



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE UMA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
POR

OSCAR JAVIER RICO CORREA

ORIENTADOR (a): Prof. Cristiano Alexandre Virginio Cavalcante

Recife
2025

OSCAR JAVIER RICO CORREA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PARA
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virginio Cavalcante.

Recife

2025

Correa, Oscar Javier Rico.

Desenvolvimento de uma política de manutenção para sistemas de distribuição de água / Oscar Javier Rico Correa. - Recife PE, 2025.

69f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2025.

Orientação: Cristiano Alexandre Virginio Cavalcante.

Inclui referências.

1. Redes de distribuição de água; 2. Motobomba; 3. Política de manutenção; 4. Choques; 5. Delay-Time. I. Cavalcante, Cristiano Alexandre Virginio. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

OSCAR JAVIER RICO CORREA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PARA
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

A Aprovado em: dia/mês/ano.

Prof. Cristiano Alexandre Virginio Cavalcante, PhD (UFPE)

Prof. Ana Paula Cabral Seixas Costa, PhD (UFPE)

Prof. Marcelo Seido Nacano, PhD (USP)

“Um pesquisador não luta na guerra, é um especialista em resolver problemas. Se algo se perde, ele o encontra; se o problema é desconhecido, descobre como solucioná-lo; se algo está no caminho, ele o move. E, se tiver sorte, resolverá um problema que mudará o mundo”.

Oscar Rico (2025)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, Jesus e a virgem Maria, cuja proteção foram fundamentais neste caminho.

Devo um agradecimento especial ao meu pai e à minha mãe, cujo apoio incondicional e amor foram minha maior fortaleza.

Agradeço a meus irmãos: Etlingert, Aranza, Evelin, Naily e em especial a minha irmã Sasha que me ajudou no Brasil neste grande desafio, todos eles sempre estiveram dando-me incentivo e ânimo a cada passo que dei, estou eternamente grato. Seu carinho e apoio foram um pilar em minha vida e neste projeto.

A meu orientador Cristiano Cavalcante por guiar-me e ensinar-me o caminho da pesquisa e brindando-me a motivação para não desistir.

Aos meus valiosos colegas de laboratório, agradeço a colaboração, dedicação e companheirismo. Foram parte fundamental neste processo, compartilhando conhecimentos e experiências que enriqueceram esta pesquisa. Em especial a Victor Resende, Rafael Paiva, Yan Melo e Augusto Rodrigues.

Ao meu grupo de estudo de estatística, pela orientação e pelos momentos compartilhados que contribuíram para a minha saúde mental.

Aos professores do PPGEF por me ensinar as disciplinas que eu precisava para me tornar um pesquisador. E em especial a Rafael Kramer e Alexandre Alberti.

Por último, mas não menos importante, agradeço à CAPES por me fornecer os recursos e o apoio necessários para realizar este trabalho. Sua contribuição foi inestimável e tornou possível a realização deste projeto.

RESUMO

As motobombas desempenham um papel vital na sociedade, fornecendo água para o consumo humano, agrícola e industrial. No entanto, suas falhas podem ter consequências graves, afetando o abastecimento de água e o funcionamento de setores essenciais da economia. A pesquisa tem um impacto social significativo ao garantir o fornecimento estável de água potável, essencial para a saúde e o bem-estar das comunidades, além de otimizar a manutenção das bombas hidráulicas, assegurando acesso contínuo à água e melhorando a qualidade de vida. Economicamente, promove uma gestão financeira mais eficiente ao reduzir intervenções corretivas imprevistas e alocar recursos de forma estratégica, fortalecendo a sustentabilidade a longo prazo. A manutenção preventiva estende a vida útil do equipamento, reduz o desperdício de recursos e aprimora a eficiência no uso da água, contribuindo para a preservação do meio ambiente. A motobomba está sujeita à degradação natural e a choques inesperados que a deixam em estado defeituoso. Além disso, foi desenvolvida uma nova política de manutenção que incorpora custos adicionais proporcionais ao tempo em que o sistema permanece no estado defeituoso (Delay Time), com diferenciação de custos dependendo da origem do defeito. Foi desenvolvido um modelo matemático abrangente que descreve vários cenários de eventos, calcula probabilidades, custos e expectativas de vida do sistema. Ademais, os resultados computacionais foram obtidos por meio da otimização dos intervalos entre inspeções consecutivas e do tempo recomendado para manutenção preventiva, baseada na idade do equipamento. Essa análise examina as implicações econômicas do modelo proposto, o qual demonstra ser bastante promissor em promover a eficiência operacional e minimizar os custos associados à manutenção e falhas, oferecendo uma gestão mais eficaz e econômica de sistemas de bombas hidráulicas.

Palavras-Chave: Redes de distribuição de água; Motobomba; Política de manutenção; Choques; Delay-Time.

ABSTRACT

Motor pumps play a vital role in society by supplying water for human consumption, agriculture, and industry. However, their failures can have serious consequences, affecting water supply and the operation of essential economic sectors. This research has a significant social impact by ensuring a stable supply of potable water, which is essential for the health and well-being of communities. Additionally, it optimizes the maintenance of hydraulic pumps, ensuring continuous access to water and improving quality of life. From an economic perspective, it promotes more efficient financial management by reducing unforeseen corrective interventions and strategically allocating resources, thereby strengthening long-term sustainability. Preventive maintenance extends equipment lifespan, reduces resource waste, and enhances water use efficiency, contributing to environmental preservation. Motor pumps are subject to natural degradation and unexpected shocks that lead to defective conditions. Hence, a new maintenance policy has been developed that incorporates additional costs proportional to the time the system remains in a defective state (Delay Time), with cost differentiation depending on the origin of the defect. A comprehensive mathematical model was developed to describe various event scenarios, calculate probabilities, costs, and system life expectancy. Additionally, computational results were obtained by optimizing the intervals between consecutive inspections and determining the recommended time for preventive maintenance based on equipment age. This analysis examines the economic implications of the proposed model, which proves to be highly promising in promoting operational efficiency and minimizing costs associated with maintenance and failures, offering more effective and economical management of hydraulic pump systems.

Keywords: Water distribution networks; Pump; Maintenance policy; Shocks; Delay-Time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Exibição de <i>Delay time</i>	20
Figura 2 - Motobomba	26
Figura 3 - Representação gráfica dos cenários	35
Figura 4 - Taxa de custo em função de C_{dn} , C_{dc}	45
Figura 5 - Número de inspeções em função de C_{dn} , C_{dc}	46
Figura 6 - Intervalo de tempo entre inspeções em função de C_{dn} , C_{dc}	47
Figura 7 - Tempo para ação da manutenção preventiva em função de C_{dn} , C_{dc}	48
Figura 8. Comparação das políticas	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos parâmetros.....	34
Tabela 2 - Parâmetros e variáveis de decisão.....	44
Tabela 3 - Análise de sensibilidade do parâmetro η_1	49
Tabela 4 - Tabela 4.2. Análise de sensibilidade do parâmetro η_2	49
Tabela 5 - Análise de sensibilidade do parâmetro β_1	50
Tabela 6 - Análise de sensibilidade do parâmetro β_2	51
Tabela 7 - Análise de sensibilidade do parâmetro α	51
Tabela 8 - Análise de sensibilidade do parâmetro λ	52
Tabela 9 - Análise de sensibilidade do parâmetro μ	53
Tabela 10 - Análise de sensibilidade do parâmetro C_F	53
Tabela 11 - Análise de sensibilidade do parâmetro C_I	54

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	29
Equação 2.2	30
Equação 2.3	30
Equação 2.4	30
Equação 2.5	30
Equação 2.6	30
Equação 2.7	30
Equação 2.8	30
Equação 3.1	33
Equação 3.2	33
Equação 3.3	34
Equação 3.4	36
Equação 3.5	36
Equação 3.6	36
Equação 3.7	36
Equação 3.8	36
Equação 3.9	37
Equação 3.10	37
Equação 3.11	37
Equação 3.12	37
Equação 3.13	37
Equação 3.14	37
Equação 3.15	38
Equação 3.16	38
Equação 3.17	38
Equação 3.18	38
Equação 3.19	38
Equação 3.20	38
Equação 3.21	39
Equação 3.22	39
Equação 3.23	39
Equação 3.24	39
Equação 3.25	39
Equação 3.26	39
Equação 3.27	39
Equação 3.28	40
Equação 3.29	40
Equação 3.30	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	13
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	15
1.3	OBJETIVOS	16
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i>	16
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	MANUTENÇÃO	17
2.1.1	<i>Tipos de manutenção</i>	18
2.1.2	<i>Delay time</i>	19
2.1.3	<i>Choque</i>	21
2.2	COMPONENTE CRÍTICO DO SISTEMA	25
2.2.1	<i>Manutenção no componente crítico</i>	26
2.2.2	<i>Choques no componente crítico</i>	28
2.3	CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA	31
3	METODOLOGIA.....	32
3.1	MODELO MATEMÁTICO	32
3.1.1	<i>Notações</i>	34
3.1.2	<i>Descrição dos Cenários</i>	35
4	ESTUDO DE CASO	41
4.1	CONTEXTO DO PROBLEMA.....	41
4.2	ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS.....	43
4.3	AValiação DOS RESULTADOS.....	44
4.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	48
4.5	COMPARAÇÃO DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO COM OUTRAS POLITICAS	55
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	57
5.1	CONCLUSÕES	57
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de água desempenham um papel crucial na saúde e na melhoria da qualidade de vida das comunidades em todo o mundo. A água potável representa cerca de 0,007% dos recursos hídricos globais na terra. Dessa forma, além de ser uma necessidade básica, trata-se de um componente essencial para o desenvolvimento humano. Nesse sentido, o uso eficiente desses sistemas contribui para a prevenção de doenças transmitidas pela água, melhorando assim os padrões de saúde pública (Mohammadi *et al.*, 2022). Assim, sua manutenção adequada é essencial para garantir a qualidade contínua da água fornecida.

Por outro lado, a falta de manutenção nesses sistemas pode resultar em vazamentos, contaminação e deterioração da infraestrutura, colocando em risco a qualidade da água e a saúde das comunidades atendidas pelo serviço (Kombo; Escuder; Chordà, 2022). Ademais, a bomba hidráulica é um componente crítico deste tipo de sistema. Esses equipamentos estão sujeitos à operação constante, o que representa uma carga de trabalho contínua, dificultando a manutenção desse elemento.

Portanto, manter seu funcionamento adequado é um desafio significativo, considerando a necessidade de conservar o sistema disponível para as comunidades e os efeitos da degradação que são amplamente influenciados por fatores externos (Eaton *et al.*, 2018). Nesse contexto, as políticas de manutenção permitem maximizar a vida útil do equipamento, ao criar regras para decisão de quando executar ações de manutenção. Um exemplo é a política de substituição por idade (Cha, 2022), onde um componente deve ser substituído após atingir uma certa idade ou no momento de uma falha, o que ocorrer primeiro. Outra política é a política híbrida de inspeções periódicas (Scarf *et al.*, 2009), que envolve a revisão do sistema em intervalos fixos para detectar e corrigir falhas potenciais, equilibrando os custos de manutenção e a disponibilidade do sistema.

As políticas baseadas no limite de falhas realizam manutenção preventiva com base no número de falhas ou no grau de deterioração do sistema, alinhando-se diretamente com os objetivos de melhorar a confiabilidade e reduzir a frequência de falhas do sistema (Wang, 2002; Ding; Kamaruddin, 2015; Alberti *et al.*, 2018). Além disso, o planejamento apropriado das atividades de manutenção contribui diretamente para a preservação do desempenho e da eficiência operacional dos equipamentos industriais. Através de inspeções regulares, reparos preventivos e substituições de componentes desgastados, é possível evitar falhas e garantir o

funcionamento adequado dos equipamentos, reduzindo assim a probabilidade de paradas inesperadas e interrupções na produção (Melo *et al.*, 2023).

Por outro lado, tais sistemas não são completamente isolados do seu ambiente externo e isto representa um tipo de interação entre o sistema e o ambiente. Nesse sentido existem agentes externos que causam uma degradação abrupta nos equipamentos, comumente chamados de choques. Estes podem gerar uma degradação maior ou falha imediata no sistema (Dong *et al.*, 2020; Haghghi; Castanier; Misaii, 2021; Alberti; Cavalcante, 2022; Chen; Chang, 2022; Gan, Song; Zhang, 2022).

Nesse contexto, dada a complexidade no acesso a estes equipamentos, torna-se imperativo explorar alternativas para obter dados relevantes que possam embasar o planejamento da manutenção. As redes de distribuição de água desempenham um papel fundamental nos sistemas de abastecimento, transportando água até os locais de consumo, como edifícios e instalações industriais. Essas redes abrangem uma série de tubulações e componentes especializados, cuidadosamente configurados para assegurar o fornecimento adequado nos pontos de uso.

Além disso, a disponibilidade e a qualidade da água potável são essenciais para a saúde pública e o bem-estar da comunidade. A interrupção do fornecimento pode provocar sérias consequências sanitárias e afetar a qualidade de vida. Por exemplo a falta de água compromete a higiene pessoal e a limpeza, aumentando o risco de infecções e doenças. Por outro lado, a manutenção e a melhoria dessas redes implicam consideráveis custos financeiros, mas são necessárias para evitar perdas maiores associadas a falhas na rede, como reparos de emergência e danos à infraestrutura.

Assim, a motobomba desempenha um papel crucial, uma vez que, ela é um componente crítico em sistemas de redes de distribuição de água e essencial na sua movimentação e distribuição eficiente. Este dispositivo é fundamental para garantir a disponibilidade contínua de água, especialmente em áreas onde a distribuição depende de sistemas de bombeamento para superar variações de terreno e distância. Dessa maneira, ao integrar motor e bomba, ela permite a movimentação de grandes volumes de água com eficiência energética, minimizando desperdícios e garantindo que a água chegue aos pontos de uso com a pressão adequada (Kini, 2010).

Finalmente, dada a importância desse equipamento, a implementação de políticas de manutenção é necessária e desempenha então um papel crucial na mitigação desses impactos, assegurando uma operação contínua e confiável do sistema de distribuição de água. O modelo proposto nesta dissertação tem como base um processo de falha onde o efeito dos choques é

modelado. Além disso, é apresentada uma aplicação numérica que inclui uma análise abrangente dos resultados, demonstrando as vantagens dessa política de manutenção. A metodologia abordada no contexto de sistemas de distribuição de água e possui um forte apelo prático. Este estudo buscará apresentar um modelo destinado a auxiliar no planejamento da manutenção para tais sistemas.

Para abordar a problemática descrita, serão desenvolvidas ações de manutenção para sistemas de distribuição de água, com foco em componentes críticos como a motobomba. Estas políticas incluirão a substituição por idade, inspeções periódicas e manutenção preventiva baseada na condição dos equipamentos. Além disso, será modelado o processo de falhas considerando os efeitos de choques externos que causam degradação no equipamento. Adicionalmente, será analisado o custo gerado pela permanência do equipamento em estado defeituoso. Uma aplicação numérica será realizada para analisar os resultados e demonstrar as vantagens das políticas de manutenção propostas. Essa metodologia será implementada para garantir a operação contínua e confiável do sistema de distribuição de água, assegurando a disponibilidade e a qualidade da água fornecida às comunidades.

Dada a importância dos sistemas de distribuição de água, a implementação de políticas de manutenção é essencial para mitigar impactos e garantir uma operação contínua e confiável. Este estudo propõe um modelo baseado em um processo de falha que considera os efeitos de choques externos, os quais causam degradação no equipamento, com foco no componente crítico, como a motobomba. A política de manutenção inclui substituição por idade, inspeções periódicas e manutenção preventiva baseada na condição do equipamento, além da análise dos custos gerados pela permanência do equipamento em estado defeituoso. Essa metodologia será aplicada com o intuito de assegurar o funcionamento ininterrupto e seguro do sistema de distribuição de água, garantindo, assim, a disponibilidade e a qualidade da água entregue às populações atendidas.

1.1 Descrição do problema

A distribuição de água desempenha um papel vital no abastecimento diário de cidades e enfrenta desafios operacionais e de manutenção que ameaçam sua eficiência e confiabilidade. A infraestrutura subterrânea, composta por uma rede de tubulações, bombas e componentes, é essencial para garantir o acesso contínuo à água potável. No entanto, vazamentos não detectados, interrupções frequentes no fornecimento de água, custos operacionais crescentes e problemas de qualidade desse recurso hídrico evidenciam a urgência de uma abordagem estratégica para a manutenção (Tornyeviadzi; Mohammed; Seidu, 2022).

Além disso, a rede subterrânea de distribuição de água, embora invisível aos olhos dos consumidores, é uma rede complexa que se estende por toda a cidade. A falta de acesso fácil e direto aos componentes subterrâneos cria desafios consideráveis para a manutenção. Detectar vazamentos e problemas de pressão torna-se um processo complicado, que muitas vezes resulta em atrasos na identificação de problemas críticos (Wang; Chen, 2016). Nesse contexto, a falta de manutenção proativa impacta diretamente na eficiência operacional de tais sistemas. As perdas substanciais de água, devido a vazamentos não detectados, representam uma fonte de desperdício financeiro e de recursos naturais além de comprometer sua qualidade, levando a reclamações dos consumidores e questões de saúde pública (Awopetu; Aribisala; Awopetu, 2013).

Além disso, as motobombas assumem um papel essencial como componente fundamental da infraestrutura subterrânea de distribuição de água, impulsionando o fluxo através das tubulações para garantir a eficiente entrega de água às áreas de consumo. No entanto, sua operação inadequada ou falha pode acarretar impactos significativos em todo o sistema. Uma bomba com mau funcionamento pode resultar em fornecimento insuficiente de água, interrupções no abastecimento e insatisfação dos consumidores, além de problemas de pressão que afetam a distribuição equitativa e aumentam os desafios operacionais. Portanto, sua manutenção adequada é de suma importância para prevenir falhas e garantir um fluxo contínuo de água, com a adoção de políticas proativas como manutenção preditiva e preventiva, utilizando modelos matemáticos para acompanhar o desempenho e realizar intervenções planejadas (Hatsey *et al.*, 2021., Koteleva; Valnev; Frenkel, 2021., Pellegrini; Rossi, 2019., Mackay, 1993., Bianchini, 2019).

Para abordar as questões discutidas, serão desenvolvida uma política de manutenção para sistemas de distribuição de água, com foco em componentes críticos como a motobomba. Estas ações incluirão a substituição por idade, inspeções periódicas, manutenção preventiva e corretiva baseada na condição dos equipamentos. Além disso, será modelado o processo de falhas considerando os efeitos de choques externos que causam degradação no equipamento. Uma aplicação numérica será realizada para analisar os resultados e demonstrar as vantagens da política de manutenção proposta. Essa metodologia será implementada para garantir a operação contínua e confiável do sistema de distribuição de água, assegurando a disponibilidade e a qualidade da água fornecida às comunidades.

1.2 Justificativa e relevância

A pesquisa adota uma abordagem prescritiva, fornecendo ao gestor instruções para serem incorporadas no processo de gestão de manutenção. Isso não apenas impacta a economia por meio de operações de menor custo, mas também tem repercussões nas esferas social e de sustentabilidade. A melhoria na eficiência da manutenção contribui para a saúde pública, reduzindo interrupções no fornecimento de água, e promove a preservação dos recursos naturais, beneficiando a comunidade e o meio ambiente. Ao investigar um problema relacionado a uma bomba hidráulica sujeita à degradação natural e impactos que podem levá-la a um estado defeituoso, este estudo não apenas aborda questões técnicas, mas também destaca a importância do funcionamento adequado deste equipamento para o acesso a uma necessidade básica. Este recurso hídrico é essencial para o consumo, higiene, limpeza e culinária diários das famílias. A escassez de água está associada a graves problemas de saúde, como ambientes propícios à contaminação e doenças, além do armazenamento inadequado que pode se tornar um criadouro para mosquitos transmissores de arboviroses (Adams; Stoler; Adams, 2020).

No âmbito social, a pesquisa é relevante por considerar o fornecimento estável de água para comunidades. A operação eficiente das bombas hidráulicas garante o acesso contínuo à água potável, um recurso essencial para a saúde e o bem-estar da população. Assim, ao otimizar as políticas de manutenção para minimização de falhas desses equipamentos, a pesquisa contribui diretamente para a qualidade de vida das pessoas, assegurando um suprimento adequado de água para uso doméstico, higiene e atividades cotidianas.

Do ponto de vista econômico, a pesquisa que visa otimizar a política de manutenção proporciona uma gestão financeira mais eficiente. Isso se deve à redução da necessidade de intervenções corretivas dispendiosas e imprevistas, permitindo uma alocação mais estratégica de recursos financeiros. Como resultado, promove-se a sustentabilidade econômica a longo prazo.

Ao considerar a degradação natural e choques que afetam a operação das bombas, a pesquisa aborda diretamente a resiliência do sistema em face aos desafios ambientais. A implementação de um custo adicional, proporcional ao tempo de inatividade, é mais um fator que promove a adoção da manutenção preventiva. Essa abordagem não apenas estende a vida útil dos equipamentos, mas também minimiza o desperdício e aprimora a eficiência no uso dos recursos, o que, por sua vez, contribui para a preservação ambiental.

Dessa forma, a pesquisa transcende a mera resolução técnica de um problema, abrangendo implicações nos âmbitos social, econômico e de sustentabilidade.

1.3 Objetivos

Esta seção apresenta os objetivos gerais e específicos da pesquisa, indicando a principal meta da realização do trabalho bem como outros aspectos que são alcançados através da realização do objetivo principal.

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma política de manutenção para motobombas de sistemas de distribuição de água, sujeita à influências de choques externos e com um custo adicional diretamente proporcional ao tempo em estado defeituoso.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Levantar o estado-da-arte no que tange à manutenção preventiva, corretiva e baseada em inspeções em sistemas de rede de distribuição de água, bem como os modelos tradicionais nestes mesmos tipos de sistemas;
- Desenvolver uma modelagem matemática para a utilização de atividades de manutenção em sistemas de motobombas;
- Avaliar a robustez do modelo por meio de uma análise de sensibilidade.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em cinco seções a seguir: No Capítulo 1, a Introdução, apresenta as motivações, justificativas para o desenvolvimento da pesquisa, e os objetivos do estudo. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, revisão da literatura e conceitos básicos necessários para a realização do estudo. No Capítulo 3, a metodologia é apresentada, junto ao modelo matemático e os diferentes cenários que fazem parte da construção do modelo, assim como a construção da função objetivo que deverá ser minimizada para encontrar os resultados ótimos das variáveis de decisão. O Capítulo 4 apresenta a análise de resultados, utilizando diferença percentual, tabelas com métricas e a interpretação destas. Por fim, no Capítulo 5 é mostrada a conclusão e sugestões dos trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção apresenta as contribuições teóricas relacionadas aos principais conceitos abordados nesta pesquisa, tais como manutenção, *Delay Time*, choques externos e motobombas. Em seguida, examina-se como esses conceitos foram aplicados por outros autores em pesquisas anteriores e o impacto que tiveram nos respectivos estudos.

2.1 Manutenção

A manutenção pode ser descrita como a integração de todos os elementos técnicos, administrativos e práticas de gestão realizadas ao longo do ciclo de vida do equipamento, com o propósito de preservá-lo ou restabelecê-lo a um estado no qual seja capaz de desempenhar sua função exigida de forma eficaz (NBR 5462/1994; EN 13306:2010). Essas ações de manutenção são implementadas com o intuito de assegurar a preservação ou restauração de um item, garantindo que ele permaneça capaz de desempenhar sua função designada ao longo do tempo de forma eficaz. Esse enfoque não apenas visa à conservação do sistema, mas também permite melhorar sua operacionalidade e prolongar sua vida útil. Assim, o planejamento da manutenção se apresenta como vital para a gestão eficiente de ativos e recursos em diversos contextos industriais e organizacionais (Patil *et al.*, 2022).

Além disso, a gestão da manutenção não se limita apenas à disponibilidade dos ativos, mas também está intimamente ligada à produtividade, qualidade e segurança dos processos industriais. Uma política de manutenção bem planejada e executada pode resultar em reduções de custos operacionais, aumento da vida útil dos equipamentos, melhorias na qualidade do produto final e um ambiente de trabalho mais seguro para os funcionários (Bafandegan *et al.*, 2023).

Por outro lado, a manutenção está intrinsecamente ligada à gestão de falhas em equipamentos, que podem ocorrer por vários fatores e podem ser classificadas em três tipos: (1) Falhas iniciais: surgem principalmente devido a defeitos de fabricação, falhas no projeto ou configuração inadequada do sistema. É comum que ocorram com maior frequência no início da operação do sistema, sendo essencial tomar medidas preventivas antes mesmo do início das operações para mitigá-las (Mounia *et al.*, 2022). (2) Falhas aleatórias: ocorrem de maneira totalmente imprevisível, geralmente devido a influências externas, como choques, ao sistema. Os choques podem manifestar-se com uma frequência aleatória ao longo do tempo, e para prevenir sua ocorrência, pode ser necessário controlar e monitorar variáveis externas ao sistema (Correa; Cavalcante. 2023). (3) Falhas por degradação: principalmente resultam do desgaste ou

envelhecimento do sistema. Além disso, as falhas acontecem com mais frequência à medida que o sistema envelhece, e medidas de manutenção preventiva podem ser úteis para diminuir sua ocorrência.

2.1.1 Tipos de manutenção

Na literatura destacam-se três abordagens distintas, uma destinada a corrigir falhas precoces, outra a evitar defeitos ou falhas e corrigir defeitos e, por último, a abordagem destinada a reparar os danos causados pelas falhas. Adicionalmente, ela também abrange a gestão eficaz de recursos humanos, materiais e financeiros, além do planejamento e monitoramento das atividades de manutenção.

- **Manutenção corretiva**

A manutenção corretiva é uma intervenção realizada em sistemas, equipamentos, máquinas ou instalações após a ocorrência de uma falha. Seu objetivo é restaurar o item em questão ao seu estado operacional normal ou adequado. No entanto, essa abordagem pode acarretar períodos de inatividade não planejados, custos adicionais de reparo e potenciais impactos negativos na produção ou operações (Hao *et al.*, 2010).

Por outro lado, caracterizar os custos de manutenção é desafiador devido à falta de dados precisos e às incertezas no uso e na confiabilidade dos equipamentos (Erkoyuncu *et al.*, 2017). Os autores ainda abordaram que a manutenção preventiva não elimina completamente a necessidade de reparos corretivos, e qualquer manutenção não programada pode impactar significativamente os custos gerais. Eles investigaram um processo desenvolvido para estimar os custos de contratos de suporte baseados em desempenho, com foco na manutenção corretiva, essencial para o suporte ao longo da vida útil de ativos de alto valor, exemplificado pelo Ministério da Defesa do Reino Unido. Assim, a abordagem permite comparar soluções de contratos baseados no desempenho e facilita decisões de planejamento eficientes. Assim sendo, os autores desenvolveram metodologias para estimar custos e disponibilidade da manutenção corretiva, considerando a complexidade dos sistemas e a necessidade de otimizar recursos e reduzir custos. Em um contexto de defesa, isso é particularmente importante devido aos altos valores dos equipamentos e às exigências rigorosas de disponibilidade.

- **Manutenção preventiva**

A manutenção preventiva é uma abordagem proativa adotada para evitar falhas e garantir o funcionamento contínuo e eficiente de sistemas, equipamentos, máquinas ou instalações. Além disso, ela utiliza substituições de componentes em intervalos regulares, ajudando a

minimizar o tempo de inatividade, reduzir os custos de reparo e prolongar a vida útil dos ativos, mantendo a segurança e a eficiência operacional (Grida; Zaid; Kholief, 2017).

Chen (2008) abordou a manutenção em sistemas de produção, especialmente aqueles compostos por vários componentes, abrange diversas atividades essenciais. Entre elas, destacam-se três principais: manutenção preventiva, reparo mínimo e substituição. A manutenção preventiva visa restaurar o sistema a um estado mais próximo do original para reduzir falhas e minimizar períodos de inatividade. Por outro lado, o reparo mínimo visa restabelecer o sistema ao seu estado de funcionamento imediatamente anterior à falha, enquanto a substituição visa a restauração completa do sistema. Além disso, o aumento da taxa de falhas é explorado, com ênfase em duas razões principais para a substituição: evitar custos crescentes de operação e períodos prolongados de inatividade, além de prevenir falhas do sistema.

- **Manutenção preditiva**

A manutenção preditiva é baseada na análise de dados e tecnologias de monitoramento para identificar sinais precoces de deterioração ou potenciais problemas de desempenho (Kumar; Shankar; Thakur, 2020). Assim, os técnicos podem programar intervenções de manutenção específicas e pontuais, como reparos ou substituições de componentes, antes que ocorram falhas graves ou interrupções não planejadas.

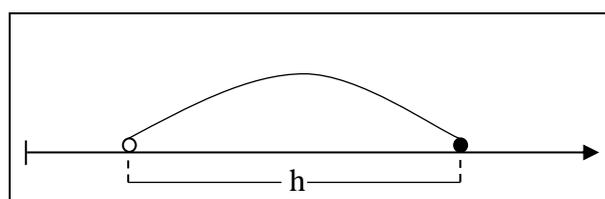
Segundo Mckone e Weiss (2002), a integração de tecnologias de manutenção preditiva com práticas tradicionais de manutenção periódica deve ser fomentada. Os autores evidenciam, inclusive, a mudança de muitas empresas manufatureiras em direção à manutenção preditiva e concentram-se em fornecer diretrizes para a seleção de políticas de manutenção com base nas condições dos equipamentos e nas capacidades de monitoramento. A metodologia implementada envolve a integração de ferramentas de manutenção preditiva de monitoramento contínuo com programas de manutenção preventiva periódica, alinhando políticas de manutenção com as condições dos equipamentos. A coleta e análise de dados focam na estimativa das distribuições de falha e na avaliação da precisão e exatidão das ferramentas preditivas. Os autores concluem que é importante selecionar a tecnologia de manutenção preditiva mais adequada para situações específicas e combinar manutenções periódicas e preditivas para o alcance de melhores resultados, sendo ainda possível obter um equilíbrio entre prevenção e correção.

2.1.2 Delay time

No contexto da gestão da manutenção e operação eficiente de sistemas produtivos e equipamentos, o *Delay Time* é o período de tempo em que o equipamento entra no estado

defeituoso até a falha. Este conceito representa um aspecto essencial na gestão da manutenção e operação eficiente de sistemas produtivos e equipamentos específicos ao considerar que toda falha é precedida por um defeito observável (Christer, 1999). Essa métrica foi meticulosamente desenvolvida com o propósito de estabelecer políticas de vigilância que visam reduzir interrupções não planejadas e maximizar a confiabilidade do equipamento (Sinisterra *et al.*, 2023).

Figura 1- Exibição de *Delay time*



Fonte: Adaptado de Correa e Cavalcante (2023)

De Santos *et al.* (2023), usaram o modelo do *Delay-Time* para incorporar ações de reutilização em sistemas de um único componente com três estados (defeito menor, defeito maior e falha) focando na reutilização de componentes industriais para promover a sustentabilidade em termos de recursos, economia e meio ambiente. Nesse contexto, o modelo é empregado para determinar a viabilidade de reutilizar um equipamento, considerando a correta classificação dos componentes defeituosos. Além disso, eles analisaram diferentes cenários de reutilização de componentes para otimizar os intervalos de inspeção, demonstrando que a reutilização pode oferecer benefícios econômicos e ambientais em comparação com a aquisição de novos componentes.

Alberti e Cavalcante (2020) propuseram uma política de manutenção para sistemas de proteção para redes de distribuição de água. A abordagem matemática empregada pelos autores considera o conceito *Delay-Time*. Especificamente, o trabalho tratou da manutenção de válvulas em sistemas de esgoto para demonstrar como ajustes nas frequências de inspeção e manutenção preventiva podem substancialmente reduzir os riscos e custos associados, considerando também a manutenção imperfeita e seus impactos na operacionalidade e confiabilidade dos sistemas.

Christer e Waller (1984) sugeriram uma política de manutenção, na qual se realizam inspeções em intervalos de tempo fixos e proporcionais. Utilizando o *Delay-Time* para calcular a probabilidade de que o equipamento possa apresentar um defeito em determinado período, dentro do intervalo entre inspeções. Torna-se possível prever quando o componente pode falhar. Isso facilita garantir que o equipamento funcione até a próxima inspeção, permitindo a aplicação de ações de manutenção preventiva ou corretiva se este não chegar até a inspeção.

Christer; Lee e Wang (2000), abordaram um estudo focado em otimizar a manutenção preventiva em uma linha de produção de saquinhos de chá utilizando o *Delay-Time*. Devido à falta de dados específicos de manutenção preventiva, os parâmetros foram estimados a partir de dados de falhas mediante máxima verossimilhança. Eles buscaram melhorar o programa de manutenção atual e reduzir o tempo de inatividade. Embora se tenha proposto um modelo de inspeção baseado nos parâmetros estimados, concluiu-se que a empresa precisa resolver outros problemas antes de implementá-lo. A eficiência da manutenção preventiva atual é limitada, com apenas 7% dos defeitos identificados.

Wenbin (2007) desenvolveu um modelo probabilístico de duas etapas para prever o início do segundo estado de falha e a vida útil residual de equipamentos de produção, com base em informações de monitoramento de condições. Neste modelo, a vida útil do equipamento é dividida em duas etapas: uma fase normal de operação e uma fase de falha retardada, onde o equipamento apresenta defeitos, mas ainda funciona. A detecção precoce de defeitos ocultos através do monitoramento de condições e a previsão precisa do momento em que o equipamento entrará na fase de falha são cruciais para o planejamento eficaz da manutenção.

Aven e Castro (2009) desenvolveram um modelo baseado no *Delay-Time* que integra restrições de segurança para otimizar a manutenção de sistemas deterioráveis. Nesse modelo, um sistema pode estar em três estados: funcionamento perfeito, defeituoso e falho. Os defeitos são identificados por meio de inspeções regulares, e são realizadas substituições preventivas se forem detectados defeitos, ou substituições corretivas se o sistema falhar. O objetivo é determinar os intervalos ótimos de inspeção que minimizem os custos, atendendo a duas restrições de segurança: a probabilidade de pelo menos uma falha em um intervalo específico e a fração de tempo que o sistema permanece em estado defeituoso.

O modelo proposto neste trabalho introduz uma perspectiva que outros estudos não abordaram, considerando que o sistema pode entrar no estado defeituoso por duas razões principais: degradação natural e choques externos. Esses fatores, por sua vez, fazem com que o sistema entre no estado defeituoso, permanecendo neste estado durante um certo tempo (*Delay-Time*). Além disso, é avaliado e quantificado os custos associados ao período que o equipamento permanece neste estado defeituoso, fornecendo uma visão do impacto financeiro e operacional.

2.1.3 Choque

O choque é um evento repentino e não planejado que gera uma perturbação no funcionamento normal dos componentes do equipamento. Essas perturbações podem se apresentar na forma de sobretensões elétricas, vibrações severas, impactos físicos, variações extremas de temperatura ou mudanças abruptas nas condições ambientais. Tais eventos podem

resultar em danos estruturais, falhas operacionais, degradação prematura de componentes ou perda temporária ou permanente de funcionalidade. Portanto, em contextos que tais choques existem, é fundamental demonstrar flexibilidade e agilidade, redefinindo as políticas e restabelecendo o sistema rapidamente. O objetivo é assegurar que o equipamento retorne à sua plena capacidade de funcionamento no menor tempo possível (Liu *et al.*, 2024., Wei; Bai; Wu, 2023., Gan; Song; Zhang, 2022., Liu; Wang, 2021., Alberti; Cavalcante, 2020).

Sobre o contexto histórico da consideração de choques em modelos de manutenção, esses modelos foram desenvolvidos no ano 1973, quando Esary e Marshall desenvolveram os modelos para dispositivos sujeitos a choques que seguiam um processo homogêneo de Poisson (Esary; Marshall, 1973). Modelos que incorporam choques fornecem uma estrutura matemática para prever a probabilidade de falha de um dispositivo ao longo do tempo, levando em consideração a frequência e a intensidade dos choques aos quais o sistema está exposto. Essa abordagem é particularmente relevante em áreas como engenharia de transporte, eletrônica e mecânica, onde a confiabilidade dos dispositivos sob condições de choque é crucial para o desempenho e segurança dos sistemas. A modelagem de tais choques e seus efeitos no desempenho do sistema tem ganhado atenção na área de manutenção (Zhao *et al.*, 2021). Aqueles mais conhecidos são os que consideram choques: acumulativos, δ -choques, extremos, *run Shocks* e mistos.

Os modelos de choque acumulativo são uma abordagem na teoria da confiabilidade que se concentra na acumulação de danos ao longo do tempo causados por eventos de choque repetidos. Em vez de considerar cada evento de choque de forma isolada, esses modelos levam em conta a soma dos efeitos de todos os choques que o sistema experimenta ao longo de sua vida útil. Essa perspectiva é particularmente relevante em situações em que os sistemas estão sujeitos a choques frequentes ou periódicos, como em estruturas sujeitas a vibrações constantes ou em equipamentos eletrônicos expostos a impactos repetidos (Shamstabar; Shahriari; Samimi, 2021., Montoro-Cazorla; Pérez-Ocón, 2015). Além disso, é possível avaliar como a acumulação de danos influencia diretamente na confiabilidade e na vida útil do sistema, oferecendo uma compreensão mais profunda dos efeitos dos choques repetidos. Isso é importante para prever quando o sistema pode falhar devido à fadiga causada pela repetição de eventos de choque ao longo do tempo.

Os modelos de δ -choque são aqueles que se concentram em eventos de choque específicos e instantâneos, representados pelo símbolo δ , que denota a função delta de Dirac. Esses modelos são utilizados para analisar o impacto de eventos de choque individuais em um sistema, considerando sua magnitude e duração em um ponto específico no tempo. Além disso, esses

choques ocorrem de forma abrupta e rápida, cujos efeitos precisam ser avaliados com precisão. Ademais, é possível avaliar a resposta do sistema a eventos de choque individuais, incluindo como esses eventos podem causar danos ou influenciar a confiabilidade do sistema. Isso permite uma compreensão mais detalhada dos riscos associados a eventos de choque específicos e pode orientar decisões de projeto e manutenção para garantir a segurança e confiabilidade dos sistemas em ambientes sujeitos a condições adversas (Li, 2024., Roozegar; Entezari; Nadarajah, 2023., Li; Zhao, 2007., Bian; Ma; Liu; Ye, 2019).

Os modelos de choque extremos são projetados para analisar eventos de choque de alta magnitude e baixa probabilidade, como terremotos, tempestades severas ou falhas mecânicas catastróficas, e entender seu impacto nos sistemas. Eles visam compreender como esses eventos raros, mas potencialmente devastadores, afetam a confiabilidade e a segurança dos sistemas. A aplicação destes modelos permite avaliar como os sistemas respondem a eventos que ultrapassam os limites normais de operação, considerando não apenas os danos diretos causados pelo choque, mas também os efeitos secundários e as consequências em cascata (Shamstabar; Ebrahimmagham; Shahriari, 2024; Wang *et al.*, 2023). Essa análise é fundamental para projetar sistemas resilientes capazes de lidar com cenários extremos e minimizar os riscos associados a esses eventos raros, mas potencialmente danosos.

Os modelos de run *shock* concentram-se na análise do impacto cumulativo de eventos de choque ao longo do tempo em sistemas sujeitos a uma série de choques sucessivos. Por outro lado, permitem considerar eventos de choque individuais, possibilitando avaliar a soma dos efeitos de múltiplos choques em períodos contínuos, reconhecendo que a repetição de choques pode levar a danos acumulativos e à deterioração do sistema ao longo do tempo. Porém, é possível identificar áreas de maior vulnerabilidade e implementar medidas de mitigação para garantir a operação confiável e segura do sistema ao longo do tempo (Ozkut; Kan; Franko, 2024; Gong; Xie; Yang, 2018).

Os modelos de choque mistos são aqueles que combinam diferentes características de modelos de choque, como os de choque extremo, acumulado e em δ -choque, esses modelos proporcionam uma visão holística do comportamento do sistema diante de diversas condições de choque (Ozkut, 2023; Zhao; Qi; Wang, 2023). Dessa forma, esses modelos conseguem capturar uma ampla gama de cenários, fornecendo uma compreensão mais abrangente da confiabilidade e do desempenho do sistema em ambientes dinâmicos e adversos. Assim, os modelos são ferramentas essenciais para tomar decisões informadas sobre projeto, manutenção e gerenciamento de riscos em sistemas complexos.

Sobre políticas de manutenção que incorporam choques, Gan *et al.* (2022) descrevem o sistema sujeito a degradação e choques, e estabelece uma política de manutenção com limites para manutenção corretiva. Adicionalmente, eles abordam um sistema de componente único que sofre degradação normal ao longo do tempo e está sujeito a choques aleatórios. Dessa maneira, o sistema é descrito em três estágios: Após a ocorrência de choques fatais nos Estágios 1 e 2, implementa-se uma manutenção corretiva imperfeita, enquanto no Estágio 3, opta-se pela substituição. O número de políticas de manutenção corretiva é limitado por restrições predefinidas, sendo que os custos e as probabilidades de manutenção variam de acordo com os estágios do sistema. A otimização da manutenção é realizada através do controle desses limites, visando minimizar a taxa de custo esperada do sistema que também considera as perdas de produtividade associadas ao Estágio 2. Por fim, eles empregam o Algoritmo de Enxame de Partículas para otimização.

Alberti e Cavalcante (2020) estudaram sistemas de proteção de componente único que estão submetidos a choques. Os autores consideraram que durante as inspeções pode acontecer um falso positivo ou um falso negativo, os quais influenciam a tomada de decisões, mas não consideram o conceito *Delay-Time*. Em consonância com o trabalho anterior, Chen e Chang (2022) desenvolveram um modelo para um sistema que opera com tempo de trabalho aleatório e manutenção imperfeita. O sistema está sujeito a choques, resultando em falhas catastróficas e de menor magnitude. A manutenção preventiva é realizada antes que ocorram falhas catastróficas, seguindo um cronograma planejado. O modelo minimiza o custo médio por unidade de tempo, a fim de determinar o número ótimo de manutenções.

Zhang *et al.* (2018) propuseram uma política de manutenção preventiva fundamentada na condição (CBM) e caracterizada por políticas de manutenção imperfeitas. O modelo desenvolvido abrange a degradação contínua decorrente do uso ao longo do tempo, bem como a degradação instantânea resultante de choques aleatórios. Adicionalmente, eles enfatizaram a importância de estimar a vida útil restante (RUL) e a utiliza para agendar as ações preventivas.

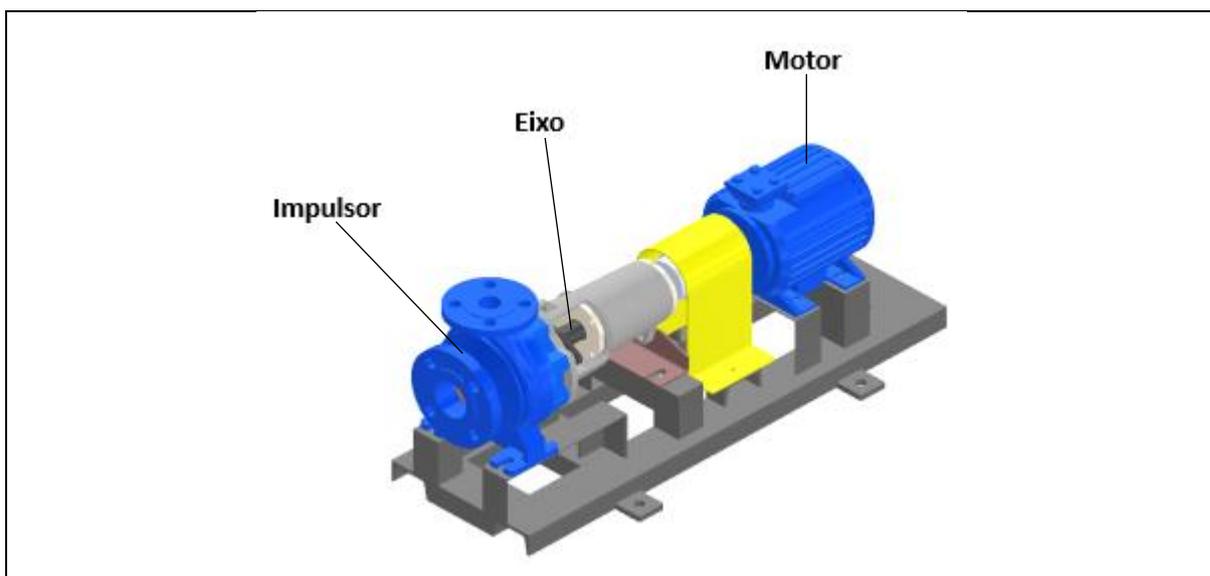
Jin e Matoba (2020) examinaram um sistema em que a deterioração está diretamente relacionada ao dano acumulado causado por choques. Eles consideraram condições específicas de deterioração e custo, permitindo, no máximo, uma transição entre as ações de operação, reparo ou substituição tanto no estado de deterioração quanto no dano acumulado. Esses resultados destacaram a importância de considerar o limiar como um aspecto fundamental na tomada de decisão da política de manutenção para esse tipo de sistema.

2.2 Componente crítico do sistema

Uma motobomba é um dispositivo que combina um motor e uma bomba para mover fluídos, sendo composta por vários componentes essenciais. O motor elétrico fornece a energia mecânica necessária para acionar a bomba. A bomba contém um impulsor que, ao girar, movimenta o fluído através da força centrífuga, e uma voluta ou carcaça que direciona o fluxo para a saída. Selos mecânicos impedem vazamentos, enquanto eixos e acoplamentos conectam o motor ao impulsor, transmitindo a energia. A base ou suporte assegura a estabilidade e o alinhamento dos componentes. O sistema de resfriamento, como ventiladores ou radiadores, mantém a temperatura ideal do motor e a válvula de retenção evita o fluxo reverso e tubulações de sucção e descarga conectam a bomba à fonte de líquido, utilizada para o bombeamento de líquidos de um local para outro (ver Figura 2).

Quanto ao seu uso, tal dispositivo é amplamente empregado em diversas aplicações, tais como irrigação agrícola, abastecimento de água em áreas urbanas e rurais, drenagem de águas pluviais, controle de enchentes, circulação de água em sistemas de aquecimento e refrigeração, entre outras. Ainda, eles desempenham um papel crucial em atividades industriais, comerciais e residenciais, assegurando o transporte eficiente de líquidos e contribuindo para o funcionamento adequado de uma diversidade de processos e sistemas (Garbus; Angle; Starke, 2008).

Figura 2 - Motobomba



Fonte: Adaptado de Borzoski (2018).

2.2.1 Manutenção no componente crítico

A manutenção de motobombas é uma prática essencial para garantir o funcionamento confiável e eficiente desses equipamentos, tão vitais em uma ampla gama de aplicações industriais, comerciais e residenciais. Responsáveis por gerar o fluxo necessário para o transporte de fluidos em sistemas de redes de distribuição de fluidos, as bombas hidráulicas estão sujeitas a desgaste natural, falhas mecânicas e condições operacionais adversas. Uma política de manutenção bem elaborada não apenas visa prevenir falhas e maximizar a vida útil das bombas, mas também contribui para a segurança, a produtividade e a eficiência dos processos nos quais estão inseridas.

Hatsey *et al.* (2021) abordaram um modelo de minimização de custos para otimizar a manutenção de bombas submersíveis em sistemas de irrigação de águas subterrâneas, utilizando uma análise estocástica baseada em simulação. Além disso, compararam cinco cenários alternativos de manutenção durante um período de 15 anos, utilizando dados empíricos do norte da Etiópia. Os resultados indicam que realizar o rebobinamento do motor de cada bomba ao falhar, com tempos de fornecimento reduzidos, minimiza os custos totais. Este modelo auxilia na tomada de decisões informadas sobre o planejamento e gestão de falhas em economias em desenvolvimento, melhorando os rendimentos dos pequenos agricultores e a segurança alimentar. Ademais, sugerem que estabelecer centros de reparo locais e agilizar a compra de novos equipamentos pode reduzir significativamente os custos.

Ruhi e Karim (2016) fizeram o estudo de caso que analisa a seleção de um modelo estatístico adequado para estimar o período de manutenção ideal e o custo de uma bomba

hidráulica usadas em escavadeiras por uma empresa de mineração. Além disso, analisaram dados de falhas e tempos de vida das bombas, aplicando diferentes modelos de mistura, incluindo Weibull, Normal, Exponencial e Log-normal, para avaliar a confiabilidade das bombas. Utilizando o método de máxima verossimilhança via algoritmo EM (*Expectation-Maximization*) utilizado para a estimação de parâmetros em modelos estatísticos, os parâmetros dos modelos são estimados e comparados através de critérios como Critério de Informação de Akaike (AIC) e erro quadrático médio (RMSE). O modelo de mistura Weibull-Normal-Exponencial foi identificado como o mais adequado, proporcionando a melhor estimativa para a política de manutenção que minimiza os custos esperados por unidade de tempo. Este modelo permite calcular o tempo ótimo de manutenção preventiva (PM) e corretiva (CM), levando em consideração a probabilidade de substituição ou recondicionamento das bombas e os custos associados a cada ação.

Bertolini *et al.* (2006) apresentaram uma abordagem combinada de Programação por Metas Lexicográfica (LGP) e Processo de Hierarquia Analítica (AHP) para selecionar as melhores políticas de manutenção para bombas centrífugas críticas em uma refinaria de petróleo. A metodologia integra aspectos de custo, uso de mão de obra, segurança e risco, utilizando a técnica AHP para avaliar os critérios de ocorrência, severidade e perceptibilidade das falhas. Dados reais de falhas e manutenção das bombas ao longo de 10 anos foram analisados, revelando que a manutenção preditiva é frequentemente a política ótima, seguida pela manutenção preventiva. O modelo LGP permite priorizar diferentes metas e encontrar soluções que minimizem desvios indesejados dos objetivos definidos, como custos e uso de mão de obra. Finalmente, uma abordagem combinada LGP-AHP é uma ferramenta flexível e eficaz para alocar recursos de manutenção de maneira otimizada, sendo particularmente útil em contextos industriais onde a segurança e a confiabilidade são críticas.

Koteleva, Valnev e Frenkel (2021) afirmaram que a manutenção de bombas de petróleo configura-se como um desafio intrincado para as organizações inseridas no setor de petróleo e gás. A ampla distribuição desses equipamentos em ambientes adversos e sob condições climáticas rigorosas intensifica a premência de conceber sistemas de manutenção de alta eficácia. Nesse contexto, a modelagem dinâmica emerge como uma ferramenta de vanguarda que avalia o estado técnico dos equipamentos, viabilizando diagnósticos precisos e prognósticos confiáveis. Complementarmente, a realidade aumentada emerge como uma tecnologia complementar que acelera as atividades de manutenção ao simplificar a busca por informações indispensáveis.

A política de manutenção proposta em comparação aos modelos discutidos anteriormente, introduz dois novos parâmetros, como: a consideração de "choques" e o custo adicional devido à permanência do componente no estado defeituoso. Além disso, os "choques" são reconhecidos como eventos que podem causar degradação adicional e acelerada ao componente. Isso implica que o modelo reconhece variações operacionais que não são estritamente previsíveis apenas com base no desgaste natural. Ao modelar esses agentes externos, oferece uma abordagem mais realista que pode refletir mais precisamente o ambiente operacional da motobomba, especialmente em condições severas ou variáveis.

Em concordância com o anterior, introduz o custo acumulados enquanto o componente se mantém no estado defeituoso. Isso sugere uma análise mais detalhada do impacto econômico da manutenção, onde não apenas os custos diretos de reparo são considerados, mas também os custos indiretos associados à operação de um equipamento defeituoso. Essa abordagem pode incentivar intervenções de manutenção mais rápidas e eficazes, visando não apenas a funcionalidade do equipamento, mas também a otimização econômica do processo de manutenção.

Ambos os aspectos podem significar um avanço substancial em relação aos modelos mencionados anteriormente, que, embora abordem de políticas de manutenção baseadas em programação e critérios de falha, podem não levar em consideração a complexidade adicional introduzida por choques externos e os custos acumulados por um estado prolongado de operação do componente defeituoso. Essa inovação é particularmente relevante para ambientes onde as condições de operação são extremamente variáveis e onde o impacto financeiro de uma manutenção ineficaz pode ser significativo.

2.2.2 Choques no componente crítico

A degradação precoce das motobombas é frequentemente atribuída a agentes externos, conhecidos como choques. Alguns tipos de choques aos quais motobombas estão sujeitos são: cavitação, obstrução por partículas sólidas e variações elétricas (BILUS; PREDIN, 2009).

A cavitação em motobombas é um fenômeno que ocorre quando a pressão do fluido bombeado é mais baixa que a pressão de vapor do fluido, resultando na formação de bolhas de vapor. Isso geralmente ocorre em áreas de alta velocidade do fluido ou em torno das pás do impulsor da bomba. Quando essas bolhas de vapor são transportadas para regiões de alta pressão, como na saída da bomba, elas colapsam de forma violenta. Esse colapso das bolhas cria ondas de choque e impactos nas superfícies internas da bomba, causando danos ao material e reduzindo a eficiência da bomba ao longo do tempo. Além disso, pode resultar em ruído excessivo, vibração e aumento do desgaste das peças da bomba, levando a falhas prematuras e

custos de manutenção mais elevados. Para prevenir a cavitação em motobombas, é importante projetar sistemas de bombeamento adequados, com dimensionamento correto das bombas, evitando altas velocidades do fluido e garantindo que a pressão de entrada da bomba seja suficiente para evitar a formação de bolhas de vapor (Stopa; Cardoso Filho; Martinez, 2013).

Por outro lado, a obstrução de partículas sólidas em motobombas é um problema comum que ocorre quando partículas sólidas, como areia, lodo, detritos ou outros materiais, entram no sistema de bombeamento e obstruem o fluxo do líquido. Quando as partículas sólidas são sugadas para dentro da motobomba, elas podem ficar presas nas pás do impulsor, nas passagens da bomba ou em outros componentes internos, impedindo o fluxo normal do líquido. Para evitar ou minimizar a obstrução de partículas sólidas nesse equipamento, é importante usar filtros ou peneiras adequados para remover as partículas maiores antes que o líquido entre na bomba. Além disso, a instalação de válvulas de pé ou outros dispositivos de proteção pode ajudar a evitar que grandes objetos entrem na bomba. Em situações em que a obstrução de partículas sólidas é um problema persistente, pode ser necessário considerar a instalação de sistemas de filtragem mais avançados ou a utilização de bombas específicas projetadas para lidar com sólidos em suspensão (Bilus; Predin, 2009).

Por fim, as variações e desequilíbrios de tensão têm um impacto significativo no desempenho de bombas centrífugas, afetando consideravelmente sua eficiência. Além disso, as motobombas são sensíveis a flutuações de tensão quando ocorrem condições de sobretensão e subtensão, quer sejam balanceadas ou desbalanceadas. A subtensão desbalanceada é a que causa o maior impacto negativo. Essas variações resultam em aumentos na corrente de linha e na potência de entrada do motor, enquanto a eficiência do motor diminui. Além disso, a saída da bomba é influenciada pela tensão aplicada, aumentando as condições de sobretensão e diminuindo as de subtensão. Ademais, a resistência do sistema de tubulação, representada pela cabeça do sistema, também varia, aumentando com a sobretensão e diminuindo com a subtensão. Para finalizar, a eficiência da bomba cai significativamente quando as condições de tensão se desviam das especificações nominais, isso destaca a importância de manter as condições de fornecimento de tensão o mais próximo possível do ideal, para evitar desperdícios de energia e danos ao equipamento (Kini; Bansal; Aithal, 2008).

Diante disso, o modelo proposto determina os choques por cavitação, obstrução e variações de tensão, de forma mista, ou seja, a taxa de chegada está determinada por:

$$\mu = \mu_{cavitação} + \mu_{obstrução} + \mu_{v.tensão}$$

Equação 2.1

Além disso, os choques de variação de tensão são os que têm a menor taxa de chegada entre os três tipos de choques. Portanto, podemos considerar que:

$$\mu_{v.tensão} \prec \mu_{cavitação} \quad \text{Equação 2.2}$$

e

$$\mu_{v.tensão} \prec \mu_{obstrução} \quad \text{Equação 2.3}$$

as taxas de chegadas individuais estão determinadas por;

$$\mu_{obstrução} = 0,2 \quad \text{Equação 2.4}$$

$$\mu_{cavitação} = 0,2 \quad \text{Equação 2.5}$$

$$\mu_{v.tensão} = 0,1 \quad \text{Equação 2.6}$$

onde a taxa de chegada dos choques mistos é 0,5 e isso significa que:

$$\mu = 0,2 + 0,2 + 0,1 \quad \text{Equação 2.7}$$

$$\mu = 0,5 \quad \text{Equação 2.8}$$

Os choques de cavitação, obstrução e elétricos, considerados "choques mistos", podem ser controlados de maneiras diferentes, sendo alguns mais facilmente gerenciáveis que outros (Kini; Bansal; Aithal, 2008). Em particular, os choques elétricos possuem uma taxa de chegada menor porque podem ser controlados externamente com sistemas de controle de variações de tensão. Esses sistemas de proteção e regulação de tensão são eficazes em minimizar as flutuações, reduzindo assim a frequência e a gravidade dos choques elétricos.

Conforme supracitado, as motobombas são especialmente sensíveis a flutuações de tensão, com condições de sobretensão e subtensão, sejam balanceadas ou desbalanceadas, resultando em aumentos na corrente de linha e na potência de entrada do motor, enquanto a eficiência diminui. Embora a cavitação resulte da formação de bolhas de vapor devido à pressão do líquido abaixo da pressão de vapor, e a obstrução decorra da entrada de partículas sólidas no sistema, ambas podem levar a danos similares, como desgaste do impulsor, erosão de superfícies internas e redução do desempenho da bomba. Portanto, ao tratar esses choques como um único fenômeno, é possível simplificar as políticas de gestão de riscos e implementar

medidas de prevenção mais abrangentes para garantir a operação confiável das motobombas em diversas condições operacionais.

2.3 Contribuição da pesquisa

A presente pesquisa traz uma contribuição para a gestão da manutenção de sistemas de distribuição de água, especialmente na otimização das políticas de manutenção de motobombas. Foi desenvolvido um modelo matemático que incorpora os efeitos da degradação natural e dos choques externos, fatores essenciais que influenciam a confiabilidade e a eficiência operacional desses sistemas. Diferentemente das abordagens tradicionais, que consideram apenas o envelhecimento do equipamento, esta pesquisa introduz uma análise detalhada do impacto de eventos aleatórios que podem acelerar a degradação do sistema, proporcionando uma visão mais realista e aplicável a cenários operacionais reais.

Além disso, o estudo apresenta uma metodologia inovadora para minimizar os custos de manutenção, considerando não apenas as ações preventivas e corretivas, mas também o impacto econômico da permanência do equipamento no estado defeituoso. A inclusão do "custo por tempo em estado defeituoso" permite um melhor planejamento das inspeções e substituições, garantindo uma alocação mais eficiente de recursos e evitando períodos prolongados de operação em condições inadequadas. A combinação de inspeções periódicas com manutenção baseada na idade e na condição representa uma política eficaz, equilibrando a confiabilidade do sistema com a redução dos custos operacionais.

Do ponto de vista prático, esta pesquisa fornece ferramentas para a tomada de decisão na gestão da manutenção de infraestruturas hídricas. Sua aplicação em redes de distribuição de água permite otimizar os intervalos entre inspeções e definir os momentos ideais para a realização da manutenção preventiva, contribuindo para a continuidade do abastecimento e a redução de falhas inesperadas. Isso é especialmente relevante em contextos onde a disponibilidade de água é crítica, garantindo que comunidades e setores industriais que dependem desse recurso tenham acesso a um sistema de abastecimento confiável e eficiente.

Em termos metodológicos, a pesquisa também amplia a literatura sobre modelos de manutenção ao integrar o conceito de Delay-Time com a ocorrência de choques externos e custos associados ao tempo de falha. Essa abordagem proporciona um novo marco de análise para avaliar a vida útil de equipamentos em sistemas complexos, oferecendo uma base teórica e prática que pode ser aplicada a outros setores nos quais a manutenção de equipamentos críticos é essencial.

3 METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido mediante observações feitas baseadas na pesquisa de Correa E Cavalcante, (2023). Além disso foi conduzida uma revisão da literatura no campo de manutenção aplicada a bombas hidráulicas, com o propósito de identificar os componentes do sistema, definir os custos associados e compreender os mecanismos geradores de defeitos e falhas. Os parâmetros de entrada foram estabelecidos com base em pesquisas prévias na literatura de bombas hidráulica e reuniões com especialistas de rede de distribuição de água. Foi apresentado o desenvolvimento de uma política de manutenção para o sistema, juntamente com os resultados derivados do modelo utilizado dessa política, os quais demonstraram ser favoráveis e passíveis na aplicação prática.

3.1 Modelo matemático

Considera-se o sistema composto por um único componente, que pode assumir três estados: bom, defeituoso e falho. O estado defeituoso pode ocorrer devido a degradação natural ou degradação causada por choques, e ambos os tipos de degradação eventualmente levam ao estado de falha. Ao detectar que o sistema está em estado defeituoso durante uma inspeção, aciona-se a ação de manutenção preventiva. São consideradas duas ações de manutenção: preventiva e corretiva. Ambas ações de manutenção envolvem a substituição do componente, efetivamente renovando o sistema. Durante a paralisação do sistema, seja para manutenção preventiva ou corretiva, não é relevante o tempo de inatividade. A relação de custo entre as ações de manutenção é dada por $c_F > c_P > c_I$, onde o custo corretivo é maior que o preventivo que por sua vez é maior que o custo de uma inspeção.

Além disso, modela-se o impacto financeiro causado por a permanência no estado defeituoso da motobomba, seja devido à deterioração natural (c_{DN}) ou a um choque externo imprevisto (c_{DC}). Esses custos estão associados a perdas de produtividade, desperdício de recursos, bem como ao aumento do consumo de energia para operar na mesma capacidade de antes, quando o componente não estava em um estado defeituoso.

Durante o desenvolvimento do modelo matemático da política de manutenção proposta, o defeito devido à degradação natural foi modelado seguindo uma distribuição de *Weibull*. Os choques e o *Delay Time* foram modelados seguindo distribuições exponenciais. Tanto as políticas de manutenção preventiva quanto as corretivas renovam o sistema, encerrando o ciclo de vida e caracterizando uma renovação a cada intervenção.

A permanência no estado bom é representada por X (para degradação natural), enquanto no estado defeituoso é denotada por h . Ambos são variáveis aleatórias estatisticamente independentes. Quanto aos componentes, estes são divididos em duas subpopulações: fracos e fortes. Essa classificação permite modelar instalações de componentes inadequados no sistema. O parâmetro de mistura (α), representa a proporção da subpopulação fraca. Ou seja, quanto maior o parâmetro de mistura, mais componentes fracos há na população total de componentes. Assim, a distribuição de X é representada na equação 3.1.

$$f_x(x) = \alpha \left(\frac{\beta_1}{\eta_1} \left(\frac{x}{\eta_1} \right)^{\beta_1-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta_1}\right)^{\beta_1}} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{\beta_2}{\eta_2} \left(\frac{x}{\eta_2} \right)^{\beta_2-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta_2}\right)^{\beta_2}} \right) \quad \text{Equação 3.1}$$

Assumindo que o tempo no estado bom do componente segue uma distribuição Weibull, com parâmetros de forma β_1 e parâmetro de escala η_1 para componentes da subpopulação fraca (afetados por instalação inadequada), e parâmetros de forma β_2 e parâmetro de escala η_2 para a subpopulação forte (componentes adequadamente instalados). Além disso, o sistema está sujeito a choques que ocorrem de acordo com um Processo de Poisson Homogêneo com taxa μ . Para calcular a probabilidade de chegada de choques, é utilizada a fórmula da distribuição Poisson, onde a probabilidade de k eventos ocorrerem em um intervalo de tempo t é dada por:

$$P(k : \mu t) = \frac{(\mu t)^k e^{-\mu t}}{k!} \quad \text{Equação 3.2}$$

A política de manutenção proposta baseia-se no modelo de Scarf *et al.* (2009) e possui duas fases, com três variáveis de decisão: o número de inspeções (K), o intervalo entre inspeções (Δ) e a idade para ação de manutenção preventiva (T). Na primeira fase do modelo, são realizadas K inspeções com intervalos Δ entre elas. Se durante uma inspeção o componente for observado no estado defeituoso, a manutenção preventiva é realizada imediatamente. As falhas são auto anunciadas e, quando o sistema falha, uma ação de manutenção corretiva é executada imediatamente. Essas inspeções têm o objetivo de monitorar o comportamento do componente no início de sua vida útil, focando em componentes que podem ser vulneráveis devido a instalações deficientes ou variações na qualidade dos componentes.

Ao final dessa fase, em $K\Delta$, caso não sejam detectados defeitos durante as inspeções e o componente não apresente falha entre elas, inicia-se a segunda fase. Na segunda fase, que vai de $K\Delta$ a T , não há inspeções programadas. Durante esse período, há apenas uma ação de manutenção preventiva'' agendada para ocorrer em T . A implementação de práticas de manutenção preventiva centradas na idade e o monitoramento através de inspeções regulares são fundamentais para mitigar problemas e garantir a eficiência e durabilidade das motobombas.

Entretanto, o modelo proposto por Scarf *et al.* (2009) não considera a possibilidade de choques e o custo adicional devido à permanência do componente no estado defeituoso. Tais considerações são comumente observadas no sistema em estudo. Por exemplo, choques devido à cavitação e obstrução são frequentemente observados na prática durante a operação deste tipo de sistemas. A política de manutenção proposta neste trabalho considera ambos os aspectos: a chegada de choques e o custo adicional gerado pela permanência do componente no estado defeituoso.

A otimização das variáveis de decisão baseia-se no critério de decisão conhecido como taxa de custo $\{C_\infty\}$, o qual é justificado pelo teorema de renovação-recompensa. Para calcular essa taxa, primeiramente identificamos todos os cenários de renovação distintos e, em seguida, calculamos o custo esperado (E_{Cs}) e a duração esperada (E_{Ls}) para cada cenário (s). Assim, a taxa de custo pode ser determinada utilizando a seguinte equação 3.3:

$$C_\infty = (K, \Delta, T) = \frac{\sum_{s=1}^9 E_{Cs}}{\sum_{s=1}^9 E_{Ls}} \quad \text{Equação 3.3}$$

Então, determinamos a política ótima em termos de custo: aqueles valores de K , Δ e T que minimizam $C_\infty = (K, \Delta, T)$ sujeitos a: $T \geq K\Delta$; $K, \Delta, T > 0$.

3.1.1 Notações

Tabela 1 - Descrição dos parâmetros

Sigla	Descrição
η	Parâmetro de escala da Weibull da degradação natural
β	Parâmetro de forma da Weibull da degradação natural
λ	Inverso da média da distribuição de delay-time
μ	Taxa de chegada do choque

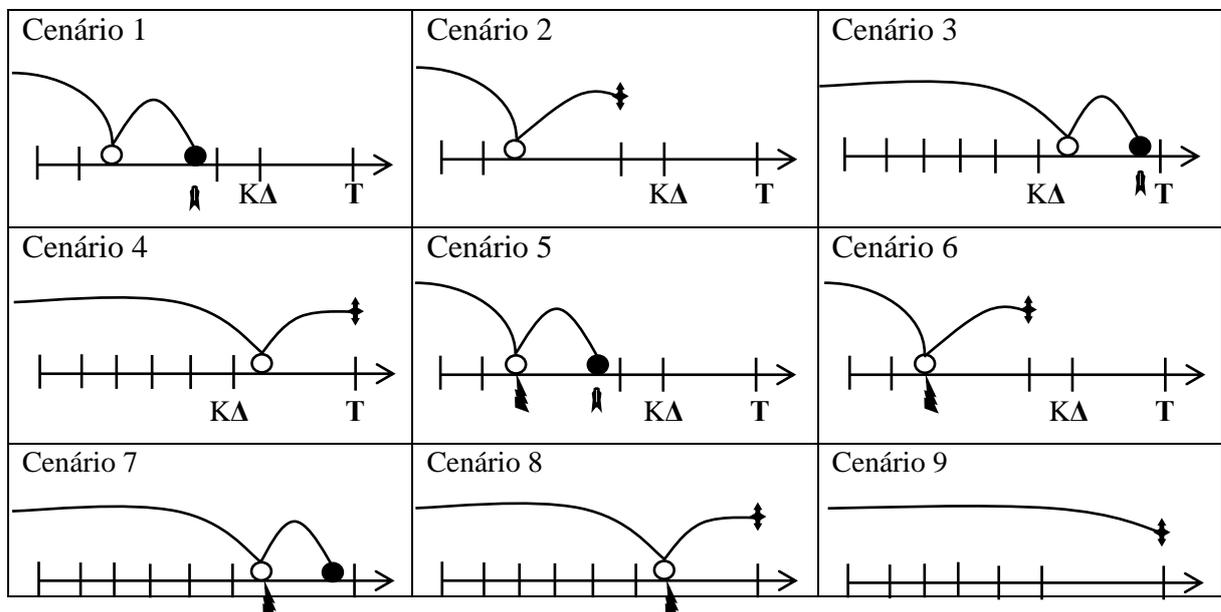
x	Tempo de permanência no estado bom
h	Delay time
z	Tempo de chegada do choque
c_I	Custo de inspeção
c_P	Custo de manutenção preventiva
c_F	Custo de renovação corretiva
c_{DN}	Custo por unidade de tempo no estado defeituoso dado que chegou por degradação natural
c_{DC}	Custo por unidade de tempo no estado defeituoso dado que chegou por choque
K	Número de inspeções
Δ	Intervalo do tempo entre inspeções
T	Tempo para ação da manutenção preventiva
$\{C_\infty\}$	Taxa de custo

Fonte: O Autor (2025).

3.1.2 Descrição dos Cenários

Os cenários são subdivididos em duas partes: aqueles derivados da degradação natural do equipamento (cenários de 1 - 4 e 9) e cenários que consideram a chegada do choque (cenários de 5 - 8).

Figura 3 - Representação gráfica dos cenários



KΔ	T	KΔ	T	KΔ	T
Falha	●	Choque	⚡	Preventiva	↕
Defeito	○	Corretiva	🔧	Linha do tempo	→

Fonte: O Autor (2025).

- Cenário 1

Neste cenário, o defeito ocorre devido à degradação natural do equipamento durante o i -ésimo intervalo entre inspeções, a falha chega antes de ser realizada a inspeção, sendo aplicada a manutenção corretiva. O comprimento do ciclo de vida do equipamento é dado por $x+h$. A probabilidade de isso acontecer, o custo esperado e o tamanho da vida do ciclo de renovação são apresentados respectivamente pelas equações 3.4, 3.5 e 3.6.

$$P_1 = \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_0^{i\Delta-x} e^{-\mu x} f_x(x) f_h(h) dh dx \quad \text{Equação 3.4}$$

$$C_1 = \left[\sum_{i=1}^K [(i-1)c_I + c_F] \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_0^{i\Delta-x} e^{-\mu x} f_x(x) f_h(h) dh dx \right] + \left[\sum_{i=1}^K \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_0^{i\Delta-x} e^{-\mu x} (c_{DN}h) f_x(x) f_h(h) dh dx \right] \quad \text{Equação 3.5}$$

$$V_1 = \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_0^{i\Delta-x} e^{-\mu x} (x+h) f_x(x) f_h(h) dh dx \quad \text{Equação 3.6}$$

- Cenário 2

O defeito ocorre devido à degradação natural do equipamento durante o i -ésimo intervalo entre as inspeções. O defeito chega até a realização da inspeção, onde é detectada e realizada a manutenção preventiva. O comprimento do ciclo de vida do componente é dado por $i\Delta$. A probabilidade de acontecimentos, o custo esperado e o comprimento do ciclo de renovação são representados pelas equações 3.7, 3.8 e 3.9.

$$P_2 = \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_{i\Delta-x}^{\infty} e^{-\mu x} f_x(x) f_h(h) dh dx \quad \text{Equação 3.7}$$

$$C_2 = \left[\sum_{i=1}^K [ic_I + c_P] \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_{i\Delta-x}^{\infty} e^{-\mu x} f_x(x) f_h(h) dh dx \right] + \left[\sum_{i=1}^K \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_{i\Delta-x}^{\infty} e^{-\mu x} c_{DN} (i\Delta-x) f_x(x) f_h(h) dh dx \right] \quad \text{Equação 3.8}$$

$$V_2 = \sum_{i=1}^K i\Delta \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_{i\Delta}^{\infty} e^{-\mu x} f_x(x) f_h(h) dh dx \quad \text{Equação 3.9}$$

- **Cenário 3**

Nesta situação, o defeito ocorre devido à degradação natural do equipamento após a i -ésima inspeção, a falha chega antes de realizar a manutenção preventiva planejada, aplicando a manutenção corretiva. O comprimento médio do ciclo é dado por $x+h$. A probabilidade, o custo esperado e o tamanho da vida do ciclo de renovação são dados pelas equações 3.10, 3.11 e 3.12.

$$P_3 = \int_{K\Delta}^T \int_0^{T-x} e^{-\mu x} f_x(x) f_h(h) dh dx \quad \text{Equação 3.10}$$

$$C_3 = \left[[Kc_I + c_F] \int_{K\Delta}^T \int_0^{T-x} e^{-\mu x} f_x(x) f_h(h) dh dx \right] + \left[\int_{K\Delta}^T \int_0^{T-x} e^{-\mu x} c_{DN} h f_x(x) f_h(h) dh dx \right] \quad \text{Equação 3.11}$$

$$V_3 = \int_{K\Delta}^T \int_0^{T-x} e^{-\mu x} (x+h) f_x(x) f_h(h) dh dx \quad \text{Equação 3.12}$$

- **Cenário 4**

Neste caso, o defeito ocorre devido à degradação natural após a i -ésima inspeção. O equipamento chega até o tempo em que é realizada a manutenção preventiva planejada, onde se faz a substituição e o comprimento do ciclo é dado por T . A probabilidade de isto acontecer, o custo esperado e a dimensão do ciclo de renovação são dados pelas equações 3.13, 3.14 e 3.15.

$$P_4 = \int_{K\Delta}^T \int_{T-x}^{\infty} e^{-\mu x} f_x(x) f_h(h) dh dx \quad \text{Equação 3.13}$$

$$C_4 = \left[[Kc_I + c_P] \int_{K\Delta}^T \int_{T-x}^{\infty} e^{-\mu x} f_x(x) f_h(h) dh dx \right] + \left[\int_{K\Delta}^T \int_{T-x}^{\infty} e^{-\mu x} c_{DN} (T-x) f_x(x) f_h(h) dh dx \right] \quad \text{Equação 3.14}$$

$$V_4 = T \int_{K\Delta}^T \int_{T-x}^{\infty} e^{-\mu x} f_x(x) f_h(h) dh dx \quad \text{Equação 3.15}$$

- Cenário 5

Neste cenário o defeito ocorre devido à degradação causada por choque no i -ésimo intervalo entre inspeções, a falha chega antes da inspeção e causa a aplicação da manutenção corretiva, sendo o comprimento do ciclo de vida igual a $z+h$. A probabilidade, o custo esperado e a dimensão ciclo de renovação são dados por 3.16, 3.17 e 318.

$$P_5 = \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_0^{i\Delta-z} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} f_x(x) f_h(h) dx dh dz \quad \text{Equação 3.16}$$

$$C_5 = \left[\sum_{i=1}^K [(i-1)c_I + c_F] \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_0^{i\Delta-z} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} f_x(x) f_h(h) dx dh dz \right] \quad \text{Equação 3.17}$$

$$+ \left[\sum_{i=1}^K \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_0^{i\Delta-z} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} c_{DC} h f_x(x) f_h(h) dx dh dz \right]$$

$$V_5 = \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_0^{i\Delta-z} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} (z+h) f_x(x) f_h(h) dx dh dz \quad \text{Equação 3.18}$$

- Cenário 6

O defeito ocorre devido à degradação causada por choque no i -ésimo intervalo entre inspeções, o equipamento chega até a inspeção onde é detectado, fazendo a manutenção preventiva. Nesse caso, o comprimento do ciclo é dado por $i\Delta-z$. A probabilidade, o custo esperado e a dimensão do ciclo de vida do componente são dados pelas equações 3.19, 3.20 e 3.21.

$$P_6 = \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_{i\Delta-z}^{\infty} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} f_x(x) f_h(h) dx dh dz \quad \text{Equação 3.19}$$

$$C_6 = \left[\sum_{i=1}^K [ic_I + c_P] \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_{i\Delta-z}^{\infty} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} f_x(x) f_h(h) dx dh dz \right] \quad \text{Equação 3.20}$$

$$+ \left[\sum_{i=1}^K \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_{i\Delta-z}^{\infty} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} c_{DC} (i\Delta-z) f_x(x) f_h(h) dx dh dz \right]$$

$$V_6 = \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_{i\Delta-z}^{\infty} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} (i\Delta - z) f_x(x) f_h(h) dx dh dz \quad \text{Equação 3.21}$$

- **Cenário 7**

O defeito ocorre devido à degradação causada por choque após a i -ésima inspeção, a falha chega antes da manutenção preventiva planejada, aplicando a manutenção corretiva, o comprimento médio do ciclo de vida está dado por $z+h$. A probabilidade, o custo esperado e o tamanho do ciclo de renovação são dados pelas equações 3.22, 3.23, 3.24.

$$P_7 = \int_{K\Delta}^T \int_0^{T-z} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} f_x(x) f_h(h) dx dh dz \quad \text{Equação 3.22}$$

$$C_7 = \left[[Kc_I + c_F] \int_{K\Delta}^T \int_0^{T-z} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} f_x(x) f_h(h) dx dh dz \right] + \left[\int_{K\Delta}^T \int_0^{T-z} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} c_{DC} h f_x(x) f_h(h) dx dh dz \right] \quad \text{Equação 3.23}$$

$$V_7 = \int_{K\Delta}^T \int_0^{T-z} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} (z+h) f_x(x) f_h(h) dx dh dz \quad \text{Equação 3.24}$$

- **Cenário 8**

Neste cenário o defeito ocorre devido à degradação causada por choque após a i -ésima inspeção, o equipamento chega até a manutenção preventiva planejada, onde é realizada a substituição preventiva, o comprimento do ciclo de vida é igual a T . Nesta situação, a probabilidade, o custo esperado e a dimensão do ciclo de renovação são dadas pelas equações 3.25, 3.26 e 3.27.

$$P_8 = \int_{K\Delta}^T \int_{T-z}^{\infty} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} f_x(x) f_h(h) dx dh dz \quad \text{Equação 3.25}$$

$$C_8 = \left[[Kc_I + c_P] \int_{K\Delta}^T \int_{T-z}^{\infty} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} f_x(x) f_h(h) dx dh dz \right] + \left[\int_{K\Delta}^T \int_{T-z}^{\infty} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} c_{DC} (T-z) f_x(x) f_h(h) dx dh dz \right] \quad \text{Equação 3.26}$$

$$V_8 = T \int_{K\Delta}^T \int_{T-z}^{\infty} \int_z^{\infty} \mu e^{-\mu z} f_x(x) f_h(h) dx dh dz \quad \text{Equação 3.27}$$

- Cenário 9

Neste último cenário de renovação, o equipamento chega em perfeito funcionamento até a manutenção preventiva planejada, o qual é renovado. O comprimento do ciclo de vida é dado por T e a probabilidade, o custo esperado e a dimensão deste ciclo são dados pelas equações 3.28, 3.29 e 3.30.

$$P_9 = \int_T^{\infty} \int_T^{\infty} \mu e^{-\mu t} f_x(x) f_h(h) dx dh \quad \text{Equação 3.28}$$

$$C_9 = [Kc_I + c_P] \int_T^{\infty} \int_T^{\infty} \mu e^{-\mu t} f_x(x) f_h(h) dx dh \quad \text{Equação 3.29}$$

$$V_9 = T \int_T^{\infty} \int_T^{\infty} \mu e^{-\mu t} f_x(x) dx dz \quad \text{Equação 3.30}$$

4 ESTUDO DE CASO

Esta seção aborda o estudo de caso analisado neste trabalho. Uma política de manutenção é proposta para uma motobomba através da análise de um caso inspirado em um problema real. No final da seção, são fornecidos insights práticos e recomendações para profissionais de manutenção e gestores de sistemas de abastecimento de água e enfatizadas as importâncias das ações de inspeções, substituições preventivas e corretivas para estes sistemas.

4.1 Contexto do problema

A motobomba desempenha um papel essencial na garantia de eficiência e confiabilidade no fornecimento de água. Sem um funcionamento adequado das motobombas, a distribuição pode ser comprometida, resultando em interrupções no abastecimento. Essas interrupções afetam diretamente a vida cotidiana das pessoas impactando atividades essenciais como higiene, alimentação e saúde. A falta de acesso a água potável pode aumentar a incidência de doenças causadas pela presença de microrganismos patogênicos, representando um risco significativo para a saúde pública (OMS, 2021).

Além disso, a eficiência energética das motobombas tem um impacto considerável no meio ambiente. Estes tipos de equipamento, quando são ineficientes, consomem mais energia, o que pode aumentar a emissão de gases do efeito estufa, contribuindo para as mudanças climáticas. Assim sendo, a otimização do uso de energia em sistemas de abastecimento de água é crucial para reduzir a pegada de carbono das operações (ANA, 2020). Portanto, a manutenção de motobombas eficientes não só contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também alinha as práticas de gestão de água à redução de emissões.

Ademais, a falha no fornecimento adequado de água pode levar a custos elevados. Comunidades que enfrentam interrupções frequentes no abastecimento de água podem precisar investir em soluções alternativas, como o transporte de água por caminhões-pipa, o que é custoso e insustentável a longo prazo. Nesse contexto, a ineficiência energética das motobombas aumenta os custos operacionais dos sistemas de distribuição de água (IWA, 2019). O investimento em motobombas eficientes pode resultar em economias significativas, liberando recursos que podem ser reinvestidos em melhorias do sistema e expansão dos serviços para áreas não atendidas. Portanto, garantir o funcionamento eficiente das motobombas é essencial não só para a economia local, mas também para a qualidade do serviço de abastecimento de água.

A motobomba pode apresentar falhas por diversos motivos, incluindo problemas de natureza elétrica, vazão e pressão de recalque. Os problemas elétricos geralmente envolvem falhas no motor, que podem ser causadas por sobrecarga elétrica, má conexão de cabos, curto-circuito, ou flutuações de tensão. Essas falhas podem levar ao superaquecimento do motor, redução na eficiência e eventual parada completa da bomba. Além disso, o problema de vazão ocorre quando a motobomba não consegue movimentar a quantidade de água esperada por unidade de tempo. Isso pode ser causado por obstruções na tubulação, desgaste de componentes internos, como impulsores e vedações, cavitação ou falhas de vedação que resultam em vazamentos. Por outro lado, os problemas de pressão de recalque referem-se à pressão que a motobomba precisa gerar para mover a água através do sistema até o ponto de consumo. Também podem surgir devido a obstruções na linha de descarga, desgaste dos impulsores, configuração inadequada da bomba, ou falhas no sistema de controle de pressão.

Para compreender os procedimentos realizados e as políticas aplicadas, foram promovidas reuniões com engenheiros especialistas de uma empresa de rede de distribuição de água. Esses profissionais, responsáveis por manter a estrutura operando eficientemente, identificaram e estabeleceram uma série de processos essenciais para garantir o funcionamento contínuo da motobomba. Dentre as ações destacadas, enfatizou-se a importância da manutenção preventiva regular, com inspeções periódicas e substituições de componentes antes que apresentem falhas críticas. Adicionalmente, destacou-se a necessidade de capacitação contínua da equipe técnica, garantindo que todos os operadores e técnicos estejam atualizados com procedimentos de manutenção realizados no sistema.

Quanto à realização da inspeção, ela é composta de uma série de atividades. Primeiramente, é checada a existência de ruídos de operação. Em seguida, o sistema é desligado e o histórico de manutenção é revisado. Após isso, é feita a inspeção visual de componentes externos à bomba no intuito de verificar desgastes, corrosões, danos ou vazamentos. Logo em seguida é feita a inspeção elétrica das conexões, cabos e motor para identificar sobrecargas ou flutuações de tensão. Vazão e pressão de recalque também são medidas como indicativo de defeito ou não, sendo feitos vários testes com diferentes condições de carga enquanto ruídos anormais são monitorados. Qualquer identificação de operação anormal de um desses aspectos supracitados é classificada como defeito.

Quanto à manutenção corretiva do sistema é feita a coleta de informações sobre sintomas de má operação como redução de vazão ou ruídos anormais, seguida por uma inspeção visual inicial para detectar sinais óbvios de desgaste ou danos. Em seguida, desliga-se a alimentação elétrica e, se necessário, drena-se o sistema. Realiza-se um diagnóstico detalhado,

inspecionando o componente mecânico e elétrico, e medindo a vazão e a pressão de recalque. Depois, desmonta-se a bomba, removendo o componente da rede de distribuição. O componente danificado é reparado ou substituído e a motobomba é instalada no sistema da rede. Após reconectar a alimentação elétrica, realiza-se um teste operacional para verificar a funcionalidade, ajustando a peça conforme necessário e aplicando lubrificantes. Finalmente, documenta-se todo o processo, incluindo peças substituídas e resultados dos testes, com recomendações para futuras manutenções preventivas.

4.2 Estimação de parâmetros

Os parâmetros que foram utilizados foram estimados com base na expertise dos engenheiros encarregados da manutenção da rede. Existem razões para se considerar componentes fortes e fracos tais como: fornecedores, má instalação, entre outros (Melo *et al.*, 2023), sendo esta proporção igual 5% ($\alpha = 0,05$). O intervalo de tempo que leva a um defeito é de em média 3 anos e segue uma distribuição de *Weibull* (fraco $\eta_1 = 0,3$; $\beta_1 = 3$; forte $\eta_2 = 3,00$; $\beta_2 = 3,00$). Por sua vez, o choque efetivo está representado por uma taxa de chegada de $\mu = 0,5$. Se a bomba perder capacidade de bombeamento, então é aumentado o consumo energético e produz-se menos volume de água. Então o *KWh* por metro cúbico produzido é maior, pois a eficiência diminui.

Na ocasião deste trabalho, as inspeções eram realizadas mensalmente e tinham um custo de $c_I = 0,10$ unidades monetárias. A manutenção preventiva é efetuada ao mesmo tempo da inspeção executando a limpeza do painel elétrico. Além desta, é realizada outra operação preventiva num ano. Aplicar ações corretivas e outros custos decorrentes da falha e ao não fornecimento de água para os clientes tem uma média de $c_F = 5$, com um tempo médio necessário para realizar a atividade de 8 horas. O custo associado a aquisição de um novo equipamento incluindo a instalação desta é de $c_p = 1$ unidades monetárias. Por fim, os custos associados a tempo de permanência no está defeituoso de forma natural e por choques ($c_{DN} = 0,04$, $c_{DC} = 0,04$) unidades monetárias por unidade de tempo e as perdas representam uma combinação de custos diretos e indiretos associados à falha e mau funcionamento dos equipamentos de bombeamento na rede de água, incluindo custos de energia, custos operacionais, custos de reparo, custos de substituição e impacto financeiro do tempo de inatividade.

4.3 Avaliação dos resultados

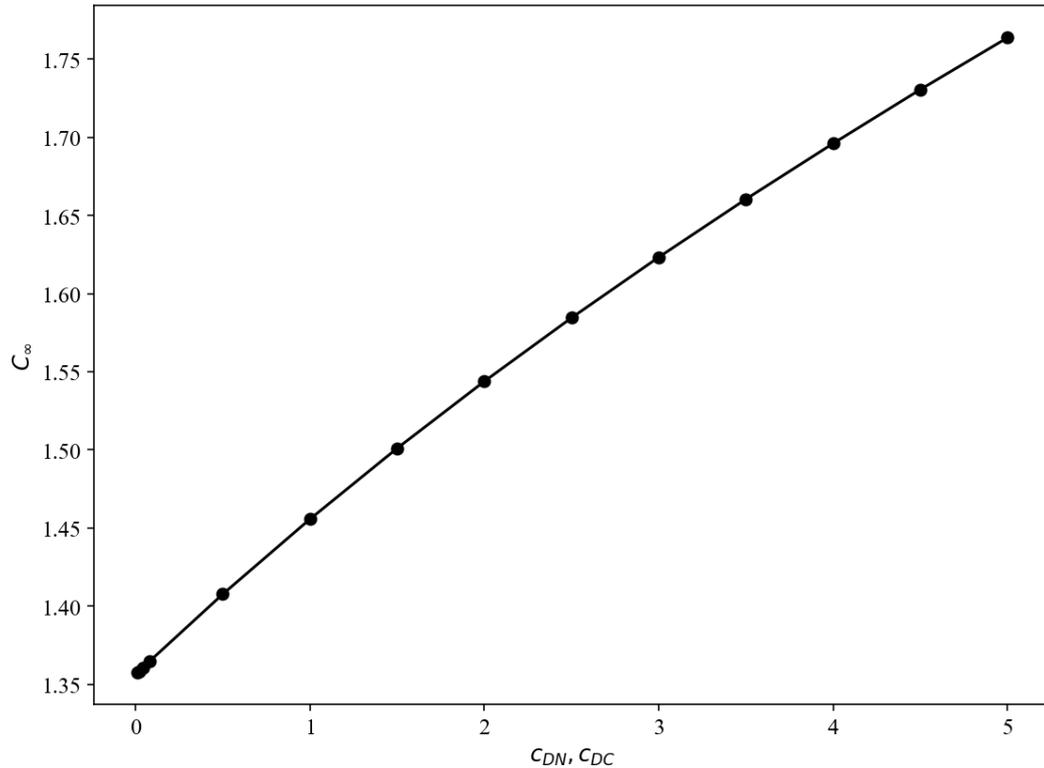
Esta seção oferece uma análise numérica do modelo para explorar diversas tendências, especialmente quanto ao efeito dos parâmetros na formulação da política de manutenção e no custo previsto. Os resultados são exibidos considerando as variáveis de decisão K , Δ e T , além do custo esperado por unidade de tempo a longo prazo C_∞ .

Tabela 2 - Parâmetros e variáveis de decisão

Parâmetros de entrada											Variáveis de decisão			Taxa de Custo	
η_1	η_2	β_1	β_2	α	λ	μ	c_F	c_I	c_{DN}	c_{DC}	c_P	K	Δ	T	C_∞
0,30	3,00	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,0	8,00	0,37	3,25	1,36

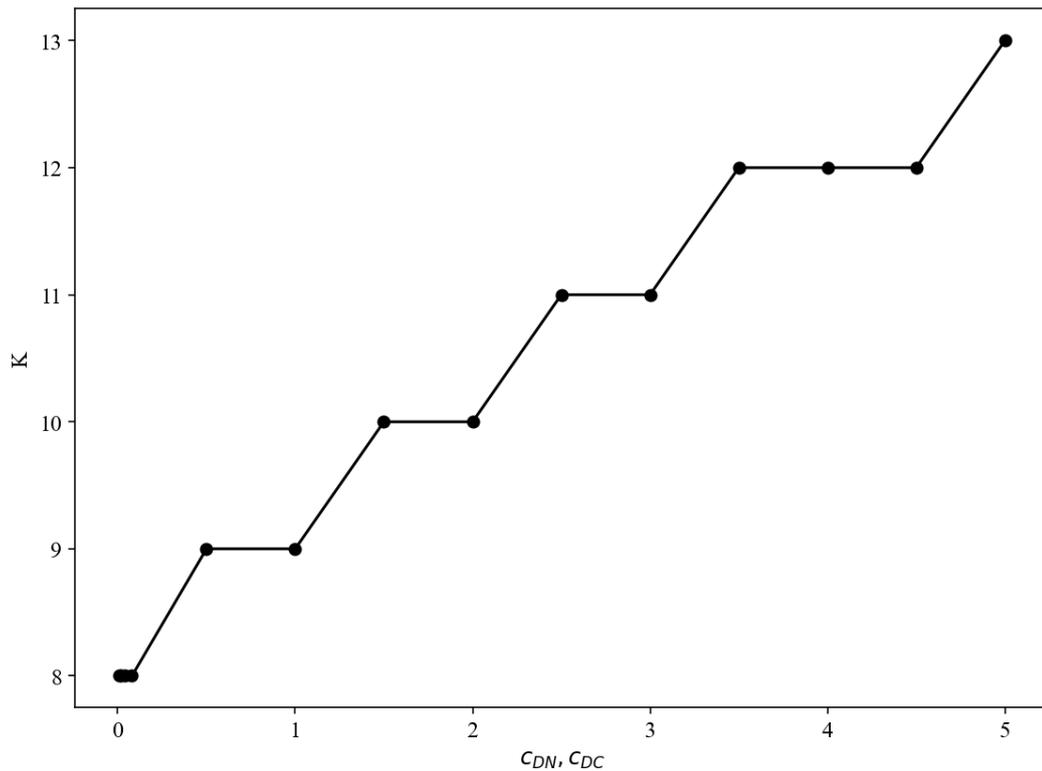
Fonte: O Autor (2025).

Na Tabela 2, encontram-se os valores dos parâmetros mencionados na sub-seção 4.2, juntamente com as variáveis de decisão e a função objetivo. A otimização do modelo matemático resultou em um número de inspeções igual a $K=8,00$, um intervalo de tempo entre inspeções de $\Delta=0,37$, e um período de tempo para a realização da manutenção preventiva planejada de $T=3,25$. A função objetivo, que é a taxa de custo, foi determinada como sendo $C_\infty=1,36$. O intervalo de tempo entre inspeções sugere uma abordagem proativa para identificar defeitos antes que eles se agravem, enquanto o período $T=3,25$ para a manutenção preventiva planejada garante que o sistema seja renovado regularmente, prevenindo falhas catastróficas.

Figura 4 - Taxa de custo em função de c_{DN} , c_{DC} 

Fonte: O Autor (2025).

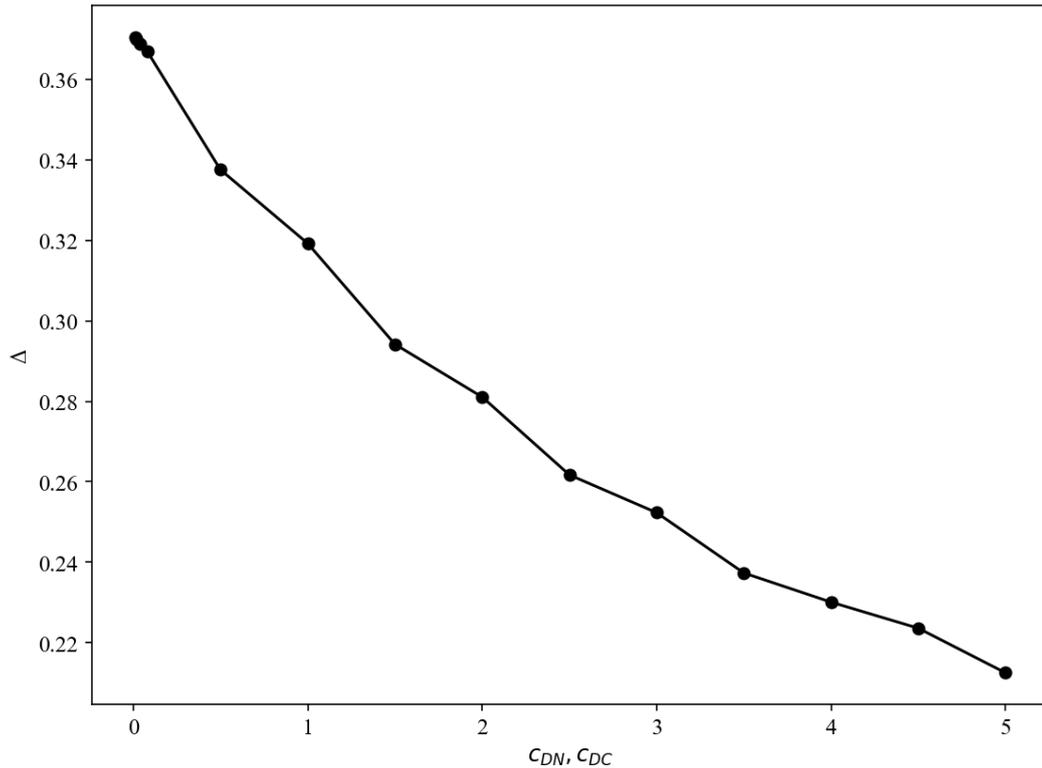
A figura 4, amostra a relação entre a taxa de custo, e os custos de permanência no estado defeituoso produzido por a degradação natural (c_{DN}) e choques (c_{DC}). À medida que os custos no estado defeituoso ocasionados por degradação natural e choques aumentam, a taxa de custo também se incrementa de maneira contínua. O comportamento sugere uma relação direta e significativa entre o estado do sistema e seus custos operacionais. Inicialmente, a taxa de custo é relativamente baixa quando os valores de c_{DN} e c_{DC} estão perto de zero, dando como resultado uma $C_\infty = 1,34$. No entanto, à medida que esses custos aumentam, observa-se um incremento gradual na taxa de custo, alcançando cerca de 1,76 quando c_{DN} e c_{DC} chegam a um valor de 5 unidades monetárias por unidade de tempo. Por outro lado, à medida que o sistema se deteriora e enfrenta mais choques, os custos associados à sua manutenção e operação se elevam de maneira mais pronunciada.

Figura 5 - Número de inspeções em função de c_{DN} , c_{DC} 

Fonte: O Autor (2025).

A figura 5 amostra o comportamento do número de inspeções em função dos custos no estado defeituoso devido à degradação natural (c_{DN}) e choques (c_{DC}). No ponto inicial, com valores de c_{DN} e c_{DC} próximos de zero, o número de inspeções (K) é de cerca de 8. Isso sugere que, mesmo quando os custos no estado defeituoso são baixos, é necessário realizar um número significativo de inspeções para manter a eficiência do sistema. Conforme os valores de c_{DN} e c_{DC} aumentam de 0 a 6, observa-se um incremento contínuo no número de inspeções, que chega a aproximadamente 13. Os custos de permanecer no estado defeituoso aumentam, a política de manutenção ajusta-se para aumentar a frequência das inspeções. Por fim, essa relação também implica na necessidade de um planejamento de recursos adequado. Aumentar o número de inspeções determina o aumento de mais horas de trabalho e mais equipamentos e ferramentas, o que deve ser considerado na alocação de recursos para a manutenção.

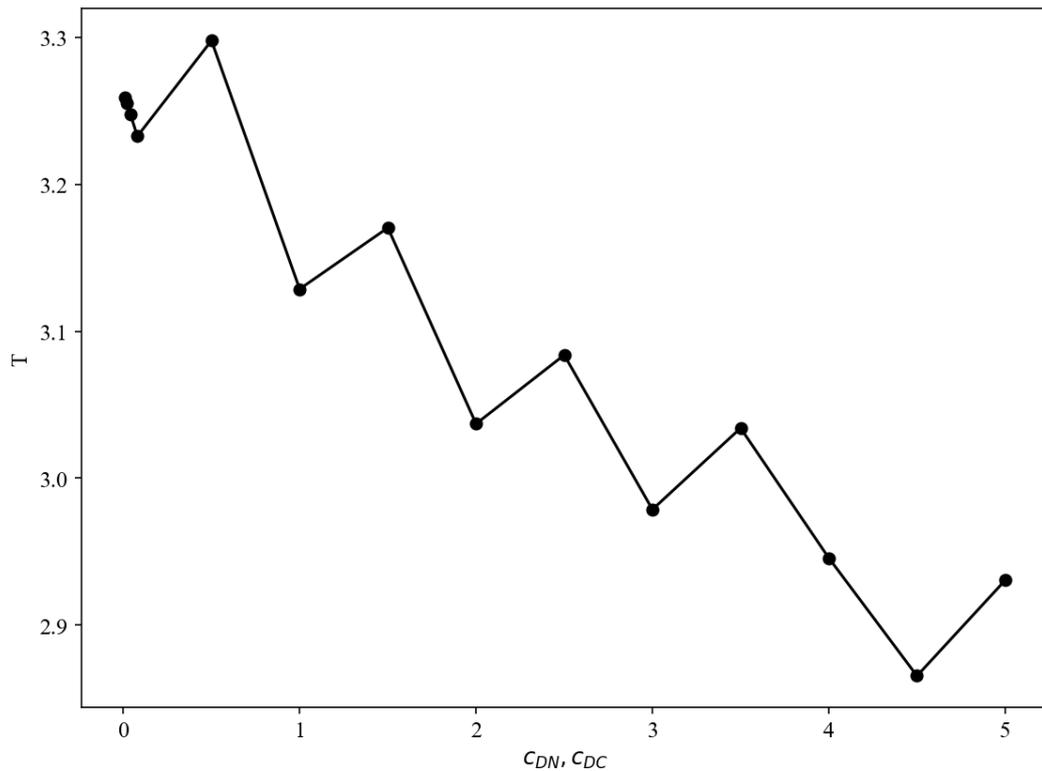
Figura 6 - Intervalo de tempo entre inspeções em função de c_{DN} , c_{DC}



Fonte: O Autor (2025).

A figura 6 apresentada ilustra a relação entre os custos de permanência no estado defeituoso por degradação natural (c_{DN}) e choques (c_{DC}) com o intervalo de tempo entre inspeções (Δ). A linha no gráfico demonstra uma tendência decrescente, indicando que, à medida que os custos de degradação natural e choques aumentam, o intervalo de tempo entre inspeções diminui. No ponto inicial, com valores de c_{DN} e c_{DC} próximos de 0, o intervalo de tempo entre inspeções (Δ) é aproximadamente 0,37 unidade de tempo. Isso indica que, quando os custos de estado defeituoso são baixos, o sistema pode permitir intervalos maiores entre inspeções, mantendo ainda a eficiência. À medida que os valores de c_{DN} e c_{DC} aumentam de 0 a 5, observa-se uma redução gradual no intervalo de tempo entre inspeções, que chega a cerca de 0,20. Esta tendência sugere que, conforme os custos de permanência no estado defeituoso aumentam, a política de manutenção ajusta-se para reduzir o tempo entre inspeções. Realizar inspeções com maior frequência permite identificar e corrigir defeitos em etapas iniciais. Além disso, é mais econômico e eficiente realizar inspeções frequentes do que arcar com os custos associados a longos períodos de operação em estado defeituoso.

Figura 7 - Tempo para ação da manutenção preventiva em função de c_{DN} , c_{DC}



Fonte: O Autor (2025).

A figura 7 apresenta a relação entre os custos de permanência no estado defeituoso por degradação natural (c_{DN}) e choques (c_{DC}) com o tempo de manutenção preventiva planejada (T). A linha no gráfico revela uma tendência geral de diminuição do tempo de manutenção preventiva planejada à medida que os custos de degradação natural e choques aumentam, com algumas variações ao longo do tempo. Além disso, os valores de c_{DN} e c_{DC} próximos de zero, o tempo de manutenção preventiva planejada (T) é de aproximadamente 3,25. Isso indica que, quando os custos de estado defeituoso são baixos, o sistema pode permitir períodos maiores para realização da manutenção preventiva planejadas, mantendo ainda a eficiência do sistema. À medida que os valores de c_{DN} e c_{DC} aumentam, observa-se uma redução gradual no tempo de manutenção preventiva planejada, chegando a cerca de 2,90. Realizar manutenções preventivas com maior frequência permite corrigir potenciais defeitos antes que se transformem em falhas graves, resultando em custos mais elevados.

4.4 Análise de sensibilidade

Para conduzir uma análise de sensibilidade mais abrangente, realizamos variações em cada parâmetro, tanto aumentando quanto diminuindo seus valores, a fim de observar minuciosamente o impacto dessas variações no modelo. Esse processo, iniciado a partir do caso

base, nos permite compreender melhor a dinâmica e a resposta do modelo diante de diferentes cenários.

Tabela 3 - Análise de sensibilidade do parâmetro η_1

Parâmetros de entrada										Variáveis de decisão			Ótimo	- (base)		
η_1	η_2	β_1	β_2	α	λ	μ	c_F	c_I	c_{DN}	c_{DC}	c_P	K	Δ	T	C_∞	$C_\infty - \%$
0,10	3,00	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	9	0,35	3,43	1,38	1,10
0,15	3,00	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	9	0,35	3,42	1,37	0,75
0,30	3,00	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,25	1,36	0,00
0,45	3,00	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,24	1,36	-0,18
0,60	3,00	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,24	1,35	-0,45

Fonte: O Autor (2025).

A Tabela 3, apresenta a análise de sensibilidade do parâmetro η_1 , avaliando como as mudanças afetam as variáveis de decisão e a taxa de custo. Além, disso, o número de inspeções varia de 9 a 8, quando η_1 varia de 0,1 a 0,6 unidade de tempo, isto impacta o intervalo entre inspeções variando ligeiramente de 0,35 para 0,37 unidade de tempo. O tempo para manutenção preventiva diminui de 3,43 para 3,24 unidades de tempo, sugerindo ajustes na frequência das inspeções e na realização da manutenção preventiva para evitar custos elevados associados às falhas. A variação percentual da taxa de custo em relação à política proposta (linha 3 da Tabela 3) diminui 0,45%. Assim, o sistema diminui a faixa de realização de manutenção preventiva para evitar um custo mais elevado aplicando a manutenção corretiva.

Tabela 4 - Análise de sensibilidade do parâmetro η_2

Parâmetros de entrada										Variáveis de decisão			Ótimo	- (base)		
η_1	η_2	β_1	β_2	α	λ	μ	c_F	c_I	c_{DN}	c_{DC}	c_P	K	Δ	T	C_∞	$C_\infty - \%$
0,30	1,50	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	3	0,39	1,49	1,78	31,12
0,30	2,00	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	5	0,36	2,10	1,57	15,75
0,30	3,00	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,25	1,36	0,00
0,30	4,00	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	11	0,38	4,46	1,25	-7,76
0,30	6,00	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	18	0,39	7,30	1,16	-14,91

Fonte: O Autor (2025).

A Tabela 4, apresenta a análise de sensibilidade do parâmetro η_2 , variando de 1,5 até 6 unidades de tempo, enquanto os outros parâmetros permanecem constantes. O efeito dessas alterações nas variáveis de decisão é o seguinte: o número de inspeções aumenta de 3 para 18 à medida que η_2 aumenta. O intervalo entre inspeções (Δ) se expande quando $\eta_2 = 1,5$ e

$\eta_2 = 6,00$ levando o parâmetro até $\Delta = 0,39$ unidades de tempo, e o tempo de aplicar a manutenção preventiva aumenta de forma constante ao aumentar η_2 . Adicionalmente, a variação percentual em relação à política proposta (linha 3 da tabela 4) aumenta em 31,12% quando $\eta_2 = 1.50$ e a taxa de custo aumenta a 1,78. Com o aumento do parâmetro $\eta_2 = 6,00$, a taxa de custo diminui para 1.16 em relação à política proposta, com uma variação percentual de -14.91%. O aumento do parâmetro η_2 resulta em uma redução da taxa de custo em relação à política proposta. Isso ocorre porque o equipamento permanece por um período de tempo mais longo em boas condições.

Tabela 5 - Análise de sensibilidade do parâmetro β_1

Parâmetros de entrada										Variáveis de decisão					Ótimo	- (base)
η_1	η_2	β_1	β_2	α	λ	μ	c_F	c_I	c_{DN}	c_{DC}	c_P	K	Δ	T	C_∞	$C_\infty - \%$
0,30	3,00	2,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,23	1,36	0,16
0,30	3,00	2,50	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,24	1,36	0,08
0,30	3,00	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,25	1,36	0,00
0,30	3,00	3,50	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,25	1,36	-0,07
0,30	3,00	4,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,25	1,36	-0,14

Fonte: O Autor (2025).

A tabela 5, apresentada a variação do parâmetro β_1 de 2,00 a 4,00, mantendo os demais parâmetros constantes, para observar suas influências nas variáveis de decisão. O número de inspeções e o intervalo entre inspeções mantem-se constantes em $K=8$ e $\Delta = 0,37$ unidades de tempo. O tempo para ação de manutenção preventiva diminui quando o parâmetro β_1 é diminuído e se mantém constante quando este aumenta. Impactando ligeiramente a taxa de custo (C_∞) comparada com à política proposta (linha 3 da tabela 5), mostrando as variações percentuais não significativas, observa-se que o aumento de β_1 resulta em uma diminuição da taxa de custo, com variações percentuais de -0,14% em relação à política proposta (linha 3 da tabela 5). Quando o parâmetro β_1 é alto permite prever em qual período de tempo o equipamento poderia apresentar um defeito ou uma falha.

Tabela 6 - Análise de sensibilidade do parâmetro β_2

Parâmetros de entrada										Variáveis de decisão			Ótimo	- (base)		
η_1	η_2	β_1	β_2	α	λ	μ	c_F	c_I	c_{DN}	c_{DC}	c_P	K	Δ	T	C_∞	$C_\infty - \%$
0,30	3,00	3,00	2,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	15	0,35	5,57	1,41	3,73
0,30	3,00	3,00	2,50	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	10	0,36	3,88	1,38	1,62
0,30	3,00	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,25	1,36	0,00
0,30	3,00	3,00	3,50	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	7	0,38	2,97	1,34	-1,30
0,30	3,00	3,00	4,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	7	0,38	2,92	1,33	-2,36

Fonte: O Autor (2025).

A Tabela 6, apresenta a modificação do parâmetro β_2 analisando seu impacto nos custos e variáveis de decisão. Os parâmetros de entrada, são mantidos constantes, enquanto β_2 é variado de 2,00 a 4,00. Com o aumento de β_2 , observa-se uma variação no número de inspeções (K) e nos intervalos entre elas (Δ), bem como no tempo para manutenção preventiva (T). A taxa de custo, inicialmente aumenta ligeiramente, alcançando um pico em $\beta_2=2,00$ com uma variação percentual de 3,73%, e então diminui progressivamente, atingindo seu valor mais baixo em $\beta_2=4,00$, com uma variação percentual de -2,36% todo isto em comparação com a política proposta (linha 3 da tabela 6). Esta análise sugere que, quando observamos uma curva Weibull com um parâmetro β_2 elevado, como $\beta_2 = 4$, notamos que a forma da curva se torna bastante alta e estreita. Indica que há um período muito específico em que a maioria das falhas ou defeitos podem acontecer, permitindo realizar uma política de manutenção mais efetiva.

Tabela 7 - Análise de sensibilidade do parâmetro α

Parâmetros de entrada										Variáveis de decisão			Ótimo	- (base)		
η_1	η_2	β_1	β_2	α	λ	μ	c_F	c_I	c_{DN}	c_{DC}	c_P	K	Δ	T	C_∞	$C_\infty - \%$
0,30	3,00	3,00	3,00	0,000	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,24	1,32	-2,92
0,30	3,00	3,00	3,00	0,025	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,24	1,34	-1,49
0,30	3,00	3,00	3,00	0,050	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,25	1,36	0,00
0,30	3,00	3,00	3,00	0,100	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,26	1,40	3,15
0,30	3,00	3,00	3,00	0,200	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	9	0,36	3,53	1,50	10,19

Fonte: O Autor (2025).

A Tabela 7, o parâmetro α varia de 0,000 a 0,200. Observa-se que, à medida que α aumenta, impacta no número de inspeções (K), no intervalo entre inspeções (Δ) e no tempo para manutenção preventiva (T). A taxa de custo ótima (C_∞) inicialmente diminui para $\alpha = 0,000$,

com uma variação percentual de -2,92%, indicando uma redução da taxa de custo de 1,32 unidades monetárias. No entanto, conforme α aumenta, os custos variam ligeiramente, alcançando um pico de aumento significativo em $\alpha = 0,200$ com uma variação percentual de 10,19%. Esta análise sugere que valores baixos de α diminuem a proporção de componentes fracos no sistema, enquanto valores altos de α podem resultar em aumentos consideráveis nos custos operacionais, pois aumentam a proporção de componentes fracos no sistema. Portanto, o parâmetro α representa a proporção ou peso de cada componente dentro da mistura. Além disso, α indica a fração de falhas que seguem a primeira distribuição em relação à segunda, a modificação do parâmetro α deve ser cuidadosamente gerenciada para otimizar a eficiência e os custos do sistema de manutenção.

Tabela 8 - Análise de sensibilidade do parâmetro λ

Parâmetros de entrada					Variáveis de decisão							Ótimo	- (base)			
η_1	η_2	β_1	β_2	α	λ	μ	c_F	c_I	c_{DN}	c_{DC}	c_P	K	Δ	T	C_∞	$C_\infty - \%$
0,30	3,00	3,00	3,00	0,05	0,50	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	5	0,59	3,49	1,12	-17,40
0,30	3,00	3,00	3,00	0,05	0,75	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	7	0,43	3,40	1,26	-7,66
0,30	3,00	3,00	3,00	0,05	1,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	8	0,37	3,25	1,36	0,00
0,30	3,00	3,00	3,00	0,05	2,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	11	0,25	2,96	1,66	21,95
0,30	3,00	3,00	3,00	0,05	3,00	0,500	5,00	0,10	0,04	0,04	1,00	12	0,21	2,70	1,87	37,36

Fonte: O Autor (2025).

A análise da Tabela 8, determina a variação do parâmetro λ , essa medida representa o inverso do tempo médio do *delay time*, impacta diretamente nas variáveis de decisão e nos custos de manutenção. Inicialmente, um λ mais baixo (0,50) resulta em menores custos operacionais, como indicado pela redução de 17,40% em relação a taxa de custo da política proposta (linha 3 da tabela 8). No entanto, à medida que λ aumenta, há uma necessidade de aumentar a frequência das inspeções (K), reduzindo os intervalos entre elas (Δ), o que implica em um aumento dos custos de manutenção. Em $\lambda = 3,00$, os custos operacionais aumentam significativamente, com uma variação percentual de 37,36% a mais que a política proposta. Portanto, valores mais altos de λ levam a aumentar os custos. Políticas de manutenção devem ser adaptadas para equilibrar a frequência de inspeções e os custos associados.

Tabela 9 - Análise de sensibilidade do parâmetro μ

Parâmetros de entrada							Variáveis de decisão						Ótimo	-(base)		
η_1	η_2	β_1	β_2	α	λ	μ	c_F	c_I	c_{DN}	c_{DC}	c_P	K	Δ	T	C_∞	$C_\infty - \%$
0,30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.100	5.00	0.10	0.04	0.04	1.00	4	0.56	2.64	0.91	-33.17
0,30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.300	5.00	0.10	0.04	0.04	1.00	6	0.43	2.92	1.14	-16.09
0.30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.500	5.00	0.10	0.04	0.04	1.00	8	0.37	3.25	1.36	0.00
0,30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.900	5.00	0.10	0.04	0.04	1.00	11	0.32	3.75	1.79	31.46
0,30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	1.000	5.00	0.10	0.04	0.04	1.00	12	0.31	3.98	1.89	39.23

Fonte: O Autor (2025).

A análise da Tabela 9, demonstra que o parâmetro μ está relacionado à taxa de falhas produzidos pela chegada dos choques no sistema, impacta significativamente as decisões de manutenção e os custos operacionais. Inicialmente, um valor baixo de μ (0,100) resulta em uma redução significativa nos custos de manutenção, com uma diminuição percentual de 33,17% em relação ao caso base (linha 3 da tabela 9). Contudo, à medida que μ aumenta, há uma necessidade crescente de aumentar o número de inspeções (K), o que se reflete em um aumento dos custos de manutenção. Em $\mu = 1$, os custos operacionais aumentam consideravelmente, com uma variação percentual positiva de 39,23%. Isso sugere que altos valores de μ implicam em maiores frequências de falhas produzidas por choques, exigindo mais inspeções em períodos de tempo mais curtos e resultando em custos mais elevados. Portanto, a necessidade de políticas de manutenção mais frequentes e intensivas para sistemas sujeitos a maiores taxas de choques.

Tabela 10 - Análise de sensibilidade do parâmetro c_F

Parâmetros de entrada							Variáveis de decisão						Ótimo	-(base)		
η_1	η_2	β_1	β_2	α	λ	μ	c_F	c_I	c_{DN}	c_{DC}	c_P	K	Δ	T	C_∞	$C_\infty - \%$
0,30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.500	1.50	0.10	0.04	0.04	1.00	0	0.00	13.79	0.44	-51.92
0,30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.500	2.00	0.10	0.04	0.04	1.00	0	0.00	3.47	0.86	-37.02
0.30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.500	5.00	0.10	0.04	0.04	1.00	8	0.37	3.25	1.36	0.00
0,30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.500	10.00	0.10	0.04	0.04	1.00	13	0.21	2.92	1.77	29.83
0,30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.500	15.00	0.10	0.04	0.04	1.00	16	0.16	2.74	2.05	50.91

Fonte: O Autor (2025).

A análise da Tabela 10, revela que o parâmetro c_F tem um impacto significativo nas decisões de manutenção e nos custos operacionais. Quando c_F é baixo (1,00), há uma redução

considerável nos custos de manutenção, refletida em uma diminuição de 29,96% em relação da taxa de custo da política proposta (linha 3da tabela 10). Conforme c_F aumenta, os custos de manutenção aumentam, culminando em uma variação percentual positiva de 28,18%. Isso indica que um aumento no custo de renovação corretiva resultando em um aumento significativo nos custos operacionais totais. O intervalo entre as inspeções diminui e a frequência de inspeções (K) também precisa ser ajustada para lidar com os custos crescentes, exigindo mais inspeções quando c_F aumenta. Quando c_F é baixo é melhor aplicar a manutenção corretiva sem realizar inspeções. Portanto, é crucial gerenciar os custos de renovação corretiva e a frequência das inspeções para manter a eficiência e a viabilidade econômica do sistema de manutenção de motobombas.

Tabela 11 - Análise de sensibilidade do parâmetro c_I

Parâmetros de entrada								Variáveis de decisão						Ótimo	- (base)	
η_1	η_2	β_1	β_2	α	λ	μ	c_F	c_I	c_{DN}	c_{DC}	c_P	K	Δ	T	C_∞	$C_\infty - \%$
0,30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.500	5.00	0.01	0.04	0.04	1.00	50	0.10	4.90	0.95	-29.96
0,30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.500	5.00	0.05	0.04	0.04	1.00	16	0.24	3.94	1.20	-11.95
0,30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.500	5.00	0.10	0.04	0.04	1.00	8	0.37	3.25	1.36	0.00
0,30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.500	5.00	0.20	0.04	0.04	1.00	4	0.57	2.76	1.56	14.53
0,30	3.00	3.00	3.00	0.05	1.00	0.500	5.00	0.50	0.04	0.04	1.00	0	0.00	1.56	1.74	28.18

Fonte: O Autor (2025).

A análise da Tabela 11 revela que o custo de inspeção (c_I) tem um impacto significativo nas decisões de manutenção e nos custos operacionais do sistema. Quando c_I é baixo (0,01), os custos de manutenção diminuem consideravelmente, refletidos em uma redução de 29,96% na taxa de custo em relação com a política proposta (linha 3 da tabela 11). No entanto, conforme c_I aumenta, os custos de manutenção também aumentam, culminando em uma variação percentual positiva de 28,18% em $c_I = 0,50$. O aumento no custo de inspeção exige ajustes na frequência das inspeções, resultando em menos inspeções (K) enquanto c_I aumenta. Dessa forma, A análise destaca a necessidade de equilibrar os custos de inspeção e a frequência das inspeções para manter a viabilidade econômica e a eficiência do sistema de manutenção de motobombas.

4.5 Comparação da Política de Manutenção com Outras Políticas

A política de manutenção proposta é comparada com três políticas distintas. Essas políticas diferem na forma como é realizada a manutenção preventiva e corretiva, impactando diretamente a confiabilidade do sistema, os custos operacionais e a disponibilidade dos equipamentos.

1. Política de inspeções ($K\Delta = T = \infty$)

Nesta política, a manutenção ocorre unicamente por meio de inspeções periódicas, sem a realização de intervenções preventivas programadas. Durante uma inspeção, caso o defeito seja identificado, procede-se com a substituição preventiva do equipamento. Se o defeito não for detectado, o sistema opera até a falha, momento em que é realizada a manutenção corretiva.

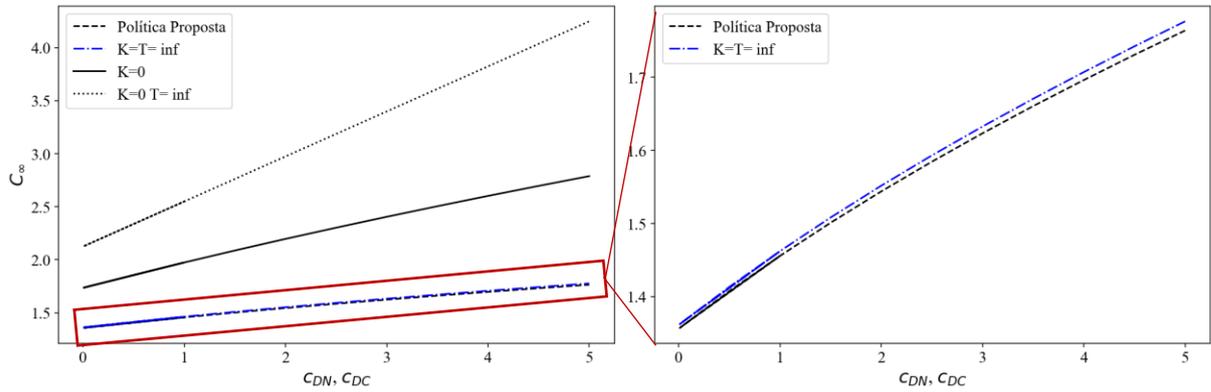
2. Política de substituição por idade ($K=0$, otimização de T)

Na política, não há a realização de inspeções periódicas, e o foco da política está na determinação da idade T ótima para realizar uma substituição preventiva do componente. O equipamento é mantido em operação até atingir a idade T , momento em que a manutenção planejada é executada. Se ocorrer uma falha antes do tempo T , aplica-se a manutenção corretiva. O objetivo dessa política é otimizar T para minimizar a taxa de custo, considerando a relação entre os custos preventivos e corretivos.

3. Política puramente corretiva sem inspeções ($T=\infty$ e $K=0$)

Esta política representa o uso extremo do equipamento, sem inspeção ou manutenção preventiva planejada. Após a falha, é realizada a substituição corretiva. Esse modelo representa uma política de manutenção reativa, no qual as falhas são tratadas conforme ocorrem, sem medidas preventivas para mitigação do risco de falha.

Figura 8. Comparação das políticas



Fonte: o autor (2025)

Na figura 8, são comparadas as três políticas de manutenção com a política proposta, observa-se a política com a maior taxa de custo é aquela que o equipamento é operado até a falha, momento que são realizadas ações corretivas. Em seguida, a política baseada em manutenções corretivas planejadas também apresenta um aumento significativo da taxa de custos. Por outro lado, a política que adota inspeções periódicas em intervalos pré-determinados inicialmente não apresenta uma diferença significativa em relação à política proposta. No entanto, à medida que aumenta o custo no estado defeituoso seja por degradação natural e por choque, a política proposta resulta em um aumento mais controlado da taxa de custos, demonstrando maior eficiência operacional em comparação com as demais políticas analisadas. Isso indica que, a longo prazo impacta outros parâmetros, a nossa política proporciona uma melhoria na relação custo-benefício, reduzindo a taxa de crescimento dos custos operacionais.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões derivadas do estudo realizado, assim como, as limitações e as sugestões de trabalhos futuros. Ao discutir essas conclusões, podemos destacar as descobertas mais significativas e oferecer uma análise aprofundada de seu impacto e relevância para as motobombas. Além disso, a importância dos sistemas de distribuição de água para a saúde e qualidade de vida das comunidades fica evidente a necessidade de garantir sua eficiência e confiabilidade por meio de políticas de manutenção adequadas. A manutenção proativa não apenas maximiza a vida útil dos equipamentos, mas também contribui para a prevenção de falhas e interrupções no fornecimento de água potável. No entanto os desafios tradicionais de manutenção, como operação contínua e desgaste natural, torna essencial considerar os impactos dos choques externos, que podem resultar na degradação maior dos equipamentos.

5.1 Conclusões

A análise dos resultados deste estudo revelou que a implementação da política de manutenção proposta traz benefícios para a gestão e operação de sistemas de motobombas em redes de distribuição de água. A abordagem de considerar a chegada de choques externos e os custos de permanência no estado defeituoso permite entender o impacto desses dois fatores, um externo e outro interno, no equipamento, facilitando uma gestão mais eficiente e econômica. Primeiramente, a inclusão dos custos de permanência no estado defeituoso proporciona uma perspectiva financeira mais precisa, incentivando intervenções de manutenção mais rápidas e eficazes. Essa abordagem não apenas reduz os custos diretos de reparo, mas também minimiza os custos indiretos associados à operação de um equipamento defeituoso, como o aumento do consumo de energia e a redução da eficiência de bombeamento. Esse aspecto é crucial, pois garante que a motobomba opere de forma otimizada, evitando desperdícios de recursos.

Além disso, a consideração dos choques externos, como cavitação, obstrução por partículas sólidas e variações elétricas, permite uma modelagem mais abrangente dos fatores que influenciam a degradação e falha das motobombas. A capacidade de prever e mitigar os impactos desses choques é essencial para manter a continuidade do serviço e evitar interrupções no abastecimento de água. Dessa forma, a política de manutenção proposta aborda esses choques de maneira eficaz, proporcionando um modelo robusto que pode ser adaptado a diferentes condições operacionais e ambientais. Por outro lado, a otimização dos intervalos entre inspeções e o tempo recomendado para manutenção preventiva baseada na idade do equipamento demonstrou ser uma política eficaz para prolongar a vida útil das motobombas e

reduzir as ocorrências de falhas. A análise de sensibilidade realizada no estudo confirmou a robustez do modelo, indicando que a política proposta é capaz de se adaptar a diferentes cenários e variáveis, mantendo sua eficácia em minimizar custos do sistema.

Adicionalmente, a política de manutenção proposta contribui para a sustentabilidade ambiental. Ao otimizar o uso de energia e minimizar o desperdício de água, o modelo promove práticas de gestão mais sustentáveis e alinhadas com os objetivos de preservação dos recursos naturais. A eficiência energética das motobombas é maximizada, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Por fim, a pesquisa destaca a importância de uma abordagem integrada e holística na gestão da manutenção de sistemas críticos.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A pesquisa sugere várias direções promissoras para trabalhos futuros que podem ampliar e aprofundar os conhecimentos adquiridos. Primeiramente, a integração da política de manutenção proposta com tecnologias avançadas de manutenção preditiva e monitoramento em tempo real utilizando sensores e IoT (Internet das Coisas) é altamente recomendada. Essa abordagem permitirá a coleta de dados em tempo real, proporcionando uma base sólida para decisões de manutenção mais precisas e eficientes. Além disso, a realização de análises de impacto ambiental é essencial para avaliar como a implementação da política de manutenção pode contribuir para a redução das emissões de carbono e o uso eficiente dos recursos hídricos e energéticos. Aplicar o modelo proposto em diferentes contextos, como sistemas de distribuição de energia elétrica e redes de telecomunicações, controle de vírus informáticos, também é uma área frutífera a ser explorada, pois permitirá verificar a aplicabilidade e eficácia da política em outros setores críticos.

Outra linha de pesquisa relevante é o desenvolvimento de modelos de choques mais complexos, considerando diferentes tipos de choques e suas interações, o que pode melhorar significativamente a precisão das previsões e das políticas de manutenção.

O modelo apresenta limitações em relação a vários aspectos. Primeiro, a estimativa de parâmetros é um desafio significativo devido à falta de dados adequados de manutenção nas empresas. Isso dificulta a obtenção de estimativas precisas e confiáveis para os parâmetros do modelo, afetando sua aplicabilidade e efetividade em diferentes contextos operacionais.

Além disso, a generalização do modelo nem sempre é viável. Sua aplicabilidade pode variar de acordo com o setor crítico, como a distribuição de energia elétrica ou as redes de

telecomunicações. Cada setor tem características e requisitos específicos que podem limitar a efetividade do modelo proposto.

Finalmente, a consideração de choques externos e a degradação natural do sistema. Integrar esses fatores no modelo aumenta sua complexidade e pode limitar a precisão das previsões e políticas de manutenção. À medida que os sistemas enfrentam diferentes tipos de choques e taxas de degradação, o modelo deve se adaptar para refletir essas variações, o que nem sempre é simples.

REFERÊNCIAS

KOMBO MPINDOU; G. O. M.; ESCUDER BUENO, I.; CHORDÀ RAMÓN, E. Risk analysis methods of water supply systems: comprehensive review from source to tap. *Applied Water Science*, v. 12, n. 4, p. 56, 2022.

EATON, A.; D'ALESSANDRO, F.; AHMED, W.; HASSAN, M. On the performance degradation of centrifugal pumps. In: Proceedings of the International Conference on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer, Niagara Falls, Canada. 2018. p. 7-9.

MOHAMMADI, A.; DOBARADARAN, S.; SCHMIDT, T. C.; MALAKOOTIAN, M.; SPITZ, J. Emerging contaminants migration from pipes used in drinking water distribution systems: a review of the scientific literature. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 50, p. 75134-75160, 2022.

GRIDA, M.; ZAID, A.; KHOLIEF, G. Optimization of preventive maintenance interval. In: 2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). IEEE, 2017. p. 1-7.

LEGÁT, V.; MOŠNA, F.; ALEŠ, Z.; JURČA, V. Preventive maintenance models—higher operational reliability. *Eksplatacja i Niezawodność*, v. 19, n. 1, 2017.

MCKONE, K. E.; WEISS, E. N. Guidelines for implementing predictive maintenance. *Production and Operations Management*, v. 11, n. 2, p. 109-124, 2002.

CHRISTER, ANTHONY H. Developments in delay time analysis for modelling plant maintenance. *Journal of the Operational Research Society*, v. 50, p. 1120-1137, 1999.

CHEN, M., WANG, M., & CHIEN, Y. H. A modified imperfect preventive maintenance policy under reliability limit. In: 2008 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. IEEE, 2008. p. 581-584.

CASTILLO, E.; MÍNGUEZ, R.; CASTILLO, C. Sensitivity analysis in optimization and reliability problems. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 93, n. 12, p. 1788-1800, 2008.

SPÜNTRUP, F. S.; DALLE AVE, G.; IMSLAND, L.; & HARJUNKOSKI, I. Optimal maintenance scheduling for washing of compressors to increase operational efficiency. In: *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier, 2019. p. 1321-1326.

WANG, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European journal of operational research*, v. 139, n. 3, p. 469-489, 2002.

DING, SIEW-HONG; KAMARUDDIN, SHAHRUL. Maintenance policy optimization—literature review and directions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 76, p. 1263-1283, 2015.

ALBERTI, A. R.; CAVALCANTE, C. A. A two-scale maintenance policy for protection systems subject to shocks when meeting demands. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 204, p. 107118, 2020.

CHRISTER, A. H.; WALLER, W. M. Delay time models of industrial inspection maintenance problems. *Journal of the Operational Research Society*, v. 35, n. 5, p. 401-406, 1984.

CHRISTER, A. H.; LEE, C.; WANG, W. A data deficiency based parameter estimating problem and case study in delay time PM modeling. *International Journal of Production Economics*, v. 67, n. 1, p. 63-76, 2000.

CHEN, Y. L.; CHANG, C. C. Optimum sequential preventive maintenance first or last policies with imperfect maintenance for a system subject to shocks. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, v. 51, n. 1, p. 162-178, 2022.

HAGHIGHI, F.; CASTANIER, B.; MISAIL, H. Rolling horizon optimal maintenance policy for a system subject to shocks and degradation under uncertain parameters. *Computers & Industrial Engineering*, v. 157, p. 107298, 2021.

LIU, H.; LI, B.; YAO, F.; HU, G.; XIE, L. Maintenance optimization of multi-unit balanced systems using deep reinforcement learning. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 244, p. 109921, 2024.

WEI, X.; BAI, S.; WU, B. A novel shock-dependent preventive maintenance policy for degraded systems subject to dynamic environments and N-critical shocks. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 239, p. 109535, 2023.

GAN, S.; SONG, Z.; ZHANG, L. A maintenance strategy based on system reliability considering imperfect corrective maintenance and shocks. *Computers & Industrial Engineering*, v. 164, p. 107886, 2022.

LIU, P.; WANG, G. Optimal periodic preventive maintenance policies for systems subject to shocks. *Applied Mathematical Modelling*, v. 93, p. 101-114, 2021.

ESARY, J. D.; MARSHALL, A. W. Shock models and wear processes. *The annals of probability*, p. 627-649, 1973.

ZHAO, X.; CHAI, X.; SUN, J.; QIU, Q. Optimal bivariate mission abort policy for systems operate in random shock environment. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 205, p. 107244, 2021.

MONTORO-CAZORLA, D.; PÉREZ-OCÓN, R. A reliability system under cumulative shocks governed by a BMAP. *Applied Mathematical Modelling*, v. 39, n. 23-24, p. 7620-7629, 2015.

SHAMSTABAR, Y.; SHAHRIARI, H.; SAMIMI, Y. Reliability monitoring of systems with cumulative shock-based deterioration process. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 216, p. 107937, 2021.

LI, Z.; ZHAO, P. Reliability analysis on the δ -Shock model of complex systems. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 56, n. 2, p. 340-348, 2007.

BIAN, L.; MA, M.; LIU, H.; YE, J. H. Lifetime distribution of two discrete censored δ shock models. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, v. 48, n. 14, p. 3451-3463, 2019.

ROOZEGAR, R.; ENTEZARI, M.; NADARAJAH, S. A new mixed δ -shock model and associated reliability properties. *Stochastic Models*, p. 1-29, 2023.

LI, S. Delta-shock for a class of systems of conservation laws of the Keyfitz–Kranzer type. *Mathematische Nachrichten*, v. 297, n. 3, p. 1042-1061, 2024.

OZKUT, M. Reliability and optimal replacement policy for a generalized mixed shock model. *Test*, v. 32, n. 3, p. 1038-1054, 2023.

ZHAO, X.; QI, X.; WANG, X. Reliability assessment for coherent systems operating under a generalized mixed shock model with multiple change points of the environment. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 239, p. 109526, 2023.

SHAMSTABAR, Y.; EBRAHIMMAGHAM, N.; SHAHRIARI, H. Monitoring reliability of a system with random failure threshold under extreme shocks. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 245, p. 109973, 2024.

OZKUT, M.; KAN, C.; FRANKO, C. Analyzing the multi-state system under a run shock model. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, p. 1-13, 2024.

GONG, M.; XIE, M.; YANG, Y. Reliability assessment of system under a generalized run shock model. *Journal of Applied Probability*, v. 55, n. 4, p. 1249-1260, 2018.

WANG, C.; BOURI, E.; XU, Y.; ZHANG, D. Intraday and overnight tail risks and return predictability in the crude oil market: Evidence from oil-related regular news and extreme shocks. *Energy Economics*, v. 127, p. 107121, 2023.

DONG, W.; LIU, S.; CAO, Y.; JAVED, S. A.; DU, Y. Reliability modeling and optimal random preventive maintenance policy for parallel systems with damage self-healing. *Computers & Industrial Engineering*, v. 142, p. 106359, 2020.

TORNYEVIADZI, H. M.; MOHAMMED, H.; SEIDU, R. Dynamic segment criticality analysis: A precursor to scheduling of maintenance routines in water distribution networks. *Alexandria Engineering Journal*, v. 61, n. 12, p. 9261-9272, 2022.

WANG, H.; CHEN, X. Optimization of maintenance planning for water distribution networks under random failures. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 142, n. 2, p. 04015063, 2016.

AWOPETU, M. S.; COKER, A. O.; ARIBISALA, J. O.; AWOPETU, S. O. Water quality in a pipe distribution network: a case study of a communal water distribution network in Ibadan, Nigeria. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, v. 171, p. 175-186, 2013.

STACHURA, M.; FAJDEK, B.; STUDZINSKI, J. Model based decision support system for communal water networks. In: *ISC'2012 Conference, Brno*. 2012. p. 19-23.

MACKAY, R. C. Routine pump maintenance is it all necessary?. CANADIAN PULP & PAPER ASSOC, MONTREAL(CAN). 1993., 1993.

BROZOSKI, A. Centrifugal motor pump design, year of creation, available in 2018, <https://grabcad.com/library/centrifugal-pump-167>.

BIANCHINI, A.; PELLEGRINI, M.; ROSSI, J. Maintenance scheduling optimization for industrial centrifugal pumps. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, v. 10, n. 4, p. 848-860, 2019.

KOTELEVA, N.; VALNEV, V.; & FRENKEL, I. Investigation of the effectiveness of an augmented reality and a dynamic simulation system collaboration in oil pump maintenance. *Applied Sciences*, v. 12, n. 1, p. 350, 2021.

STOPA, M. M.; CARDOSO FILHO, B. J.; MARTINEZ; C. B. Incipient detection of cavitation phenomenon in centrifugal pumps. *IEEE Transactions on industry applications*, v. 50, n. 1, p. 120-126, 2013.

HATSEY, N. H.; BIRKIE, S. E. Total cost optimization of submersible irrigation pump maintenance using simulation. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 27, n. 1, p. 187-202, 2021.

RUHI, S.; KARIM, M. R. Selecting statistical model and optimum maintenance policy: a case study of hydraulic pump. *SpringerPlus*, v. 5, p. 1-13, 2016.

PATIL, A.; SONI, G.; PRAKASH, A.; KARWASRA, K. Maintenance strategy selection: a comprehensive review of current paradigms and solution approaches. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 39, n. 3, p. 675-703, 2022.

BAFANDEGAN EMROOZI, V.; KAZEMI, M.; DOOSTPARAST, M.; POOYA, A. Improving Industrial Maintenance Efficiency: a Holistic Approach to Integrated Production and Maintenance Planning with Human Error Optimization. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, p. 1-26, 2023.

ACHOUCH, M.; DIMITROVA, M.; ZIANE, K.; SATTARPANAH KARGANROUDI, S.; DHOUIB, R.; IBRAHIM, H.; ADDA, M. On predictive maintenance in industry 4.0: Overview, models, and challenges. *Applied Sciences*, v. 12, n. 16, p. 8081, 2022.

SINISTERRA, W. Q.; LIMA, V. H. R.; CAVALCANTE, C. A. V. ARIBISALA, A. A. A delay-time model to integrate the sequence of resumable jobs, inspection policy, and quality for a single-component system. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 230, p. 108902, 2023.

DE JESUS SANTOS, A. C., CAVALCANTE, C. A. V., REN, J., & WU, S. A novel delay time modelling method for incorporating reuse actions in three-state single-component systems. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 234, p. 109129, 2023.

PAIVA, R. G. N. Utilização de mineração de padrões sequenciais através do algoritmo GSP e abordagem snapshot para o desenvolvimento de uma política de manutenção oportuna. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

RODRIGUES, A. J. D. S.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALBERTI, A. R. A multicriteria model to support the selection of inspection service providers based on the delay time model. *International Transactions in Operational Research*, v. 30, n. 6, p. 3554-3577, 2023.

HAO, Q.; XUE, Y.; SHEN, W.; JONES, B.; ZHU, J. A decision support system for integrating corrective maintenance, preventive maintenance, and condition-based maintenance. In: *Construction Research Congress 2010: Innovation for Reshaping Construction Practice*. 2010. p. 470-479.

ERKOYUNCU, J. A., KHAN, S., EIROA, A. L., BUTLER, N., RUSHTON, K., & BROCKLEBANK, S. Perspectives on trading cost and availability for corrective maintenance at the equipment type level. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 168, p. 53-69, 2017.

SYAMSUNDAR, A.; NAIKAN, V. N. A.; WU, S. Estimating maintenance effectiveness of a repairable system under time-based preventive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, v. 156, p. 107278, 2021.

HUO, H. Optimal Corrective Maintenance Policies via an Availability-Cost Hybrid Factor for Software Aging Systems. *Mathematics*, v. 12, n. 5, p. 694, 2024.

BACHA, S.; BELLAOUAR, A.; DRON, J. P. Assessment of the effectiveness of corrective maintenance of an oil pump using the proportional intensity model (PIM). *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 40, n. 1, p. 226-237, 2023.

ZHANG, B.; XU, L.; CHEN, Y.; LI, A. Remaining useful life based maintenance policy for deteriorating systems subject to continuous degradation and shock. *Procedia CIRP*, v. 72, p. 1311-1315, 2018.

JIN, L.; MATOBA, S. Threshold Type Maintenance Policies for Systems under Cumulative Damage from Random Shocks. In: *2020 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM)*. IEEE, 2020. p. 1-5.

GARBUS, RICHARD O.; ANGLE, THOMAS L.; STARKE, ROBERT E. Types of Pumps. In: SLOOTWEG, Henk; WELT, Carl (Eds.). *Pumping Station Design*. 3rd ed. ScienceDirect, 2008. p. 11.1-11.41.

RODRIGUES, M. V. T.; SIROVA, E.; DYNTAR, J. Maintenance Scheduling of Heating Networks using Simulation in Witness. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*, v. 21, n. 2, 2022.

URBANI, MICHELE; BRUNELLI, MATTEO; COLLAN, MIKAEL. A comparison of maintenance policies for multi-component systems through discrete event simulation of faults. *IEEE Access*, v. 8, p. 143654-143664, 2020.

LEE, JUSEONG; MITICI, MIHAELA. Multi-objective analysis of condition-based aircraft maintenance strategies using discrete event simulation. In: *2021 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, 2021. p. 1-6.

BERTOLINI, MASSIMO; BEVILACQUA, MAURIZIO. A combined goal programming AHP approach to maintenance selection problem. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 91, n. 7, p. 839-848, 2006.

CORREA, O. J. R.; CAVALCANTE, C. A. V. Otimização de políticas de manutenção oportuna para redes de distribuição de água. *SIMPEP, Anais XXX, 2023*.

AHMAD, R.; KAMARUDDIN, S.; AZID, I.; ALMANAR, I. Maintenance management decision model for preventive maintenance strategy on production equipment. 2011.

SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A.; DWIGHT, R. A.; GORDON, P. An age-based inspection and replacement policy for heterogeneous components. *IEEE Transactions on reliability*, v. 58, n. 4, p. 641-648, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Eficiência no uso da água e energia em sistemas de abastecimento. Brasília: ANA, 2020.

INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION. Energy efficiency in water supply systems. London: IWA, 2019.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. Geneva: WHO, 2021.

MELO, Y. R.; CAVALCANTE, C. A.; SCARF, P.; LOPES, R. S. A hybrid maintenance policy with fixed periodic structure and opportunistic replacement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, v. 237, n. 3, p. 579-591, 2023.

BILUS, I.; PREDIN, A. Numerical and experimental approach to cavitation surge obstruction in water pump. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, v. 19, n. 7, p. 818-834, 2009.

KINI, P. G.; BANSAL, R. C.; AITHAL, R. S. Performance analysis of centrifugal pumps subjected to voltage variation and unbalance. *IEEE transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 2, p. 562-569, 2008.