UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

YAN RIBEIRO DE MELO

PROPOSIÇÃO DE MODELO DE MANUTENÇÃO PARA SISTEMAS DE DIFÍCIL ACESSO

Recife
2025

YAN RIBEIRO DE MELO

PROPOSIÇÃO DE MODELO DE MANUTENÇÃO PARA SISTEMAS DE DIFÍCIL ACESSO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Melo, Yan Ribeiro de.
Proposição de modelo de manutenção para sistemas de difícil acesso / Yan Ribeiro de Melo. - Recife, 2025.
85f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2025.
Orientação: Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.
Inclui referências.

1. Política de Manutenção; 2. Confiabilidade; 3. Manutenção Oportuna; 4. Sistemas de Difícil Acesso. I. Cavalcante, Cristiano Alexandre Virgínio. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

YAN RIBEIRO DE MELO

PROPOSIÇÃO DE MODELO DE MANUTENÇÃO PARA SISTEMAS DE DIFÍCIL ACESSO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Aprovada em: 25/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Raphael Harry Frederico Ribeiro Kramer (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza (Examinador Externo)
Universidade de São Paulo - USP

AGRADECIMENTOS

A Deus e à espiritualidade, por toda proteção e força ao longo desta jornada.

Aos meus pais, Waléria Costa e Derlir Guimarães, pelo apoio, amor e dedicação que me permitiram chegar até aqui. Sem vocês, cada conquista teria sido muito mais difícil.

Ao meu irmão, Iury Melo, meu maior parceiro e exemplo. Sigo seus passos com admiração e gratidão por tudo que compartilhamos.

Ao restante da minha família, pelo carinho e incentivo incondicional.

Ao meu orientador, Professor Cristiano Cavalcante, pela inspiração constante na pesquisa e no ensino, além do incentivo para superar desafios acadêmicos, profissionais e pessoais.

Aos docentes que, ao longo do caminho, compartilharam não apenas conhecimento, mas também valiosos ensinamentos de vida. Um agradecimento especial aos Professores Phil Scarf, Raphael Kramer e Maísa Silva.

Aos membros da banca examinadora, Professores Cristiano Cavalcante, Raphael Kramer e Gilberto Souza, cuja contribuição foi essencial para a conclusão desta pesquisa com sucesso.

Aos meus amigos pesquisadores, especialmente Augusto Rodrigues, Carlos Renan e Rafael Paiva, por toda parceria e troca de conhecimento. Aos membros do laboratório RANDOM, meu sincero agradecimento pelo companheirismo ao longo desta jornada.

Aos amigos que o mestrado me presenteou, Eduardo Silva, Hellen Maria e Hellen Rayssa, por cada momento compartilhado, pelo apoio mútuo e pela motivação nos desafios que enfrentamos juntos.

Aos amigos de outras fases da vida, sempre ao meu lado, independentemente do tempo ou da distância: Victor Gabriel, Manoel Ribeiro, Laís Borges, Élida Moraes, Felipe Pereira, Jefferson Sercundes e Lucas Bernardo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro que viabilizou esta pesquisa e contribuiu para a concretização deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória, meu mais profundo agradecimento.

RESUMO

Este estudo investiga sistemas críticos para a sociedade, como os de geração e distribuição de energia, água e saneamento básico, com ênfase naqueles localizados em áreas remotas ou com infraestrutura complexa – os chamados sistemas de difícil acesso, que apresentam desafios de manutenção particularmente acentuados. A pesquisa propõe um modelo de manutenção fundamentado na execução de ações em períodos discretos, permitindo a integração de medidas preventivas e corretivas de acordo com a disponibilidade de recursos, caracterizada pela ocorrência de oportunidades. O modelo adota uma estrutura periódica que facilita o planejamento e a implementação das intervenções, aproximando a teoria de uma realidade operacional prática. A otimização da taxa de custo da política de manutenção é realizada por meio de algoritmos que avaliam todos os possíveis cenários de renovação do sistema, considerando parâmetros como os custos das manutenções corretiva e preventiva, o custo decorrente da inatividade após uma falha, o custo associado à garantia de uma ação de manutenção, a probabilidade de surgimento de oportunidades em visitas, os intervalos entre os períodos de visita e aspectos relacionados à vida útil do sistema. A aplicação do modelo, acompanhada de uma análise de sensibilidade, demonstrou que a política proposta é particularmente eficaz em sistemas com recursos de manutenção limitados e poucas oportunidades de intervenção. Ademais, a comparação com uma política de manutenção contínua evidenciou que a discretização dos períodos não compromete significativamente o desempenho do sistema, reforçando a viabilidade prática da abordagem. Por fim, foi desenvolvido um produto tecnológico que apoia os gestores de manutenção na tomada de decisão, contribuindo para a sustentabilidade econômica e operacional dos sistemas de difícil acesso.

Palavras-chave: Política de Manutenção; Confiabilidade; Manutenção Oportuna; Sistemas de Difícil Acesso.

ABSTRACT

This study investigates critical systems for society, such as power generation and distribution, water supply, and sanitation, with an emphasis on those located in remote areas or with complex infrastructure – commonly referred to as hard-to-access systems, which pose particularly significant maintenance challenges. The research proposes a maintenance model based on the execution of actions in discrete periods, allowing the integration of preventive and corrective measures according to resource availability, characterized by the occurrence of opportunities. The model adopts a periodic structure that facilitates the planning and implementation of interventions, bridging the gap between theory and practical operational reality. The optimization of the maintenance policy's cost rate is performed through algorithms that evaluate all possible system renewal scenarios, considering parameters such as corrective and preventive maintenance costs, downtime costs after a failure, costs associated with ensuring a maintenance action, the probability of opportunity occurrences during visits, the intervals between visit periods, and factors related to the system's lifespan. The model's application, accompanied by a sensitivity analysis, demonstrated that the proposed policy is particularly effective in systems with limited maintenance resources and few intervention opportunities. Furthermore, a comparison with a continuous maintenance policy revealed that the discretization of periods does not significantly compromise system performance, reinforcing the practical feasibility of the approach. Finally, a technological product was developed to support maintenance managers in decision-making, contributing to the economic and operational sustainability of hard-to-access systems.

Keywords: Maintenance Policy; Reliability; Opportunistic Maintenance; Hard-to-Reach Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação gráfica da política de substituição por idade 29
Figura 2 - Representação gráfica da política de substituição em bloco..... 29
Figura 3 - Representação gráfica de modelo clássico de inspeção..... 33
Figura 4 - Representação gráfica da política proposta 46
Figura 5 - Processo de tomada de decisão da política proposta 46
Figura 6 - Representação gráfica do primeiro cenário de renovação 48
Figura 7 - Representação gráfica do segundo cenário de renovação..... 49
Figura 8 - Representação gráfica do terceiro cenário de renovação..... 51
Figura 9 - Representação gráfica do quarto cenário de renovação..... 51
Figura 10 - Representação gráfica da política de manutenção recomendada..... 57
Figura 11 - Análise de sensibilidade da taxa de custo do sistema em função das variáveis de decisão para diferentes valores de W $\left(W \in \{1,\ldots,11\}\right)$ e M $\left(M \in \{9,\ldots,19\}\right)$ 58
Figura 12 - Análise de sensibilidade da taxa de inatividade do sistema em função das variáveis de decisão para diferentes valores de W $\left(W \in \{1,\ldots,11\}\right)$ e M $\left(M \in \{9,\ldots,19\}\right)$ 59
Figura 13 - Análise de sensibilidade da confiabilidade operacional do sistema em função das variáveis de decisão para diferentes valores de W $\left(W \in \{1,\ldots,11\}\right)$ e M $\left(M \in \{9,\ldots,19\}\right)$ 59
Figura 14 - Análise de sensibilidade do comportamento da política de manutenção proposta em função da probabilidade de oportunidade para os parâmetros do caso base, variando o valor de c_M ($-$ para $c_M = 0{,}25$; $\cdots$ para $c_M = 0{,}5$; $---$ para $c_M = 1$)..... 63
Figura 15 - Análise de sensibilidade das variáveis de decisão da política proposta ($-$) e da política puramente corretiva ($\cdots$) para os valores do caso base (com $o = 0{,}1$), variando c_D 66
Figura 16 - Análise de sensibilidade das variáveis de decisão da política proposta ($-$) e da política puramente corretiva ($\cdots$) para os valores do caso base (com $o = 0{,}2$), variando c_D 66
Figura 17 - Análise de sensibilidade das variáveis de decisão da política proposta ($-$) e da política puramente corretiva ($\cdots$) para os parâmetros do caso base (com $o = 0{,}4$), variando c_D 67

Figura 18 - Comparação da taxa de custo da política proposta ($-$) com seus casos especiais: política puramente oportuna ($-\cdot-$), política de manutenção por idade ($---$) e política puramente corretiva ($\cdots$) para os parâmetros do caso base, variando o e c_D 68

Figura 19 - Comparação da taxa de custo da política de manutenção contínua ($---$) e da política de manutenção discreta proposta ($-$ para $c_D = 0$; $\cdots$ para $c_D = 0{,}25$; $-\cdot-$ para $c_D = 0{,}5$) para os valores dos parâmetros do caso base (com $c_F = 4$), variando s 69

Figura 20 - Simulador do sistema de apoio à decisão desenvolvido 70

Figura 21 - Otimizador do sistema de apoio à decisão desenvolvido 71

Figura 22 - Resultados retornados pelo sistema de apoio à decisão desenvolvido 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação desta pesquisa quanto às categoriais apresentadas na literatura 37
Tabela 2 - Notação da política de manutenção proposta 41
Tabela 3 - Legenda das representações gráficas dos cenários de renovação 47
Tabela 4 - Definição dos parâmetros de entrada do modelo (caso base) 56
Tabela 5 - Análise de sensibilidade da política de manutenção proposta 60
Tabela 6 - Análise de sensibilidade dos casos especiais da política de manutenção proposta 64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pseudocódigo para simulação da política de substituição por idade..... 30
Quadro 2 - Pseudocódigo para simulação da política de substituição em bloco..... 31
Quadro 3 - Pseudocódigo para simulação da política de substituição por idade modificada..... 32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BSI	Instituição Britânica de Normas
CEN	Comitê Europeu de Normalização
GWEC	Conselho Global de Energia Eólica
IA	Inteligência Artificial
ISO	Organização Internacional de Normalização
MTBF	Tempo Médio entre Falhas
MTBOF	Tempo Médio entre Falhas Operacionais
MTTF	Tempo Médio para Falha
NBR	Norma Brasileira
O&M	Operação e Manutenção
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
RUL	Vida Útil Residual
SAD	Sistema de Apoio à Decisão
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA 15

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA 17

1.3 OBJETIVOS 19

1.4 METODOLOGIA 19

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO 21

2. REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA 22

2.1 MANUTENÇÃO E CONFIABILIDADE 22

2.1.1 Definição da Manutenção 22

2.1.2 Evolução da Manutenção 22

2.1.3 Classificação da Manutenção 23

2.1.4 Definição da Confiabilidade 25

2.1.5 Indicadores de Confiabilidade 26

2.2 POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO 28

2.2.1 Políticas de Manutenção Baseadas no Uso 28

2.2.2 Políticas de Manutenção Baseadas na Condição 32

2.3 MANUTENÇÃO OPORTUNA 35

2.4 MANUTENÇÃO EM SISTEMAS DE DIFÍCIL ACESSO 36

3. PROPOSTA DE UMA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PARA SISTEMAS DE DIFÍCIL ACESSO 41

3.1 NOTAÇÃO 41

3.2 MOTIVAÇÃO 43

3.3 CARACTERIZAÇÃO E PRESSUPOSTOS DO SISTEMA 43

3.4 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PROPOSTA 45

3.4.1 Cenários de Renovação 47

3.4.2 Casos Especiais da Política de Manutenção 53

4. ESTUDO NUMÉRICO DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PROPOSTA 56

4.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA 56

4.2 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO RECOMENDADA 57

4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 58
4.4 COMPARAÇÃO COM CASOS ESPECIAIS 63
4.5 COMPARAÇÃO COM POLÍTICA DE MANUTENÇÃO CONTÍNUA 68
4.6 PRODUTO TECNOLÓGICO DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO 69
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 72
REFERÊNCIAS 75

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de difícil acesso são caracterizados por barreiras significativas de ordem financeira, técnica e/ou operacional, que dificultam tanto o acesso quanto a manutenção dessas infraestruturas. Exemplos comuns incluem sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia (Kang; Soares, 2020; Neto; Moretti; Castro, 2015; Trentini *et al.*, 2021), além das infraestruturas de saneamento básico (Wang; Chen, 2016; Algaydi; Subyani; Hamza, 2019; Draude *et al.*, 2022).

Os parques eólicos se destacam nos sistemas de produção de energia como uma alternativa promissora aos recursos tradicionais, contribuindo para o desenvolvimento de uma sociedade mais sustentável (Sarker; Faiz, 2017; Blaabjerg; Ma, 2017). No mesmo contexto de infraestrutura energética, os gasodutos desempenham um papel fundamental no transporte de gás natural, uma fonte tanto para a geração de energia elétrica quanto para diversos outros usos industriais. A distribuição de energia, por sua vez, refere-se à etapa final no fornecimento de eletricidade, assegurando que ela alcance residências e indústrias de maneira eficiente.

No contexto de saneamento básico, as redes de abastecimento de água asseguram o fornecimento de água potável tanto para áreas urbanas quanto rurais, sendo complementadas por poços artesianos, que desempenham um papel essencial em regiões onde outras fontes de água são limitadas (Sayre; Taraz, 2019). Juntas, essas infraestruturas garantem a segurança hídrica da população. As redes de esgoto são fundamentais para proteger a saúde pública e preservar o meio ambiente, ao garantir o correto tratamento e descarte de águas residuais. Por fim, os sistemas de drenagem e manejo das águas pluviais são indispensáveis para prevenir enchentes e alagamentos.

O funcionamento adequado de cada um desses sistemas é essencial para a sociedade e estudos nessa área contribuem diretamente para o cumprimento de alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), como: (1) ODS 6: Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos; (2) ODS 7: Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos; e (3) ODS 9: Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação.

Entretanto, vários fatores contribuem para dificultar o planejamento da operação e manutenção (O&M) desses sistemas. Nos parques eólicos em alto mar, por exemplo, há a

necessidade de barcos especializados ou até mesmo transporte aéreo para a execução de atividades de manutenção (Halvorsen-Weare *et al.*, 2013), além da exposição a ambientes adversos, como tempestades, ventos fortes e altas ondas, que impedem a execução da ação de manutenção (Lubing *et al*., 2020). Nos sistemas de distribuição de água, a manutenção exige escavações, impactando a infraestrutura ao redor e o desempenho do sistema (Tornyeviadzi; Mohammed; Seidu, 2022). Além disso, há a necessidade de equipamentos especializados e, dependendo da localização, o acesso a áreas remotas para manutenção de poços artesianos (Alotaibi *et al*., 2023).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A gestão da manutenção de sistemas de difícil acesso é importante para garantir a qualidade de vida das populações que dependem dessas infraestruturas. No entanto, essa tarefa enfrenta inúmeros desafios, incluindo a complexidade logística envolvida (Rashidnejad; Ebrahimnejad; Safari, 2018), a necessidade de recursos técnicos especializados (Gundegjerde *et al*., 2015), dificuldades no monitoramento contínuo (Martin *et al*., 2016), além de limitações relacionadas à disponibilidade de pessoal, peças sobressalentes e tempo para realizar as intervenções de manutenção (Cavalcante *et al.*, 2024). Esses fatores tornam a gestão dessas operações não apenas complexa, mas também frequentemente custosa (Zhou; Yin, 2019). Isso exige com que estratégias de manutenção bem planejadas sejam propostas para manter a eficiência operacional desses sistemas.

O principal objetivo dos sistemas de distribuição de água é garantir a entrega de água de alta qualidade, em quantidade adequada, para atender às necessidades da população. Para alcançar esse objetivo, é essencial realizar ações de manutenção, como inspeções, reparos e substituições de componentes que apresentem funcionamento inadequado (Romaniuk, 2016). Entretanto, ao realizar a manutenção de sistemas de distribuição de água, o tráfego de vias pode ser interrompido, assim como o fornecimento de água para a região em questão. Por outro lado, deixar de realizar ações de manutenção não é uma opção, visto que os danos causados são ainda maiores. A perda de fornecimento de água devido ao vazamento representa hoje uma grande parcela do custo desses sistemas (Rajeswaran; Narasimhan; Narasimhan, 2018). Gupta e Kulat (2018) apontam que os vazamentos nos sistemas de distribuição de água variam de 5% (países europeus) a 50% (países emergentes). No Brasil, a proporção de água perdida na distribuição chega a 37,8% (SNIS, 2022a).

Além do abastecimento de água, os sistemas de esgoto desempenham um papel fundamental na proteção da saúde pública e do meio ambiente. A má manutenção dessas infraestruturas pode resultar em danos físicos, altos custos de reparo, impacto ambiental severo e problemas de saúde pública, como a propagação de doenças, contaminação de recursos hídricos e poluição do solo. Inundações urbanas também são frequentes em cidades onde as redes de esgoto não são adequadamente gerenciadas (Romanova *et al*., 2013).

Os gasodutos, que transportam gás natural por grandes distâncias, são também infraestruturas críticas que enfrenta desafios de difícil acesso. Diferente dos outros sistemas, o transporte de gás impõe riscos adicionais, como vazamento que podem representar uma ameaça à segurança das populações próximas (Li *et al*., 2022). A manutenção dessas estruturas é complexa e exige o monitoramento constante para garantir a segurança.

No setor de distribuição de energia elétrica, o objetivo principal é garantir o fornecimento contínuo e confiável de eletricidade para a população e indústrias. A manutenção regular é crucial para prevenir falhas no fornecimento, prolongar a vida útil dos equipamentos e garantir a segurança da rede elétrica (Heiden; Priefer; Beverungen, 2024). Diversos sistemas e subsistemas, como telecomunicações, provedores de internet e saúde, dependem diretamente desse fornecimento. Assim, falhas no sistema elétrico podem desencadear impactos em cascata, afetando outros setores essenciais (De Almeida *et al.*, 2015). A falta de manutenção adequada pode resultar em quedas de energia, sobrecargas e danos aos equipamentos, causando custos elevados e desconforto generalizado para a população, que depende de dispositivos alimentados por eletricidade (Harsanto; Yunani, 2023).

Finalmente, no contexto de geração de energia, a energia eólica em alto mar apresenta desafios específicos. Com plataformas de geração distribuídas no mar, essas operações demandam uma logística complexa para manutenção em ambientes marítimos adversos, além de uma gestão integrada para garantir a eficiência e continuidade da geração de energia (Melo *et al*., 2023). Embora ainda não seja uma realidade no Brasil, a energia eólica em alto mar tem grande potencial de desenvolvimento devido à extensa costa do país e às condições favoráveis para sua implementação (González *et al*., 2020).

Dado o cenário de complexidade e altos custos associados à manutenção de sistemas de difícil acesso, este estudo propõe o desenvolvimento de um modelo matemático que auxilie no planejamento eficiente da manutenção. A aplicação de políticas de manutenção otimizadas tem o

potencial de aumentar a eficácia das ações, reduzir interrupções e melhorar o desempenho geral dessas infraestruturas.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

No setor de produção de energia elétrica, a crescente preocupação com o impacto ambiental dos sistemas industriais tem impulsionado a adoção de fontes de energia renováveis, destacando a energia eólica como uma das principais alternativas com grande potencial de expansão (Onat; Canbazoğlu, 2007). Com o crescimento desse setor, torna-se essencial estudar suas especificidades, especialmente nos processos de O&M (GWEC, 2024). Essas operações demandam investimentos financeiros significativos, com estudos indicando que entre 20% e 35% dos custos totais ao longo do ciclo de vida de um parque eólico em alto mar são alocados para atividades de O&M (Kang; Soares, 2020). Portanto, um planejamento eficiente dessas operações pode gerar benefícios substanciais, impactando economicamente o setor.

No contexto da distribuição de energia elétrica, esse subsetor estabelece uma conexão direta com o consumidor final, funcionando como o elo entre a indústria elétrica e a comunidade. As decisões tomadas nesta área são importantes, pois representam o ponto final da cadeia de fornecimento de eletricidade e determinam o nível de satisfação do público com o desempenho do setor (Alimohammadi; Behnamian, 2021). Dados de uma empresa brasileira de transmissão, conforme relatado por Silva, Ducharme e Ferreira (2019), indicam que os custos de manutenção de um sistema composto por 48 transformadores e 7 subestações podem superar a marca de R$ 1,4 milhão por ano.

O saneamento básico é um dos pilares fundamentais da sociedade, englobando serviços e infraestruturas públicas essenciais para garantir a qualidade de vida e a saúde da população. Entre esses serviços, incluem-se as redes de distribuição de água, sistemas de esgotamento sanitário e poços artesianos. Em relação aos sistemas de distribuição de água, Blokus-Dziula *et al*. (2023) apontam que os custos médios anuais de manutenção, abrangendo reparos e inspeções, representam cerca de 55% do custo total de O&M. No caso dos sistemas de esgoto, Obradović, Marenjak e Šperac (2023) revelam que, em um sistema de 200 km localizado na Croácia, os custos de O&M podem chegar a R$ 1,2 milhão por ano. Além disso, Alotaibi *et al*. (2023) demonstram que os custos associados a intervenções de manutenção corretiva em poços artesianos podem ser de 5 a

10 vezes maiores do que os da manutenção planejada, ressaltando a urgência de um estudo aprofundado sobre as práticas de O&M para esse conjunto de sistemas de difícil acesso.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS, 2022a; SNIS, 2022b), cerca de 85% da população brasileira é atendida pela rede de água, enquanto apenas 56% têm acesso ao esgotamento sanitário. Esses dados reforçam a necessidade de universalizar esses serviços. Um planejamento eficiente de manutenção, focado em reduzir custos e aumentar a confiabilidade e disponibilidade, pode ser uma solução viável para esse avanço (Ribeiro; Bin; Serafim, 2022).

Gasodutos transportam gás por vastas áreas, e sua instalação em algumas regiões apresenta riscos consideráveis, como vazamentos que são geralmente causados por interferência externa, corrosão dos dutos, movimentação do solo e defeito de construção (Li *et al*., 2021; Li *et al*., 2022). Tais incidentes podem provocar danos ambientais, contaminação do solo e graves acidentes, incluindo sufocamento ou explosões (Liu *et al*., 2024). Um exemplo foi o vazamento de gás em Shiyan, China, em 2021, que resultou em 26 mortes, 138 feridos e uma perda direta de R$ 37 milhões (Jiang *et al*., 2023).

Diante desses cenários, a urgência em desenvolver políticas de manutenção eficientes para sistemas de difícil acesso se torna evidente. A implementação de estratégias adequadas não apenas garante a operacionalidade e sustentabilidade desses sistemas, mas também contribui para a melhoria da qualidade de vida das populações locais. Este trabalho busca preencher lacunas na literatura, propondo um novo modelo de manutenção que possa ser aplicado de forma prática, promovendo o uso mais eficiente e sustentável dos recursos disponíveis.

O modelo de manutenção proposto neste trabalho é fundamentado em tempo discreto, que busca otimizar a execução de ações preventivas e corretivas. A estrutura periódica da política permite incorporar intervalos regulares para a realização de ações, refletindo restrições operacionais, como a disponibilidade de recursos e a dificuldade de acesso aos sistemas. Diferenciando-se de abordagens mais comuns, a otimização empregada é realizada de forma exaustiva, garantindo a obtenção de uma solução ótima para a política de manutenção proposta. A sua metodologia se diferencia ao integrar restrições práticas, como a periodicidade das ações e a limitação de recursos, alinhando-se às condições reais dos sistemas de difícil acesso.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma política de manutenção para sistemas de difícil acesso. Para isso, almeja-se cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Estudar a literatura existente, investigando aspectos cruciais para o planejamento da manutenção de sistemas de difícil acesso;
- Compreender as modelagens matemáticas de políticas de manutenção já estabelecidas para esses sistemas;
- Desenvolver uma nova modelagem matemática aplicável a sistemas de difícil acesso;
- Criar algoritmos de otimização para a política de manutenção proposta;
- Realizar aplicação numérica utilizando o modelo de manutenção desenvolvido;
- Conduzir análises de sensibilidade dos resultados obtidos, investigando diferentes cenários que maximizem os benefícios dos modelos propostos;
- Desenvolver um produto tecnológico que facilite a implementação e disseminação da política de manutenção proposta neste estudo.

1.4 METODOLOGIA

Esta pesquisa é classificada como aplicada quanto à sua natureza, exploratória quanto aos seus objetivos, quantitativa quanto à abordagem, dedutiva quanto ao método científico e adota a pesquisa bibliográfica e a modelagem matemática como procedimentos técnicos.

A natureza aplicada da pesquisa se justifica pelo desenvolvimento de soluções voltadas à gestão da manutenção em sistemas de difícil acesso. Segundo Marconi e Lakatos (2007), a pesquisa aplicada busca gerar conhecimento que possa ser prontamente utilizado para resolver problemas reais, o que se alinha ao objetivo deste estudo: propor um modelo de manutenção e um produto tecnológico para sua implementação.

A pesquisa exploratória é apropriada quando há necessidade de aprofundamento teórico e metodológico sobre um tema ainda não totalmente esclarecido (Gil, 2002). Assim, este estudo busca contribuir para a literatura ao integrar abordagens que ampliem a efetividade das políticas de manutenção em sistemas de acesso restrito.

A abordagem quantitativa se justifica pela necessidade de mensurar os fenômenos associados à manutenção desses sistemas. Para isso, foi desenvolvido um modelo matemático que otimiza a política de manutenção proposta, exigindo análise de dados numéricos e a aplicação de métodos computacionais para implementação e avaliação (Miguel *et al*., 2012).

O método científico adotado é o dedutivo, pois a pesquisa parte de teorias matemáticas e conceitos avançados de manutenção para derivar explicações e previsões sobre a eficiência da política de manutenção proposta (Marconi; Lakatos, 2003).

O desenvolvimento desta pesquisa seguiu um processo estruturado, fundamentado em etapas essenciais da modelagem matemática e da análise quantitativa, conforme proposto por Miguel *et al.* (2012). Esse processo pode ser descrito por meio das seguintes fases:

1. Identificação do Problema: Nesta etapa, delimitou-se o escopo do problema por meio de uma pesquisa bibliográfica abrangente, utilizando artigos científicos, teses e relatórios técnicos extraídos de bases de dados indexadas. Essa análise permitiu identificar lacunas na literatura e avaliar as limitações dos modelos existentes quanto à sua aplicabilidade em diferentes contextos de sistemas de difícil acesso.
2. Construção do Modelo: Com base na literatura e nas particularidades operacionais dos sistemas de difícil acesso, foi desenvolvido um modelo matemático. A formulação do modelo foi ajustada para refletir a realidade operacional, incorporando análises preliminares que avaliaram a adequação dos pressupostos adotados e a eficácia da abordagem proposta.
3. Solução do Modelo: Nesta etapa, foram formuladas equações matemáticas para avaliar quantitativamente o desempenho do sistema sob diferentes configurações da política de manutenção proposta. Para otimizar as variáveis de decisão do modelo, foi implementado um algoritmo de busca exaustiva, utilizando a linguagem de programação *Python*. Esse algoritmo explora sistematicamente todo o espaço de soluções possíveis, resultando na configuração ótima da política de manutenção. A implementação utilizou as bibliotecas *SciPy* e *NumPy*, que oferecem capacidades avançadas de cálculo numérico, garantindo precisão e eficiência computacional.
4. Validação do Modelo: Essa etapa foi conduzida de forma abrangente, englobando três aspectos principais: (a) Análise de sensibilidade: o comportamento da política de manutenção proposta foi examinado sob diferentes configurações de parâmetros,

possibilitando a avaliação de sua robustez e adaptabilidade a distintos cenários operacionais; (b) Comparação com casos especiais: a política foi confrontada com versões simplificadas, evidenciando suas vantagens em relação a abordagens menos sofisticadas; (c) Avaliação comparativa: o desempenho do modelo foi analisado em comparação com outra política de manutenção presente na literatura, evidenciando a eficácia da abordagem proposta.

5. Implementação da Solução: Para facilitar a adoção da política de manutenção proposta, foi desenvolvido um protótipo computacional. Essa ferramenta permite que gestores de manutenção insiram parâmetros operacionais específicos e avaliem o desempenho da política em diversos cenários, oferecendo uma interface acessível e intuitiva para a tomada de decisão. O protótipo foi implementado utilizando o framework de código aberto *StreamLit*, que garante flexibilidade e facilidade de uso.

Por meio desse processo metodológico, a pesquisa buscou assegurar que a política de manutenção desenvolvida fosse não apenas teoricamente robusta, mas também aplicável a contextos operacionais reais.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos: (1) Introdução; (2) Referencial Teórico e Revisão da Literatura; (3) Proposta de uma Política de Manutenção para Sistemas de Difícil Acesso; (4) Estudo Numérico da Política de Manutenção Proposta; e (5) Considerações Finais.

O primeiro capítulo apresenta a contextualização do estudo, destacando as considerações iniciais, a justificativa e a relevância do tema, além dos objetivos e da metodologia adotada. O segundo capítulo discute os principais conceitos que embasam o desenvolvimento da pesquisa, bem como estudos recentes que se relacionam com o escopo deste trabalho.

No terceiro capítulo é proposta uma política de manutenção específica, a caracterização dos sistemas sob estudo e a formulação matemática do modelo desenvolvido. O quarto capítulo traz uma análise detalhada da política proposta, incluindo a avaliação do comportamento do modelo frente à variação de parâmetros, comparações com casos especiais e com a literatura existente.

Por fim, no quinto capítulo são sintetizados os principais resultados e impactos da pesquisa, além de serem discutidas as limitações e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta os principais conceitos teóricos e a revisão da literatura sobre manutenção em sistemas de difícil acesso. Inicialmente, são abordadas a definição de manutenção, confiabilidade e suas principais dimensões. Em seguida, são discutidas as políticas de manutenção clássicas que fundamentam este estudo, finalizando com aspectos essenciais para sistemas de difícil acesso, como a manutenção oportuna.

2.1 MANUTENÇÃO E CONFIABILIDADE

Esta seção aborda os conceitos centrais de manutenção e confiabilidade, incluindo definições, classificações, evolução histórica das práticas e principais indicadores de confiabilidade para o planejamento e avaliação de políticas de manutenção.

2.1.1 Definição da Manutenção

Wang (2002) define manutenção como o conjunto de atividades necessárias para manter ou restaurar um equipamento ou sistema a um estado em que possa desempenhar sua função operacional. Zwingelstein (2002) complementa ao afirmar que a manutenção também visa avaliar a capacidade operacional de um sistema ou equipamento.

Mostafa, Dumrak e Soltan (2015) identificam diversas atividades ligadas à manutenção de sistemas produtivos, como inspeção, monitoramento, manutenção de rotina, revisão, recondicionamento e reparo. Esses conceitos estão alinhados com a definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), conforme a NBR 5462:1994, que descreve manutenção como “o conjunto de ações necessárias para que um item seja mantido ou restaurado a um estado no qual possa desempenhar a função requerida” (ABNT, 1994).

2.1.2 Evolução da Manutenção

Inicialmente, a manutenção era vista como um mal necessário e realizada apenas quando indispensável. Com o tempo, passou a ser tratada como uma questão técnica e, eventualmente,

como uma função completa, separada da produção (Kobbacy; Murthy, 2008). Moubray (2001) classifica a evolução da manutenção em três gerações:

1. Primeira geração (de 1930 até 1950): A indústria era pouco mecanizada e a prevenção de falhas não era uma prioridade, já que os sistemas eram simples, superdimensionados, confiável e fáceis de reparar. Assim, a manutenção se restringia a serviços básicos.
2. Segunda geração (de 1950 até 1970): Durante a Segunda Guerra Mundial, a crescente demanda por bens e a redução da mão de obra impulsionaram a mecanização. A partir de 1950, com o aumento da complexidade dos sistemas, o tempo de inatividade passou a ser mais crítico, surgindo o conceito de manutenção planejada. O aumento dos custos de manutenção e dos ativos levou ao desenvolvimento de sistemas de planejamento e controle da manutenção, visando maximizar a vida útil dos ativos.
3. Terceira geração (de 1970 até 2000): A indústria enfrentou rápidas mudanças, com o tempo de inatividade afetando a capacidade produtiva e aumentando custos. A crescente mecanização e automação tornaram a confiabilidade dos sistemas produtivos crítica, pois as falhas passaram a comprometer a qualidade, segurança e meio ambiente, impactando a sustentabilidade operacional.

A partir dos anos 2000, a manutenção passa a ser reconhecida por sua importância estratégica, combinando habilidades técnicas e gerenciamento, sendo vista como um parceiro-chave no desenvolvimento de estratégias de negócios (De Almeida; Souza, 2001). Paiva *et al.* (2024) ressaltam que a próxima geração da manutenção está centrada na adoção de técnicas avançadas, impulsionadas por tecnologias da Indústria 4.0, como Inteligência Artificial (IA) e Big Data. Esse avanço possibilita a análise de grandes volumes de dados captados por sensores, permitindo uma previsão de falhas mais precisa, a otimização de recursos e a prevenção de paradas inesperadas. Dessa forma, a manutenção evolui para um componente estratégico, sendo adaptada a contextos específicos e promovendo maior eficiência e competitividade industrial.

2.1.3 Classificação da Manutenção

As estratégias de manutenção podem ser categorizadas de diferentes maneiras, e a literatura frequentemente utiliza termos intercambiáveis para descrevê-las. Dentre as abordagens mais amplamente adotadas, destacam-se a manutenção corretiva e a manutenção planejada (CEN, 2001).

A manutenção corretiva é o procedimento realizado após a ocorrência de uma falha no sistema, com o objetivo de restaurar a sua operacionalidade. Em diversos contextos industriais, esse tipo de manutenção é inevitável. A manutenção corretiva pode ser considerada a menos estratégica, uma vez que suas intervenções ocorrem somente após a falha do sistema. Apesar disso, Sharma, Kumar e Kumar (2005) defendem que essa abordagem pode ser adequada para instalações com margens de lucro elevadas e ativos de baixo valor.

A manutenção corretiva apresenta algumas vantagens, como a redução de ações de manutenção desnecessárias e menores custos de gestão. No entanto, suas desvantagens incluem um alto risco de falha dos componentes, interrupções no processo produtivo, comprometimento da segurança e confiabilidade, além de um maior potencial para acidentes com consequências significativas (Hao *et al*., 2010). Em sistemas de difícil acesso, uma estratégia puramente corretiva não é recomendada devido aos elevados impactos sociais, ambientais e econômicos que pode gerar.

Em contraste com a abordagem de esperar pela falha do sistema, existe a estratégia de manutenção planejada. A manutenção planejada é definida como o conjunto de ações planejadas com o objetivo de evitar a ocorrência de falhas (ISO, 2016). A adoção da manutenção planejada é difundida por trazer uma grande economia ao gerenciamento da manutenção de um sistema quando comparado com a manutenção corretiva, bem como prevenir a perda na produtividade (Tsai; Wang; Tsai, 2004). Duas estratégias principais dentro da manutenção planejada se destacam: a manutenção preventiva e a manutenção preditiva, como destacado por Márquez (2007).

Segundo a ABNT, a manutenção preventiva é definida como “aquela efetuada em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios descritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação de desempenho de um item” (ABNT, 1994). Rausand e Hoyland (2003) argumentam que a escolha pela manutenção preventiva em vez da corretiva se justifica quando duas condições são atendidas: (1) a taxa de falha do sistema aumenta com o tempo e (2) o custo das ações de manutenção preventivas são menores que o das ações corretivas.

A manutenção preditiva é definida como a medição e interpretação contínua ou periódica do estado de um sistema, com o objetivo de determinar a necessidade de uma ação de manutenção (BSI, 1984). Moya (2007) argumenta que essa abordagem é justificada quando há possibilidade de detectar uma falha em potencial, sendo essencial identificar um parâmetro mensurável que indique esse início de falha. Fogliato e Ribeiro (2009) destacam que os sinais típicos de falha potencial incluem: ruído, aspecto desagradável, vibração, folga, operação intermitente, falha na operação e

odor desagradável. Nessas condições, a aplicação de práticas de manutenção preditiva se torna viável e estratégica não apenas por reduzir custos, mas também por elevar a confiabilidade e disponibilidade do sistema.

2.1.4 Definição da Confiabilidade

A ABNT (1994) define confiabilidade como a "capacidade de um item de desempenhar uma função requerida sob condições específicas durante um período determinado". De maneira similar, Leemis (1995) a descreve como a probabilidade de um sistema ou componente operar sem falhas dentro de um intervalo de tempo estabelecido.

Com isso, a confiabilidade está diretamente associada à função de densidade de probabilidade de falha de um sistema ou componente e pode ser expressa conforme mostrado na Equação (2.2), sendo o complemento da função de distribuição cumulativa $F(t)$ apresentada na Equação (2.1), onde $R(t)$ representa a probabilidade de o sistema ou componente operar sem falha até o tempo t.

$$F(t) = \int_0^t f(x)dx \tag{2.1}$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^\infty f(x)dx \tag{2.2}$$

Fogliato e Ribeiro (2009) definem cinco implicações importantes da definição do período de tempo em confiabilidade: (1) O analista deve estabelecer uma unidade de tempo para conduzir as análises; (2) Os modelos que descrevem o tempo até a falha utilizam a variável aleatória T para representar o tempo até a falha de um item; (3) O termo "tempo" não deve ser interpretado de forma literal, pois, em muitos contextos, a quantidade de milhas ou ciclos pode ser usada para representar o tempo até a falha de um item; (4) O conceito de confiabilidade precisa estar vinculado a um período específico ou à duração de uma missão; (5) A escolha da medida apropriada para avaliar a vida útil de um item nem sempre é evidente.

Fogliato e Ribeiro (2009) ainda destacam que as condições ambientais de uso de um item afetam diretamente a confiabilidade deste item. Ao considerar o sistema de geração de energia

eólica, é evidente que o desempenho de uma turbina eólica terrestre difere significativamente daquele de uma turbina em alto mar (Xiang *et al.*, 2024), especialmente em condições adversas, como a exposição a altas ondas, ventos fortes e até neve (Tikanmäki; Heinonen, 2022).

Knight (1991) apresenta um panorama histórico do progresso da confiabilidade, destacando que, entre 1950 e 1989, ocorreram avanços significativos. Esses avanços, combinados com melhorias nos métodos de fabricação, levaram a uma redução expressiva nas taxas de falha, um dos principais indicadores de confiabilidade.

Zio (2009) destaca que a transição da economia industrial, focada na produção, para uma economia centrada na prestação de serviços, altera a forma como o valor é percebido: agora, o foco está na performance do produto em fornecer serviços, em vez de no produto em si. Essa mudança elevou a importância da disponibilidade dos serviços, levando ao desenvolvimento de técnicas para sua mensuração. Nesse contexto, o autor sintetiza a engenharia de confiabilidade como uma disciplina multidisciplinar que investiga as causas de falhas, os métodos para desenvolver e manter sistemas confiáveis e as formas de medir a confiabilidade ao longo do ciclo de vida do sistema. Essas definições se mantêm relevantes até os dias atuais (Breznická *et al*., 2023).

2.1.5 Indicadores de Confiabilidade

Os indicadores de confiabilidade desempenham um papel fundamental na avaliação do desempenho de sistemas e componentes, fornecendo métricas essenciais para prever e minimizar falhas. Fogliato e Ribeiro (2009) destacam que as principais métricas de confiabilidade utilizadas incluem a função de confiabilidade, já discutida anteriormente, além da taxa de falha e do tempo médio até a falha.

A taxa de falha, amplamente utilizada na prática, é considerada um dos principais indicadores de confiabilidade. Também denominada função de risco ou taxa de risco, essa métrica representa a quantidade de risco associada a uma unidade de tempo t. A Equação (2.3) descreve a taxa de falha como a razão entre a função de densidade de probabilidade e a função de confiabilidade, oferecendo uma interpretação clara da probabilidade de falha ao longo do tempo.

$$h(t)=\frac{f(t)}{R(t)},\ t\geq 0 \tag{2.3}$$

O tempo médio até a falha (MTTF, do inglês *mean time to failure*) representa o valor esperado de tempo em que um componente permanece em estado operacional. O MTTF, também denominado por vida esperada, é formalizado pela Equação (2.4). Além disso, ele pode ser expresso de forma alternativa pela Equação (2.5), média da função confiabilidade (Nakagawa, 2006).

$$MTTF = \int_0^\infty t f(t) dt \tag{2.4}$$

$$MTTF = \int_0^\infty R(t) dt \tag{2.5}$$

O MTTF é aplicado a componentes não reparáveis (Fogliato; Ribeiro, 2009). Para componentes reparáveis, o indicador utilizado é o tempo médio entre falhas (MTBF, do inglês *mean time between failures*). Quando um componente reparável é substituído após falhar, o MTBF coincide com o MTTF, assumindo-se que o processo de renovação seja perfeito, o que geralmente é adequado para muitas análises de confiabilidade (Modarres; Kaminskiy; Krivtosov, 2016).

Uma extensão do MTBF é o tempo médio entre falhas operacionais (MTBOF, do inglês *mean time between operational failures*), também conhecido por confiabilidade operacional, introduzido por Scarf, Dwight e Al-Musrati (2005). O MTBOF é definido como a razão entre a vida útil esperada do componente e a probabilidade de que um ciclo de renovação resulte em falha (Cavalcante; Lopes; Scarf, 2021), ou seja, o inverso do valor médio de longo prazo do número de falhas por unidade de tempo. É importante ressaltar que, enquanto o MTTF e o MTBF são medidos com base no comportamento natural da falha, o MTBOF, por sua vez, é uma medida derivada da implementação de uma política de manutenção.

Além disso, Nakagawa (2006) destaca que a disponibilidade, $A(t)$, é também um dos principais indicadores de confiabilidade, classificando-a em três categorias:

1. Disponibilidade instantânea: a probabilidade de que o sistema esteja ativo em um determinado instante;
2. Disponibilidade média em operação: a fração esperada de um intervalo específico durante o qual o sistema poderá operar;
3. Disponibilidade em regime estacionário: a fração esperada de tempo a longo prazo em que o sistema estará em operação.

De forma geral, a disponibilidade média em operação é expressa pela Equação (2.6), enquanto a disponibilidade em regime estacionário é apresentada pela Equação (2.7), onde x representa o instante inicial do intervalo de tempo em que as métricas estão sendo calculadas.

$$A(x, x+t) = \frac{1}{t}\int_{x}^{x+t} A(u)du, \text{ x} \geq 0 \tag{2.6}$$

$$A(x) = \lim_{t\to\infty}\frac{1}{t}\int_{x}^{x+t} A(u)du, \text{ x} \geq 0 \tag{2.7}$$

Por fim, os indicadores de confiabilidade oferecem uma base quantitativa para a tomada de decisões estratégicas, facilitando a identificação dos momentos apropriados para intervenções de manutenção. A aplicação adequada desses indicadores é fundamental para o desenvolvimento de políticas de manutenção que sejam tanto eficazes quanto sustentáveis.

2.2 POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO

As políticas de manutenção vêm sendo amplamente estudadas na literatura pelo menos desde 1960 (Wang, 2002). Definidas como um conjunto de diretrizes e estratégias, essas políticas visam garantir o desempenho ideal de sistemas, equipamentos ou infraestruturas. De Almeida *et al*. (2015) apontam que as políticas de manutenção buscam responder a três questões fundamentais:

- Quais ações de manutenção são mais adequadas para o sistema em questão?
- Com que frequência essas ações devem ser realizadas?
- Quais recursos serão necessários para sua implementação eficiente?

A seguir, são apresentadas políticas de manutenção clássicas, baseadas no uso e na condição.

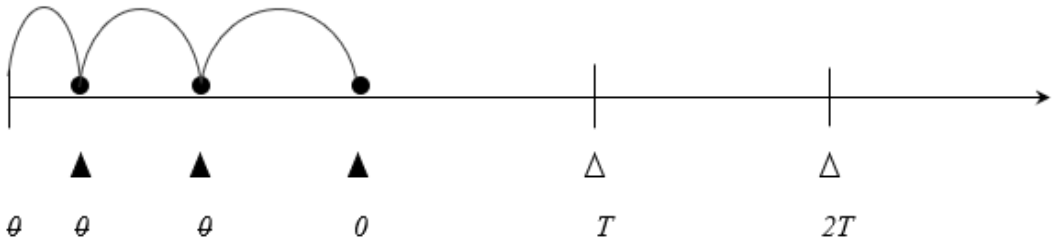
2.2.1 Políticas de Manutenção Baseadas no Uso

A manutenção baseada no uso utiliza a unidade de utilização como principal parâmetro para definir suas políticas. Embora o tempo seja frequentemente empregado como medida padrão, essa unidade pode variar dependendo do contexto. Por exemplo, em automóveis, a manutenção preventiva é frequentemente agendada com base nos quilômetros percorridos (Danilecki;

Smurawski; Urbanowicz, 2023). Entre as políticas clássicas dessa estratégia estão a política de substituição por idade e a política de substituição em bloco (Barlow; Proschan, 1996) para sistema crítico de componente único, no qual a ação de substituição (preventiva ou corretiva) representa uma renovação do sistema.

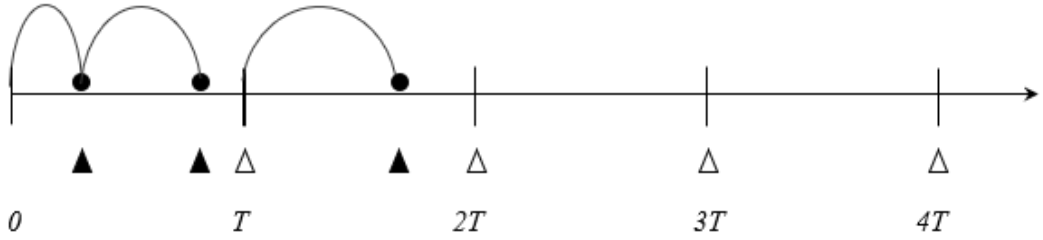
A política de substituição por idade define que uma substituição corretiva se dará após a falha do sistema, ou uma substituição preventiva será executada se o sistema atingir uma idade pré-determinada T, denominada idade de substituição, o que ocorrer primeiro. Já a política de substituição em bloco prevê a execução de substituições preventivas em intervalos regulares (T, $2T$, $3T$, ...), independentemente da idade do componente, ou corretivas, caso ocorra uma falha antes do intervalo programado. No entanto, na política de substituição em bloco, diferentemente da substituição por idade, a substituição corretiva não reinicia o ciclo de vida do componente. As Figuras 1 e 2 apresentam as representações gráficas dessas políticas, onde as circunferências preenchidas indicam os momentos das falhas, e os triângulos, preenchidos e vazados, representam manutenções corretivas e preventivas, respectivamente.

Figura 1 - Representação gráfica da política de substituição por idade



Fonte: Adaptado de Cavalcante (2022a)

Figura 2 - Representação gráfica da política de substituição em bloco



Fonte: Adaptado de Cavalcante (2022b)

A política de substituição por idade (Figura 1), embora frequentemente recomendada pelos fabricantes, apresenta a desvantagem de não seguir uma periodicidade fixa, o que pode causar desalinhamento com os intervalos planejados para a manutenção preventiva de outros componentes de um mesmo sistema. Por outro lado, a política de substituição em bloco (Figura 2) estabelece uma periodicidade regular para a manutenção preventiva de componentes semelhantes ou idênticos, proporcionando economia de escala e facilitando o gerenciamento do sistema. No entanto, essa estratégia pode não ser a mais eficiente em termos de custo, pois pode resultar na substituição de componentes que ainda estão em boas condições de funcionamento, gerando gastos desnecessários e subutilização dos ativos. A definição da política de manutenção mais adequada para o sistema depende de suas características específicas, que podem ser avaliadas através da simulação de aplicação de cada uma das políticas de manutenção.

O Quadro 1 exibe o pseudocódigo para a simulação da política de substituição por idade, que calcula a taxa de custo de longo prazo (C_∞) para um sistema com um único componente. Nesta simulação, x representa o tempo em que o componente permanece em operação até a ocorrência de uma falha potencial, que pode evoluir para uma falha efetiva quando $x < T$, exigindo um custo c_F para substituição corretiva do componente. Alternativamente, a falha pode ser evitada por meio de uma substituição preventiva quando $x \geq T$, com custo c_P. Por sua vez, o Quadro 2 exibe o pseudocódigo para a simulação da política de substituição em bloco, aplicada a um sistema com as mesmas características.

Quadro 1 - Pseudocódigo para simulação da política de substituição por idade

Início Simulador de Política de Substituição por Idade

1. Inicialize as variáveis auxiliares (Custo , Vida , C_∞) como nulas
2. **Enquanto** (Critério de parada não satisfeito) **faça**:
3. Gere x baseado na função de distribuição da vida do componente
4. **Se** $x < T$ **então**:
5. Custo $\leftarrow$ Custo $+ c_F$
6. Vida $\leftarrow$ Vida $+ x$
7. **Senão**:
8. Custo $\leftarrow$ Custo $+ c_P$
9. Vida $\leftarrow$ Vida $+ T$
10. $C_\infty \leftarrow$ Custo/Vida
11. **Retorne** C_∞

Fim Simulador de Política de Substituição por Idade

Fonte: Adaptado de Cavalcante (2022a)

Quadro 2 - Pseudocódigo para simulação da política de substituição em bloco

Início Simulador de Política de Substituição em Bloco

1. Inicialize as variáveis auxiliares (Custo , Vida , C_∞) como nulas
2. **Enquanto** (Critério de parada não satisfeito) **faça**:
3. Gere x baseado na função de distribuição da vida do componente
4. **Se** $x < T$ **então**:
5. Custo $\leftarrow$ Custo $+ c_F$
6. Vida $\leftarrow$ Vida $+ x$
7. **Enquanto** Verdadeiro **faça**:
8. Gere z baseado na função de distribuição da vida do componente
9. **Se** $z < (T - x)$ **faça**:
10. Custo $\leftarrow$ Custo $+ c_F$
11. Vida $\leftarrow$ Vida $+ x$
12. $x \leftarrow x + z$
13. **Senão**:
14. Custo $\leftarrow$ Custo $+ c_F$
15. Vida $\leftarrow$ Vida $+ (T - x)$
16. **Finalize-enquanto**
17. **Senão**:
18. Custo $\leftarrow$ Custo $+ c_P$
19. Vida $\leftarrow$ Vida $+ T$
20. $C_\infty \leftarrow$ Custo/Vida
21. **Retorne** C_∞

Fim Simulador de Política de Substituição em Bloco

Fonte: Adaptado de Scarf *et al.* (2024a)

A literatura aponta que a indústria favorece cronogramas fixos de manutenção à medida que eles facilitam o planejamento de recursos e o controle de custos operacionais (Scarf; Syntetos; Teunter, 2024). A política de substituição em bloco, por não reiniciar o ciclo de vida do componente, permite substituições preventivas logo após corretivas, o que reduz sua eficiência econômica.

Para mitigar essa limitação, Bajestani e Banjevic (2016) propuseram, e Scarf *et al.* (2024a) analisaram detalhadamente, uma política que combina vantagens das abordagens clássicas de manutenção baseadas no uso. Aplicada a sistemas de componente único, a política periódica (com intervalo de tempo entre visitas s) prevê a substituição do componente em caso de falha ou ao atingir a idade ks, isto é, a $k-$ésima visita, de modo que $(k-1)s < T < ks$, conforme o evento que ocorrer primeiro. Dessa forma, o sistema é renovado na próxima visita após a atingir a idade T, desde que não tenha falhado antes. Essa abordagem estabelece um padrão quase periódico para as substituições preventivas, cujo pseudocódigo é apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Pseudocódigo para simulação da política de substituição por idade modificada

Início Simulador de Política de Substituição por Idade Modificada
1. Inicialize as variáveis auxiliares (Custo , Vida , C_∞) como nulas
2. **Enquanto** (Critério de parada não satisfeito) **faça**:
3. Gere z baseado na função de distribuição da vida do componente
4. $x \leftarrow \text{Vida} + z$
5. $T \leftarrow T + \text{Vida}$
6. Defina k baseado na seguinte relação: $(k-1)s < T < ks$
7. **Se** $x < ks$ **faça**:
8. $\text{Custo} \leftarrow \text{Custo} + c_F$
9. $\text{Vida} \leftarrow x$
10. **Senão**:
11. $\text{Custo} \leftarrow \text{Custo} + c_P$
12. $\text{Vida} \leftarrow ks$
13. $C_\infty \leftarrow \text{Custo}/\text{Vida}$
14. **Retorne** C_∞
Fim Simulador de Política de Substituição por Idade Modificada

Fonte: Adaptado de Scarf *et al.* (2024a)

Os resultados de Scarf *et al.* (2024a) indicam que essa política equilibra previsibilidade e eficiência de custos ao introduzir periodicidade nas substituições preventivas. Embora ligeiramente menos eficiente do que a substituição por idade em termos de custo, sua aderência a cronogramas fixos facilita a implementação, especialmente em sistemas que exigem planejamento estruturado das ações de manutenção.

Os achados destacam a relevância de considerar restrições operacionais na definição de políticas de manutenção. A substituição por idade modificada pode ser particularmente vantajosa para sistemas que demandam alinhamento com janelas operacionais fixas, como aqueles de difícil acesso.

2.2.2 Políticas de Manutenção Baseadas na Condição

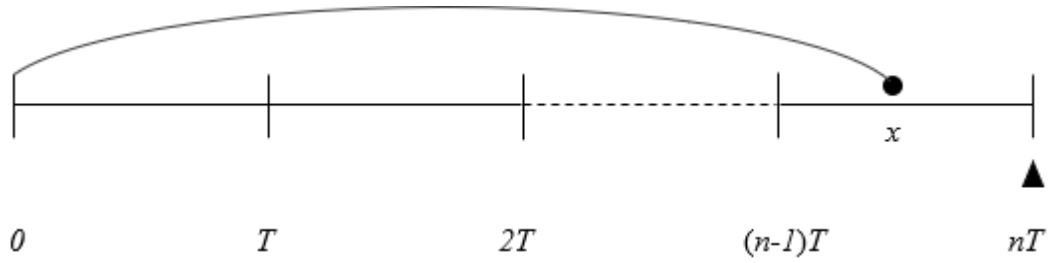
A manutenção baseada na condição foca no monitoramento, modelagem e previsão da degradação de sistemas específicos (Rausand; Hoyland, 2003). Márquez (2007) destaca que seu objetivo é definir um cronograma de inspeção ideal, identificando os momentos mais eficazes para verificar a condição do componente.

Barlow, Hunter e Proschan (1963) introduziram um modelo de inspeção, no qual não há substituições preventivas e o equipamento é reparado ou substituído apenas após uma falha x com função de densidade $f(x)$. As principais suposições do modelo incluem:

- A falha do equipamento só é conhecida após uma inspeção;
- As inspeções não deterioram o equipamento;
- Cada inspeção tem um custo unitário c_I;
- O custo associado a uma falha não detectada por unidade de tempo é c_D;
- O custo de manutenção corretiva é c_F;
- O tempo de manutenção corretiva é t_F.

A política de inspeção nesse modelo prevê que as inspeções sejam realizadas em intervalos regulares (T, $2T$, $3T$, ...) até que uma falha seja encontrada, então o equipamento é substituído, e um novo ciclo inicia. A Figura 3 ilustra a representação gráfica dessa política, onde a circunferência preenchida indica o momento da falha e o triângulo preenchido representa uma manutenção corretiva. A taxa de custo esperada ao longo prazo é dada pela Equação (2.8).

Figura 3 - Representação gráfica de modelo clássico de inspeção



Fonte: Adaptado de Márquez (2007)

$$C_\infty(T) = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \int_{(n-1)T}^{nT} \left[(nT - x)c_D + nc_I + c_F \right] f(x)dx}{\sum_{n=1}^{\infty} \int_{(n-1)T}^{nT} (nT) f(x)dx + t_F} \tag{2.8}$$

O modelo de Barlow, Hunter e Proschan (1963) foi um marco inicial nas políticas de manutenção baseadas na condição e em estruturas de tempo discreto. Embora se limite a uma abordagem corretiva, na qual a manutenção ocorre apenas após a falha, o modelo oferece uma

estrutura relevante para o planejamento de inspeções em cenários onde a falha não é auto anunciada, como em sistemas de proteção (válvulas de isolamento, disjuntos e barreiras de segurança) (Scarf *et al.*, 2024b). Nesses casos, uma política puramente corretiva detectaria a falha apenas em uma demanda (emergência), potencialmente causando danos significativos ao sistema e seu ambiente.

Ao longo dos anos, a manutenção baseada na condição evoluiu para abordagens mais sofisticadas e preditivas. Andersen e Rasmussen (1999) destacam que seu objetivo é intervir apenas quando necessário, considerando que a maioria das falhas é precedida por sinais detectáveis (Bloch, 1998), monitorados por variáveis como vibração, acústica, temperatura e corrente elétrica. Segundo Iqbal *et al.* (2017), o monitoramento pode ser contínuo, por sensores especializados, ou discreto, por inspeções periódicas ou não periódicas (Fauriat; Zio, 2020).

O monitoramento contínuo fornece dados em tempo real, permitindo a detecção precoce de falhas, a redução de paradas não planejadas e o aumento da confiabilidade (Minou *et al.*, 2017). No entanto, exige infraestrutura avançada e gera grandes volumes de dados ruidosos (Jardine; Lin; Banjevic, 2006). O monitoramento discreto, por sua vez, é uma alternativa viável quando restrições econômicas ou operacionais inviabilizam o monitoramento contínuo.

No contexto do monitoramento discreto, Christer (1976) introduziu o conceito de *delay-time*, que define o intervalo entre o surgimento de um defeito e a falha efetiva do componente. Essa abordagem possibilita a realização de ações preventivas antes da falha, equilibrando custos e riscos. Esse conceito foi primeiramente aplicado no contexto da construção (Christer, 1982) e foi estendido para o contexto industrial pouco tempo depois (Christer; Waller, 1984). Até hoje, é uma técnica muito utilizada para otimização da frequência de inspeções e intervenções (Berrade; Scarf; Cavalcante, 2017; Liu *et al.*, 2021; Ahmadi; Castro; Bautista, 2024), equilibrando custos de manutenção e riscos de falha, sendo expandida também para outras áreas mais distantes como a da saúde (Mahfoud; El Barkany; El Biyaali, 2016).

Diante disso, Rausand e Hoyland (2003) argumentam que modelos modernos baseados nessa abordagem devem incluir: (1) a definição de estados de degradação que exigem intervenção; (2) a especificação do estado restaurado após a manutenção preventiva; e (3) uma metodologia de monitoramento para avaliação contínua do sistema. Além disso, Hao *et al.* (2010) destacam que a adoção de políticas de manutenção baseadas na condição é vantajosa, pois possibilita a detecção precoce de problemas nos componentes, prevenindo falhas críticas. No entanto, essa estratégia

exige expertise técnica especializada, além de envolver altos custos operacionais e desafios no gerenciamento da instrumentação.

2.3 MANUTENÇÃO OPORTUNA

A manutenção oportuna ocorre quando, ao realizar a manutenção de um componente, outros componentes do mesmo sistema ou de sistemas adjacentes que requerem intervenção em um curto prazo são atendidos de forma antecipada. Li *et al.* (2023), argumentam que essa abordagem oferece maior flexibilidade em comparação com a manutenção em grupo (estratégia de manutenção planejada em que múltiplos componentes de um sistema passam por intervenções de manutenção simultaneamente, em vez de individualmente (Okumoto; Elsayed, 1983)) e a manutenção seletiva (estratégia de manutenção planejada que define intervenções em componentes específicos, equilibrando a eficiência das ações de manutenção e o consumo de recursos (Cao *et al*., 2018)), pois aproveita de maneira mais eficiente as oportunidades de realizar a manutenção de diversos componentes ao mesmo tempo, fazendo uso dos recursos de maneira mais eficiente, e reduzindo significativamente os custos de manutenção.

Cavalcante, Lopes e Scarf (2021) ressaltam que, ao desenvolver políticas de manutenção oportuna, não se define previamente o momento exato das intervenções. Em vez disso, estabelecem-se critérios para identificar as condições em que as oportunidades de manutenção devem ser aproveitadas. Um exemplo disso é a adoção de uma abordagem em que a manutenção oportuna é realizada apenas quando um determinado limiar, relacionado à idade do componente, é atingido.

Neste contexto, um modelo prático para a implementação de uma política de manutenção oportuna é apresentado por Ab-Samat e Kamaruddin (2019). Este framework é estruturado em cinco fases: a primeira consiste na identificação dos objetivos de manutenção, alinhados à gestão estratégica da empresa. Em seguida, realiza-se a priorização dos componentes críticos dos sistemas produtivos, seguida pela avaliação das atividades de manutenção preventiva e pela análise de falhas. A quarta fase envolve a definição das condições para a execução da manutenção oportuna, e, por último, inclui a medição e controle da política de manutenção recomendada.

Dekker e Plasmeijer (2001) propuseram uma política clássica de manutenção oportuna com duas variáveis de controle: um limite t e uma idade de substituição planejada T para um sistema

de componente crítico. A política de manutenção proposta estabelece que um componente deve ser substituído preventivamente na primeira oportunidade que surgir após atingir t e, no máximo, quando atingir a idade T, caso nenhuma oportunidade ocorra entre t e T. Se a unidade falhar, o sistema é imediatamente substituído. As principais suposições do modelo incluem:

- As oportunidades para uma substituição preventiva seguem um Processo de Poisson com uma taxa de intensidade finita ($\lambda > 0$), onde a função distribuição do tempo de intercorrência é dado por $E_\lambda(.)$;
- O sistema tem uma distribuição de vida útil $F(x)$, com uma função de risco crescente e contínua;
- O processo de oportunidade é independente do processo de falha;
- O custo de manutenção após falha (c_F) é maior que o custo de manutenção na idade de substituição preventiva (c_P), que por sua vez é maior que o custo de manutenção na oportunidade (c_0).

Com isso, o custo médio por unidade de tempo pode ser definido a partir da razão do custo esperado do ciclo (Equação 2.9) pelo tamanho esperado do ciclo (Equação 2.10) de renovação, conforme apresentado na Equação 2.11.

$$C(t,T) = c_P + (c_F - c_P)F(T) - (c_P - c_0)(1 - F(T))E_\lambda(T-t) - (c_F - c_P)\int_0^{T-t} E_\lambda(x)F(t+x)dx \quad (2.9)$$

$$T(t,T) = T - \int_0^T F(x)dx - \int_0^{T-t} E_\lambda(x)dx + \int_0^{T-t} E_\lambda(x)F(t+x)dx \quad (2.10)$$

$$C_\infty(t,T) = C(t,T)/T(t,T) \quad (2.11)$$

2.4 MANUTENÇÃO EM SISTEMAS DE DIFÍCIL ACESSO

Diversos estudos propõem políticas de manutenção para sistemas de difícil acesso, destacando a complexidade e os desafios enfrentados nesses setores críticos. No campo da geração de energia eólica, a literatura oferece uma vasta gama de tendências e inovações voltadas ao planejamento da manutenção, cobrindo diferentes configurações, como sistemas de componente único (Schouten *et al*., 2022), de dois componentes (Li; Wu, 2024) e multicomponentes (Yu *et al*.,

2021; Jiang *et al.*, 2022), além de contarem com sistemas críticos (Cavalcante; Lopes; Scarf, 2021) e sistemas de proteção (Rodrigues; Cavalcante; Lee, 2024).

As abordagens de manutenção incluem desde a manutenção baseada na condição (Kang; Wang; Soares, 2020) e a manutenção baseada no uso (Wang; Qiu; Wang, 2021), até a manutenção oportuna (Li *et al*., 2024). Metodologias como horizontes rolantes (Kang; Soares, 2020), framework de renovação-recompensa (Yu; Carlson; Sagitov, 2023; Alotaibi *et al.*, 2023) e processo de decisão de Markov (Cheng *et al*., 2023) são amplamente empregadas para o cálculo dos critérios de decisão, os quais geralmente envolvem custo (Li *et al*., 2020; Tian; Zhang, 2022), confiabilidade (Wang *et al*., 2021; Dui; Zhang; Zhang, 2023) e disponibilidade (Saleh *et al*., 2023) do sistema, incluindo também a combinação de diferentes critérios (Xiang *et al.*, 2024).

As técnicas de otimização adotadas também variam, incluindo algoritmos genéticos (Wang *et al*., 2020; Wang; He; Tian, 2023), algoritmos de colônia de abelhas artificiais (Yang *et al*., 2020) e busca exaustiva (Safaei; Ahmadi; Fouladirad, 2023). Além disso, as estruturas das políticas de manutenção se dividem em tempo contínuo (Wu *et al*., 2023) e discreto (Melo *et al*., 2023). Nesse contexto, a classificação desta pesquisa em relação a essas categoriais é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação desta pesquisa quanto às categoriais apresentadas na literatura

Categoria	Classificação
Configuração do sistema	Sistema de componente único
Abordagem de manutenção	Manutenção baseada na condição, no uso e manutenção oportuna
Critérios de decisão	Taxa de custo, taxa de indisponibilidade e confiabilidade operacional
Metodologia	Framework de renovação-recompensa
Técnica de otimização	Busca exaustiva
Estrutura da política de manutenção	Tempo discreto

Fonte: O Autor (2024)

As políticas com estruturas de tempo discreto, embora atualmente recebam pouca atenção, já eram discutidas em trabalhos clássicos (Nakagawa; Osaki, 1977). A principal vantagem da discretização do tempo está na maior previsibilidade das ações e na redução da carga computacional necessária para a otimização (Briš *et al*., 2017), o que facilita o planejamento da manutenção dos sistemas.

No contexto de sistemas de difícil acesso, Cavalcante, Lopes e Scarf (2021) propuseram uma política híbrida de inspeção e substituição em tempo discreto para sistemas com um único componente, utilizando o framework de renovação-recompensa. A abordagem envolve inspeções periódicas seguidas por operação sujeita à manutenção corretiva, encerrando-se com substituição preventiva ao atingir uma idade limite. O modelo considera falhas precoces, atrasos na substituição corretiva, custos de inatividade e a inadimplência na manutenção, ou seja, a não realização de uma intervenção que deveria ocorrer. Fundamentado no conceito de *delay time*, pressupõe-se que a falha seja precedida por um estado defeituoso detectável por inspeção. Os resultados indicam que a frequência de visitas e a inadimplência na manutenção são fatores críticos, e que inspeções são pouco eficazes na ausência de tendência de falha precoce.

Para aprimorar essa abordagem, Melo *et al.* (2023) introduziram uma janela de substituição oportuna na fase final da política. Essa abordagem permite ações preventivas ou corretivas a partir de um determinado momento, aproveitando oportunidades disponíveis. O modelo mantém ações em tempos predefinidos e possibilidade de inadimplência. A otimização da taxa de custo mostra que o aproveitamento de oportunidades reduz a necessidade de inspeções e substituições programadas, sendo vantajoso mesmo quando pouco frequente. Contudo, há risco de perda de sincronia entre componentes de um mesmo conjunto ao se aproveitar oportunidades em qualquer momento do ciclo de vida do componente, questão já discutida com a política de substituição por idade neste capítulo.

No contexto de usinas elétricas, Jiang *et al.* (2022) estudaram a manutenção de sistemas de proteção híbridos série-paralelo *K*-de-*N*, considerando a dependência econômica entre subsistemas para otimizar o agrupamento de manutenções e mitigar custos operacionais. A política baseada na condição integra oportunidades de manutenção e utiliza a teoria de vida útil residual (RUL, do inglês *remaining useful life*) para definir pontos de inspeção e limiares de manutenção preventiva, visando minimizar a taxa de custo. A análise de sensibilidade comprova a robustez do modelo, que supera abordagens convencionais. No entanto, sua generalização para sistemas de difícil acesso ainda é limitada pela complexidade estrutural e operacional desses ativos (Wu *et al.*, 2024). A eficácia da abordagem depende diretamente da precisão dos modelos de degradação, cuja obtenção e calibração permanecem desafios significativos.

Para sistemas de distribuição de energia elétrica, Wang, He e Tian (2023) propuseram uma política de manutenção baseada na condição, integrando manutenção oportuna e simulação de

Monte Carlo para suporte à decisão. A simulação estima os custos de manutenção conforme um cronograma específico, enquanto um Algoritmo Genético otimiza intervalos de inspeção e idade máxima de manutenção dos componentes, minimizando custos anuais. Aplicada a dados reais de uma empresa elétrica canadense responsável por cerca de 10.000 transformadores, a abordagem projetou economias entre 13,74% e 29,29% em relação a políticas convencionais. No entanto, o estudo não considera impactos das paradas na produção nem variáveis operacionais que possam inviabilizar a manutenção, como a falta de sobressalentes.

No mesmo contexto de aplicação, Rodrigues, Cavalcante e Lee (2024) propõem uma política de manutenção para sistemas de proteção, motivada por um caso real em uma empresa de distribuição de energia elétrica. O modelo considera um disjuntor crítico sujeito a falhas ocultas detectáveis apenas por inspeções ou em momentos de demanda, combinando degradação interna e choques externos como modos de falha competitivos. As inspeções são imperfeitas e suscetíveis a erros de classificação. A política híbrida integra inspeções periódicas na fase inicial e substituição preventiva baseada na idade do componente na fase final. A degradação interna é modelada pelo *delay-time*, enquanto os choques externos seguem um processo de Poisson não homogêneo. A otimização minimiza a taxa de custo, e os resultados indicam que a eficiência das inspeções depende da qualidade da manutenção, além de evidenciar a superioridade das políticas baseadas no uso para componentes de longa duração. Entretanto, o modelo é específico para sistemas de proteção e não se generaliza para sistemas de difícil acesso em geral, que incluem também sistemas críticos. Além disso, assim como a maioria dos estudos analisados, não avalia o impacto da política sobre outros critérios essenciais, como confiabilidade operacional e taxa de indisponibilidade do sistema.

Por outro lado, Alotaibi *et al.* (2023) propuseram um modelo para planejamento de inspeções de sistemas críticos, aplicado à manutenção de bombas de poços artesianos em regiões remotas. O modelo integra inspeções oportunas e programadas, considerando dois parâmetros: idade mínima para utilizar uma oportunidade e idade adequada para inspeção programada. A formulação baseia-se no framework de renovação-recompensa e busca otimizar a taxa de custo de um sistema de componente único, avaliando também a confiabilidade operacional. Os resultados demonstram economia significativa, chegando a 20% em comparação com políticas convencionais. No entanto, as expressões desenvolvidas possuem limitações de generalização, pois assumem sistemas com tempo de vida conhecido ou distribuição exponencial, uma suposição pouco realista.

Em resumo, os estudos apresentados ressaltam a importância das políticas de manutenção oportunas com tempo discreto, demonstrando seu impacto positivo na redução de custos e no aumento da confiabilidade operacional, especialmente em sistemas de difícil acesso, onde as intervenções de manutenção são limitadas e precisam ser otimizadas. No entanto, este estudo se diferencia dos trabalhos anteriores ao integrar e aprimorar três aspectos identificados na literatura:

1. Manutenção em momentos discretos: As intervenções ocorrem apenas em intervalos de tempo discretos previamente definidos, abrangendo tanto ações de manutenção planejadas, quanto as ações de manutenção oportunas preventivas e corretivas. Esse aprimoramento busca solucionar a limitação identificada em Melo *et al.* (2023), tornando o planejamento mais previsível e mantendo a sincronia entre diferentes sistemas dentro de um mesmo conjunto;
2. Modelo de duas fases distintas: Na primeira fase, a realização da manutenção é condicionada ao estado do sistema. Já na segunda fase, as ações de manutenção ocorrem independentemente dessa condição. Esse conceito foi recentemente modelado por Alotaibi *et al.* (2023) em um contexto restrito. Neste estudo, essa abordagem é expandida, tornando as expressões desenvolvidas para taxa de custo, taxa de indisponibilidade e confiabilidade operacional aplicáveis a diferentes distribuições de vida do sistema;
3. Generalização de aplicação: As formulações desenvolvidas neste estudo não apenas abrangem diferentes distribuições de vida do sistema, mas também são aplicáveis a distintos contextos operacionais. Isso inclui tanto sistemas críticos (Cavalcante; Lopes; Scarf, 2021; Wang; He; Tian, 2023), quanto sistemas de proteção (Jiang *et al.*, 2022; Rodrigues; Cavalcante; Lee, 2024).

Dessa forma, este estudo contribui para o aprimoramento das estratégias de manutenção oportunas em tempo discreto, oferecendo uma estrutura mais adequada às necessidades dos sistemas de difícil acesso.

3. PROPOSTA DE UMA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PARA SISTEMAS DE DIFÍCIL ACESSO

Este capítulo apresenta uma política de manutenção baseada na idade, que utiliza dois limites de controle: um que aciona uma manutenção oportuna, e outro que determina uma manutenção garantida (Cavalcante *et al.*, 2024). A principal inovação da política de manutenção proposta reside no fato de que as ações de manutenção são limitadas a momentos específicos, denominadas visitas, que ocorrem periodicamente, e cada visita oferece uma oportunidade de substituição com uma determinada probabilidade. Neste capítulo, também são apresentados os cálculos do custo de longo prazo por unidade de tempo, entre outros indicadores de desempenho.

3.1 NOTAÇÃO

A notação utilizada no desenvolvimento do modelo de manutenção é apresentada na Tabela 2. Essa notação serve como um guia para facilitar a compreensão do leitor durante o capítulo.

Tabela 2 - Notação da política de manutenção proposta

W	Limite inferior da janela de ações de manutenção preventivas por oportunidade (variável de decisão)
M	Idade de ação de manutenção (preventiva ou corretiva) garantida (variável de decisão)
s	Intervalo de tempo entre visitas (momentos apropriados para realizar uma ação de manutenção)
o	Probabilidade de oportunidade de ação de manutenção (preventiva ou corretiva) em uma visita
X	Variável aleatória associada ao tempo de permanência do sistema no estado bom
f_X	Função densidade de probabilidade do tempo de permanência do sistema no estado bom
F_X	Função distribuição acumulada do tempo de permanência do sistema no estado bom
R_X	Função confiabilidade do tempo de permanência do sistema no estado bom
β	Parâmetro de forma do sistema da função de densidade de probabilidade f_X
η	Parâmetro de escala do sistema da função de densidade de probabilidade f_X
c_P	Custo de uma ação de manutenção preventiva em uma oportunidade no intervalo $[0, Ms)$
c_F	Custo de uma ação de manutenção corretiva em uma oportunidade no intervalo $[0, Ms)$

c_M	Custo adicional de uma ação de manutenção (preventiva ou corretiva) garantida em Ms
c_D	Custo de inatividade do sistema por unidade de tempo
S_i	Formulação matemática do $i-$ésimo cenário de renovação $\left(i \in \{1,...,4\}\right)$
P_i	Probabilidade de ocorrência do $i-$ésimo cenário de renovação $\left(i \in \{1,...,4\}\right)$
C_i	Custo esperado do ciclo de renovação do $i-$ésimo cenário de renovação $\left(i \in \{1,...,4\}\right)$
T_i	Duração esperada do ciclo de renovação do $i-$ésimo cenário de renovação $\left(i \in \{1,...,4\}\right)$
I_i	Taxa de indisponibilidade do ciclo de renovação do $i-$ésimo cenário de renovação $\left(i \in \{1,...,4\}\right)$
C_∞	Taxa de custo do sistema sob a política de manutenção proposta (W , M) (critério de decisão)
I_∞	Taxa de indisponibilidade sob a política de manutenção proposta (W , M) (critério auxiliar)
O_∞	Confiabilidade operacional sob a política de manutenção proposta (W , M) (critério auxiliar)
C_∞^F	Taxa de custo do sistema sob a política de manutenção puramente corretiva (∞ , ∞)
I_∞^F	Taxa de indisponibilidade sob a política de manutenção puramente corretiva (∞ , ∞)
O_∞^F	Confiabilidade operacional sob a política de manutenção puramente corretiva (∞ , ∞)
C^P	Custo esperado do ciclo de renovação sob a política de manutenção por idade (M , M)
T^P	Duração esperada do ciclo de renovação sob a política de manutenção por idade (M , M)
C_∞^P	Taxa de custo do sistema sob a política de manutenção por idade (M , M)
I_∞^P	Taxa de indisponibilidade sob a política de manutenção por idade (M , M)
O_∞^P	Confiabilidade operacional sob a política de manutenção por idade (M , M)
C^O	Custo esperado do ciclo de renovação sob a política de manutenção puramente oportuna (W , ∞)
T^O	Duração esperada do ciclo de renovação sob a política de manutenção puramente oportuna (W , ∞)
C_∞^O	Taxa de custo do sistema sob a política de manutenção puramente oportuna (W , ∞)
I_∞^O	Taxa de indisponibilidade sob a política de manutenção puramente oportuna (W , ∞)
O_∞^O	Confiabilidade operacional sob a política de manutenção puramente oportuna (W , ∞)
G	Valor suficientemente grande tal que $F_X\left(Gs\right) \approx F_X\left(\left(G-1\right)s\right)$

Fonte: O Autor (2024)

3.2 MOTIVAÇÃO

Este trabalho busca reduzir a lacuna entre a teoria e a prática, propondo uma política de manutenção simples, que combina atributos de substituição por idade, em bloco e oportuna. A política se destaca por sua aplicação em contextos de manutenção periódica, nos quais as oportunidades de intervenção são restritas e dependem da disponibilidade de recursos, além de estarem sujeitas a fatores incontroláveis, como condições climáticas adversas ou outros eventos disruptivos que possam impedir a execução das ações de manutenção. Essa abordagem atende a cenários práticos, como a manutenção de sistemas de difícil acesso, em que as intervenções devem ser planejadas de forma eficiente, otimizando o uso de recursos limitados.

3.3 CARACTERIZAÇÃO E PRESSUPOSTOS DO SISTEMA

Os sistemas de difícil acesso considerados nesta modelagem são aqueles compostos por um componente crítico não reparável, cuja interação com um conector, que acopla o componente a um sistema complexo, resulta no desempenho de uma função operacional essencial para o sistema (Veevers; Ascher; Feingold, 1986). Por se tratar de um componente crítico, as falhas são imediatamente detectadas sem a necessidade de intervenções de manutenção. Entretanto, as ações de manutenção no sistema são limitadas a momentos pré-planejados, chamados de visitas.

As visitas podem coincidir com períodos de demanda reduzida, como no caso de grandes ativos hidrelétricos, ou serem definidos por limitações logísticas, como ocorre em campos de turbinas eólicas em alto mar. Dessa forma, a definição das visitas depende de fatores específicos do sistema empregado. Neste trabalho, o intervalo entre visitas (s) é considerado fixo.

Em um regime prático, no qual as ações de manutenção são realizadas apenas em intervalos periódicos, é comum que a execução de uma manutenção seja impedida por diversos fatores (Alotaibi *et al*., 2020). No contexto deste estudo, isso significa que, caso uma visita de manutenção seja impedida, a intervenção poderá ser adiada para a próxima visita programada, desde que existam restrições de recursos ou qualquer outro fator que inviabilize a execução da ação na data originalmente planejada.

Em qualquer visita, o sistema pode se apresentar em um dos dois possíveis estados: bom ou falho. O tempo de permanência do sistema no estado bom é dado por uma variável aleatória. As

funções de densidade de probabilidade do tempo de permanência do sistema no estado bom são dadas por uma distribuição de probabilidade Weibull de dois parâmetros: forma (β) e escala (η).

A distribuição Weibull é altamente flexível e amplamente utilizada para modelar diferentes conjuntos de dados e os mais diversos comportamentos de falhas de dispositivos, sendo capaz de representar taxas de falhas crescentes, constantes ou decrescentes, conforme o valor do parâmetro de forma. A Weibull de dois parâmetros é de fácil aplicação e interpretação, ajustando-se bem a dados reais de falhas (Scarf *et al.*, 2024a). Além disso, é adequada a dados reais e amplamente adotada em diversos contextos, inclusive em sistemas de difícil acesso (Melo *et al*., 2023). As Equações (3.1)-(3.3) apresentam a função densidade de probabilidade do tempo de permanência do sistema no estado bom, a função distribuição acumulada e a função confiabilidade do sistema, respectivamente.

$$f(x)=\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{3.1}$$

$$F_X(x)=1-e^{-\left(x/\eta\right)^{\beta}} \tag{3.2}$$

$$R_X(x)=e^{-\left(x/\eta\right)^{\beta}} \tag{3.3}$$

O sistema está inserido no contexto em que as oportunidades de ações de manutenção só podem ser aproveitadas nas visitas ao sistema. Assim, a chegada das oportunidades é modelada por um Processo de Bernoulli e o tempo entre as oportunidades é simplesmente o intervalo entre as visitas, com uma probabilidade específica (o) de que uma oportunidade ocorra em cada visita.

As falhas em sistemas de difícil acesso podem ter graves consequências, como danos à vida humana, ao meio ambiente, à infraestrutura e à economia. Esses sistemas, essenciais para setores vitais como o abastecimento de água e o fornecimento de energia, exigem alta disponibilidade para evitar prejuízos significativos. Por isso, neste modelo, o custo de inatividade do sistema (c_D) é considerado, abrangendo as perdas financeiras decorrentes do tempo em que o sistema permanece em estado falho. Em um sistema de geração de energia, por exemplo, esse custo reflete a perda pela interrupção na geração de energia. No contexto da distribuição de água potável, esse custo

pode incluir não apenas custos diretos, como aqueles relacionados a vazamentos, mas também custos indiretos, como a insatisfação dos consumidores.

As ações de manutenção são caracterizadas pela substituição instantânea do sistema, renovando o sistema para um estado de "tão bom quanto novo". O custo de inatividade é dado por unidade de tempo, enquanto os custos de ação de manutenção são dados por intervenções.

3.4 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PROPOSTA

A política de manutenção proposta envolve duas fases principais: uma fase inicial de manutenção corretiva, seguida de uma fase de manutenção preventiva. As visitas são oportunidades potenciais de manutenção, definidas de maneira periódica a cada s unidades de tempo. A política proposta, denominada $\{W,M\}$, conta com duas variáveis de decisão inteiras (limites de controle), W e M, onde $0<W\leq M$.

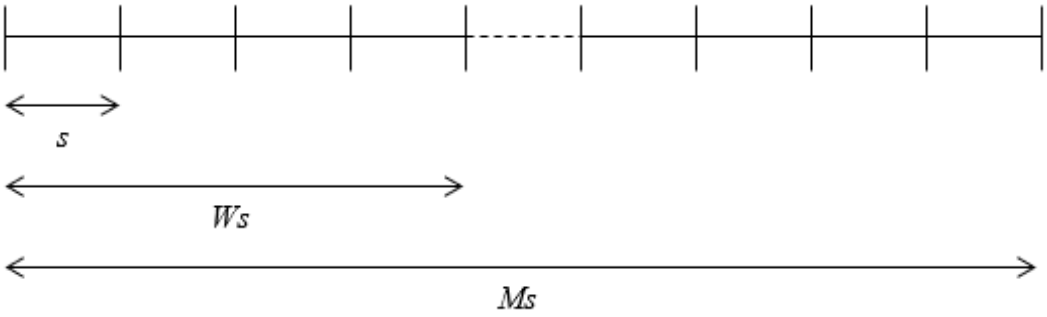
Na primeira fase, que vai do tempo 0 até imediatamente antes da $W-$ésima visita $[0,Ws)$, o sistema é substituído em uma visita apenas se estiver no estado falho e uma oportunidade surgir numa visita posterior.

A segunda fase, correspondente ao intervalo $[Ws,Ms]$, permite que o sistema seja substituído em uma visita, independentemente do seu estado, desde que haja uma oportunidade na visita, com exceção da visita final em Ms, onde uma manutenção ocorre garantidamente se o sistema atingir essa idade. Nessa visita, a substituição pode ser corretiva, caso tenha ocorrido uma falha previamente, ou preventiva, caso contrário.

Portanto, durante o período $[0,Ms)$, a manutenção depende de uma oportunidade, enquanto em Ms, torna-se garantida, independente de oportunidade. Na primeira fase, qualquer substituição é corretiva, e na segunda fase, pode ser corretiva ou preventiva. Uma representação gráfica da política de manutenção proposta neste capítulo é apresentada na Figura 4.

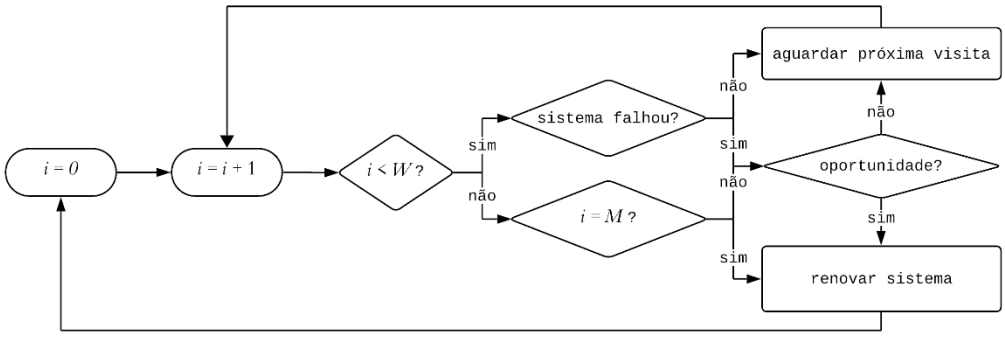
Além disso, o processo de tomada de decisão da política $\{W,M\}$ é ilustrado na Figura 5 para facilitar a compreensão. Vale ressaltar que, embora as falhas sejam detectadas de imediato, a manutenção corretiva não ocorre imediatamente, pois o sistema permanece falho até que surja uma oportunidade em uma visita ao sistema.

Figura 4 - Representação gráfica da política proposta



Fonte: O Autor (2024)

Figura 5 - Processo de tomada de decisão da política proposta



Fonte: O Autor (2024)

As oportunidades surgem na $j-$ésima visita $\left(j \in \{1,\ldots,M-1\}\right)$ com probabilidade o, independentemente da fase do sistema ou do histórico de oportunidades, seguindo um Processo de Bernoulli. Se o sistema falha entre a $(i-1)-$ésima e a $i-$ésima visita, ele é renovado na $i-$ésima visita com probabilidade o. Caso contrário, é renovado na $(i+1)-$ésima visita com probabilidade $(1-o)o$, ou na $(i+2)-$ésima visita com probabilidade $(1-o)^2 o$, e assim sucessivamente, até que, na idade Ms, a renovação do sistema ocorra de forma garantida.

Os custos são fixos e incluem o custo de inatividade por unidade de tempo (c_D), o custo de manutenção corretiva em uma oportunidade (c_F), e o custo de manutenção preventiva em uma oportunidade (c_P). Além disso, realizar renovação do sistema na $M-$ésima visita envolve um

custo extra (c_M), que está relacionado com o recurso necessário para garantir a realização da ação de manutenção na $M-$ésima visita. Assim, uma manutenção corretiva na idade Ms custa $c_F + c_M$, enquanto a preventiva custa $c_F + c_M$. Esse modelo de custos flexível permite simular cenários no qual a alta disponibilidade, a prevenção de falhas, ou ambos, são prioritários.

3.4.1 Cenários de Renovação

A seguir, são descritos e ilustrados os diferentes cenários de renovação do sistema ao aplicar a política de manutenção $\{W, M\}$. A análise detalhada de todos os cenários fundamenta o cálculo do critério de decisão, que é utilizado para otimizar as variáveis de decisão da política. O critério de decisão adotado é a taxa de custo, justificada pelo Teorema da Renovação por Recompensa (Ross, 1995). Para calcular essa taxa, é necessário determinar o custo esperado e a duração esperada do ciclo de renovação, os quais dependem da probabilidade de ocorrência de cada cenário. As formulações matemáticas correspondentes a cada cenário são apresentadas a seguir. A legenda para as representações gráficas dos cenários de renovação está contida na Tabela 3.

Tabela 3 - Legenda das representações gráficas dos cenários de renovação

●	Momento da falha no sistema
◆	Impedimento de realizar uma ação de manutenção (por falta de oportunidade)
◇	Oportunidade de realizar uma ação de manutenção
✚	Renovação corretiva do sistema (manutenção corretiva por uma oportunidade ou garantida)
✪	Renovação preventiva do sistema (manutenção preventiva por oportunidade ou garantida)

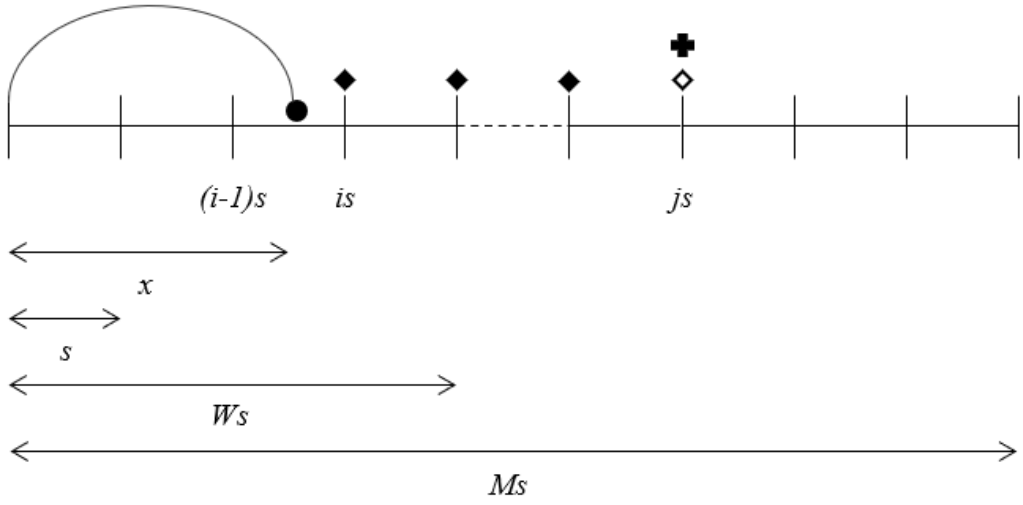
Fonte: O Autor (2024)

3.4.1.1 Cenários de Renovações Corretivas

No primeiro cenário de renovação, o sistema falha no intervalo entre visitas e uma manutenção corretiva oportuna é realizada em uma visita subsequente, mas não necessariamente aquela imediatamente posterior, visto que uma oportunidade é requerida para que haja uma ação de manutenção para renovação do sistema, sem considerar a $M-$ésima visita. A Figura 6 apresenta a representação gráfica do primeiro cenário de renovação.

A falha, representada por x, ocorre no intervalo $\left[(i-1)s, is\right]$ $\left(i \in \{1,...,M-1\}\right)$, e a duração do ciclo de renovação é um múltiplo inteiro de s, js $\left(j \in \{1,...,M-1\}\right)$, onde ocorre a manutenção corretiva por uma oportunidade, dada uma oportunidade que surge na $j-$ésima visita. Com isso, a formulação matemática que descreve o primeiro cenário de renovação é apresentada na Equação (3.4). Para calcular a probabilidade do cenário de renovação, basta substituir ϕ por 1, conforme Equação (3.5). Já para determinar as contribuições de custo, duração e tempo de inatividade do ciclo, deve-se substituir ϕ por "$c_F + c_D\left(js - x\right)$", "$js$" e "$js - x$", conforme Equações (3.6)-(3.8), respectivamente.

Figura 6 - Representação gráfica do primeiro cenário de renovação



Fonte: O Autor (2024)

$$S_1 = \sum_{i=1}^{W-1}\sum_{j=i}^{M-1}\left(1-o\right)^{j-i} o \int_{(i-1)s}^{is} \phi f_X\left(x\right)dx + \sum_{i=W}^{M-1}\sum_{j=i}^{M-1}\left(1-o\right)^{j-W} o \int_{(i-1)s}^{is} \phi f_X\left(x\right)dx \tag{3.4}$$

$$P_1 = S_1,\ \phi = 1 \tag{3.5}$$

$$C_1 = S_1,\ \phi = c_F + c_D\left(js - x\right) \tag{3.6}$$

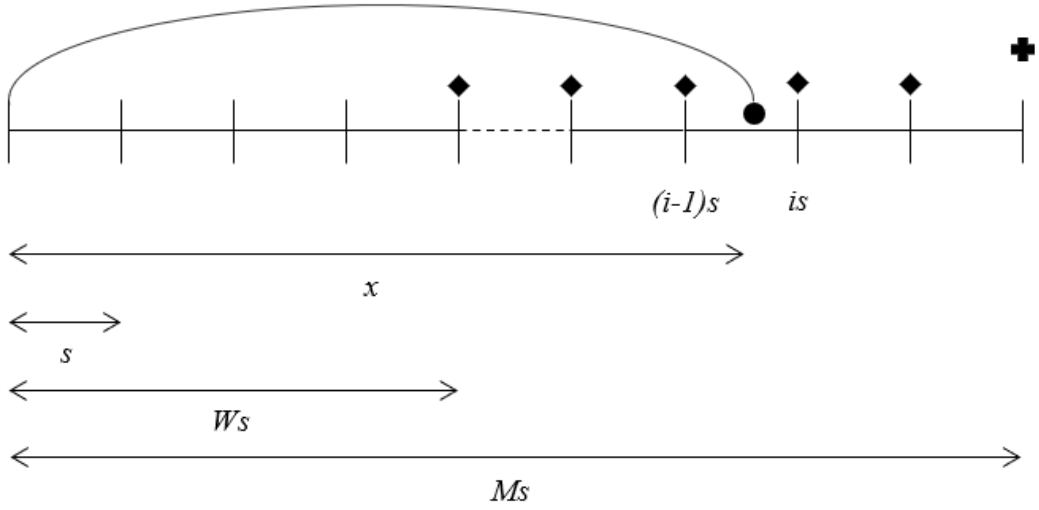
$$T_1 = S_1,\ \phi = js \tag{3.7}$$

$$I_1 = S_1,\ \phi = js - x \tag{3.8}$$

As duas fases da política de manutenção apresentam diferenças em relação à manutenção por uma oportunidade, resultando em dois termos na Equação (3.4). Se a falha ocorre na primeira fase, conforme indicado pelo primeiro termo, é preciso garantir que não haja oportunidades entre o momento da falha e a $(j-1)-$ésima visita. Essa condição é assegurada pela probabilidade associada $\left[(1-o)^{j-i}\, o\right]$. Por outro lado, se a falha ocorre na segunda fase, é necessário que não tenham surgido oportunidades antes da falha. Dessa forma, todas as visitas nesta segunda fase que precedem a visita onde a manutenção corretiva ocorre devem ser considerados como não oportunidades para manutenção. Essa condição é garantida pela probabilidade $\left[(1-o)^{j-W}\, o\right]$ do segundo termo.

O segundo cenário de renovação também envolve uma falha, mas, neste caso, a manutenção corretiva é realizada em Ms. Isso significa que, se a falha ocorre na primeira fase, não há oportunidades subsequentes até a manutenção corretiva garantida em Ms. Por outro lado, se a falha acontece na segunda fase, é necessário garantir que não existiram oportunidades nas visitas que antecedem a falha, desde o início da segunda fase até a manutenção corretiva garantida em Ms. A Figura 7 apresenta a representação gráfica do segundo cenário de renovação.

Figura 7 - Representação gráfica do segundo cenário de renovação



Fonte: O Autor (2024)

O momento da falha, representado por x, ocorre no intervalo $\left[(i-1)s, is\right]$ $\left(i \in \{1,\ldots,M\}\right)$, e a duração do ciclo de renovação é Ms, onde ocorre a manutenção corretiva garantida. Com isso, a formulação matemática que descreve o segundo cenário de renovação é apresentada na Equação (3.9). Para calcular a probabilidade do cenário de renovação, basta substituir ϕ por 1, conforme Equação (3.10). Já para determinar as contribuições de custo, duração e tempo de inatividade do ciclo, deve-se substituir ϕ por "$c_F + c_D\left(js - x\right) + c_M$", "$Ms$" e "$Ms - x$", conforme Equações (3.11)-(3.13), respectivamente.

$$S_2 = \sum_{i=1}^{W-1}\left(1-o\right)^{M-i} \int_{(i-1)s}^{is} \phi f_X\left(x\right)dx + \sum_{i=W}^{M}\left(1-o\right)^{M-W} \int_{(i-1)s}^{is} \phi f_X\left(x\right)dx \tag{3.9}$$

$$P_2 = S_2,\ \phi = 1 \tag{3.10}$$

$$C_2 = S_2,\ \phi = c_F + c_D\left(Ms - x\right) + c_M \tag{3.11}$$

$$T_2 = S_2,\ \phi = Ms \tag{3.12}$$

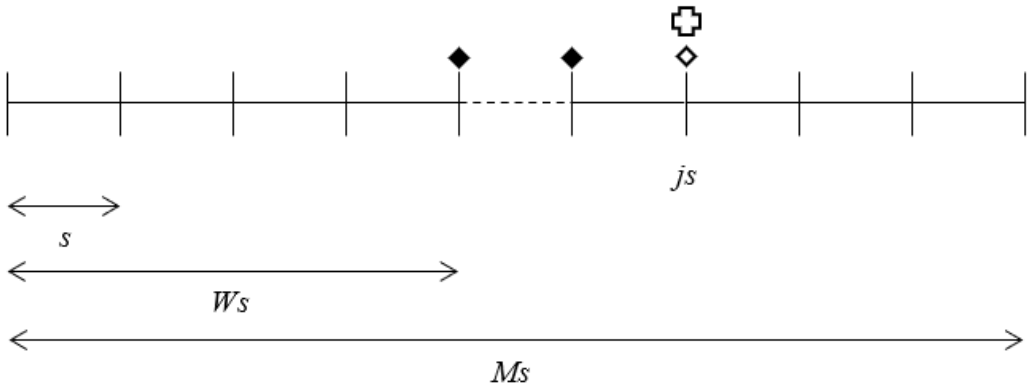
$$I_2 = S_2,\ \phi = Ms - x \tag{3.13}$$

3.4.1.2 Cenários de Renovações Preventivas

No terceiro cenário de renovação, o sistema continua em operação até a $j-$ésima visita da segunda fase, onde uma manutenção preventiva por uma oportunidade é realizada, desde que não tenham surgido oportunidades nas visitas anteriores dessa fase. Como o sistema não apresenta falha, uma manutenção corretiva por oportunidade não ocorre na primeira fase, e não há tempo de inatividade neste cenário de renovação, apresentado na Figura 8.

A duração do ciclo de renovação é js $\left(j \in \{W,\ldots,M-1\}\right)$, onde ocorre a manutenção preventiva por uma oportunidade. Assim, não há tempo de inatividade e o custo do ciclo de renovação é expresso por c_P. Com isso, a formulação matemática que descreve o terceiro cenário de renovação é apresentada na Equação (3.14). Para calcular a probabilidade do cenário de renovação, basta substituir ϕ por $\mathbf{1}$, conforme Equação (3.15). Já para determinar as contribuições de custo e de duração do ciclo, deve-se substituir ϕ por "c_P" e "js", conforme Equações (3.16) e (3.17), respectivamente.

Figura 8 - Representação gráfica do terceiro cenário de renovação



Fonte: O Autor (2024)

$$S_3 = \sum_{j=W}^{M-1} \phi(1-o)^{j-W} o R_X(js) \quad (3.14)$$

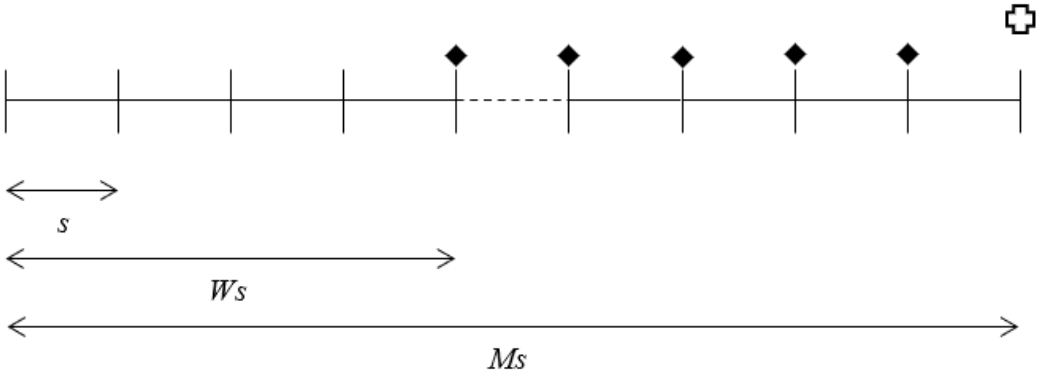
$$P_3 = S_3,\ \phi = 1 \quad (3.15)$$

$$C_3 = S_3,\ \phi = c_P \quad (3.16)$$

$$T_3 = S_3,\ \phi = js \quad (3.17)$$

Por fim, no quarto cenário de renovação, uma manutenção preventiva garantida ocorre em Ms. Dessa forma, o sistema deve sobreviver até Ms, e não devem surgir oportunidades nas visitas da segunda fase. Como o sistema sobrevive até a manutenção preventiva garantida, não há tempo de inatividade e, consequentemente, custo de inatividade do sistema. A Figura 9 ilustra a representação gráfica do quarto cenário.

Figura 9 - Representação gráfica do quarto cenário de renovação



Fonte: O Autor (2024)

A duração do ciclo de renovação é Ms e o custo do ciclo de renovação é expresso por $c_P + c_M$. Com isso, a formulação matemática que descreve o quarto cenário de renovação é apresentada na Equação (3.18). Para calcular a probabilidade do cenário de renovação, basta substituir ϕ por 1, conforme Equação (3.19). Já para determinar as contribuições de custo e de duração do ciclo, deve-se substituir ϕ por "$c_P + c_M$" e "Ms", conforme Equações (3.20) e (3.21), respectivamente.

$$S_4 = \phi\left(1-o\right)^{M-W} R_X\left(Ms\right) \tag{3.18}$$

$$P_4 = S_4,\ \phi = 1 \tag{3.19}$$

$$C_4 = S_4,\ \phi = c_P + c_M \tag{3.20}$$

$$T_4 = S_4,\ \phi = Ms \tag{3.21}$$

Dessa forma, a soma das probabilidades de todos os cenários de renovação resulta em 1. A taxa de custo, que é o critério de decisão do modelo proposto, é calculada conforme a Equação (3.22), enquanto a taxa de indisponibilidade do sistema é descrita pela Equação (3.23) e a confiabilidade operacional é determinada pela Equação (3.24).

$$C_\infty\left(W,M\right) = \sum_{i=1}^{4} C_i \Big/ \sum_{i=1}^{4} T_i \tag{3.22}$$

$$I_\infty\left(W,M\right) = \sum_{i=1}^{2} I_i \Big/ \sum_{i=1}^{4} T_i \tag{3.23}$$

$$O_\infty\left(W,M\right) = \sum_{i=1}^{4} T_i \Big/ \sum_{i=1}^{2} P_i \tag{3.24}$$

Com isso, o objetivo da política de manutenção proposta é a minimização de $C_\infty\left(W,M\right)$, sujeito à restrição de $0 < W \leq M$, sendo $W,M \in \mathbb{Z}$. Além disso, a taxa de indisponibilidade e a confiabilidade operacional do sistema são particularmente úteis na definição de restrições de confiabilidade ou disponibilidade do sistema, permitindo que a taxa de custo seja minimizada, desde que um nível especificado seja atendido.

3.4.2 Casos Especiais da Política de Manutenção

Os casos especiais da política de manutenção proposta podem ser obtidos com pequenas modificações em sua estrutura. Uma política de manutenção puramente corretiva é obtida ao definir $W = M = \infty$. Nesse caso, há apenas o primeiro cenário de renovação da política original, em que a taxa de custo é calculada pela Equação (3.25), a taxa de indisponibilidade é determinada pela Equação (3.26), e a confiabilidade operacional é expressa pela Equação (3.27), sendo G um valor suficientemente grande tal que $F_X(Gs) \approx F_X\big((G-1)s\big)$.

$$C_\infty^F = \frac{\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-i}\, o\int_{(i-1)s}^{is}\big[c_F + c_D(js-x)\big] f_X(x)dx}{\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-i}\, o\int_{(i-1)s}^{is}(js) f_X(x)dx} \tag{3.25}$$

$$I_\infty^F = \frac{\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-i}\, o\int_{(i-1)s}^{is}(js-x) f_X(x)dx}{\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-i}\, o\int_{(i-1)s}^{is}(js) f_X(x)dx} \tag{3.26}$$

$$O_\infty^F = \frac{\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-i}\, o\int_{(i-1)s}^{is}(js) f_X(x)dx}{\sum_{i=1}^{G}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-i}\, o\int_{(i-1)s}^{is} f_X(x)dx} \tag{3.27}$$

A política de manutenção por idade é obtida ao definir $W = M$. Neste caso, há apenas a primeira fase da política original, a de manutenção corretiva no intervalo $[1,\ldots,M)$, já que na $M-$ésima visita, uma manutenção garantida acontece. A taxa de custo desta política é obtida através da razão do custo esperado (Equação 3.29) pela duração esperada (Equação 3.28) do ciclo de renovação, conforme apresentado na Equação (3.30).

$$\begin{aligned} T^P = {} & \sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i}^{M-1}(1-o)^{j-i}\, o\int_{(i-1)s}^{is}(js) f_X(x)dx \\ & + Ms\left\{\sum_{i=1}^{M-1}(1-o)^{M-i}\int_{(i-1)s}^{is} f_X(x)dx + \int_{(M-1)s}^{Ms} f_X(x)dx + R_X(Ms)\right\} \end{aligned} \tag{3.28}$$

$$C^P = \sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i}^{M-1}(1-o)^{j-i}\, o \int_{(i-1)s}^{is} \left[c_F + c_D(js-x)\right] f_X(x)dx + \sum_{i=1}^{M-1}(1-o)^{M-i} \int_{(i-1)s}^{is} \left[c_F + c_D(Ms-x) + c_M\right] f_X(x)dx + \int_{(M-1)s}^{Ms} \left[c_F + c_D(Ms-x) + c_M\right] f_X(x)dx + (c_P + c_M) R_X(Ms) \quad (3.29)$$

$$C_\infty^P = C^P / T^P \quad (3.30)$$

A indisponibilidade esperada é calculada através da Equação (3.31) para gerar da taxa de indisponibilidade (Equação 3.32). A confiabilidade operacional da política de manutenção por idade é apresentada na Equação (3.33).

$$I^P = \sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i}^{M-1}(1-o)^{j-i}\, o \int_{(i-1)s}^{is} (js-x) f_X(x)dx + \sum_{i=1}^{M-1}(1-o)^{M-i} \int_{(i-1)s}^{is} (Ms-x) f_X(x)dx + \int_{(M-1)s}^{Ms} (Ms-x) f_X(x)dx \quad (3.31)$$

$$I_\infty^P = I^P / T^P \quad (3.32)$$

$$O_\infty^P = \frac{T^P}{\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i}^{M-1}(1-o)^{j-i}\, o \int_{(i-1)s}^{is} f_X(x)dx + \sum_{i=1}^{M-1}(1-o)^{M-i} \int_{(i-1)s}^{is} f_X(x)dx + \int_{(M-1)s}^{Ms} f_X(x)dx} \quad (3.33)$$

Outro caso especial é definido a partir da política de manutenção puramente oportuna, no qual W é otimizado e $M=\infty$. Dessa forma, apenas o primeiro e o terceiro cenário de renovação são considerados da política proposta. A taxa de custo para esta política é obtida através da razão do custo esperado (Equação (3.34)) e pela duração esperada (Equação (3.35)) do ciclo de renovação, conforme apresentado na Equação (3.36), sendo G um valor suficientemente grande tal que $F_X(Gs) \approx F_X((G-1)s)$. A taxa de indisponibilidade (Equação 3.37) e confiabilidade operacional (Equação 3.38) são também apresentadas abaixo.

$$C^{O} = \sum_{i=1}^{W-1}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-i}\, o \int_{(i-1)s}^{is} \left[c_F + c_D(js-x)\right] f_X(x)dx + \sum_{i=W}^{G}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-W}\, o \int_{(i-1)s}^{is} \left[c_F + c_D(js-x)\right] f_X(x)dx + \sum_{j=W}^{G}(c_P)(1-o)^{j-W}\, oR_X(js) \tag{3.34}$$

$$T^{O} = \sum_{i=1}^{W-1}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-i}\, o \int_{(i-1)s}^{is} (js) f_X(x)dx + \sum_{i=W}^{G}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-W}\, o \int_{(i-1)s}^{is} (js) f_X(x)dx + \sum_{j=W}^{G}(js)(1-o)^{j-W}\, oR_X(js) \tag{3.35}$$

$$C_{\infty}^{O} = C^{O}/T^{O} \tag{3.36}$$

$$I_{\infty}^{O} = \frac{\sum_{i=1}^{W-1}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-i}\, o \int_{(i-1)s}^{is} (js-x) f_X(x)dx + \sum_{i=W}^{G}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-W}\, o \int_{(i-1)s}^{is} (js-x) f_X(x)dx}{T^{O}} \tag{3.37}$$

$$O_{\infty}^{O} = \frac{T^{O}}{\sum_{i=1}^{W-1}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-i}\, o \int_{(i-1)s}^{is} f_X(x)dx + \sum_{i=W}^{G}\sum_{j=i}^{G}(1-o)^{j-W}\, o \int_{(i-1)s}^{is} f_X(x)dx} \tag{3.38}$$

A política de manutenção proposta (W,M), assim como seus casos especiais, não faz distinção entre sistemas críticos e sistemas de proteção, podendo ser aplicados a ambos. Em um contexto de sistema de proteção, em uma visita com oportunidade, o sistema pode ser testado, e caso seja detectada uma falha, deve-se proceder com a manutenção corretiva por uma oportunidade. A partir da $W-$ésima visita, qualquer oportunidade exige a execução de uma ação de manutenção (preventiva ou corretiva) por oportunidade, independentemente do estado do sistema. Na $M-$ésima visita, a ação de manutenção (preventiva ou corretiva) é garantida.

4. ESTUDO NUMÉRICO DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PROPOSTA

Neste capítulo, um estudo numérico da política de manutenção apresentada no capítulo anterior é conduzido. Primeiramente, são definidos os valores dos parâmetros do caso base e a política de manutenção recomendada para o caso base. Em seguida, realiza-se uma análise de sensibilidade para examinar o comportamento da política proposta (W, M) diante da variação dos seus parâmetros de entrada. Por fim, são feitas comparações com casos especiais da política, além de uma análise comparativa com uma versão contínua da política de manutenção proposta na literatura, avaliando o custo marginal decorrente da discretização.

4.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

Os parâmetros de entrada para aplicação do modelo estão apresentados na Tabela 4. Esses valores foram selecionados para ilustrar um comportamento relevante da política de manutenção proposta e por serem inspirados em um cenário real de um componente não reparável em turbinas em um parque eólico (Kang; Soares, 2020). A unidade de tempo é arbitrária, sendo definido s, o intervalo entre visitas, como a unidade base, enquanto a razão entre η e s determina a velocidade da passagem do tempo. Da mesma forma, a unidade monetária foi arbitrariamente escolhida, utilizando-se c_P, o custo de manutenção preventiva em uma oportunidade.

Tabela 4 - Definição dos parâmetros de entrada do modelo (caso base)

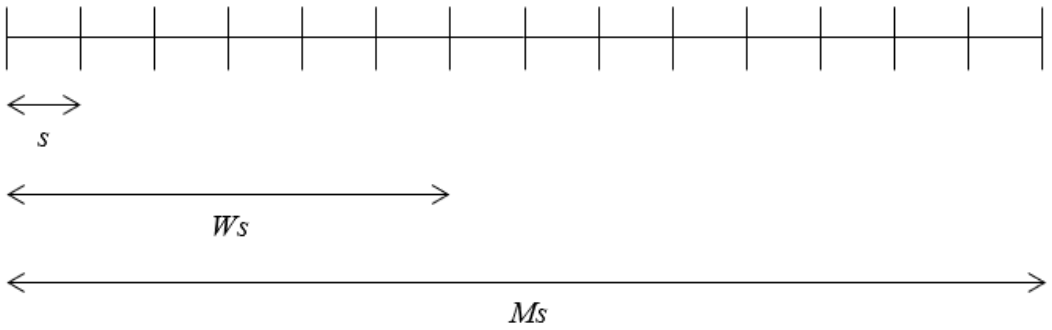
$\beta = 3$	Parâmetro de forma do sistema
$\eta = 10$	Parâmetro de escala do sistema
$c_P = 1$	Custo de uma ação de manutenção preventiva em uma oportunidade
$c_D = 0{,}5$	Custo de inatividade do sistema por unidade de tempo
$c_M = 1$	Custo adicional de uma ação de manutenção (preventiva ou corretiva) garantida
$c_F = 1$	Custo de uma ação de manutenção corretiva em uma oportunidade
$o = 0{,}2$	Probabilidade de oportunidade em uma visita
$s = 1$	Intervalo de tempo entre visitas

Fonte: O Autor (2024)

4.2 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO RECOMENDADA

Para o conjunto de parâmetros de entradas definidos no caso base, a política (W,M) que minimiza a taxa de custo é $W^* = 6$ e $M^* = 14$, que resulta em $C_\infty^* = 0{,}223$, $I_\infty = 0{,}193$ e $O_\infty = 17{,}3$. Em outras palavras, ao adotar a política ótima de manutenção, o custo de manutenção do sistema é de 0,223 unidade monetária por unidade de tempo, a proporção de tempo em que o sistema permanece em estado de falha até a realização de uma manutenção corretiva é de aproximadamente 19,3% da duração esperada do ciclo de vida do sistema, e o tempo médio de operação antes de uma falha operacional é de 17,3 unidades de tempo. A política ótima é representada graficamente através da Figura 10.

Figura 10 - Representação gráfica da política de manutenção recomendada



Fonte: O Autor (2024)

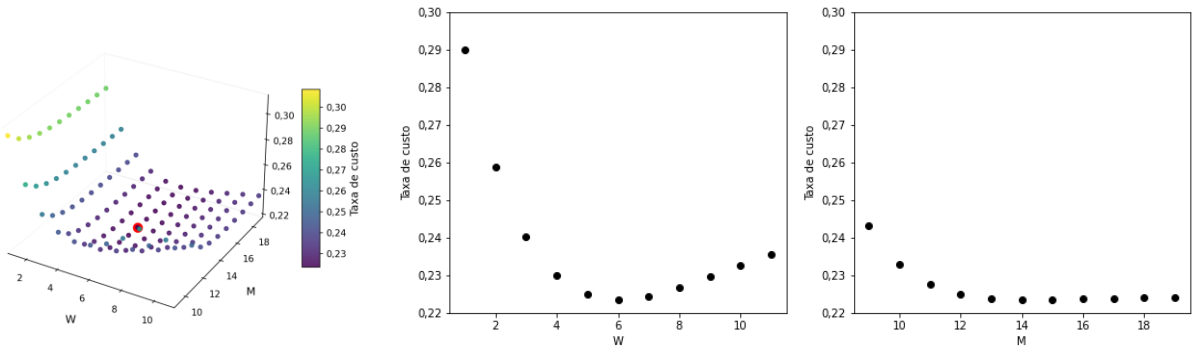
A política ótima é determinada por meio de uma busca exaustiva sobre as variáveis de decisão W e M $\left(W,M \in \{1,\ldots,50\}\right)$. O algoritmo foi implementado em *Python*, utilizando as bibliotecas *SciPy* e *NumPy*, com tempo de execução aproximado de 5 minutos. Para $W,M \geq 50$ os incrementos na taxa de custo são desprezíveis. Embora a confiabilidade do sistema em idades avançadas seja improvável (por exemplo, $R_X(33) < 10^{-15}$), a busca em uma ampla faixa de valores é necessária, pois a renovação do sistema pode ser adiada após a falha, especialmente quando a probabilidade de oportunidade de manutenção é baixa. Por exemplo, para $o = 0{,}2$, a probabilidade de uma falha persistir por pelo menos 20 visitas é significativa, sendo $(1-o)^{20} = 0{,}8^{20} = 0{,}0115$.

4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

As análises de sensibilidade nas Figuras 11 a 13 avaliam a influência das variáveis de decisão nas métricas da política de manutenção proposta. O ponto vermelho representa a posição das variáveis de decisão que minimizam a taxa de custo do sistema ($W^* = 6$ e $M^* = 14$), considerando os parâmetros do caso base apresentados anteriormente (veja a Tabela 4). A taxa de custo da política de manutenção proposta é significativamente mais sensível à abertura da janela de oportunidades (W) do que à idade de garantia de manutenção (M) para valores próximos às variáveis de decisão retornadas (Figura 11). A variação pode resultar em um aumento de até 29,73% na taxa de custo quando $W = 1$ ($C_\infty = 0{,}290$), comparado a um aumento de 8,84% quando $M = 9$ ($C_\infty = 0{,}243$). Esse resultado sugere que, embora as oportunidades sejam valiosas, seu uso excessivo pode elevar os custos sem benefícios proporcionais, já que o retorno de cada intervenção tende a diminuir com a frequência.

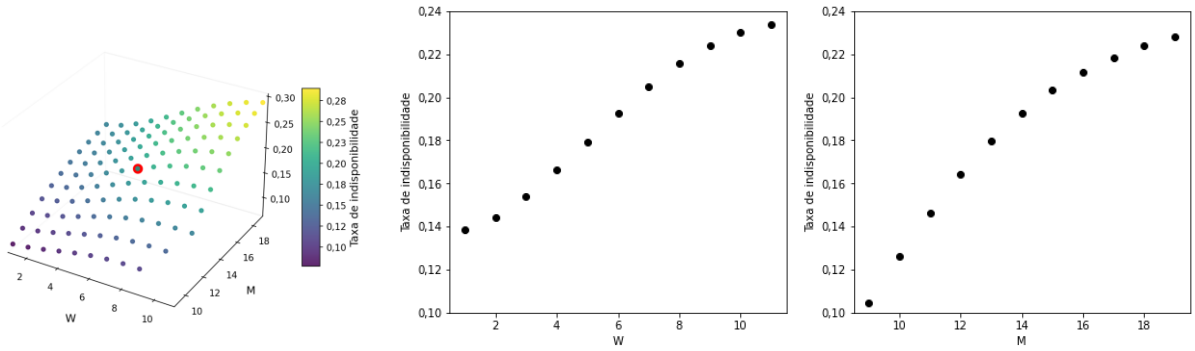
O mesmo efeito é observado para a confiabilidade operacional (Figura 13), que pode aumentar até 42,42% quando $W = 1$ ($O_\infty = 24{,}7$), em comparação a um aumento de 12,19% quando $M = 9$ ($O_\infty = 19{,}4$). Já a taxa de indisponibilidade (Figura 12) apresenta comportamento inverso, sendo mais sensível à idade de garantia de manutenção do que à abertura da janela de oportunidades, com redução de até 45,86% quando $M = 9$ ($I_\infty = 0{,}104$), frente a uma redução de 28,21% quando $W = 1$ ($I_\infty = 0{,}138$).

Figura 11 - Análise de sensibilidade da taxa de custo do sistema em função das variáveis de decisão para diferentes valores de W $\left(W \in \{1,\ldots,11\}\right)$ e M $\left(M \in \{9,\ldots,19\}\right)$



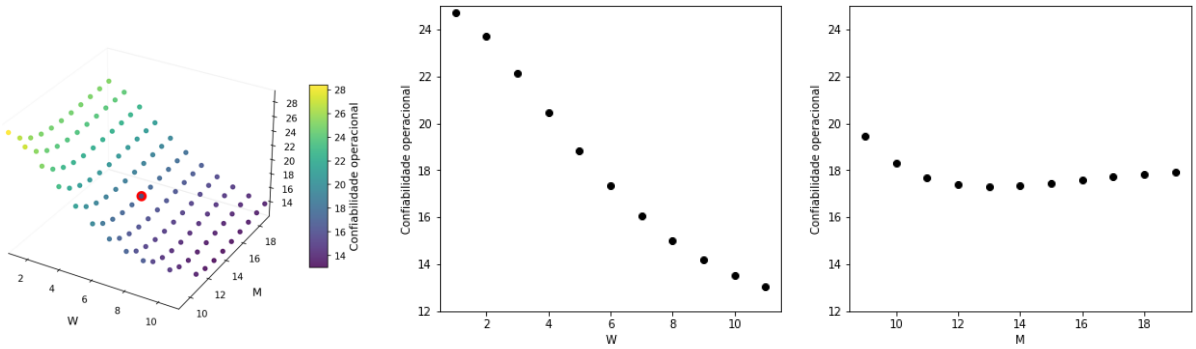
Fonte: O Autor (2024)

Figura 12 - Análise de sensibilidade da taxa de inatividade do sistema em função das variáveis de decisão para diferentes valores de W $\left(W \in \{1,\ldots,11\}\right)$ e M $\left(M \in \{9,\ldots,19\}\right)$



Fonte: O Autor (2024)

Figura 13 - Análise de sensibilidade da confiabilidade operacional do sistema em função das variáveis de decisão para diferentes valores de W $\left(W \in \{1,\ldots,11\}\right)$ e M $\left(M \in \{9,\ldots,19\}\right)$



Fonte: O Autor (2024)

A análise de sensibilidade apresentada na Tabela 5 examina diferentes alternativas para os valores dos parâmetros de entrada ao otimizar a política de manutenção proposta. No caso base (caso 0), os custos da manutenção preventiva e corretiva em uma oportunidade são iguais $(c_P = c_F = 1)$. Com isso, o custo de inatividade por unidade de tempo ($c_D = 0{,}5$) é o único que representa o impacto que a falha causa no sistema. No entanto, uma falha pode acarretar outros riscos além do tempo de inatividade, como danos à reputação, questões de segurança e consequências imprevistas, o que pode justificar considerar riscos adicionais, no qual $c_F > c_P$. O custo adicional de uma ação de manutenção garantida no caso base ($c_M = 1$) resulta na duplicação do custo de renovação, uma vez que assegura a execução da intervenção de manutenção. Além

disso, a probabilidade de oportunidade de manutenção em uma visita é considerada baixa no caso base ($o = 0,2$), refletindo a escassez de recursos e a raridade de oportunidades de sistemas de difícil acesso. A vida útil característica do sistema ($\eta = 10$) é relativamente baixa em comparação ao intervalo de tempo entre visitas ($s = 1$) e moderadamente variável ($\beta = 3$).

Tabela 5 - Análise de sensibilidade da política de manutenção proposta

Casos	Parâmetros								Política (W, M)				
	η	c_P	β	c_D	c_M	c_F	o	s	W^*	M^*	C_∞^*	I_∞	O_∞
0	10	1	3	0,5	1	1	0,2	1	6	14	0,223	0,193	17,3
1	10	1	1	0,5	1	1	0,2	1	≥50	≥50	0,225	0,310	14,5
2	10	1	2	0,5	1	1	0,2	1	8	20	0,237	0,275	15,2
3	10	1	5	0,5	1	1	0,2	1	6	12	0,205	0,127	19,1
4	10	1	3	0	1	1	0,2	1	≥50	≥50	0,074	0,335	13,4
5	10	1	3	0,25	1	1	0,2	1	10	≥50	0,157	0,305	14,7
6	10	1	3	1	1	1	0,2	1	5	9	0,292	0,099	21,2
7	10	1	3	0,5	0,25	1	0,2	1	8	9	0,194	0,109	17,1
8	10	1	3	0,5	0,5	1	0,2	1	7	11	0,208	0,154	16,3
9	10	1	3	0,5	2	1	0,2	1	6	≥50	0,225	0,245	18,3
10	10	1	3	0,5	1	1,5	0,2	1	5	≥50	0,251	0,227	19,7
11	10	1	3	0,5	1	2	0,2	1	5	≥50	0,277	0,227	19,7
12	10	1	3	0,5	1	4	0,2	1	3	≥50	0,371	0,195	23,0
13	10	1	3	0,5	1	1	0,1	1	5	11	0,259	0,184	16,8
14	10	1	3	0,5	1	1	0,4	1	9	≥50	0,176	0,139	14,3
15	10	1	3	0,5	1	1	1	1	15	≥16	0,132	0,051	09,7
16	10	1	3	0,5	1	1	0,2	0,5	16	≥50	0,182	0,146	15,4
17	10	1	3	0,5	1	1	0,2	1,5	4	8	0,247	0,196	16,6
18	10	1	3	0,5	1	1	0,2	2	3	6	0,260	0,214	16,2
19	10	1	3	0,5	1	2	0,1	1	4	10	0,316	0,150	18,4
20	10	1	3	0,5	1	2	0,4	1	6	≥50	0,232	0,094	21,0
21	10	1	3	0,5	1	2	1	1	8	≥9	0,205	0,026	18,2
22	10	1	3	0,5	0,5	1	0,4	1	9	≥50	0,176	0,139	14,3
23	10	1	3	0,5	2	1	0,4	1	9	≥50	0,176	0,139	14,3
24	10	1	3	0,5	1	2	0,4	1	6	≥50	0,232	0,094	21,0
25	10	1	3	0,5	1	3	0,4	1	5	≥50	0,275	0,079	25,1
26	10	1	3	0,5	1	4	0,4	1	4	≥50	0,313	0,064	30,7
27	10	1	2	0,25	1	2	0,2	1	9	≥50	0,229	0,298	15,1
28	10	1	2	0,25	1	3	0,2	1	6	≥50	0,292	0,269	16,7
29	10	1	2	0,25	1	4	0,2	1	5	≥50	0,351	0,257	17,5
30	10	1	3	0,5	1	2	0,4	1	6	≥50	0,232	0,094	21,0

Fonte: O Autor (2024)

À medida que a variabilidade da vida útil característica do sistema aumenta, isto é, com a redução de β, conforme os casos 1 a 3, observa-se uma postergação do limiar inferior da janela

de ações de manutenção preventivas por oportunidades (W) e da idade de ação de manutenção garantida (M) na política ótima resultante. Esse efeito resulta na configuração de uma política de manutenção puramente corretiva (∞,∞) quando o tempo de vida do sistema é modelado por uma distribuição exponencial (caso 1).

As taxas de indisponibilidade do sistema são elevadas nos casos analisados devido à baixa probabilidade de oportunidade em uma visita, ao longo intervalo entre visitas (s) em relação à vida útil característica do sistema (η) e à baixa taxa de custo de inatividade do sistema (c_D). No entanto, observa-se uma redução na indisponibilidade no caso 6, onde c_D é maior, no caso 16, em que s é menor, e nos casos 20, 24-26 e 30, onde o é maior. Isso indica que a disponibilidade do sistema aumenta com a alocação de mais recursos de manutenção e a aplicação de penalidades mais rigorosas à indisponibilidade.

Além disso, na maioria dos casos mencionados anteriormente, a política original assume a forma de um caso especial, equivalente à política de manutenção puramente oportuna (W,∞). A razão para isso é que intervalos de manutenção mais frequentes e/ou maior probabilidade de oportunidade aumentam as chances de intervenção, tornando menos necessário o agendamento de uma manutenção garantida na $M-$ésima visita. Esse comportamento persiste para diferentes valores de custo adicional de renovação garantida (c_M), como nos casos 22 e 23, onde se observa que c_M se torna um parâmetro redundante quando M é grande.

O efeito da política original convergir para a manutenção puramente oportuna também ocorre quando o custo da manutenção corretiva em uma oportunidade (c_F) aumenta, como nos casos 10-12 e 27-29. Nesses casos, observa-se uma leve redução de W^* à medida que c_F cresce. Isso indica um maior aproveitamento das oportunidades para renovação preventiva à medida que o custo da correção se torna mais elevado.

Quando os recursos não são escassos, ou seja, $o=1$ (casos 15 e 21), a manutenção corretiva é garantida em qualquer visita na primeira fase da política, enquanto uma ação preventiva ou corretiva é garantida na $W-$ésima visita. Assim, qualquer valor de $M>W^*$ é admissível, pois M não influencia esses casos específicos. Além disso, a taxa de indisponibilidade do sistema é baixa, uma vez que o tempo no estado de falha é reduzido. No caso 15, a confiabilidade operacional é limitada, pois não há preocupação do sistema falhar além do tempo de inatividade. Portanto, essa

métrica pode não ser ideal para avaliar a política de manutenção nesse cenário, mas sua análise pode ser relevante em outros contextos.

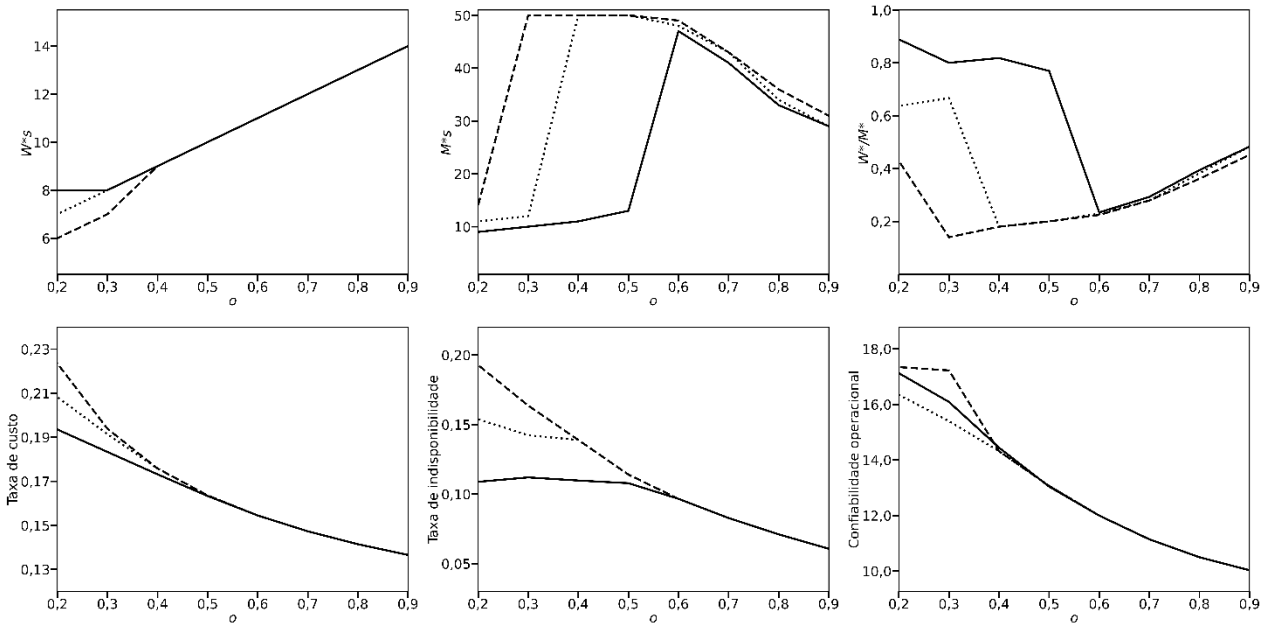
As variáveis de decisão dependem diretamente de c_D. À medida que a taxa de custo de inatividade aumenta (casos 4-6), a segunda fase da manutenção começa mais cedo, resultando em um valor de W^* menor. Quando $c_D = 0$ (caso 4), a política ótima é a puramente corretiva (∞,∞). No caso de $c_D = 0{,}25$ (caso 5), a política ótima passa a ser a política de manutenção puramente oportuna (W,∞). Para $c_D = 0{,}5$ (caso 0) e $c_D = 1$ (caso 6), a política de manutenção ótima utiliza ambas as variáveis de decisão, W^* e M^*.

À medida que as oportunidades se tornam menos raras e as intervenções de manutenção mais frequentes, como nos casos 13-21, as taxas de custo e inatividade da política ótima diminuem. No entanto, esse efeito proporcional não se reflete na confiabilidade operacional. Além disso, com oportunidades e visitas mais frequentes, o sistema tende a postergar a idade de renovação garantida, reduzindo a dependência da renovação na $M-$ésima visita ao aproveitar melhor as oportunidades. Esse efeito também é observado à medida que o custo adicional de uma manutenção garantida $(c_M = 1)$ aumenta, como nos casos 7-9.

De modo geral, a análise de sensibilidade reforça a consistência do modelo matemático proposto e destaca a importância de uma estimativa precisa dos valores dos parâmetros de entrada. Uma vez que essa estimativa pode influenciar significativamente a política de manutenção ótima recomendada para o sistema.

A Figura 14 mostra que a política de manutenção proposta (W,M) é pouco sensível às variações de c_M quando a probabilidade de oportunidade em uma visita (o) é alta. No entanto, para valores menores de o, as variações em c_M geram o efeito esperado. À medida que o diminui, a janela para a manutenção preventiva oportuna se abre mais cedo, ampliando as oportunidades de intervenção. As métricas de desempenho da política apresentam comportamento semelhante para diferentes valores de c_M e o, convergindo para valores praticamente iguais de taxa de custo, indisponibilidade e confiabilidade operacional a partir de $o \geq 0{,}5$. Esse resultado evidencia a robustez da política de manutenção proposta, demonstrando sua capacidade de adaptação às características do sistema em que é implementada.

Figura 14 - Análise de sensibilidade do comportamento da política de manutenção proposta em função da probabilidade de oportunidade para os parâmetros do caso base, variando o valor de c_M ($-$ para $c_M = 0{,}25$; $\cdots$ para $c_M = 0{,}5$; $---$ para $c_M = 1$)



Fonte: O Autor (2024)

4.4 COMPARAÇÃO COM CASOS ESPECIAIS

A análise de sensibilidade da Tabela 6 avalia diferentes configurações dos parâmetros de entrada da Tabela 5 na otimização dos casos especiais da política de manutenção proposta. No caso base (caso 0), a política proposta reduz a taxa de custo em 7,66% em relação à política puramente corretiva (∞,∞), 7,44% em comparação à política de manutenção por idade (M,M), e 0,54% em relação à política puramente oportuna (W,∞).

Para as outras métricas, a política proposta reduz a taxa de inatividade em 42,48% frente à política puramente corretiva, enquanto as políticas de manutenção por idade e puramente oportuna promovem reduções de 28,88% e 21,31%, respectivamente. Em termos de confiabilidade operacional, a política proposta aumenta essa métrica em 29,14% e 39,52% em relação às políticas puramente corretiva e de manutenção por idade, respectivamente, mas apresenta uma redução de 5,33% em comparação à política puramente oportuna.

Para os outros casos analisados, a política proposta demonstra uma redução expressiva na taxa de custo em comparação com a maioria dos seus casos especiais. Em particular, quando

comparada à política puramente corretiva, observa-se uma economia relativa na ordem de 20 a 30% na taxa de custo, notadamente em casos caracterizados por uma elevada taxa de custo de inatividade (caso 6), por um baixo custo adicional de garantia de renovação (caso 7) ou por um alto custo associado à renovação corretiva (casos 12, 25 e 26). Além disso, a análise revela que a política proposta exibe desempenho superior, tanto em termos de disponibilidade quanto de confiabilidade, em relação à abordagem puramente corretiva, independente do caso considerado.

Tabela 6 - Análise de sensibilidade dos casos especiais da política de manutenção proposta

Casos	Política (∞,∞)			Política (M,M)				Política (W,∞)			
	C_∞^*	I_∞	O_∞	M^*	C_∞^{F*}	I_∞^F	O_∞^F	W^*	C_∞^{O*}	I_∞^O	O_∞^O
0	0,242	0,335	13,4	16	0,241	0,271	12,4	6	0,225	0,245	18,3
1	0,225	0,310	14,5	≥50	0,225	0,310	14,5	≥50	0,225	0,310	14,5
2	0,243	0,337	13,4	25	0,243	0,325	13,2	8	0,237	0,290	15,5
3	0,238	0,329	13,7	12	0,235	0,174	12,0	6	0,209	0,217	20,7
4	0,074	0,335	13,4	≥50	0,074	0,335	13,4	33	0,074	0,335	13,4
5	0,158	0,335	13,4	≥50	0,158	0,335	13,4	10	0,157	0,305	14,7
6	0,410	0,335	13,4	9	0,322	0,109	16,6	4	0,336	0,210	21,3
7	0,242	0,335	13,4	9	0,195	0,109	16,6	6	0,225	0,245	18,3
8	0,242	0,335	13,4	11	0,215	0,163	13,6	6	0,225	0,245	18,3
9	0,242	0,335	13,4	≥50	0,242	0,335	13,4	6	0,225	0,245	18,3
10	0,279	0,335	13,4	≥50	0,279	0,335	13,4	5	0,251	0,227	19,7
11	0,316	0,335	13,4	≥50	0,316	0,335	13,4	5	0,277	0,227	19,7
12	0,465	0,335	13,4	7	0,438	0,060	23,6	3	0,371	0,195	23,0
13	0,311	0,512	18,3	11	0,272	0,197	14,2	4	0,294	0,432	21,7
14	0,183	0,183	10,9	≥50	0,183	0,183	10,9	9	0,176	0,139	14,3
15	0,133	0,053	9,4	35	0,133	0,053	9,4	15	0,132	0,051	9,7
16	0,190	0,201	11,2	≥50	0,190	0,201	11,2	16	0,182	0,146	15,4
17	0,279	0,430	15,7	8	0,263	0,215	13,3	3	0,260	0,329	20,4
18	0,307	0,502	17,9	6	0,274	0,230	13,6	2	0,289	0,411	21,8
19	0,366	0,512	18,3	10	0,340	0,161	15,2	4	0,340	0,432	21,7
20	0,274	0,183	10,9	≥50	0,274	0,183	10,9	6	0,232	0,094	21,0
21	0,239	0,053	9,4	35	0,239	0,053	9,4	8	0,205	0,026	18,2
22	0,183	0,183	10,9	≥50	0,183	0,183	10,9	9	0,176	0,139	14,3
23	0,183	0,183	10,9	≥50	0,183	0,183	10,9	9	0,176	0,139	14,3
24	0,274	0,183	10,9	≥50	0,274	0,183	10,9	6	0,232	0,094	21,0
25	0,366	0,183	10,9	≥50	0,366	0,183	10,9	5	0,275	0,079	25,1
26	0,457	0,183	10,9	8	0,429	0,062	18,9	4	0,313	0,064	30,7
27	0,234	0,337	13,4	≥50	0,234	0,337	13,4	9	0,229	0,298	15,1
28	0,309	0,337	13,4	≥50	0,309	0,337	13,4	6	0,292	0,269	16,7
29	0,384	0,337	13,4	≥50	0,384	0,337	13,4	5	0,351	0,257	17,5
30	0,274	0,183	10,9	≥50	0,274	0,183	10,9	6	0,232	0,094	21,0

Fonte: O Autor (2024)

No caso 1, onde $\beta = 1$, observa-se que todas as estratégias convergem para valores idênticos, o que indica que, sob determinadas condições, por exemplo, quando a vida útil do sistema é modelada por uma distribuição exponencial, a escolha da política de manutenção torna-se menos determinante. Esse efeito também é parcialmente constatado nos casos 4 e 5, quando a taxa de custo de inatividade é baixa ou nula, evidenciando que, na ausência de um impacto severo do tempo de inatividade, a seleção da política exerce influência reduzida sobre os resultados.

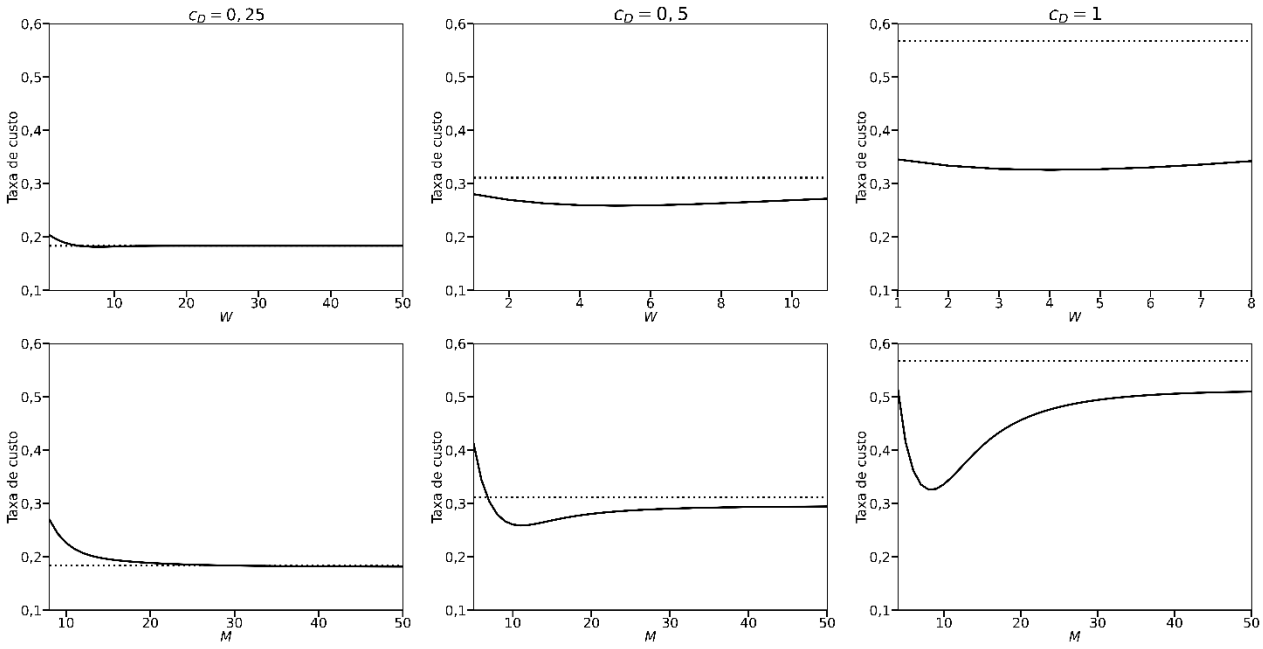
A política de manutenção por idade (M,M) apresenta métricas ligeiramente superiores à abordagem puramente corretiva, adotando seu formato em situações específicas: quando o custo adicional de garantia de renovação na M-ésima visita é elevado (caso 9), quando a taxa de custo de inatividade é baixa (casos 4 e 5) ou quando os recursos são menos escassos, permitindo maior frequência de oportunidades (casos 22–25 e 27–30). Destaca-se, ainda, que, em cenários de alto custo de renovação corretiva (caso 12), a redução na taxa de inatividade ultrapassa 200% comparando com a política proposta (W,M).

Os resultados apresentados na Tabela 5 indicam que, em contextos de abundância de recursos de manutenção, as diferenças entre as políticas tendem a ser pequenas. Entretanto, em ambientes adversos, caracterizados por uma elevada taxa de custo de inatividade ou por parâmetros operacionais que impõem desafios mais significativos, a política proposta revela-se significativamente mais robusta do que seus casos especiais.

A robustez da política de manutenção proposta é também analisada nas Figuras 15 a 17 por meio de uma análise de sensibilidade das variáveis de decisão. A taxa de custo resultante da política (W,M) é comparada à da política puramente corretiva (∞,∞) para diferentes taxas de custo de inatividade (c_D) e probabilidades de oportunidade de manutenção (o).

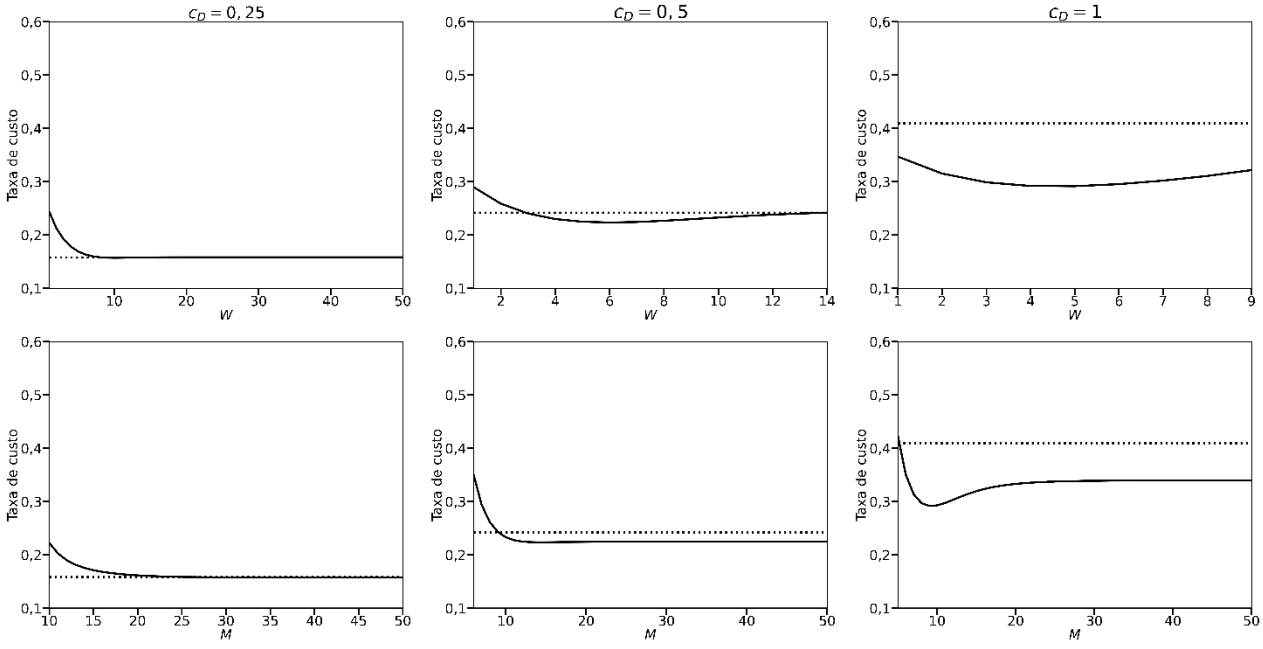
De maneira geral, observa-se que a taxa de custo é menos sensível ao W do que ao M quando o é pequeno (Figura 15), e os efeitos tendem a inverter à medida que o aumenta (Figura 17). Esse comportamento é esperado, pois, quando as oportunidades são raras, o momento exato em que a janela de oportunidade deve ser acionada torna-se menos relevante do que a definição do momento em que a manutenção garantida deve ocorrer. Além disso, a análise confirma que a política proposta se revela significativamente mais vantajosa em comparação com a puramente corretiva, especialmente quando a taxa de custo de inatividade é alta, com a diferença entre as políticas sendo mais pronunciada quando as oportunidades são escassas (Figuras 15 e 16).

Figura 15 - Análise de sensibilidade das variáveis de decisão da política proposta (–) e da política puramente corretiva (⋯) para os valores do caso base (com $o = 0{,}1$), variando c_D



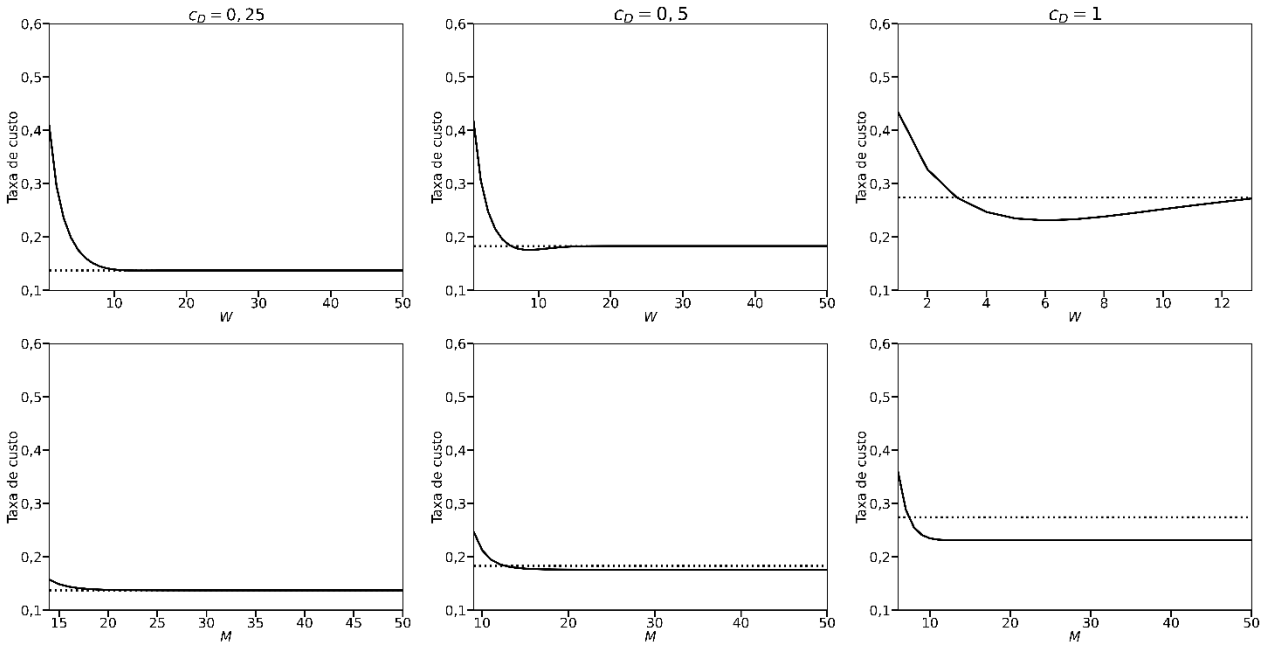
Fonte: O Autor (2024)

Figura 16 - Análise de sensibilidade das variáveis de decisão da política proposta (–) e da política puramente corretiva (⋯) para os valores do caso base (com $o = 0{,}2$), variando c_D



Fonte: O Autor (2024)

Figura 17 - Análise de sensibilidade das variáveis de decisão da política proposta (–) e da política puramente corretiva (⋯) para os parâmetros do caso base (com $o = 0{,}4$), variando c_D



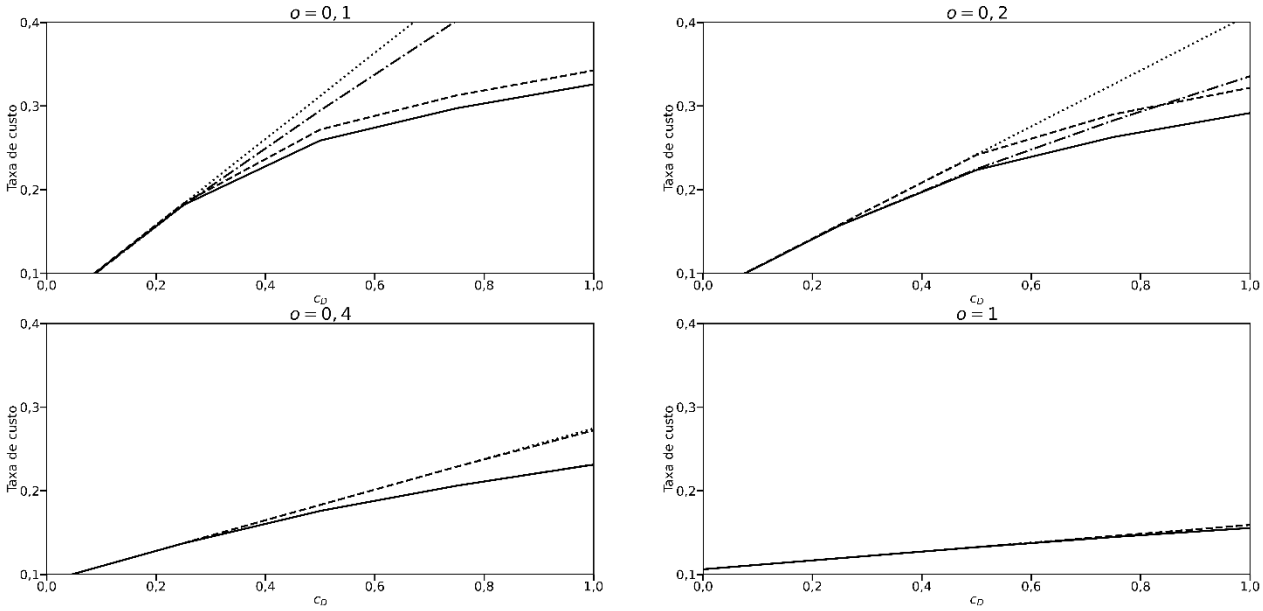
Fonte: O Autor (2024)

A Figura 18 ilustra a comparação do desempenho da política de manutenção proposta com seus casos especiais, levando em consideração a variação da probabilidade de oportunidade de manutenção em uma visita (o) e o custo de inatividade por unidade de tempo (c_D). O ponto de inflexão, onde a política proposta se torna mais vantajosa que a política puramente corretiva, ocorre em um limite relativamente alto ($c_D \approx 0{,}25$), onde o custo de uma ação de manutenção (preventiva ou corretiva) por uma oportunidade é equivalente a 4 unidades de tempo de inatividade do sistema, dado que $c_P = c_F = 1$ para o caso base.

Para maiores valores de o, a política de manutenção puramente oportuna funciona tão bem quanto a política original, o que é coerente em termos práticos. Por exemplo, em uma grande frota de turbinas em um parque eólico em alto mar, com visitas periódicas e recursos limitados, a produção perdida pode não ser significativa o suficiente para justificar o uso de recursos adicionais necessários para garantir uma alta disponibilidade. Assim, o mantenedor pode estar disposto a tolerar que algumas turbinas fiquem indisponíveis por períodos mais longos. No entanto, à medida que os custos de inatividade por unidade de tempo aumentam ou as oportunidades para ação de

manutenção se tornam mais escassas, a disposição do mantenedor em aguardar uma oportunidade diminui.

Figura 18 - Comparação da taxa de custo da política proposta (−) com seus casos especiais: política puramente oportuna (−·−), política de manutenção por idade (– – –) e política puramente corretiva (⋯) para os parâmetros do caso base, variando o e c_D



Fonte: O Autor (2024)

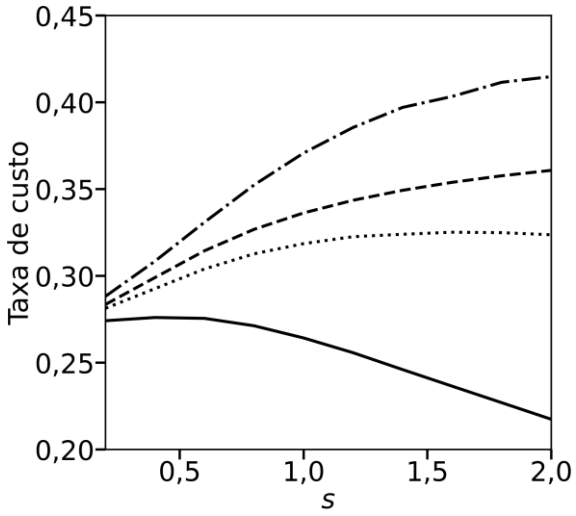
4.5 COMPARAÇÃO COM POLÍTICA DE MANUTENÇÃO CONTÍNUA

Uma análise comparativa entre a taxa de custo da política clássica de manutenção oportuna (t,T) e a política de manutenção proposta (W,M) neste estudo foi realizada. A política de Dekker e Plasmeijer (2001), descrita no segundo capítulo, difere da política atual principalmente pela discretização das ações de manutenção e das oportunidades de intervenção. Na política proposta (W,M), as ações de manutenção ocorrem em visitas específicas, enquanto na política clássica (t,T), as intervenções podem ocorrer a qualquer momento, um pressuposto pouco realista em sistemas de difícil acesso, conforme discutido anteriormente. Na política clássica, as oportunidades seguem um Processo de Poisson com taxa λ, enquanto no presente estudo adotou-se um Processo de Bernoulli com probabilidade o para modelar as oportunidades de ação de manutenção.

A Figura 19 apresenta os resultados da comparação entre ambas as políticas, variando o intervalo entre visitas (s) e a taxa de custo do tempo de inatividade (c_D). Para uma comparação justa, define-se que $\lambda = o/s$, uma vez que o/s representa o número esperado de oportunidades por unidade de tempo na política proposta. Observa-se que, à medida que o intervalo entre visitas diminui, as taxas de custo das políticas convergem. Isso ocorre porque, com s reduzido, a política discreta se assemelha à política contínua. Além disso, a política discreta apresenta um tempo de inatividade insignificante, o que reduz o impacto da variação de c_D sobre os resultados.

Outro resultado interessante é que quando a taxa de custo do tempo de inatividade é razoavelmente grande, a ineficiência de custo da política discreta é aparente. Isso é da ordem de 10% para s moderados. Este é o custo marginal da discretização para o conjunto de parâmetros analisado.

Figura 19 - Comparação da taxa de custo da política de manutenção contínua ($---$) e da política de manutenção discreta proposta ($—$ para $c_D = 0$; $\cdots$ para $c_D = 0{,}25$; $-\cdot-$ para $c_D = 0{,}5$) para os valores dos parâmetros do caso base (com $c_F = 4$), variando s



Fonte: O Autor (2024)

4.6 PRODUTO TECNOLÓGICO DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO

Desenvolveu-se um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) em *Python*, implementado no framework de código aberto *StreamLit*, para replicar as análises deste capítulo e possibilitar novas

aplicações da política de manutenção em diferentes contextos, como sistemas de difícil acesso (Melo; Cavalcante, 2023) e geograficamente distribuídos (Melo; Rodrigues; Cavalcante, 2024). O SAD está disponível em *https://dissertacao-melo-2024.streamlit.app/* (Melo; Cavalcante, 2024). Embora seja essencial conhecer as suposições e restrições da política proposta, o uso do sistema não exige domínio do modelo matemático subjacente, representando uma vantagem significativa.

O SAD conta com um menu de quatro abas. A primeira aba (Figura 20) permite a inserção dos parâmetros de entrada e variáveis de decisão, oferecendo flexibilidade para testar diferentes configurações. Em poucos segundos, são retornadas as métricas da política de manutenção proposta: taxa de custo, taxa de inatividade e confiabilidade operacional.

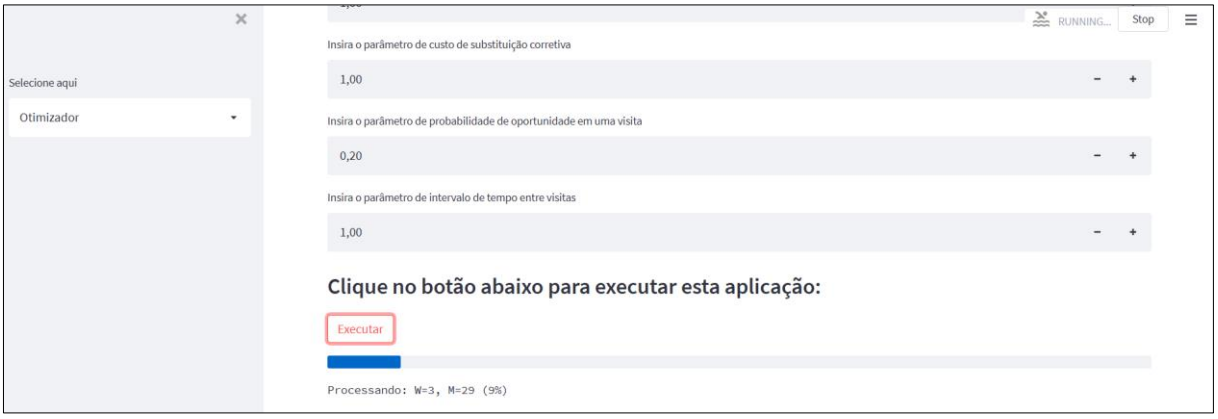
A segunda aba (Figura 21) realiza a otimização das variáveis de decisão da política de manutenção, minimizando a taxa de custo. O processo, que dura alguns minutos, é acompanhado por uma barra de progresso. Os resultados (Figura 22) incluem os valores ótimos das variáveis de decisão e as métricas de desempenho: taxa de custo, taxa de inatividade e confiabilidade operacional. Além disso, são gerados gráficos tridimensionais para a análise de sensibilidade, permitindo avaliar a influência das variáveis de decisão no desempenho do sistema.

A terceira aba fornece uma visão geral da política de manutenção proposta neste estudo, além de apresentar as funcionalidades do SAD. A quarta aba introduz o laboratório de pesquisa vinculado a este trabalho, que inclui o autor e seu orientador, e contextualiza a inserção da pesquisa no âmbito do grupo.

Figura 20 - Simulador do sistema de apoio à decisão desenvolvido

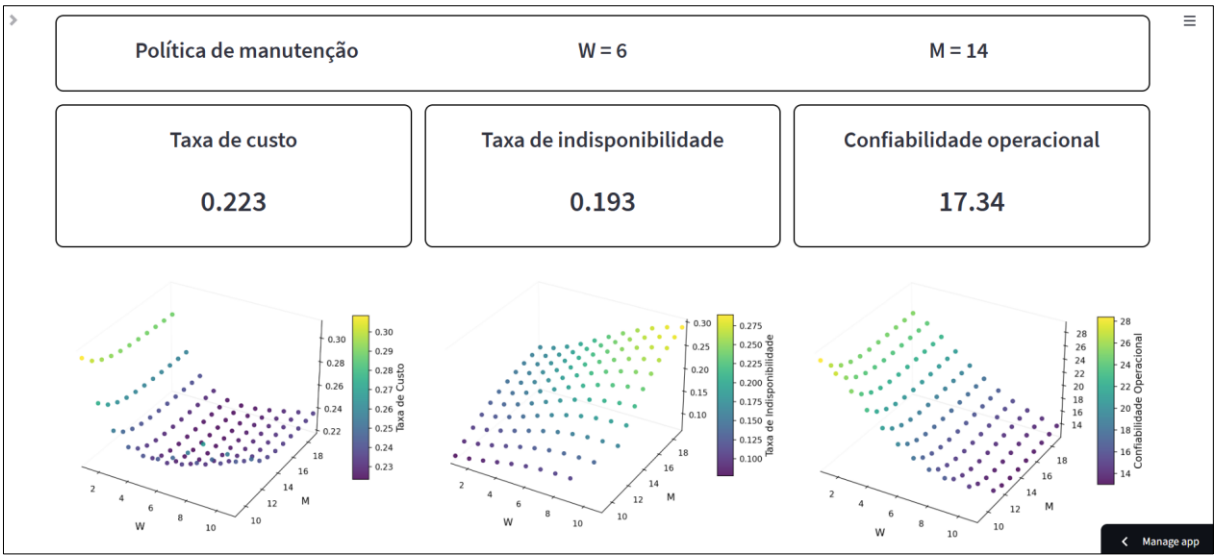
Fonte: O Autor (2024)

Figura 21 - Otimizador do sistema de apoio à decisão desenvolvido



Fonte: O Autor (2024)

Figura 22 - Resultados retornados pelo sistema de apoio à decisão desenvolvido



Fonte: O Autor (2024)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo propôs um modelo de política de manutenção voltado para sistemas de difícil acesso, com foco na aplicabilidade prática. A política adota uma estrutura periódica que determina momentos oportunos para a realização de ações de manutenção, refletindo a realidade de recursos limitados e a imprevisibilidade de execução, causada por fatores como condições climáticas adversas, falta de sobressalentes ou pessoal.

O sistema foi modelado como crítico, composto por um único componente não reparável, com uma política de manutenção dividida em duas fases: corretiva, predominante no início da vida útil do sistema, e preventiva, aplicada em um estágio posterior. As variáveis de decisão determinam as durações dessas fases. As falhas são corrigidas na primeira oportunidade após sua ocorrência, contabilizando o tempo de inatividade. Na fase preventiva, a substituição ocorre na primeira oportunidade disponível, independentemente do estado do componente.

O comportamento da política ótima foi analisado numericamente para diferentes valores dos parâmetros do modelo. Os resultados indicam que a aplicação da política ótima pode reduzir significativamente a taxa de custo do sistema, especialmente quando o custo da manutenção corretiva é substancialmente maior do que o da manutenção preventiva e/ou quando a probabilidade de oportunidades em uma visita é elevada. Além disso, a política ótima também proporciona uma redução expressiva da taxa de custo à medida que o custo de inatividade por unidade de tempo aumenta, reforçando sua eficiência em contextos em que a indisponibilidade do sistema gera impactos consideráveis.

Uma comparação da política ótima com as políticas derivadas, isto é, seus casos especiais, também foi realizada. Observou-se que uma política puramente oportuna pode ser preferível à original em certos contextos, por ser ainda mais simples de implementar e quase tão eficaz quanto a política de manutenção de duas variáveis de decisão. Contudo, essa preferência depende dos parâmetros do sistema e deve ser analisada caso a caso.

Foi realizada uma comparação entre a política discreta proposta e uma política contínua da literatura, com o objetivo de avaliar o custo marginal da discretização. Esse custo varia com a taxa de inatividade, já que não há tempo de inatividade na política contínua. Embora essa comparação exija cautela, os resultados demonstram que ambas as políticas apresentam custos semelhantes quando os intervalos entre visitas são pequenos.

Neste estudo, foi desenvolvido um produto tecnológico com o objetivo de tornar a política de manutenção mais acessível para gerentes de manutenção de sistemas de difícil acesso. A solução proposta elimina a necessidade de um conhecimento aprofundado em modelagem matemática ou em linguagens de programação, facilitando a aplicação prática da política e contribuindo para a tomada de decisões de maneira mais eficiente e intuitiva.

A melhoria na disponibilidade e confiabilidade de sistemas essenciais, como distribuição de água, energia e sistemas de esgoto, tem o potencial de gerar impactos sociais positivos significativos. Ao aumentar a estabilidade desses sistemas, a população local terá acesso mais consistente a serviços fundamentais, promovendo uma melhoria na qualidade de vida, saúde pública e bem-estar.

A otimização das estratégias de manutenção desses sistemas pode levar a uma operação mais eficiente e menos suscetível a falhas, vazamentos e acidentes. No caso de sistemas de distribuição de água, por exemplo, a redução de vazamentos contribui para a preservação de recursos hídricos, um aspecto de extrema relevância frente às crises de água em diversas regiões. Em sistemas de esgoto, a confiabilidade aumentada pode prevenir danos ambientais, como a contaminação de solos e cursos d'água. Ademais, a gestão mais eficiente de sobressalentes, incluindo uma redução na quantidade de itens em estoque e na demanda por energia, contribui para um uso mais racional e sustentável dos recursos, reduzindo os impactos ambientais do armazenamento excessivo e da logística de manutenção.

A implementação de uma política de manutenção eficiente resulta, principalmente, na redução dos custos operacionais e de manutenção, gerando economias substanciais a longo prazo. Ademais, o desenvolvimento de modelos matemáticos aplicáveis a esses sistemas contribui para a sustentabilidade econômica ao longo do tempo, ao assegurar uma execução mais eficaz das atividades de manutenção e minimizar o desperdício de recursos financeiros.

A principal limitação deste estudo reside no escopo restrito, uma vez que o foco foi em um sistema de componente único. Consequentemente, sistemas complexos com múltiplos componentes não foram considerados nas análises. No entanto, a fixação do período das visitas oferece vantagens para a modelagem de uma extensão multicomponente. Seria relevante explorar cenários com múltiplos componentes, adotando menos suposições simplificadas sobre o comportamento do sistema e suas falhas, permitindo uma análise mais realista para diversos sistemas de difícil acesso.

Outra sugestão para trabalhos futuros é aprimorar a modelagem dos recursos disponíveis. Na prática, a probabilidade de uma oportunidade de ação corretiva pode diferir da probabilidade de uma ação preventiva, já que os mantenedores podem priorizar substituições corretivas, alocando mais recursos para essa tarefa. Essa generalização pode ser tratada ao especificar probabilidades distintas para cada tipo de manutenção. Simulações poderiam ser realizadas considerando uma frota de sistemas, recursos fixos e regras que priorizam a manutenção corretiva sobre a preventiva. Além disso, seria interessante investigar o cenário em que a manutenção corretiva é garantida na primeira visita subsequente à falha. Apesar dessas limitações, o estudo atual oferece um suporte decisório abrangente e serve como uma forte base para estudos mais detalhados e específicos a serem desenvolvidos no futuro.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 5462:1994*. Rio de Janeiro, 1994.

AB-SAMAT, H.; KAMARUDDIN, S. Development of opportunistic maintenance policy towards optimal maintenance system (OPTOMS) model: A case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 26, n. 1, p. 129-165, 2019.

AHMADI, R.; CASTRO, I. T.; BAUTISTA, L. Reliability modeling and maintenance planning for a parallel system with respect to the state-dependent mean residual time. *Journal of the Operational Research Society*, v. 75, n. 2, p. 297-313, 2024.

ALGAYDI, B.; SUBYANI, A.; HAMZA, M. Investigation of Groundwater Potential Zones in Hard Rock Terrain, Wadi Na'man, Saudi Arabia. *Groundwater*, v. 57, p. 940-950, 2019.

ALIMOHAMMADI, M.; BEHNAMIAN, J. Preventive maintenance scheduling of electricity distribution network feeders to reduce undistributed energy: A case study in Iran. *Electric Power Systems Research*, v. 201, p. 107509, 2021.

ALOTAIBI, N.; CAVALCANTE, C.; LOPES, R.; SCARF, P. Preventive replacement with defaulting. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 31, n. 4, p. 491-504, 2020.

ALOTAIBI, N.; SCARF, P.; CAVALCANTE, C.; LOPES, R.; SILVA, A.; RODRIGUES, A.; ALYAMI, S. Modified-opportunistic inspection and the case of remote, groundwater well-heads. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 237, p. 109-389, 2023.

ANDERSEN, T. M.; RASMUSSEN, M. Decision support in a condition-based environment. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 5, n. 2, p. 89–101, 1999.

BAJESTANI, M.; BANJEVIC, D. Calendar-based age replacement policy with dependent renewal cycles. *IIE Transactions*, v. 48, n. 11, p. 1016-1026, 2016.

BARLOW, R.; HUNTER, L.; PROSCHAN, F. Optimum checking procedures. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, v. 11, n. 4, p. 1078-1095, 1963.

BARLOW, R.; PROSCHAN, F. *Mathematical theory of reliability*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1996.

BLAABJERG, F.; MA, K. Wind energy systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 105, n. 11, p. 2116-2131, 2017.

BERRADE, M.; SCARF, P.; CAVALCANTE, C. A study of postponed replacement in a delay time model. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 168, p. 70–79, 2017.

BLOCH, H. *Practical machinery management for process plants: Volume 1: Improving machinery reliability.* Burlington, MA: Gulf Professional Publishing, 1998.

BLOKUS-DZIULA, A.; DZIULA, P.; KAMEDULSKI, B.; MICHALAK, P. Operation and Maintenance Cost of Water Management Systems: Analysis and Optimization. *Water*, v. 15, n. 17, p. 3053, 2023.

BREZNICKÁ, A.; KOHUTIAR, M.; KRBAŤA, M.; ECKERT, M.; MIKUŠ, P. Reliability analysis during the life cycle of a technical system and the monitoring of reliability properties. *Systems*, v. 11, n. 12, p. 556, 2023.

BRIŠ, R.; BYCZANSKI, P.; GOŇO, R.; RUSEK, S. Discrete maintenance optimization of complex multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 168, p. 80-89, 2017.

BSI – British Standard Institution. *BS 3811:1984 – Glossary of maintenance management terms in terotechnology*. Bruxelas: British Standards Publishing, 1984.

CAO, W.; JIA, X.; HU, Q.; ZHAO, J.; WU, Y. A literature review on selective maintenance for multi-unit systems. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 34, n. 5, p. 824-845, 2018.

CAVALCANTE, C.; LOPES, R.; SCARF, P. Inspection and replacement policy with a fixed periodic schedule. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 208, p. 107402, 2021.

CAVALCANTE, C. *Políticas de manutenção clássicas: substituição em bloco*. 2022a. 11 slides.

CAVALCANTE, C. *Políticas de manutenção clássicas: substituição por idade*. 2022b. 15 slides.

CAVALCANTE, C.; SCARF, P.; MELO, Y.; RODRIGUES, A.; ALOTAIBI, N. Planning maintenance when resources are limited: a study of periodic opportunistic replacement. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 35, n. 4, p. 573-593, 2024.

CEN – European Committee for Standardization. *EN 13306:2001* – Maintenance terminology. Brussels: CEN, 2001.

CHENG, J.; LIU, Y.; LI, W.; LI, T. Deep reinforcement learning for cost-optimal condition-based maintenance policy of offshore wind turbine components. *Ocean Engineering*, v. 283, p. 115062, 2023.

CHRISTER, A. Innovatory decision making. In: NATO CONFERENCE ON ROLE AND EFFECTIVENESS OF DECISION THEORY IN PRACTICE, 1976. Anais [...]. Editado por BOWEN, K.; WHITE, D. J., 1976.

CHRISTER, A. Modelling inspection policies for building maintenance. *Journal of the Operational Research Society*, v. 33, n. 8, p. 723-732, 1982.

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

DANILECKI, K.; SMURAWSKI, P.; URBANOWICZ, K. Optimization of car use time for different maintenance and repair scenarios based on life cycle assessment. *Applied Sciences*, v. 13, n. 17, p. 9843, 2023.

DE ALMEIDA, A.; CAVALCANTE, C.; ALENCAR, M.; FERREIRA, R.; DE ALMEIDA FILHO, A.; GARCEZ, T. *Multicriteria and multiobjective models for risk, reliability and maintenance decision analysis*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2015.

DE ALMEIDA, A.; SOUZA, F. *Gestão da manutenção: na direção da competitividade*. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2001.

DEKKER, R.; PLASMEIJER, R. Multi-parameter maintenance optimisation via the marginal cost approach. *Journal of the Operational Research Society*, v. 52, n. 2, p. 188-197, 2001.

DRAUDE, S.; KEEDWELL, E.; KAPELAN, Z.; HISCOCK, R. Multi-objective optimisation of sewer maintenance scheduling. *Journal of Hydroinformatics*, v. 24, n. 3, p. 574-589, 2022.

DUI, H.; ZHANG, Y.; ZHANG, Y. Grouping Maintenance Policy for Improving Reliability of Wind Turbine Systems Considering Variable Cost. *Mathematics*, v. 11, n. 8, p. 1954, 2023.

FAURIAT, W.; ZIO, E. Optimization of an aperiodic sequential inspection and condition-based maintenance policy driven by value of information. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 204, p. 107133, 2020.

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

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

GONZÁLEZ, M.; SANTISO, A.; MELO, D.; VASCONCELOS, R. Regulation for offshore wind power development in Brazil. *Energy Policy*, v. 145, p. 111756, 2020.

GUNDEGJERDE, C.; HALVORSEN, I.; HALVORSEN-WEARE, E.; HVATTUM, L.; NONÅS, L. A stochastic fleet size and mix model for maintenance operations at offshore wind farms. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 52, p. 74-92, 2015.

GUPTA, A.; KULAT, K. A selective literature review on leak management techniques for water distribution system. *Water Resources Management*, v. 32, p. 3247-3269, 2018.

GWEC – GLOBAL OFFSHORE WIND COUNCIL. *Global Wind Report*, 2024. Disponível em: https://gwec.net/global-wind-report-2024/. Acesso em: 02 set. 2024.

HALVORSEN-WEARE, E.; GUNDEGJERDE, C.; HALVORSEN, I.; HVATTUM, L.; NONÅS, L. Vessel fleet analysis for maintenance operations at offshore wind farms. *Energy Procedia*, v. 35, p. 167-176, 2013.

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*, p. 470-479, 2010.

HARSANTO, B.; YUNANI, A. Electric power distribution maintenance model for industrial customers: Total productive maintenance (TPM), reliability-centered maintenance (RCM), and four-discipline execution (4DX) approach. *Energy Reports*, v. 10, p. 3186-3196, 2023.

HEIDEN, P.; PRIEFER, J.; BEVERUNGEN, D. Predictive maintenance on the energy distribution grid—design and evaluation of a digital industrial platform in the context of a smart service system. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2024.

IQBAL, H.; TESFAMARIAM, S.; HAIDER, H.; SADIQ, R. Inspection and maintenance of oil & gas pipelines: a review of policies. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 13, n. 6, p. 794-815, 2017.

ISO – International Organization for Standardization. *ISO 14224:2016 – Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*. Genebra: International Organization for Standardization, 2016.

JARDINE, A. K. S.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 20, p. 1483–1510, 2006.

JIANG, A.; HUANG, Z.; XU, J.; XU, X. Condition-based opportunistic maintenance policy for a series–parallel hybrid system with economic dependence. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 28, n. 3, p. 584-605, 2022.

JIANG, H.; CHI, M.; HOU, D.; DING, H.; XIE, Z.; ZENG, X. Numerical investigation and analysis of indoor gas explosion: A case study of “6· 13” major gas explosion accident in Hubei Province, China. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 83, p. 105045, 2023.

KANG, J.; SOARES, C. An opportunistic maintenance policy for offshore wind farms. *Ocean Engineering*, v. 216, p. 108075, 2020.

KANG, J.; WANG, Z.; SOARES, C. Condition-based maintenance for offshore wind turbines based on support vector machine. *Energies*, v. 13, n. 14, p. 3518, 2020.

KNIGHT, C. Four decades of reliability progress. In: *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, p. 156-160. IEEE, 1991

KOBBACY, K. A. H.; MURTHY, D. P. (Eds.). *Complex system maintenance handbook*. Springer Science & Business Media, 2008.

LEEMIS, L. M. *Reliability: probabilistic models and statistical methods*. Prentice-Hall, Inc., 1995.

LI, M.; JIANG, X.; CARROLL, J.; NEGENBORN, R. Operation and maintenance management for offshore wind farms integrating inventory control and health information. *Renewable Energy*, v. 231, p. 120970, 2024.

LI, M.; WANG, M.; KANG, J.; SUN, L.; JIN, P. An opportunistic maintenance strategy for offshore wind turbine system considering optimal maintenance intervals of subsystems. *Ocean Engineering*, v. 216, p. 108067, 2020.

LI, M.; WU, B. Optimal condition-based opportunistic maintenance policy for two-component systems considering common cause failure. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 110269, 2024.

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

LI, X.; WANG, J.; ABBASSI, R.; CHEN, G. A risk assessment framework considering uncertainty for corrosion-induced natural gas pipeline accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 75, p. 104718, 2022.

LI, X.; ZHANG, Y.; ABBASSI, R.; YANG, M.; ZHANG, R.; CHEN, G. Dynamic probability assessment of urban natural gas pipeline accidents considering integrated external activities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 69, p. 104388, 2021.

LIU, C.; AN, J.; XIE, C.; WU, H.; ZHANG, Z. Numerical simulation-based pinhole leakage characteristics and hazard boundaries of buried natural gas risers. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 184, p. 462-476, 2024.

LIU, G.; CHEN, S.; JIN, H.; LIU, S. Optimum opportunistic maintenance schedule incorporating delay time theory with imperfect maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 213, p. 107668, 2021.

LUBING, X.; XIAOMING, R.; SHUAI, L.; XIN, H. An opportunistic maintenance strategy for offshore wind turbine based on accessibility evaluation. *Wind Engineering*, v. 44, n. 5, p. 455-468, 2020.

MAHFOUD, H.; EL BARKANY, A.; EL BIYAALI, A. Reliability assessment of degradable systems under imperfect maintenance and utilization rate: a case study. *International Journal of Engineering Research in Africa*, v. 26, p. 184-194, 2016.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. *Fundamentos da metodologia científica*. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MARCONI, M; LAKATOS, E. *Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas; amostragens e técnicas de pesquisa; elaboração, análise e interpretação de dados*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

MÁRQUEZ, A. *The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance*. Springer Science & Business Media, 2007.

MARTIN, R.; LAZAKIS, I.; BARBOUCHI, S.; JOHANNING, L. Sensitivity analysis of offshore wind farm operation and maintenance cost and availability. *Renewable Energy*, v. 85, p. 1226-1236, 2016.

MELO, Y; CAVALCANTE, C. Modelo de manutenção para sistemas de difícil acesso. Disponível em: < https://dissertacao-melo-2024.streamlit.app/ >. Acesso em: 11 out. 2024.

MELO, Y.; CAVALCANTE, C. Proposição de protótipo para aplicação de política híbrida de manutenção para sistemas geograficamente distribuídos. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL*, 55., 2023. Anais [...]. Disponível em: <https://proceedings.science/sbpo-2023/trabalhos/proposicao-de-prototipo-para-aplicacao-de-politica-hibrida-de-manutencao-para-si?lang=pt-br>. Acesso em: 14 out. 2024.

MELO, Y.; CAVALCANTE, C.; SCARF, P.; LOPES, R. 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.

MELO, Y.; RODRIGUES, A.; CAVALCANTE, C. Políticas de manutenção baseadas no modelo de delay time para sistemas de difícil acesso. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL*, 56., 2024. Anais [...]. Disponível em: <https://proceedings.science/sbpo/sbpo-2024/trabalhos/politicas-de-manutencao-baseadas-no-modelo-de-delay-time-para-sistemas-de-difici?lang=en>. Acesso em: 28 fev. 2025.

MIGUEL, P.; FLEURY, A.; MELLO, C.; NAKANO, D.; LIMA, E.; TURRIONI, J; HO, L.; MORABITO, R.; MARTINS, R.; SOUSA, R.; COSTA, S.; PUREZA, V. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012

MINOU, C. A. O.; FLAPPER, S. D. P.; TEUNTER, R. H. Condition-based maintenance policies for systems with multiple dependent components: a review. *European Journal of Operational Research*, 2017.

MODARRES, M.; KAMINSKIY, M. P.; KRIVTSOV, V. *Reliability engineering and risk analysis: a practical guide*. CRC Press, 2016.

MOSTAFA, S.; DUMRAK, J.; SOLTAN, H. Lean maintenance roadmap. *Procedia Manufacturing*, v. 2, p. 434-444, 2015.

MOUBRAY, J. *Reliability-centered maintenance*. Industrial Press Inc., 2001.

MOYA, M. Model for the selection of predictive maintenance techniques. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, v. 45, n. 2, p. 83-94, 2007.

NAKAGAWA, T. *Maintenance theory of reliability*. Springer Science & Business Media, 2006.

NAKAGAWA, T.; OSAKI, S. Discrete time age replacement policies. *Journal of the Operational Research Society*, v. 28, n. 4, p. 881-885, 1977.

NETO, J.; MORETTI, A.; CASTRO, C. Transmission asset maintenance programming optimization—the Brazilian Electric System case. *IEEE Latin America Transactions*, v. 13, n. 5, p. 1414-1420, 2015.

OBRADOVIĆ, D.; MARENJAK, S.; ŠPERAC, M. Estimating Maintenance Costs of Sewer System. *Buildings*, v. 13, n. 2, p. 500, 2023.

OKUMOTO, K.; ELSAYED, E. A. An optimum group maintenance policy. *Naval Research Logistics Quarterly*, v. 30, n. 4, p. 667-674, 1983.

ONAT, C.; CANBAZOĞLU, S. An investigation on the economic analysis of wind turbines. *Energy Exploration & Exploitation*, v. 25, n. 1, p. 27-37, 2007.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: https://sdgs.un.org/2030agenda. Acessado: 2024-05-26.

PAIVA, R.; MELO, Y.; CAVALCANTE, C.; TENÓRIO, V.; DO, P. Developing data-driven O&M policy through sequential pattern mining: a case study. *Computers & Industrial Engineering*, v. 193, p. 110318, 2024.

RAJESWARAN, A.; NARASIMHAN, S.; NARASIMHAN, S. A graph partitioning algorithm for leak detection in water distribution networks. *Computers & Chemical Engineering*, v. 108, p. 11-23, 2018.

RASHIDNEJAD, M.; EBRAHIMNEJAD, S.; SAFARI, J. A bi-objective model of preventive maintenance planning in distributed systems considering vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, v. 120, p. 360-381, 2018.

RAUSAND, M.; HOYLAND, A. *System reliability theory: models, statistical methods, and applications*. New York: John Wiley & Sons, 2003.

RIBEIRO, B.; BIN, A.; SERAFIM, M. Innovation dynamics of the state basic sanitation companies. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, n. 2, p. 305-314, 2022.

RODRIGUES, A.; CAVALCANTE, C.; LEE, C. A general inspection and replacement policy for protection systems subject to shocks with state dependent effect. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 251, p. 110397, 2024.

ROMANIUK, M. On simulation of maintenance costs for water distribution system with fuzzy parameters. *Eksploatacja i Niezawodność*, v. 18, n. 4, p. 514-527, 2016.

ROMANOVA, A.; HOROSHENKOV, K.; TAIT, S.; ERTL, T. Sewer inspection and comparison of acoustic and CCTV methods. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, v. 166, n. 2, p. 70-80. Thomas Telford Ltd, 2013.

ROSS, S. M. *Stochastic processes*. New York: John Wiley & Sons, 1995.

SAFAEI, F.; AHMADI, J.; FOULADIRAD, M. Optimal N-policy for the maintenance of k-out-of-n systems with dynamic minor repairs considering second-hand component income. *International Journal of Production Research*, v. 61, n. 17, p. 5956-5973, 2023.

SALEH, A.; CHIACHÍO, M.; SALAS, J. F.; KOLIOS, A. Self-adaptive optimized maintenance of offshore wind turbines by intelligent Petri nets. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 231, p. 109013, 2023.

SARKER, B.; FAIZ, T. Minimizing transportation and installation costs for turbines in offshore wind farms. *Renewable Energy*, v. 101, p. 667-679, 2017.

SAYRE, S.; TARAZ, V. Groundwater depletion in India: Social losses from costly well deepening. *Journal of Environmental Economics and Management*, v. 93, p. 85-100, 2019.

SCARF, P.; ALOTAIBI, N.; CAVALCANTE, C.; MELO, Y.; RODRIGUES, A. Modified age-based replacement. *Reliability Engineering & System Safety*, p. 110022, 2024a.

SCARF, P.; ALOTAIBI, N.; CAVALCANTE, C. A.; RODRIGUES, A. J.; MELO, Y. R. On periodic maintenance for a protection system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, v. 1748006X241254420, 2024b.

SCARF, P.; DWIGHT, R.; AL-MUSRATI, A. On reliability criteria and the implied cost of failure for a maintained component. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 89, n. 2, p. 199-207, 2005.

SCARF, P.; SYNTETOS, A.; TEUNTER, R. Joint maintenance and spare-parts inventory models: a review and discussion of practical stock-keeping rules. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 35, n. 1, p. 83-109, 2024.

SCHOUTEN, T.; DEKKER, R.; HEKIMOĞLU, M.; ERUGUZ, A. Maintenance optimization for a single wind turbine component under time-varying costs. *European Journal of Operational Research*, v. 300, n. 3, p. 979-991, 2022.

SHARMA, R.; KUMAR, D.; KUMAR, P. FLM to select suitable maintenance strategy in process industries using MISO model. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2005.

SILVA, A.P.; DUCHARME, C.; FERREIRA, V.H. Transformer fleet optimal maintenance with risk considerations. *Electric Power Components and Systems*, v. 47, n. 16-17, p. 1551-1561, 2019.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. *Abastecimento de Água no Brasil*, 2022a. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/ab. Acesso em: 02 set. 2024.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. *Esgotamento Sanitário no Brasil*, 2022b. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/es. Acesso em: 02 set. 2024.

TIAN, Z.; ZHANG, H. Wind farm predictive maintenance considering component level repairs and economic dependency. *Renewable Energy*, v. 192, p. 495-506, 2022.

TIKANMÄKI, M.; HEINONEN, J. Estimating extreme level ice and ridge thickness for offshore wind turbine design: case study Kriegers Flak. *Wind Energy*, v. 25, n. 4, p. 639-659, 2022.

TORNYEVIADZI, H.; 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.

TRENTINI, C.; GUEDES, W.; OLIVEIRA, L.; DIAS, B.; FERREIRA, V. Maintenance planning of electric distribution systems—A review. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 32, p. 186-202, 2021.

TSAI, Y.; WANG, K.; TSAI, L. A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 84, n. 3, p. 261-270, 2004.

VEEVERS, A.; ASCHER, H.; FEINGOLD, H. Repairable systems reliability: modeling, inference, misconceptions and their causes. *Applied Statistics*, v. 35, n. 1, p. 76, 1986.

WANG, D.; TENG, W.; ZHANG, G.; QU, X.; LIU, Y.; MA, Z.; KUSIAK, A. An opportunistic maintenance strategy for wind turbines. *IET Renewable Power Generation*, v. 15, n. 16, p. 3793-3805, 2021.

WANG, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, v. 139, n. 3, p. 469-489, 2002.

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.

WANG, J.; QIU, Q.; WANG, H. Joint optimization of condition-based and age-based replacement policy and inventory policy for a two-unit series system. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 205, p. 107251, 2021.

WANG, J.; ZHANG, X.; ZENG, J.; ZHANG, Y. Joint external and internal opportunistic optimisation for wind turbine considering wind velocity. *Renewable Energy*, v. 159, p. 380-398, 2020.

WANG, Y.; HE, R.; TIAN, Z. Opportunistic condition-based maintenance optimization for electrical distribution systems. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 236, p. 109261, 2023.

WU, B.; WEI, X.; ZHANG, Y.; BAI, S. Modeling dynamic environment effects on dependent failure processes with varying failure thresholds. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 229, p. 108848, 2023.

WU, F.; WU, Q.; TAN, Y.; XU, X. Remaining useful life prediction based on deep learning: a survey. *Sensors*, v. 24, n. 11, p. 3454, 2024.

XIANG, H.; LIU, Q.; DONG, M.; WANG, Y. Hybrid group opportunistic maintenance strategy for offshore wind turbines considering maintenance resource allocation in harsh working environments. *Ocean Engineering*, v. 312, p. 119147, 2024.

YANG, L.; LI, G.; ZHANG, Z.; MA, X.; ZHAO, Y. Operations & maintenance optimization of wind turbines integrating wind and aging information. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 12, n. 1, p. 211-221, 2020.

YU, Q.; CARLSON, O.; SAGITOV, S. Optimal Maintenance Schedule for a Wind Power Turbine with Aging Components. *Algorithms*, v. 16, n. 7, p. 334, 2023.

YU, V.; LE, T.; SU, T.; LIN, S. Optimal maintenance policy for offshore wind systems. *Energies*, v. 14, n. 19, p. 6082, 2021.

ZHOU, P.; YIN, P. An opportunistic condition-based maintenance strategy for offshore wind farm based on predictive analytics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 109, p. 1-9, 2019.

ZIO, Enrico. Reliability engineering: old problems and new challenges. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 94, n. 2, p. 125-141, 2009.

ZWINGELSTEIN, G. RCM Approach to Maintaining a Nuclear Power Plant. In: *Case Studies in Reliability and Maintenance*, p. 447-476, 2002.