimize custos e maximize a confiabilidade do sistema.

O algoritmo de otimização segue três etapas principais: 1) inicialização, onde uma população de soluções é gerada aleatoriamente; 2) evolução, baseada no Algoritmo Genético, para refinar as soluções ao longo das gerações; e 3) movimentação das soluções usando o PSO, ajustando-as conforme o espaço de soluções. Após 100 iterações, a solução com o melhor desempenho é selecionada como a recomendação para a política de manutenção. A cada iteração, o algoritmo busca otimizar os parâmetros de manutenção, assegurando que o

sistema opere com maior eficiência e menores custos. Essas etapas podem ser visualizadas na Figura 5 abaixo.

Figura 5 – Algoritmo para otimização da política STZ.



Fonte: Esta pesquisa (2025)

Embora o algoritmo seja baseado em uma heurística e, portanto, não garanta a obtenção de uma solução ótima, os testes realizados mostraram que ele apresentou desempenho superior em relação a outros métodos convencionais, como o comando Minimize da biblioteca Scipy. Além disso, o algoritmo alcançou soluções satisfatórias de forma significativamente mais rápida em comparação ao método de Evolução Diferencial. Esse desempenho superior se deve à maior inteligência do processo de busca, que foi cuidadosamente adaptado para o contexto do estudo de caso. Além disso foi desenvolvido também um software desse algoritmo de otimização para torna-se mais acessível a utilização do modelo, como ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Software para otimização da política STZ

Inserção dos parâmetros de entrada	Apresentação dos resultados
<p>Política STZ - uma política flexível de substituição por idade</p> <p>Aplicação</p> <p>Insira os valores dos parâmetros abaixo:</p> <p>Beta - parâmetro de forma da distribuição de probabilidade de Weibull para o tempo até a falha 1,3800000</p> <p>Eta - parâmetro de escala da distribuição de probabilidade de Weibull para o tempo até a falha 503,0000000</p>	<p>Clique no botão abaixo para rodar esse aplicativo:</p> <p>Obtenha os valores</p> <p>S = : 236.83835493193925</p> <p>T = : 236.8399146664453</p> <p>Z = : 4290.636968431459</p> <p>Taxa de custo = : 0.008799910268234625</p> <p>Tempo médio entre falhas operacionais = : 813.7295157447016</p>

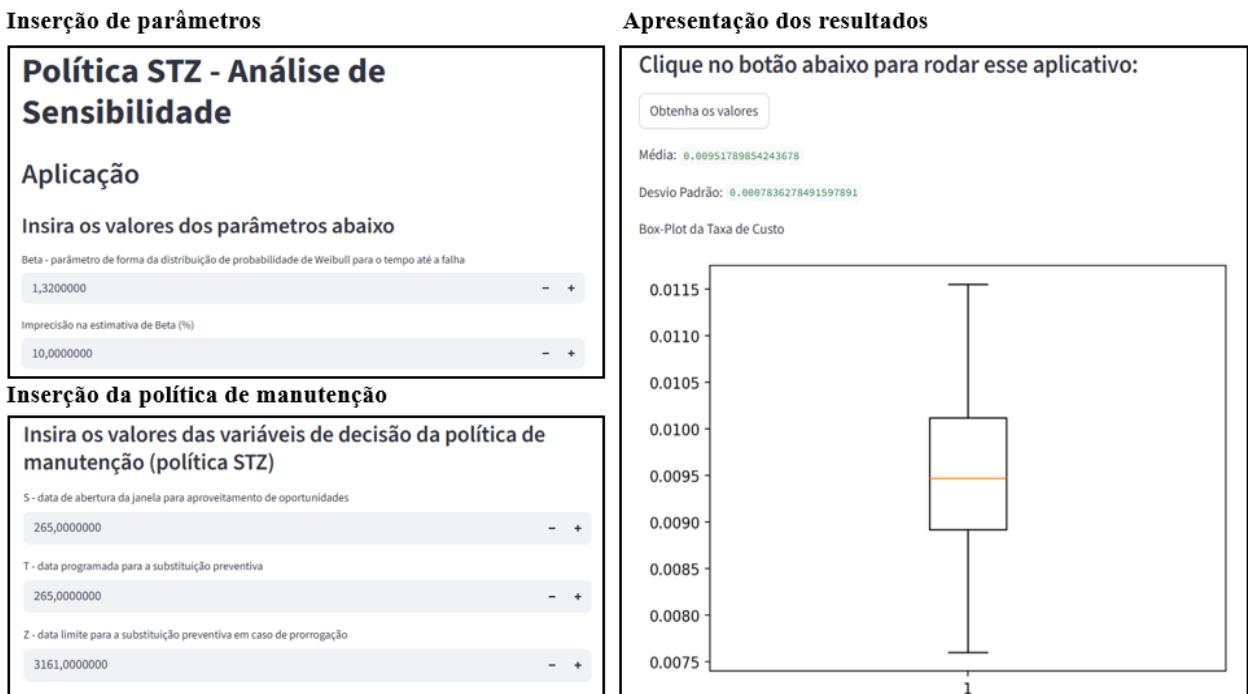
Fonte: Esta pesquisa (2025)

O software para otimização da política está disponível no link: [Streamlit](#)

Uma vez obtida uma recomendação satisfatória para as variáveis de decisão da política STZ, cabe a condução de uma análise de sensibilidade, com o objetivo de compreender o quão robusta a recomendação se mostra diante de possíveis erros que podem ocorrer na estimativa dos parâmetros do modelo.

Para a análise de sensibilidade da política, foi utilizado um software, onde nesse software é necessário informar estimativas pontuais para os parâmetros do modelo, e o nível de imprecisão de cada estimativa, sendo este definido como um percentual do valor informado. Além disso, é necessário informar os valores de S , T e Z da política que será testada. Ao ser executado, o software obtém uma amostra com 500 combinações para os parâmetros de entrada do modelo, e para cada combinação é calculado o desempenho da política, em termos da taxa de custo. A partir da amostra se calcula o valor médio e o desvio-padrão estimados para o desempenho da política de manutenção, e se elabora um gráfico boxplot para exibição dos resultados, conforme ilustrado na Figura 7. O desvio-padrão, neste contexto, serve como uma medida de robustez: quanto menor o desvio-padrão, mais robusta uma política é ante a possíveis erros na estimativa dos parâmetros do modelo.

Figura 7 – Software para análise de sensibilidade da política STZ



Fonte: Esta pesquisa (2025)

O software para análise de sensibilidade está disponível no link: [Streamlit](#), alguns elementos de sua interface são apresentados na figura acima.

3.6. BUSCA DE SOLUÇÕES

Uma vez validada a possibilidade de implementação da política STZ para a Injetora 18, passou-se à caracterização do problema a fim de obter os parâmetros de entrada para o modelo matemático utilizado. Em primeiro lugar, analisou-se o contexto de operação no qual a prensa está inserida, de forma que foi possível estimar que oportunidades para adiantar a manutenção preventiva ocorrem em média uma vez a cada 100 horas, o que implica em uma taxa de chegada de oportunidades λ igual a 0,01 h⁻¹. Também foi identificado que manutenções preventivas programadas sofrem impedimentos e precisam ser prorrogadas em 10% dos casos, do que se deduz uma probabilidade de impedimento p igual a 0,1. Para os parâmetros λ e p , consideramos um nível de imprecisão de 10% sobre a sua estimativa inicial.

Ao avaliar os custos de manutenção, adotou-se como referência o custo da manutenção preventiva programada em T , de modo a não expor dados da empresa em que o estudo de caso foi conduzido. Assim, o custo da manutenção preventiva em T é estimado em 1\$ (unidade monetária genérica). Em um cenário de oportunidade, o custo da manutenção preventiva é reduzido a 0,7\$, visto que a parada do equipamento para manutenção tem menor impacto no processo produtivo. Por outro lado, o custo da manutenção preventiva em Z , que é compulsória e não pode ser prorrogada, é estimado em 2\$, já que neste caso não há possibilidade de prorrogação, mesmo quando a produção está sob pressão. Por fim, o custo da manutenção em caráter corretivo (isto é, manutenção motivada por falha) é estimado em 5\$: tal diferença resulta do maior tempo de parada da máquina em caso de manutenção não planejada. Além disso, falhas podem ter efeito sobre a qualidade dos itens fabricados, aumentando o custo devido a rejeição e/ou retrabalho.

Para os parâmetros de custo, foi considerado um nível de imprecisão de 10% sobre as estimativas iniciais. Por fim, o modelo matemático da política STZ, conforme apresentado por (Alberti *et al.* 2024), demanda informações sobre as propriedades de confiabilidade do sistema estudado. Neste caso, a distribuição de probabilidade do tempo até a falha do equipamento após uma manutenção completa é caracterizada utilizando dados históricos e informações fornecidas pelo fabricante. Na ausência dessas fontes, pode-se recorrer à elicitação do conhecimento de especialistas. Os valores foram obtidos por meio do Método de Transformação Linear, conforme detalhado na seção 3.2.

Para busca de soluções, foi utilizado o software de otimização que foi apresentado na seção 3.5, para encontrar para encontrar boas combinações de valores para as variáveis de

decisão da política de manutenção. O software busca otimizar a política STZ em função dos parâmetros do modelo, e tem como critério de otimização a taxa de custo, isto é, o custo esperado por unidade de tempo no longo prazo, resultante da adoção da política de manutenção. Uma vez informados os parâmetros do modelo, o software apresenta uma recomendação para a política STZ, como é ilustrado na figura 6.

O mecanismo de busca de soluções implementado no software utiliza uma abordagem estocástica, baseada na combinação de algoritmo genético e otimização por nuvem de partículas. Por ter como base um algoritmo estocástico, múltiplas rodadas do software podem apresentar soluções diferentes para o mesmo problema. Em um cenário de certeza na definição dos parâmetros do modelo, basta escolher a política que apresenta menor taxa de custo. Já em um cenário com incertezas, é prudente considerar múltiplas alternativas para análise posterior.

Para o mapeamento das soluções, foi considerado recomendações obtidas pra diferente combinações dos parâmetros do modelo como mostra a tabela 4. Um total de 16 soluções foram levadas para a análise de sensibilidade junto com o caso base.

Tabela 4 – Otimização das políticas STZ, taxa de custo medido em \$/un..

Caso	Política STZ				Desempenho
	S	T	Z	C_{∞}	
Base	217	218	4504	0,0088	847
1	254	257	4144	0,0094	713
2	193	197	4861	0,0083	996
3	210	211	3154	0,0098	735
4	251	251	4114	0,0080	912
5	253	256	4970	0,0088	779
6	240	241	3946	0,0088	809
7	262	263	3316	0,0090	762
8	217	219	4962	0,0087	855
9	225	226	4768	0,0088	832
10	244	245	4775	0,0088	800
11	234	235	4526	0,0088	816
12	214	215	4909	0,0088	851
13	222	224	2422	0,0086	832
14	253	259	4983	0,0091	774

15	262	262	3629	0,0082	775
16	189	191	3283	0,0094	902

Fonte: Esta pesquisa (2025)

Na análise de sensibilidade dessas soluções, considerando o nível de imprecisão na definição dos parâmetros de entrada do modelo como sendo de 10%, conforme mencionado anteriormente. Para tal, utilizamos o software de análise de sensibilidade que foi apresentado na seção anterior.

Tabela 5 – Resultados da Análise de Sensibilidade das soluções encontradas. Média e desvio-padrão da taxa de custo, medidos em \$/un.

nº	Solução			Taxa de Custo (. 10⁻³)	
	S (horas)	T (horas)	Z (horas)	Média	Desvio-Padrão
Base	217	218	4504	8,9	0,72
1	254	257	4144	9,4	0,76
2	193	197	4861	8,3	0,69
3	210	211	3154	9,9	0,81
4	251	251	4114	8,0	0,67
5	253	256	4970	8,9	0,73
6	240	241	3946	8,9	0,73
7	262	263	3316	9,0	0,74
8	217	219	4962	8,8	0,72
9	225	226	4768	8,9	0,72
10	244	245	4775	8,8	0,73
11	234	235	4526	8,8	0,74
12	214	215	4909	8,9	0,71
13	222	224	2422	8,6	0,71
14	253	259	4983	9,1	0,76
15	262	262	3629	8,3	0,65
16	189	191	3283	9,5	0,80

Fonte: Esta pesquisa (2025)

Os resultados da análise de sensibilidade são apresentados na Tabela 6. As soluções 4 e 15 apresentam melhor desempenho médio (menor taxa de custo média) e maior robustez (menor desvio-padrão) que as demais, de modo que foram consideradas para a elaboração da recomendação apresentada na conclusão

3.7 RECOMENDAÇÃO DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO

Com base na aplicação da política STZ ao estudo de caso da injetora de termoplástico e considerando os resultados obtidos na seção anterior, recomenda-se a seguinte política de manutenção para a Injetora de termoplástico: após a manutenção completa com revisão geral de seus componentes, operação do equipamento pode prosseguir por 251 a 262 horas. Quando este limite for alcançado, o equipamento deve ser submetido a uma nova manutenção completa com caráter preventivo. Assim, a equipe responsável deve se planejar para que os recursos necessários para tal estejam disponíveis na data prevista.

Caso haja impedimento para a parada do equipamento para manutenção, este deve ser devidamente atestado pela gerência de produção; neste caso, a manutenção preventiva pode ser prorrogada, e deve ser realizada tão logo se verifique uma oportunidade para a sua realização, ou após mais 251 a 262 horas de operação. Em caso de falha crítica, o equipamento deve passar por uma manutenção complexa em caráter corretivo; mas no caso de falhas pontuais de componentes pouco relevantes, basta um mínimo reparo orientado para a correção do problema específico. Vale ressaltar que os valores de S (início da janela de oportunidade) e T (idade planejada para a substituição preventiva) estão próximos, o que se deve ao fato de a taxa de chegada de oportunidades λ ser muito pequena, indicando um não aproveitamento da oportunidade, isso significa que a política clássica satisfaz a esses parâmetros do modelo. No entanto, na análise de sensibilidade, é possível observar situações em que S não é igual a T , e é nesse contexto que a política STZ se mostra útil.

3.8 COMPARAÇÃO COM OUTRAS POLÍTICAS

É possível obter casos especiais da política de Manutenção STZ, que podem ser obtidos por meio de um ajuste na sua estrutura. A política por idade é obtida ao definir $S = T = Z = \text{valor finito}$, implicando em uma substituição preventiva assim que o sistema atinge uma idade predefinida, sendo denominada de Política S. A política puramente oportuna é caracterizada pela otimização do valor de S , com $T = Z = \infty$, de modo que as substituições ocorrem apenas quando há oportunidade, a partir de uma idade mínima, configurando a Política TZ. Além disso, há a política de manutenção oportuna com limite máximo que é caracterizada pela otimização de S e T , e $T = Z$. Nessa política, a substituição preventiva é realizada no momento em que o tempo de operação do equipamento atinge o limite máximo estipulado, representado por T , que coincide com o tempo de falha potencial do sistema Z ,

sendo chamada de Política ST.

Tabela 6 – Comparação do custos de manutenção para diferentes políticas. Média e desvio-padrão da taxa de custo, medidos em \$/un.

Caso	Política STZ	Política S	Política TZ	Política ST
	$C^*(\cdot 10^{-3})$	$C_\infty^S(\cdot 10^{-3})$	$C_\infty^Z(\cdot 10^{-3})$	$C_\infty^T(\cdot 10^{-3})$
1	8,9	10,6	9,8	11,3
2	9,4	11,3	10,2	11,6
3	8,3	9,90	9,2	10,8
4	9,9	11,7	10,8	12,3
5	8,0	9,60	8,8	10,1
6	8,9	11,0	9,7	10,9
7	8,9	11,0	9,7	11,0
8	9,0	11,0	9,8	10,8
9	8,8	11,0	9,7	11,3
10	8,9	11,0	9,5	11,2
11	8,8	11,0	9,9	11,0
12	8,8	11,0	9,8	11,0
13	8,9	11,0	9,8	11,4
14	8,6	10,3	9,7	10,9
15	9,1	10,9	9,8	11,1
16	8,3	9,8	8,9	10,1
17	9,5	11,3	9,8	12,4

Fonte: Esta pesquisa (2025)

A comparação entre a Política STZ e as demais abordagens demonstra que a STZ apresenta, de modo consistente, menores taxas de custo na maior parte dos cenários analisados. Além do desempenho favorável, sua estrutura simples e facilidade de implementação reforçam sua adequação para aplicações práticas. Nesse sentido, a Política STZ destaca-se como uma alternativa eficiente e uma referência promissora para gestores de manutenção que buscam equilibrar desempenho operacional e custo.

3.9 SÍNTESE CONCLUSIVA

A política de manutenção preventiva flexível, proposta neste estudo, se revela uma estratégia altamente eficaz para otimizar a operação de sistemas técnicos complexos, como a injetora de termoplástico analisada. Sua implementação, por meio da combinação de

manutenção baseada em idade, manutenção oportuna e a postergação da manutenção, proporciona uma significativa redução de custos operacionais, aumento da disponibilidade do equipamento e uma melhor utilização dos recursos disponíveis.

O principal benefício da política proposta é a flexibilidade na gestão da manutenção, permitindo que as intervenções sejam realizadas de maneira mais estratégica, com base nas condições reais do sistema e nas janelas de oportunidade para manutenção. Isso não só melhora a eficiência dos processos produtivos, como também minimiza o impacto da manutenção no desempenho da produção, especialmente em períodos de alta demanda.

Adicionalmente, a aplicação dessa política contribui para o aumento da vida útil dos ativos, uma vez que evita intervenções prematuras e permite um planejamento mais adequado da substituição de componentes. Ao reduzir o número de paradas não programadas e otimizar os tempos de inatividade, a política melhora a confiabilidade e a segurança do sistema, o que é fundamental para a continuidade das operações e para a manutenção da competitividade no mercado.

Por fim, a utilização de técnicas de otimização e a análise de sensibilidade garantem que a política proposta seja robusta, capaz de se adaptar às variações nos parâmetros do sistema e nos custos operacionais. A combinação desses elementos resulta em um modelo de manutenção mais eficiente e sustentável, alinhado às necessidades do mercado atual, que exige cada vez mais soluções inteligentes para o gerenciamento de ativos industriais.

4. CONCLUSÃO

Neste estudo de caso, foi aplicado a política STZ de substituição por idade, que tem uma abordagem simples, flexível e adaptativa para o planejamento de manutenção em sistemas técnicos. A adoção dessa política decorre da observação de cenários reais nos quais o processo de manutenção é fortemente condicionado por fatores externos ao sistema, tais como disponibilidade de equipes, janelas operacionais, restrições de produção e eventos inesperados que influenciam diretamente à execução das intervenções.

A política STZ destaca-se por sua flexibilidade operacional, fundamentada em duas características centrais. Primeiro, ela permite o aproveitamento de eventos oportunos, nos quais a execução de uma manutenção preventiva pode ocorrer a um custo reduzido, favorecendo a diminuição do custo global de operação. Segundo a política incorpora a possibilidade de impedimentos operacionais, que podem inviabilizar a realização da manutenção preventiva exatamente no instante planejado, exigindo um mecanismo de

adaptação do plano de manutenção sem comprometer a confiabilidade do sistema.

Essa estrutura flexível torna a política STZ particularmente adequada ao estudo de caso desenvolvido neste trabalho, permitindo avaliar seu desempenho em um ambiente sujeito a incertezas e restrições típicas de aplicações industriais reais.

4.1 LIMITAÇÕES DO ESTUDO E INDICAÇÕES PARA TRABALHO FUTUROS

Apesar dos resultados positivos obtidos com a aplicação da política flexível de manutenção preventiva STZ no estudo de caso analisado, algumas limitações devem ser reconhecidas. A principal delas está relacionada ao ambiente operacional caracterizado por uma baixa taxa de ocorrência de oportunidades para antecipação da manutenção. Em contextos como o analisado, nos quais a frequência de oportunidades é reduzida, torna-se mais difícil obter uma política STZ ótima, uma vez que os parâmetros associados à manutenção oportuna tendem a convergir para configurações próximas às políticas clássicas de substituição por idade.

Além disso, o estudo foi conduzido com base em um único equipamento, o que limita a generalização direta dos resultados para outros sistemas produtivos com características distintas, como diferentes níveis de criticidade, estruturas multicomponentes ou taxas de falha mais elevadas. Soma-se a isso o uso de elição de conhecimento de especialistas para a estimativa dos parâmetros de confiabilidade, abordagem necessária diante da indisponibilidade de dados históricos completos, mas que introduz incertezas inerentes ao julgamento humano, mesmo quando mitigadas por análises de sensibilidade.

Diante dessas limitações, recomenda-se que trabalhos futuros explorem a aplicação da política STZ em ambientes com maior taxa de oportunidades, nos quais o aproveitamento de janelas oportunas tende a ser mais frequente. Por fim, a utilização de bases de dados históricos mais extensas ou a integração com técnicas de aprendizado de máquina pode contribuir para reduzir incertezas na estimativa dos parâmetros de confiabilidade e aprimorar ainda mais a robustez das políticas recomendadas.

REFERÊNCIAS

- ALBERTI, A. R.; FERREIRA NETO, W. A.; CAVALCANTE, C. A. V.; SANTOS, A. C. J. Modelling a flexible two-phase inspection-maintenance policy for safety-critical systems considering revised and non-revised inspections. **Reliability Engineering & System Safety**, 221: 108309, 2022.
- ALBERTI, A. R.; GALVAO, C. R. L.; OLIVEIRA, R. R. S. Proposição, modelagem matemática e análise de uma política flexível de substituição por idade para sistemas técnicos. In: **LVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL**, 2024, Fortaleza. Anais eletrônicos. Galoá, 2024.
- ASADI, M. Preventive maintenance for coherent systems considering postponed replacement. **Applied Stochastic Models in Business and Industry**, 40(4): 875–894, 2024.
- BALDISSONE, G., & DEMICHELA, M. Rapid risk assessment for delayed preventive maintenance activities. **Safety Science**, 135: 105135, 2021.
- BERRADE, M. D., SCARF, P. A., & CAVALCANTE, C. A. V. A study of postponed replacement in a delay time model. **Reliability Engineering & System Safety**, 168: 70–79, 2017.
- BUDIONO, A. L., SISWANTO, N., & KURNIATI, N. Modeling opportunistic maintenance using discrete event simulation. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 1072(1): 012045, 2021.
- CARDOSO, I. A. P., PERES, M. L., NETO, F. C. M. A importância da manutenção para o negócio. In: **Encontro Nacional De Engenharia De Produção**, 31, Belo Horizonte, 2001. Anais, Belo Horizonte, 2001
- CAVALCANTE, C. A. V.; LOPES, R. S. Multi-criteria model to support the definition of opportunistic maintenance policy: A study in a cogeneration system. **Energy**, v. 80, p. 32-40, 2015.
- CAVALCANTE, C. A. V., SCARF, P., MELO, Y. R., RODRIGUES, A. J. S., & ALOTAIBI, N. Planning maintenance when resources are limited: a study of periodic opportunistic replacement. **IMA Journal of Management Mathematics**, 35(4): 573–593, 2024. DOI: 10.1093/imaman/dpae015.
- COSTA, Lucas da Silva. **Riscos e medidas preventivas na operação de injetoras plásticas**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Manaus.
- DIETER, Jader Augusto. **Redes neurais artificiais para manutenção preditiva em**

máquinas injetoras. 2022.

DOURADO, Lenilda. **Análise de Adequação de Máquinas de Injetora à NR 12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos.** São Paulo, 2012.

ERYILMAZ, S. Age based preventive replacement policy for discrete time coherent systems with independent and identical components. **Reliability Engineering and System Safety**, 240: 109544, 2023. DOI: 10.1016/j.ress.2023.109544.

FOGLIATO, F.; RIBEIRO, J. L. D. Confiabilidade e manutenção industrial. **Elsevier Brasil**, 2009.

GALVAO, C. R. L.; ALBERTI, A. R. **Protótipo para aplicação da política flexível de substituição por idade.** Ano de criação: 2024. Disponível em: < <https://stz-optimization-76nb66uzupeeodgmqvyyssl27.streamlit.app/>>.

GALVAO, C. R. L.; ALBERTI, A. R. **Protótipo para análise de sensibilidade da política flexível de substituição por idade.** Ano de criação: 2024. Disponível em: < <https://stz-sensitivity-analysis-vhxywfadmvaqsxwe5dmc6i.streamlit.app/>>.

GIL, A. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. Manutenção Função Estratégica. **Qualitymark Editora Ltda**, 2009.

KHAN, F.; AHMAD, Z.; KHOSA, S. K.; ALOMAIR, M. A.; ALOMAIR, A. M.; ALSHARIDI, A. K. A. New modification of the flexible Weibull distribution based on power transformation: Monte Carlo simulation and applications. **Heliyon**, 9(6): e17238, 2023.

LI, M., JIANG, X., & NEGENBORN, R. R. Opportunistic maintenance for offshore wind farms with multiple-component age-based preventive dispatch. **Ocean Engineering**, 231: 109062, 2021.

LI, X., RAN, Y., CHEN, B., CHEN, F., CAI, Y., & ZHANG, G. Opportunistic maintenance strategy optimization considering imperfect maintenance under hybrid unit-level maintenance strategy. **Computers & Industrial Engineering**, 185: 109624, 2023.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. A. **Técnicas de Pesquisa.** São Paulo, Editora Atlas S. A., 282p, 1985.

MARQUES, S. M. et al. Manutenção de injetoras: preventiva e corretiva. **Simpósio de Tecnologia (Sitefa)** – Fatec Sertãozinho – SP, v. 7, n. 1, e7116, 2024. ISSN 2675-7540.

MOUBRAY, J. Reliability-centered maintenance. 2^a ed., New York, Ed. Industrial Press Inc., 1997.

MOUBRAY, J., Reliability-centred Maintenance (RCM): **Manutenção Centrada em Confiabilidade**, Tradução de Kleber Siqueira, Aladon, Grã Bretanha. 2000.

- NEVES, B. P. **Implementação, análise e aplicação de um indicador de desempenho relativo da manutenção.** 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.
- PINJELA, S. K.; PINTELONA, L.; VEREECKE, A. An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. **International Journal of Production Economics**, v. 104, n. 1, p. 214-229, 2006.
- PINTO, A. K., XAVIER, J. A. N. **Manutenção Função Estratégica.** Rio de Janeiro, Ed. Qualitymarck, 2001.
- RIBEIRO, S. M.; VENTURA JUNIOR, A. C. M.; SACHETTO, J. P.; GAMBONI, O. C.; SARAN, M. C. B. Manutenção de injetoras: preventiva e corretiva. **Simpósio de Tecnologia (Sitefa)** – Fatec Sertãozinho – SP, v. 7, n. 1, e7116, 2024. ISSN 2675-7540.
- SCARF, P. A., CAVALCANTE, C. A. V., DWIGHT, R. A., & GORDON, P. An Age-Based Inspection and Replacement Policy. **IEEE Transactions on Reliability**. 58(4): 641-648, 2009.
- SHI, H., ZHANG, J., ZIO, E., & ZHAO, X. Opportunistic maintenance policies for multi-machine production systems with quality and availability improvement. **Reliability Engineering & System Safety**. 234: 109183, 2023.
- SIMATUPANG, Togar M. **Utilisation of Buffer Management to Build Focused Productive Maintenance.** 2000.
- TSANG, A. H. Condition-based maintenance: tools and decision making. **Journal of quality in maintenance engineering**, v. 1, n. 3, p. 3-17, 1995.
- VALET, A., et al. Opportunistic maintenance scheduling with deep reinforcement learning. **Journal of Manufacturing Systems**, 64: 518–534, 2022.
- XENOS, H. **Gerenciando a manutenção produtiva.** Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998.
- ZHAO, X., LI, B., MIZUTANI, S., & NAKAGAWA, T. A revisit of age-based replacement models with exponential failure distributions. **IEEE Transactions on Reliability**, 71(4): 1477–1488, 2022.
- ZHANG, X., & YANG, Z. Optimal maintenance strategies for systems with deterioration, opportunistic and delayed maintenance. **Journal of Maintenance Engineering**, 20(1): 45-56, 2020.
- ZHANG, Y., XIAO, L., & ZENG, Y. Combining preventive maintenance and opportunistic maintenance in multi-unit systems. **Journal of Maintenance Science and Technology**, 30(2): 140-155, 2012.

ZHANG, Z., & YANG, L. State-based opportunistic maintenance with multi-functional maintenance windows. **IEEE Transactions on Reliability**, 69(4): 1481–1494, 2020. DOI: 10.1109/TR.2020.2995277.