



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

YAN RIBEIRO DE MELO

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO
OPORTUNA PARA COMPONENTE CRÍTICO DE TURBINA EÓLICA EM
PLATAFORMA *OFFSHORE***

Recife

2023

YAN RIBEIRO DE MELO

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO
OPORTUNA PARA COMPONENTE CRÍTICO DE TURBINA EÓLICA EM
PLATAFORMA *OFFSHORE***

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

Orientador: Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante

Recife

2023

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

Melo, Yan Ribeiro de.

Desenvolvimento e aplicação de política de manutenção oportuna para componente crítico de turbina eólica em plataforma offshore / Yan Ribeiro de Melo. - Recife, 2023.

84 p. : il., tab.

Orientador(a): Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Produção - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. Sistemas geograficamente distribuídos. 2. Turbina eólica offshore. 3. Caixa de engrenagem. 4. Manutenção oportuna. I. Cavalcante, Cristiano Alexandre Virgínio. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

YAN RIBEIRO DE MELO

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO
OPORTUNA PARA COMPONENTE CRÍTICO DE TURBINA EÓLICA EM
PLATAFORMA *OFFSHORE***

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

Aprovado em: 27/04/2023.

BANCA EXAMINADORA

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

Profa. Dra. Isis Didier Lins (Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar (Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus e à espiritualidade por sempre estarem comigo, me protegendo e guardando.

Meus sinceros agradecimentos à minha família por todo o apoio, encorajamento e orientação que me proporcionaram ao longo de todas as etapas da minha vida. Especialmente ao meus pais, Waléria Costa e Derlir Guimarães, e ao meu irmão, Iury Melo, que sempre estiveram presentes e apoiam meus sonhos com dedicação e generosidade, ajudando-me a crescer e me tornar quem eu sou hoje.

Gostaria de expressar meus agradecimentos ao professor Cristiano Cavalcante, pelo seu constante apoio, orientação e ensinamentos ao longo desses anos. Agradeço também aos meus colegas pesquisadores, principalmente Augusto Rodrigues e Rafael Paiva, cujas contribuições também foram fundamentais para minha formação e desenvolvimento como pesquisador. Aproveito para agradecer também aos órgãos de fomento científico CNPq e FACEPE pelas bolsas concedidas durante meus projetos de iniciação científica.

Sou profundamente grato a todos que se fizeram presentes em espaços importantes da minha vida acadêmica, incluindo aquelas que fizeram parte do Diretório Acadêmico de Engenharia de Produção, do laboratório de pesquisa RANDOM e da Tramontina Delta. Espaços onde pude crescer como pessoa e profissional, adquirindo novas habilidades e experiências valiosas ao longo do caminho.

Devo saudações também a todos os amigos que me apoiaram durante essa jornada da graduação, do qual sou extremamente grato por todo companheirismo e incentivo. Em especial, Laís Borges, Manoel Ribeiro e Victor Gabriel, que estão sempre ao meu lado.

Finalmente, agradeço aos professores do Departamento de Engenharia de Produção por todo conhecimento repassado em aula.

RESUMO

O aumento da preocupação com a emissão dos gases causadores do efeito estufa e o conseqüente crescimento da utilização de fontes de energia renovável, como a energia eólica, torna evidente a necessidade de estudos voltados aos aspectos de operação e manutenção dos sistemas de turbinas eólicas, que são custosos. É necessário encontrar maneiras eficientes de minimizar os gastos financeiros atribuídos a tais aspectos, que são de fato exorbitantes, principalmente em se tratando de campos *offshore*. Nesse sentido, o trabalho apresenta contribuições no que tange o planejamento da manutenção desses sistemas por meio do desenvolvimento e aplicação de uma política híbrida de manutenção para auxiliar na definição de estratégias economicamente mais eficientes, buscando também facilitar o seu entendimento e viabilizar uma posterior aplicação desta. A aplicação da modelagem tem como resultado uma política de manutenção para um componente crítico do sistema sob estudo, a caixa de engrenagens, indicando o número de inspeções periódicas a serem realizadas, a abertura da janela para o aproveitamento de oportunidades e a idade de substituição preventiva, para uma taxa de custo mínima, reunindo diferentes ações de manutenção como a inspeção, substituição preventiva, corretiva e oportuna, com grande flexibilidade em sua estrutura e considerando diversos aspectos que são comumente negligenciados na literatura. Para compor os resultados, foi realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada, como dos custos das ações de manutenção e da taxa de oportunidades aproveitadas pelo sistema. Assim foi observado um grande benefício financeiro gerado pelas ações oportunas. Além disso, um estudo comparativo é feito para casos especiais da política de manutenção proposta, tornando possível o posicionamento da aplicação deste trabalho diante de outras aplicações presentes na literatura. É observado que a aplicação da política de manutenção atribuída ao componente crítico sob estudo promove a redução de aproximadamente 21% da taxa de custo de manutenção.

Palavras-chave: Sistemas geograficamente distribuídos. Turbina eólica *offshore*. Caixa de engrenagem. Manutenção oportuna.

ABSTRACT

The increasing concern over greenhouse gas emissions and the consequent growth of renewable energy sources, such as wind energy, make it evident the need for studies focused on the operation and maintenance aspects of wind turbine systems, which are costly. It is necessary to find efficient ways to minimize the financial expenses attributed to such aspects, which are indeed exorbitant, especially when it comes to offshore fields. In this sense, the study presents contributions regarding the maintenance planning of these systems through the development and application of a hybrid maintenance policy to assist in defining more economically efficient strategies, also seeking to facilitate their understanding and enable a subsequent application of it. The modeling application results in a maintenance policy for a critical component of the system under study, the gearbox, indicating the number of periodic inspections to be performed, the opening of the window for the use of opportunities, and the age of preventive replacement, for a minimum cost rate, gathering different maintenance actions such as inspection, preventive, corrective and opportunistic replacement, with great flexibility in its structure and considering various aspects that are commonly neglected in the literature. To compose the results, a sensitivity analysis of input parameters was performed, such as maintenance action costs and the rate of opportunities used by the system. Thus, a great financial benefit generated by opportunistic actions was observed. In addition, a comparative study is made for special cases of the proposed maintenance policy, making it possible to position the application of this work in relation to other applications present in the literature. It is observed that the application of the maintenance policy attributed to the critical component under study promotes a reduction of approximately 21% in the maintenance cost rate.

Keywords: Geographically distributed systems. Offshore wind turbine. Gearbox. Opportunistic maintenance.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Representação gráfica da política de substituição em bloco.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2 – Representação gráfica do delay time</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3 – Principais partes de uma turbina eólica</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4 – Configuração do trem de acionamento de uma turbina eólica.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 5 – Visualização detalhada da caixa de engrenagens</i>	<i>34</i>
<i>Figura 6 – Representação gráfica da estrutura da política de manutenção proposta</i>	<i>40</i>
<i>Figura 7 – Cenário de renovação 01</i>	<i>41</i>
<i>Figura 8 – Cenário de renovação 02</i>	<i>41</i>
<i>Figura 9 – Cenário de renovação 03</i>	<i>41</i>
<i>Figura 10 – Cenário de renovação 04</i>	<i>42</i>
<i>Figura 11 – Cenário de renovação 05</i>	<i>42</i>
<i>Figura 12 – Cenário de renovação 06</i>	<i>42</i>
<i>Figura 13 – Cenário de renovação 07</i>	<i>42</i>
<i>Figura 14 – Cenário de renovação 08</i>	<i>42</i>
<i>Figura 15 – Cenário de renovação 09</i>	<i>43</i>
<i>Figura 16 – Cenário de renovação 10</i>	<i>43</i>
<i>Figura 17 – Cenário de renovação 11</i>	<i>43</i>
<i>Figura 18 – Cenário de renovação 12</i>	<i>43</i>
<i>Figura 19 – Cenário de renovação 13</i>	<i>43</i>
<i>Figura 20 – Cenário de renovação 14</i>	<i>44</i>
<i>Figura 21 – Cenário de renovação 15</i>	<i>44</i>
<i>Figura 22 – Cenário de renovação 16</i>	<i>44</i>
<i>Figura 23 – Cenário de renovação 17</i>	<i>44</i>
<i>Figura 24 – Cenário de renovação 18</i>	<i>44</i>
<i>Figura 25 – Cenário de renovação 19</i>	<i>45</i>
<i>Figura 26 – Cenário de renovação 20</i>	<i>45</i>
<i>Figura 27 – Cenário de renovação 21</i>	<i>45</i>
<i>Figura 28 – Cenário de renovação 22</i>	<i>45</i>
<i>Figura 29 – Cenário de renovação 23</i>	<i>45</i>
<i>Figura 30 – Cenário de renovação 24</i>	<i>46</i>
<i>Figura 31 – Cenário de renovação 25</i>	<i>46</i>
<i>Figura 32 – Cenário de renovação 26</i>	<i>46</i>

<i>Figura 33 – Cenário de renovação 27</i>	46
<i>Figura 34 – Cenário de renovação 28</i>	46
<i>Figura 35 – Cenário de renovação 29</i>	47
<i>Figura 36 – Cenário de renovação 30</i>	47
<i>Figura 37 – Cenário de renovação 31</i>	47
<i>Figura 38 – Cenário de renovação 32</i>	47
<i>Figura 39 – Cenário de renovação 33</i>	47
<i>Figura 40 – Cenário de renovação 34</i>	48
<i>Figura 41 – Cenário de renovação 35</i>	48
<i>Figura 42 – Cenário de renovação 36</i>	48
<i>Figura 43 – Cenário de renovação 37</i>	48
<i>Figura 44 – Cenário de renovação 38</i>	48
<i>Figura 45 – Cenário de renovação 39</i>	49
<i>Figura 46 – Cenário de renovação 40</i>	49
<i>Figura 47 – Cenário de renovação 41</i>	49
<i>Figura 48 – Representação gráfica da política de manutenção recomendada</i>	54
<i>Figura 49 – Tela inicial do protótipo</i>	66
<i>Figura 50 – Inserção de parâmetros de entrada do modelo</i>	67
<i>Figura 51 – Inserção das variáveis de decisão do modelo</i>	67
<i>Figura 52 – Apresentação dos resultados</i>	68

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Parâmetros do caso base</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 2 – Análise da taxa de custo e de inatividade do sistema</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 3 – Proporção de renovações preventivas, corretivas e oportunas</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 4 – Variação dos parâmetros de custo</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 5 – Probabilidade de inacessibilidade de uma turbina eólica offshore</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 6 – Casos especiais da política de manutenção</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 7 – Comparativo com outros estudos na literatura</i>	<i>64</i>

LISTA DE QUADROS

<i>Quadro 1 – Aspectos positivos e negativos do uso da manutenção corretiva</i>	<i>22</i>
<i>Quadro 2 – Representações gráficas dos cenários da política de substituição por idade</i>	<i>23</i>
<i>Quadro 3 – Pseudocódigo do simulador da política de substituição em bloco.....</i>	<i>25</i>
<i>Quadro 4 – Aspectos positivos e negativos do uso da manutenção baseada no tempo.....</i>	<i>26</i>
<i>Quadro 5 – Aspectos positivos e negativos do uso da manutenção baseada na condição.....</i>	<i>28</i>
<i>Quadro 6 – Aspectos positivos e negativos do uso da manutenção oportuna</i>	<i>29</i>
<i>Quadro 7 – Legenda das Figuras 7 a 47.....</i>	<i>41</i>
<i>Quadro 8 – Síntese matemática dos cenários apresentados em Figuras 7 a 47.....</i>	<i>49</i>
<i>Quadro 9 – Siglas e descrições dos parâmetros de entrada</i>	<i>53</i>
<i>Quadro 10 – Levantamento dos contextos restritivos considerados.....</i>	<i>64</i>
<i>Quadro 11 – Funções para definição de cada cenário</i>	<i>83</i>

LISTA DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 1 - Análise de sensibilidade da idade de substituição preventiva.....</i>	<i>55</i>
<i>Gráfico 2 - Análise de sensibilidade do limiar inferior da janela de oportunidades.....</i>	<i>56</i>
<i>Gráfico 3 - Política de manutenção ótima para cada taxa de oportunidade.....</i>	<i>58</i>
<i>Gráfico 4 - Benefício financeiro gerado pelas oportunidades.....</i>	<i>58</i>
<i>Gráfico 5 - Política de manutenção ótima para diferentes valores de p</i>	<i>61</i>
<i>Gráfico 6 - Retorno otimizado para diferentes valores de p.....</i>	<i>61</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2	JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA	15
1.4	METODOLOGIA.....	16
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1	MANUTENÇÃO.....	19
2.1.1	Manutenção Corretiva	21
2.1.2	Manutenção Preventiva.....	22
2.1.2.1	Estratégias de Manutenção Preventiva Baseada no Tempo.....	23
2.1.2.2	Estratégias de Manutenção Preventiva Baseada na Condição.....	26
2.1.3	Manutenção Oportuna	28
2.2	DELAY TIME	29
2.3	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS.....	31
2.4	MANUTENÇÃO EM TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE.....	32
3	DESENVOLVIMENTO DO MODELO PROPOSTO.....	37
3.1	CARACTERIZAÇÃO E PRESSUPOSTOS DO SISTEMA	37
3.2	POLÍTICA DE MANUTENÇÃO	39
4	APLICAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO PROPOSTO	53
4.1	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA	53
4.2	POLÍTICA DE MANUTENÇÃO RECOMENDADA	54
4.3	ANÁLISES E DISCUSSÕES.....	54
4.4	COMPARAÇÃO COM CASOS ESPECIAIS E LITERATURA.....	62
4.5	PROTÓTIPO	65
5	CONCLUSÃO.....	69

REFERÊNCIAS.....	71
APÊNDICE A.....	79

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Sistemas produtivos geograficamente distribuídos, como o nome sugere, é um conjunto de subsistemas independentes localizados geograficamente distantes entre si e/ou de seu sistema supervisor, onde cada um desses subsistemas são compostos por um conjunto de componentes (Nguyen *et al.*, 2019). Em outras palavras, são aqueles onde diferentes partes da cadeia produtiva se encontram espalhadas em amplas regiões. Um exemplo para esse tipo de sistema são os campos de turbinas eólicas *offshore*, no qual as plataformas de geração de energia se encontram distribuídas no oceano e o produto desse processo, isto é, a energia elétrica produzida, escoar para diversas regiões distintas na costa, onde podemos encontrar também o centro de manutenção e supervisão destes.

Importante destacar que a importância destes sistemas só cresce, a medida em que se observa não mais aceitável o uso de fontes de energia com alto poder de degradação ambiental. Nesse sentido, é indiscutível que o setor energético renovável ganhará cada vez mais força no cenário de produção de energia, visto que tais fontes são alternativas promissoras em relação aos recursos convencionais, além de promoverem uma sociedade sustentável (Hansen, Narbel & Aksnes, 2017). Entretanto, a manutenção de sistemas dispersos em amplas regiões geográficas, em geral, é uma atividade intensiva de recursos.

Para o caso particular de turbinas eólicas em plataformas *offshore* isto é ainda mais grave, devido às diversas dificuldades impostas para a realização de ações sob o sistema. Estudos apontam que aproximadamente 30% dos custos totais do ciclo de vida de um campo de turbinas eólicas são voltados para as atividades de operação e manutenção (O&M) (Rockmann, Lagerveld & Stavenuiter, 2017).

Uma das principais razões para os custos de O&M de sistemas geograficamente distribuídos serem tão expressivos é o alto custo logístico associado à manutenção destes sistemas, que representa uma boa parcela dos custos totais da gestão da manutenção (Nguyen *et al.*, 2019; Hedjazi, Layachi & Boubiche, 2019). A exemplificação do alto custo logístico nos leva a imaginar novamente o cenário de turbinas eólicas *offshore*, no qual qualquer ação de manutenção a ser realizada depende de equipamentos especializados, como embarcações de serviço, helicópteros ou até mesmo guindastes (Gundegjerde *et al.*, 2015; Martin *et al.*, 2016).

Com o intuito de apoiar o crescimento contínuo das fontes de energia renovável, a proposição de modelos eficientes para reduzir os custos de O&M desses sistemas torna-se crucial.

1.2 JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA

Para além das turbinas eólicas *offshore*, outros sistemas geograficamente distribuídos podem ser listados: plataformas petrolíferas *offshore*, poços artesianos de petróleo e gás natural, além dos sistemas de distribuição de água, energia e gás. Assim, todos estes podem ser vistos como sistemas no qual a distribuição geográfica deles implica em uma maior dificuldade na gestão de manutenção. Apesar disso, a contribuição desses sistemas para o funcionamento pleno da sociedade é imensurável, que vai desde auxílio ao atendimento às necessidades básicas como alimentação e higiene até o impacto na qualidade de vida das pessoas, melhores oportunidades de emprego e maior possibilidade de investimento industrial.

Ao redor do mundo podemos observar um aumento alarmante na preocupação voltada à emissão de gases causadores do efeito estufa. Esta preocupação nos torna cada vez mais inclinados a tomar iniciativas de conversão de processos, como o processo de geração de energia elétrica - que eram tradicionalmente realizados causando um grande impacto negativo à sociedade, para processos que causam menor impacto em termos de emissão de gases do efeito estufa, como por exemplo, energia solar, energia eólica, energia de hidrogênio, entre outras. Com isto, foi possível testemunhar o aumento nos estudos e projetos realizados no campo de energia renovável, permitindo a energia eólica a se expandir dos anos 90 até a presente data, tornando-a uma chave muito importante para os sistemas de produção de energia elétrica (Sarker & Faiz, 2017; Blaabjerg & Ma, 2017).

A energia eólica é hoje não somente uma das mais importantes fontes de energia renovável, mas também é considerada uma fonte de energia limpa muito eficiente, crescendo cada vez mais ao longo dos anos (Sarker & Faiz, 2016). Ao mesmo tempo que este tipo de energia renovável cresce, a necessidade de estudar os tópicos relacionados à O&M destes sistemas também cresce. Contudo, todos os aspectos relacionados com a instalação, transporte, operação e manutenção de turbinas eólicas são muito custosos e para uma maior viabilização do investimento voltado a este tipo de energia, é necessário que a gestão desses aspectos busque maneiras eficientes de minimizar o gasto financeiro (Jiang, 2021; Ren *et al.*, 2021).

Diante disso, este trabalho busca apresentar contribuições no que tange o planejamento da manutenção para sistemas geograficamente distribuídos por meio do desenvolvimento e

aplicação de uma política de manutenção em um sistema de turbinas eólicas *offshore* de maneira a auxiliar na condução de melhores estratégias na definição do seu planejamento de manutenção. A contribuição do trabalho está relacionada com a busca de maneiras mais eficientes de tratar o planejamento de manutenção destes sistemas e assim contribuir com o avanço da energia renovável.

1.3 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento e aplicação de uma política que auxilie na tomada de decisão voltada ao planejamento de manutenção de uma turbina eólica em plataforma *offshore*.

Quanto aos objetivos específicos, temos:

- Levantamento do estado da arte no que tange a manutenção do sistema sob estudo, além das principais características que abrangem tais sistemas;
- Compreensão das modelagens matemáticas das políticas de manutenção propostas na literatura para o sistema estudado;
- Construção de algoritmo para otimização da política de manutenção designada para aplicação;
- Realização de análises de sensibilidade dos resultados obtidos pela política de manutenção aplicada;
- Criação de protótipo que permita a aplicação da política de manutenção apresentada.

1.4 METODOLOGIA

Nesta pesquisa foi realizado um levantamento bibliográfico no que tange a manutenção de campos de turbinas eólicas *offshore*. Um dos objetivos deste levantamento foi de identificar o componente crítico do sistema sob estudo. Além disso, foi possível definir diferentes aspectos presentes nestes sistemas, que possibilitaram uma maior compreensão da realidade enfrentada pelo sistema sob estudo. Em seguida, foi realizada a definição dos custos e mecanismos de falha, essenciais para desenvolvimento do estudo. Os dados para os parâmetros foram estipulados a partir de estudos presentes na literatura de turbinas eólicas *offshore*. Foi então apresentado o desenvolvimento de uma política de manutenção adequada ao sistema trabalhado e analisados os resultados trazidos pela aplicação desta. Por fim, um protótipo da política de manutenção foi criado de maneira a permitir uma possível aplicação posterior pelo leitor.

Com isso, o método científico apropriado para o estudo elaborado é o dedutivo, visto que o estudo tem como base leis e teorias universais e consequências advindas destas são derivadas para elaborar explicações e previsões. Desta maneira, partindo de um conhecimento geral para um conhecimento específico (Marconi & Lakatos, 2010).

A pesquisa se configura como aplicada quanto à sua finalidade. Isso se deve ao fato da potencialidade de aplicação em um contexto real, com desejo de torná-lo mais eficiente e eficaz (Gil, 2002).

É possível também classificar a pesquisa quanto à sua natureza como quantitativa, isto devido à necessidade de mensuração das variáveis de pesquisa para exploração do fenômeno sob estudo. Variáveis estas que serão oferecidas pela natureza ou derivadas de teorias consolidadas. Além disto, as questões de pesquisa serão respondidas através de modelos matemáticos (Habes *et al.*, 2018).

As pesquisas que têm como objetivo a utilização de técnicas para apresentar as causalidades entre variáveis é definida por explicativa (Gil, 2002). Neste trabalho são exploradas políticas de manutenção que necessitarão de parâmetros previamente estipulados na literatura para definição das variáveis de decisão que melhor atendem à função objetivo da problemática de pesquisa operacional. Buscando assim, através da modelagem matemática, revelar as relações de causalidade entre as variáveis.

A principal técnica utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa foi a documentação indireta, através da consulta de artigos, livros e teses em bancos de dados indexados, utilizada de maneira a recolher informações sobre o campo de interesse. Quanto aos dados, este estudo utiliza da modelagem de programações matemáticas – com destaque na pesquisa operacional. A pesquisa operacional é definida como a arte de aplicar técnicas de modelagem a problemas de tomada de decisão através do uso de métodos matemáticos e estatísticos visando a obtenção de solução ótima ou de melhor compromisso (Arenales *et al.*, 2007). Neste estudo, a função objetivo de otimização serão os desempenhos de custo e disponibilidade do sistema de turbinas eólicas *offshore*. A abordagem da pesquisa operacional aqui proposta explorará até a fase de validação e interpretação dos resultados, utilizando de algoritmos desenvolvidos na linguagem de programação *python*.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em 5 capítulos, introdução, referencial teórico e revisão da literatura, desenvolvimento do modelo proposto, aplicação numérica, e conclusão. O primeiro

capítulo trata das considerações iniciais do trabalho, da justificativa e relevância da pesquisa, bem como seus objetivos e metodologia. O segundo capítulo conta com o referencial teórico necessário para o desenvolvimento da pesquisa, bem como estudos recentes que tangenciam o proposto através desta pesquisa. São apresentados conceitos relacionados à manutenção corretiva, preventiva e oportuna, modelo de *delay time*, avaliação de desempenho de sistemas, e sistemas de turbinas eólicas *offshore*. No terceiro capítulo, é apresentada a caracterização do sistema sob estudo e formulação do modelo proposto. No quarto capítulo, é realizada a aplicação numérica do modelo no contexto explorado. O quinto capítulo ainda conta com as análises e discussões voltadas à sua implementação. Por fim, o sexto capítulo conta com as conclusões obtidas na pesquisa, bem como suas limitações e sugestões de trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MANUTENÇÃO

A manutenção é uma atividade crucial para indústrias de todos os setores, independente do seu tipo de produção. Tem como papel principal o manutenção do sistema produtivo em bom estado de funcionamento, prevenindo falhas e aumentando a vida útil dos equipamentos. Dessa forma, garante não somente a eficiência na produtividade do sistema, mas também uma maior segurança dos trabalhadores inseridos neste (Fogliato & Ribeiro, 2009).

A manutenção pode ser conduzida de maneiras distintas para cada um dos componentes existentes dentro deste sistema. A forma de manutenção mais antiga proposta para um componente industrial é a manutenção corretiva, que se caracteriza pela realização de uma ação de rejuvenescimento de um ativo após a perda de sua função operacional (Bousdekis *et al.*, 2015). Ou seja, há apenas uma ação, quando o sistema já falhou. Isto pode causar grandes inconvenientes, como paradas no sistema produtivo, necessidade de compras emergenciais, depreciação dos equipamentos, necessidade de retrabalho de peças e até mesmo risco à segurança dos trabalhadores. Apesar de contraintuitivo, num primeiro instante, este tipo de ação de manutenção ainda é amplamente utilizado dentro dos setores industriais, gerando perdas financeiras seja pela necessidade da ação de manutenção, pelo retrabalho produtivo ou até mesmo perda da produção quando o sistema se encontra inativo (Ding & Kamaruddin, 2015).

Entretanto, é possível alegar que a manutenção corretiva não possui somente contraindicações: quando estamos tratando de equipamentos que não afetam de maneira direta a produção ou até mesmo que o recurso para correção da falha seja muito pequeno, a manutenção corretiva passa a ser uma opção viável ao sistema (Hao *et al.*, 2010). Além disso, Sharma, Kumar & Kumar (2005) apresentam que a utilização de políticas de manutenção corretiva é viável quando estamos tratando de sistemas com grandes margens de lucro e a relação de demanda e oferta é favorável ao produtor.

Porém, para sistemas geograficamente distribuídos, a utilização de uma política de manutenção puramente corretiva não é adequada, dado o grande despendimento financeiro causado por tal gestão de manutenção, principalmente em se tratando de unidades de produção contínua como a de geração e distribuição de energia ou até mesmo de plataformas petrolíferas, no qual a perda na produção causada pela inatividade do sistema tem grande impacto na sua lucratividade (Laggoune, Chateauneuf & Aissani, 2009). Além disso, vincula-se perdas

irreversíveis, uma vez que tais sistemas devem explorar zonas de concessão, por um tempo predeterminado.

Com isso, é possível perceber que esta caracterização de componentes com pouca influência na produção ou recurso alocado para tratamento das falhas é muito restrita, visto que compreende somente uma parcela pequena de todo um sistema produtivo típico. Desta maneira, foi necessário elaborar um formato de manutenção que conseguisse pelo menos evitar as paradas no sistema, que em outras palavras seria evitar a sua perda financeira através da improdutividade.

Logo, a manutenção preventiva surge, e como o nome sugere, esta é caracterizada pela ação de prevenção de uma falha no sistema ao realizar ações de rejuvenescimento do sistema produtivo de forma regular (Cavalcante & Lopes, 2015). A partir deste conceito, diversos estudos foram desenvolvidos de maneira a entender qual seria o momento ideal para realização da manutenção preventiva de um determinado componente (Barlow & Hunter, 1960; Huynh *et al.*, 2012; Chaowasakoo, Seppälä & Koivo, 2018).

A aplicação deste tipo de ação é hoje difundida por trazer uma economia muito grande ao gerenciamento da manutenção de um sistema quando comparado com a manutenção corretiva, bem como prevenir a perda na produtividade e desgaste de diferentes componentes que não seja aquele falho (Tsai, Wang & Tsai, 2004).

Contudo, uma outra forma de manutenção ainda mais robusta baseada na ação preventiva de manutenção surge com o objetivo de prever uma falha através da utilização de algum meio de monitoramento de parâmetros essenciais do componente, como vibrações, temperatura, vazão, entre outros, através de inspeções ou até mesmo sensores (Fogliato & Ribeiro, 2009). Esta é a manutenção preditiva, que hoje é essencialmente utilizada para componentes com grandes potenciais de danos ao fluxo produtivo, aos trabalhadores do sistema e ao meio ambiente.

Com isso, a manutenção é classificada em três tipos distintos na literatura científica e normativa, são elas: manutenção corretiva, preventiva e preditiva (Cavalcante & Lopes, 2015). Entretanto, além dos tipos de manutenção extensivamente difundidos na literatura, existe uma outra prática de manutenção dentro dos sistemas produtivos que é abordada neste estudo, conhecida por manutenção oportuna. Esta se dá através de um conjunto de ações de manutenção sendo executadas por conta do surgimento de uma oportunidade para tal. Isto é, a manutenção oportuna de um componente pode vir a acontecer quando um outro componente do mesmo sistema está em manutenção ou até mesmo quando há o desligamento de uma planta, gerando

esta possibilidade de execução de atividades não programadas, desde que tais oportunidades ocorram em janelas previamente definidas (Scarf, Cavalcante & Lopes, 2018). Este tipo de manutenção possibilita a execução de ações de manutenção com custos mais baixos ou com menos interrupções do sistema produtivo do que a manutenção preventiva e principalmente do que a manutenção corretiva. No contexto do estudo apresentado através deste projeto, este tipo de manutenção pode ser muito bem aproveitado, visto que geram economia de escala para todo sistema.

São explorados a seguir os tipos de manutenção que são aproveitados a partir da aplicação do trabalho desenvolvido.

2.1.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é caracterizada como a ação de manutenção, seja reparo ou substituição, realizada após a falha operacional do sistema sob análise. A dificuldade surge quando a gestão de manutenção depende exclusivamente desse tipo de manutenção reativa para lidar com o sistema, o que pode ser ineficiente em vários aspectos, como gerar um alto custo para restaurar os equipamentos em condições operacionais durante situações de crise, causar danos secundários e riscos à saúde e segurança decorrentes da falha ou ainda a penalidade associada à perda de produção (Tsang, 1995).

Em contrapartida, Sheut & Krajewski (1994) propõem um modelo de decisão para o gerenciamento de manutenção de um sistema produtivo sob a política de manutenção puramente corretiva. O estudo apresenta diversas alternativas potencialmente favoráveis para o sistema produtivo trabalhado, os classificando em três distintos objetivos principais que seguem de suas respectivas alternativas favoráveis:

- Acelerar o serviço de reparo: aumentar do tamanho do time de manutenção, determinar os melhores métodos para reparo, treinar o time de manutenção, melhorar o centro de manutenção (espaço físico), criar inventários de sobressalentes;
- Facilitar a atividade de reparo: projetar equipamentos para facilitar a manutenção, usar design modular para equipamentos, substituir componente por peça sobressalente e reparar o componente substituído posteriormente;
- Fornecer saída alternativa durante o tempo de reparo: implementar sistemas redundantes, utilizar rotas alternativas para fluxo produtivo, fazer uso de sistemas mais flexíveis, aumentar o limite de estoque de produtos acabados, aumentar o limite de

estoque de produtos em processo, criar banco de horas extras para a equipe de manutenção.

Apesar das contribuições voltadas ao ramo do planejamento estratégico do time de operação e manutenção, este estudo se apresenta com certa defasagem no que tange a proposição de estratégias para sistemas críticos de manutenção. Isso devido ao fato de que para tais sistemas, muitas vezes a sua falha operacional e ineficiência produtiva pode ocasionar em um desencadeamento de graves consequências negativas, algumas vezes transpassando o aspecto econômico, como o impacto na satisfação do cliente do processo ou na potencialidade da participação da organização na quota do mercado. (Hao *et al.*, 2010) ainda apresentam os aspectos positivos e negativos relacionados ao uso da manutenção corretiva, conforme observado em Quadro 1.

Quadro 1 - Aspectos positivos e negativos do uso da manutenção corretiva

Aspectos positivos	Aspectos negativos
Não há ações de manutenção em excesso	Alto risco de falha dos componentes
Sem investimento inicial	Inatividade longa e não programada
Baixo custo de gerenciamento	Alto custo de componentes de reposição
	Possíveis horas extras de time de manutenção
	Baixa segurança e confiabilidade
	Interrupção do processo produtivo
	Risco de acidentes com graves repercussões

Fonte: Adaptado de Hao et al. (2010).

2.1.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é a tomada de decisão voltada à diminuição das idades dos componentes de forma a melhorar a disponibilidade de um determinado sistema – em outras palavras, a redução da probabilidade de falha ou degradação de um determinado componente do sistema (ISO 14224, 2016).

Grida, Zaid & Kholief (2017) dividem ainda, as ações de manutenção preventivas em duas perspectivas distintas: (1) a perspectiva de que o componente após a ação de manutenção preventiva será ‘tão bom quanto novo’, que neste caso significa que a idade do componente é reduzida completamente, voltando ao seu estado operacional pleno e sem impactos da degradação – uma ação associada a esse tipo de perspectiva seria a própria substituição do

componente; e (2) a perspectiva de que o componente após a ação de manutenção preventiva será ‘tão ruim quanto velho’, ou seja, que o estado do componente é apenas levemente melhorado, de forma a garantir apenas a condição necessária para operação – uma ação associada a essa segunda perspectiva seriam as ações de reparo do componente.

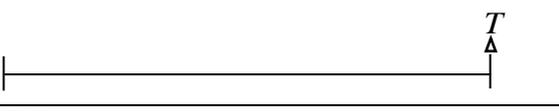
Rausand & Hoyland (2003) defendem que a manutenção preventiva é relevante a partir da conferência de que a taxa de falha dos componentes dos sistemas é crescente com o tempo e que o custo associado às ações de manutenção preventivas é menor do que aquele para a manutenção corretiva. É defendido então que a manutenção preventiva se divide em duas categorias (i) estratégias de manutenção preventiva baseada no tempo e (ii) estratégias de manutenção preventiva baseada na condição.

2.1.2.1 Estratégias de Manutenção Preventiva Baseada no Tempo

A primeira categoria é denominada como baseada no tempo pela razão de que o tempo é a única variável de decisão no que tange a definição da política de manutenção a ser tratada, abrange políticas de manutenção clássicas da literatura, como a política de substituição por idade, quanto também a política de substituição em bloco.

A política de substituição por idade é definida pela seguinte estratégia: um componente é substituído corretivamente após a falha ou é substituído preventivamente quando atinge a idade de substituição preventiva T , o que ocorrer primeiro (Barlow & Proschan, 1996). Essa política é apropriada para sistemas em que a manutenção corretiva tem maior custo que a manutenção preventiva e quando a taxa de falha é crescente. As representações gráficas dos cenários desta política podem ser visualizadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Representações gráficas dos cenários da política de substituição por idade

Cenário	Representação Gráfica
1	
2	
●	Falha
▲	Substituição corretiva
△	Substituição preventive planejada

Fonte: Adaptado de Cavalcante (2022a).

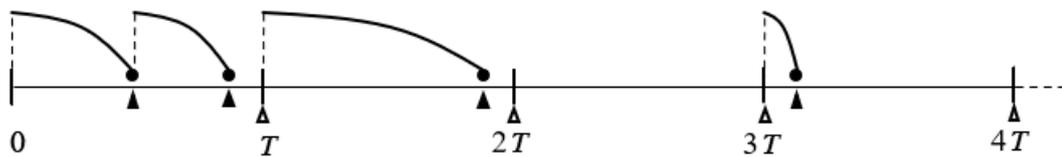
No primeiro cenário, podemos observar o componente falha antes mesmo de chegar à idade de substituição preventiva proposta pela política (T), sendo necessária uma substituição corretiva. Já no segundo cenário, o componente não apresenta falha até atingir a idade de substituição preventiva, sendo assim substituído preventivamente em T .

Tomando que x é o tempo de estadia do componente no estado bom, com função de distribuição $F(x)$ e densidade $f(x)$. O custo de substituição preventiva c_p e o custo de substituição corretiva c_F . Temos que a taxa de custo do sistema, C_∞ , é representada por Equação (2.1). Esta função é comumente utilizada como função objetivo para a otimização da política de manutenção explorada, tendo como variável de decisão a própria idade preventiva de substituição T .

$$C_\infty = \frac{c_F \int_0^T f(x) dx + c_p (1 - F(x))}{\int_0^T x f(x) dx + T (1 - F(x))} \quad (2.1)$$

A política de substituição em bloco, por outro lado, é definida pela seguinte estratégia: um componente é substituído preventivamente quando atinge o tempo regular de substituição ($T, 2T, 3T, \dots$), independente de sua idade, ou é substituído corretivamente quando falha. Esta política é apropriada para sistemas que possuem diversos componentes similares/idênticos trabalhando, promovendo uma economia de escala do sistema e maior facilidade de gerenciamento do sistema (Barlow & Proschan, 1996). A representação gráfica desta política pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - Representação gráfica da política de substituição em bloco



Fonte: Adaptado de Cavalcante (2022b).

Na representação gráfica da política de substituição em bloco pode-se observar diversos cenários que existem dentro do intervalo de tempo entre as substituições preventivas (T). Um componente pode ser substituído corretivamente mais de uma vez dentro de um cenário, assim

como pode ser substituído corretivamente e logo em seguida ser submetido a uma manutenção preventiva, assim como também não possuir nenhuma substituição corretiva dentro do intervalo de tempo proposto pela política, ou até mesmo ser submetido a uma substituição corretiva no início de sua vida, entre outras diversas combinações de cenários que podem existir. Esta política de manutenção pode ser simulada através do uso de alguma linguagem de programação, seguindo o pseudocódigo apresentado em Quadro 3.

Quadro 3 - Pseudocódigo do simulador da política de substituição em bloco

Início Simulador de Política de Substituição em Bloco
<ol style="list-style-type: none"> 1. Inicializa 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. $Vida \leftarrow Vida + z$ 12. $x \leftarrow x + z$ 13. Senão 14. $Custo \leftarrow Custo + c_p$ 15. $Vida \leftarrow Vida + (T - x)$ 16. Fim-enquanto 17. Senão 18. $Custo \leftarrow Custo + c_p$ 19. $Vida \leftarrow Vida + T$ 20. $C_{\infty} \leftarrow \frac{Custo}{Vida}$ 21. Retorne C_{∞}
Fim Simulador de Política de Substituição em Bloco

Fonte: Adaptado de Cavalcante (2022b).

O pseudocódigo apresentado em Quadro 3 tem como entradas não somente os parâmetros referentes à função de distribuição da vida do componente, mas também os valores referentes ao custo de substituição preventiva e corretiva do componente. Além disso, o simulador tem como entrada o valor do período entre substituições preventivas (T) e o critério de parada, que pode ser definido de diversas maneiras. Uma das formas é utilizando o critério de parada como sendo um número de iterações muito grande, fazendo com que haja convergência no valor de C_{∞} .

O Quadro 4 apresenta os aspectos positivos e negativos do uso da manutenção baseada na condição.

Quadro 4 - Aspectos positivos e negativos do uso da manutenção baseada no tempo

Aspectos positivos	Aspectos negativos
Manutenção é controlada	Manutenção é feita sem falha operacional
Menos desastres catastróficos	Falhas operacionais nem sempre são evitadas
Sobressalentes e custos podem ser controlados	
Redução de falhas inesperadas	

Fonte: Adaptado de Hao et al. (2010).

2.1.2.2 Estratégias de Manutenção Preventiva Baseada na Condição

A segunda estratégia, denominada de manutenção preventiva baseada na condição, tem por objetivo principal o monitoramento, modelagem e predição dos fenômenos de degradação de um determinado sistema (Rausand & Hoyland, 2003). Os modelos provenientes de uma estratégia preventiva baseada na condição devem possuir alguns elementos principais, são eles:

1. Definição de um estado de degradação ou um conjunto de estados no qual uma ação de manutenção preventiva deve ser executada no componente;
2. Definição do estado ou conjunto de estados no qual o componente é colocado de volta após a ação de manutenção preventiva;
3. Definição da abordagem de monitoramento para determinação do estado do componente sob análise.

Mobley (2012) defende que o monitoramento da condição é uma técnica de gestão que utiliza da avaliação da condição operacional dos componentes de um sistema para aumentar sua efetividade e eficiência. A principal razão pelo qual o monitoramento da condição se apresenta

como um grande aliado ao time de manutenção é o fato de que eles têm o potencial de minimizar paradas no sistema produtivo, visto que as técnicas utilizadas na manutenção baseada por condição conseguem identificar problemas no componente antes que eles se tornem ainda mais prejudiciais ao sistema.

Para o monitoramento dos sistemas, existem algumas técnicas apresentadas na literatura, como: monitoramento de vibração, monitoramento acústico, análise do óleo, elétrica, da temperatura, monitoramento físico da condição, entre outras. Apesar da existência de diversas técnicas, a maioria dos sistemas utilizam de um número mais restrito de técnicas para avaliação (Ahmad & Kamaruddin, 2012).

Dentro do campo de sistemas geograficamente distribuídos, esse tipo de manutenção já vem sendo explorado. Elusakin, Shafiee & Adedipe (2019) apresentam uma política de manutenção preventiva baseada na condição para um dos equipamentos de perfuração mais críticos quanto a segurança de trabalhadores de sistemas industriais de petróleo e gás, além de ser também um dos mais caros. Os resultados apontam uma potencial redução de custos através da redução no número de reparos e substituição realizados no componente.

Wang, Zhang & Zeng (2021) apresentam uma estratégia de manutenção baseada na condição e aplicam em um estudo de caso dentro do campo de turbinas eólicas *offshore*, mais especificamente no rolamento do eixo principal, um dos elementos críticos do sistema trabalhado. Esses rolamentos suportam o peso do rotor somada às cargas adicionais causadas pelo vento, transmitindo então o torque ao equipamento adjacente (neste caso, a caixa de engrenagens).

Assim, o estudo apresenta uma política de manutenção em grupo utilizando inspeções periódicas para detecção de falhas no sistema. Foi possível observar durante o estudo que a aplicação do modelo tem um impacto ainda maior comparado com outras políticas de manutenção existentes na literatura quando o número de turbinas no campo sob estudo é aumentado. Entretanto, o estudo desconsidera a possibilidade de manutenção imperfeita, o que se distancia da realidade dos times de manutenções desses sistemas. Ainda assim, o desenvolvimento da política de manutenção apresentada, bem como os resultados do estudo de caso tem grande contribuição para a evolução do estudo no campo.

O Quadro 5 apresenta os aspectos positivos e negativos do uso da manutenção baseada na condição.

Quadro 5 - Aspectos positivos e negativos do uso da manutenção baseada na condição

Aspectos positivos	Aspectos negativos
Falhas inesperadas são reduzidas	Alto investimento inicial
Peças são encomendadas quando necessário	Especialidade técnica é requerida
Manutenção é realizada quando necessário	Alto custo de operação
A vida útil do componente é estendida	Instrumentos extras precisam ser mantidos

Fonte: Adaptado de Hao et al. (2010).

2.1.3 Manutenção Oportuna

De maneira geral, a manutenção oportuna pode ser definida como as atividades de manutenção que se aproveitam de outras ações de manutenção sendo executadas dentro do sistema, acarretando assim em reduções significativas de custos e interrupções do sistema produtivo tratado (Cavalcante, Lopes & Scarf, 2018). Em outras palavras, seria uma forma de manutenção conveniente de substituição dos componentes de um sistema tomando como vantagem a realização de ações em outras partes do sistema, onde temos recursos de manutenção adequados e disponíveis.

Para o estabelecimento de políticas de manutenção oportuna, ao invés de serem definidas a frequência ou o momento exato em que as ações devem ser realizadas, são definidas as condições sob as quais as oportunidades são aproveitadas. Wang, Scarf & Smith (2000) exemplificam isso através do uso de paradas no sistema produtivo para realização de ação de manutenção em um determinado componente como oportunidades para realização de manutenção preventiva em outro componente do mesmo sistema, com menor custo e evitando uma parada futura no sistema produtivo. Uma outra exemplificação desta condição é realizada por Cavalcante, Lopes & Scarf (2018) através de uma política de manutenção considerando ações oportunas apenas após um certo limiar, que no estudo é definido de acordo com a idade do componente.

Segundo Dekker & Smeitink (1991), as oportunidade surgem através das interdependências econômica e estrutural entre as partes que compõe o sistema. A primeira está relacionada com a economia de escala gerada a partir da manutenção de dois ou mais componentes ao mesmo tempo, enquanto a segunda está relacionada com a relação de função operacional entre os componentes – se um componente para o outro também para.

Ab-Samat & Kamaruddin (2014) apontam que a manutenção oportuna tem como objetivo minimizar o tempo de inatividade programado das máquinas, ao mesmo tempo em que maximiza a vida útil e confiabilidade dos componentes, visando garantir a melhor durabilidade

possível para esses elementos e evitando falhas onerosas e perigosas durante a operação. A literatura ainda mostra que as aplicações de políticas de manutenção oportuna tendem a se concentrar em um sistema de manutenção ideal, pois estas utilizam abordagens de compensação entre a confiabilidade de um componente e os custos de manutenção.

A manutenção oportuna tem recebido grande atenção na literatura. Esta tem sido aplicada em diversos sistemas geograficamente distribuídos, seja no campo de turbinas eólicas (Xie *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2017; Shafiee, Finkelstein & Bérenguer, 2015), redes de abastecimento de gás (Chateauneuf & Laggoune, 2018), dispositivos de transmissão de energia (Dong *et al.*, 2022; Wang, He & Tian, 2023) ou até mesmo trilhos ferroviários (Bakhtiary, Zakeri & Mohammadzadeh, 2021).

Neste sentido, é possível perceber que a manutenção oportuna se apresenta como uma grande aliada ao time de manutenção de sistemas geograficamente distribuídos, com a capacidade de reduzir os números de interações entre o time e o sistema, reduzindo assim também custos logísticos e conseqüentemente de manutenção. Em Quadro 6, podemos observar os aspectos positivos e negativos do uso da manutenção oportuna.

Quadro 6 - Aspectos positivos e negativos do uso da manutenção oportuna

Aspectos positivos	Aspectos negativos
Aumento da confiabilidade do sistema	Difícil encontrar componentes significantes para manutenção
Redução do tempo de inatividade	Substituição ou reparação precoce de componentes em estado operacional
Redução dos custos logísticos e de manutenção	Dificuldade em determinar quais condições devem ser atendidas para realização de manutenção
Melhoria da qualidade e eficiência da produção	Depende de interdependência econômica e estrutural
Aumento da disponibilidade do sistema	
Extensão da vida útil do equipamento	

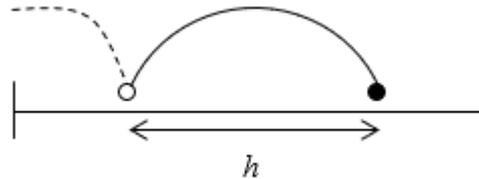
Fonte: Adaptado de Ab-Samat & Kamaruddin (2014).

2.2 MODELO DE DELAY TIME

O modelo de *delay time* é um conceito proposto por Christer & Waller (1984) que tem como base a suposição de que antes de chegar no estado falho, o equipamento sob estudo demonstra um comportamento atípico – que provoca uma redução em sua performance (Werbińska-Wojciechowska, 2019). Este comportamento atípico pode ser caracterizado como um defeito e é representado de diversas formas, como vibração excessiva, calor excessivo,

fedor, redução da produtividade, aumento da variação da qualidade, barulhos estranhos, entre outros (Christer, 1999). A representação gráfica do *delay time* (simbolizado por h) pode ser observada em Figura 2.2.

Figura 2 - Representação gráfica do *delay time*



Fonte: Adaptado de Wang (2008).

Diante deste cenário de anomalias, apresentadas ainda durante o estado operacional do sistema, é necessário que ações de manutenção conhecida por inspeções sejam realizadas de maneira a identificá-las. Com isto, ao abordar o modelo *delay time*, um ponto chave é entender qual a estratégia de manutenção deve ser utilizada de maneira a detectar o defeito antes do surgimento da falha – que neste caso seria a transição para o estado não-operacional.

Neste sentido, alguns estudos na literatura têm sido apresentados utilizando o modelo *delay time* para gerenciamento de manutenção nas mais diferentes aplicações, como na indústria de fabricação de acetileno preto (Jones, Jenkinson & Wang, 2009), fabricação de aço (Zhao; Wang & Peng, 2015), circuitos elétricos (Yuan *et al.*, 2020) e válvulas de gasodutos (Rodrigues, Cavalcante & Alberti, 2023).

No contexto de sistemas geograficamente distribuídos, poucos estudos têm sido explorados utilizando este conceito. Esta conexão tem sido desenvolvida apenas por alguns autores. Wang & Majid (2000) estabelecem a distribuição de *delay time* e estimam os parâmetros associados às plataformas petrolíferas *offshore* de forma a determinar o melhor intervalo de inspeção em termos do critério de interesse. Neste estudo foi revelado que o planejamento da manutenção atual do sistema era efetivo, mas poderia ser ainda melhor utilizando a análise do *delay time*.

Kuntz, Christie & Venkata (2001) utilizam a base do *delay time* no escopo da modelagem que propõe a definição de uma frequência ótima de inspeção para os alimentadores de um sistema de distribuição de energia elétrica considerando a compensação entre o custo de inspeção e custo de baixa confiabilidade do sistema.

No contexto de turbinas eólicas, Andrawus *et al.* (2008) aplicam o modelo de *delay time* com o objetivo de otimizar o intervalo entre inspeções de diferentes componentes do sistema tendo como função objetivo a minimização do custo expendido durante a vida de cada componente.

Ainda no contexto de sistemas geograficamente distribuídos, Cavalcante, Lopes & Scarf (2021) apresentam uma política de manutenção que utilizam como base o modelo de *delay time* para definição do número de inspeções que devem ser realizadas no sistema sob estudo, bem como a idade de substituição preventiva. A política de manutenção é modelada e aplicada numericamente.

2.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS

A avaliação de desempenho de sistemas é muito importante para definição de uma política de manutenção, visto que a decisão tomada será de grande valor para a eficácia de um determinado sistema, isto é, validação de seu uso. Segundo Almeida & Souza (2001) o tratamento da problemática voltada ao desempenho de um sistema sujeito à manutenção deve iniciar com o estabelecimento de objetivos a serem atendidos com maior custo-benefício possível. Os autores apresentam alguns destes atributos, como a disponibilidade, custo, qualidade de serviço e fatores humanos.

Em relação ao primeiro atributo, a disponibilidade, pode ser caracterizada como sendo a probabilidade no qual o sistema estudado estará disponível em dado instante de tempo. Diante desta lógica, este atributo se divide em dois diferentes conceitos: confiabilidade e manutenibilidade. A confiabilidade, por sua vez, é caracterizada como sendo a probabilidade no qual o sistema estará em seu estado operacional em dado intervalo de tempo. Já a manutenibilidade é caracterizada como a probabilidade de um equipamento depois de sair de seu estado operacional, ser restaurado de maneira a entrar novamente em seu estado operacional. Li *et al.* (2021) apresentam uma modelagem que realiza a avaliação do desempenho do sistema baseado na sua disponibilidade, utilizando políticas híbridas de manutenção. Para a avaliação do desempenho do sistema apresentado neste estudo, também é introduzido o atributo custo, segundo atributo apresentado.

O custo é amplamente utilizado para a avaliação de desempenho de um sistema, diante de diversas razões, uma delas é que este afeta diretamente a principal finalidade de uma empresa, que é a lucratividade. O limitado recurso financeiro faz com que o enfoque sobre custos relativos às ações de manutenção seja muito grande, diversos estudos têm se baseado

neste atributo para avaliação da efetividade de uma modelagem proposta. Uma pesquisa interessante utilizando este atributo para avaliação do sistema é o desenvolvido por Wang *et al.* (2021), que propõem uma política de manutenção oportuna para sistemas geograficamente distribuídos que possui uma perspectiva de redução de custo de mais de R\$ 100.000,00 (cem mil reais) para um campo de turbinas eólicas no qual o estudo de caso foi realizado.

2.4 MANUTENÇÃO EM TURBINAS EÓLICAS *OFFSHORE*

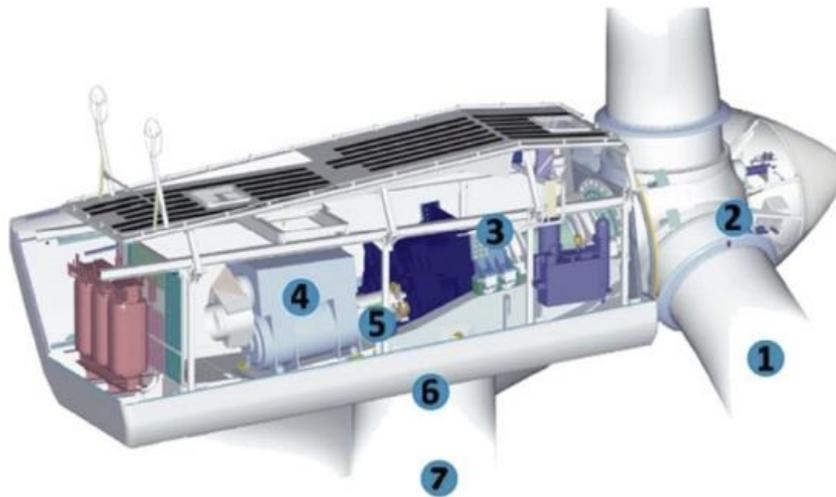
Sistemas de turbinas eólicas são sistemas complexos que contém diversos componentes importantes para seu devido funcionamento. Isso inclui 5 subsistemas que podem ser descritos da seguinte maneira: (1) sistema receptor da energia, composto pelas pás e rotor, no qual transformam a energia cinética dos ventos em energia mecânica; (2) sistema produtor de energia, integrado por um mancal principal, eixo principal, gerador e caixa de engrenagens, que transforma energia mecânica em eletricidade; (3) sistema de transformação de energia, composto por um conversor de frequência e um transformador para ajustar os níveis de frequência e tensão de acordo com os requisitos da rede; (4) estrutura de suporte, que inclui a torre, a nacela e a fundação; (5) sistema auxiliar composto pelos subsistemas de inclinação, guinada e frenagem. (Le & Andrews, 2016; Li, Teixeira & Soares, 2020). Com isso, as principais partes de uma turbina eólica são apresentadas em Figura 3, sendo (1) pás, (2) rotor, (3) caixa de engrenagens, (4) gerador, (5) rolamento, (6) sistema de guinada, e (7) torre.

As turbinas eólicas *offshore* possuem diversas vantagens quando comparados com aquelas dispostas na terra (turbinas eólicas *onshore*) dada à menor restrição física que existe para construção dos parques, maior potencial de geração de energia – devido às maiores velocidades e consistência dos ventos na região, além da geração de energia com menor impacto ao meio ambiente. Entretanto, existem diversos desafios quanto ao pleno funcionamento dos campos de turbinas eólicas *offshore*, tanto na instalação desses, que vem se expandindo para distâncias maiores da costa ao passar dos anos (Shafiee, 2015a), quanto nos seus processos de O&M, devido às condições climáticas extremas e ambientes severos que esses sistemas são submetidos (Díaz & Soares, 2020; Shafiee, 2015b).

Em se tratando de turbinas eólicas *offshore* cujo a expectativa de vida do sistema seja de 20 anos, seus custos de operação e manutenção representam de 25% a 30% do custo total de geração de energia ou 75% a 90% dos custos de investimento ao considerar seu tempo de vida. Kang & Soares (2020) ainda apresentam que os motivos para isso são os seguintes fatores: (1) Acessibilidade insuficiente devido ao clima imprevisível e à localização remota; (2) Maior

quantidade de falhas quando comparado com as turbinas eólicas *onshore*, devido ao ambiente marinho; (3) Despesas extras de estoque, pois são necessárias embarcações e técnicos específicos.

Figura 3 - Principais partes de uma turbina eólica



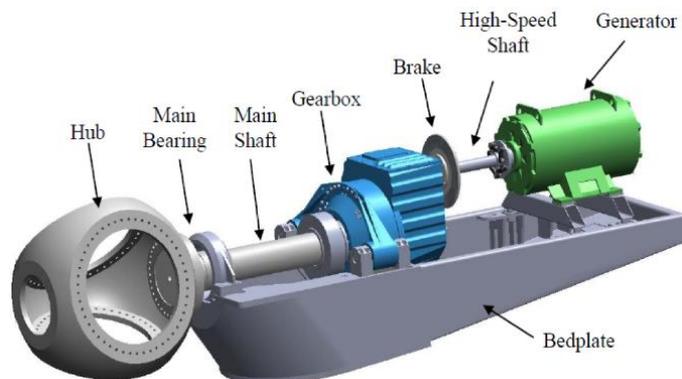
Fonte: Márquez et al. (2012).

Um dos subsistemas mais críticos de uma turbina eólica é o sistema de produção de energia, também conhecido por sistema de transmissão. Mais detalhadamente, Li, Teixeira & Soares (2020) destacam a caixa de engrenagens e o mancal principal como os componentes que mais causam problemas neste sistema. Além disso, Carroll, McDonald & Mcmillan (2016) apresentam algumas informações importantes referentes ao subsistema de produção de energia, o caracterizando como um dos mais críticos de uma turbina eólica *offshore* ao apresentar que 95% das ações de substituição são atribuídas ao gerador e à caixa de engrenagens, sendo este último responsável por aproximadamente 60% dessas substituições. Observe mais deste subsistema em Figura 4.

A principal função da caixa de engrenagens é transmitir a potência do rotor para o gerador elétrico, aumentando a velocidade rotacional de entrada de baixa velocidade e alto torque para uma velocidade de saída de alta velocidade e baixo torque adequada para o gerador elétrico, transformando energia mecânica em eletricidade. Este sistema se encontra sujeito à diversas cargas complexas decorrentes das condições climáticas que mudam rapidamente, ventos fortes, turbulência extrema, alta temperatura operacional e degradação do óleo (Elusakin & Shafiee, 2022). Além disso, as caixas de engrenagens podem falhar devido às causas relacionadas ao

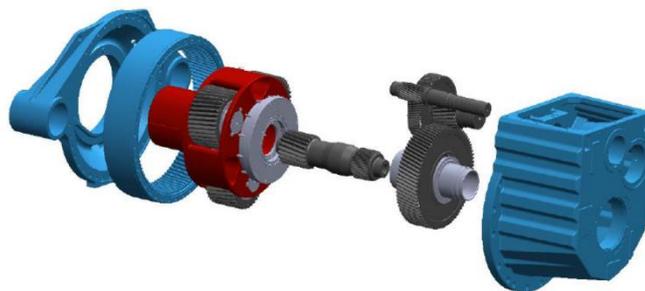
erro de design dos componentes, problema de fabricação ou qualidade, além da subestimação das cargas operacionais no qual o subsistema de geração de energia estará sujeito (Papatzimos, Dawood & Thies, 2018). A Figura 5 apresenta uma caixa de engrenagem em maior detalhamento.

Figura 4 - Configuração do trem de acionamento de uma turbina eólica



Fonte: Dong, Xing & Moan (2012).

Figura 5 - Visualização detalhada da caixa de engrenagens



Fonte: Dong, Xing & Moan (2012).

Os prejuízos causados pelo mau funcionamento das caixas de engrenagens resultam em perdas significativas tanto na geração de energia quanto financeiras. Por essa razão, a segurança operacional e a confiabilidade das caixas de engrenagens das turbinas eólicas offshore devem ser tratadas como uma prioridade alta, com o objetivo de reduzir os custos de operação e manutenção e aumentar a disponibilidade desses sistemas.

Na literatura, vários estudos consideram a caixa de engrenagens como sendo um dos componentes críticos do sistema de turbinas eólicas para proposição de políticas de manutenção de forma a minimizar os custos associados às ações de operação e manutenção destes sistemas.

Nguyen & Chou (2018) apresentam duas estratégias de manutenção de turbinas eólicas *offshore*, considerando não somente o planejamento de manutenção individual dos componentes, como também a manutenção em grupo destes, trazendo como resultado uma redução de aproximadamente 2,33% e 4,56% do custo de manutenção, respectivamente, com a aplicação destas. Isto indica, de certa forma, a importância dos princípios trazidos pela manutenção oportuna em sistemas como o tratado – visto que utiliza da manutenção em outros componentes/subsistemas para tratar de um outro.

Lu *et al.* (2018) propõem uma abordagem de otimizar as ações de manutenção para turbinas eólicas offshore utilizando a estratégia de manutenção preventiva baseada na condição e redes neurais artificiais, com o objetivo de reduzir os custos de manutenção, minimizando as ações desnecessárias de manutenção, bem como as falhas inesperadas e tempo de inatividade no sistema. As redes neurais artificiais usam como base as informações de monitoramento das condições do sistema e definem, a partir disso, o valor condicional de probabilidade de falha dos componentes representantes do sistema sob estudo. A aplicação deste método em um sistema de turbina eólica *offshore* resultou em uma redução de aproximadamente 31,5% do custo de manutenção.

Xie *et al.* (2019) propõem em seu estudo a comparação entre uma estratégia de manutenção preventiva com uma outra que utiliza da manutenção oportuna para planejamento da manutenção. Na análise realizada, houve a observação de uma redução dos custos de manutenção de aproximadamente 10% quando comparadas as duas políticas propostas. Um ponto muito importante por este trabalho, ignorado por outros, foi a consideração da acessibilidade dos sistemas para a proposição e determinação da política de manutenção ótima.

Zhou & Yin (2019) desenvolveram uma estratégia dinâmica de manutenção baseada em condições oportunas para turbinas eólicas offshore utilizando uma abordagem preditiva. O critério de decisão utilizado para a análise é o custo efetivo de manutenção, que permite a determinação de planos de manutenção para diferentes componentes do sistema sob estudo. Com essa abordagem, o estudo teve por objetivo reduzir os custos de O&M, diminuindo assim o custo de energia gerada. A utilização da abordagem teve como redução de aproximadamente 32,46% dos custos anuais de manutenção quando comparado com estratégia de manutenção baseada no tempo. O estudo traz informações valiosas sobre como a análise preditiva pode ser usada para otimização de estratégias de manutenção.

Li *et al.* (2020), por sua vez, também desenvolvem uma política de manutenção oportuna para lidar com o sistema sob estudo. O estudo introduz em sua modelagem a consideração de

diferentes ações de manutenção a serem executadas nos componentes, alinhado a manutenção imperfeita. Um dos principais resultados trazidos pelo estudo é sua redução de 6,3% nos custos de operação e manutenção quando utilizada a política proposta.

Kang & Soares (2020) desenvolveram uma política de manutenção oportuna para parques eólicos offshore que considera não somente o ambiente complexo e variado que o sistema está inserido, mas também a manutenção imperfeita e condições climáticas, que fazem parte do contexto de manutenção desses sistemas. Ao considerar esses fatores, a política se aproxima ainda mais da realidade desses sistemas e tem potencial de melhorar o custo-benefício e disponibilidades desses sistemas. Comparado com a manutenção preventiva baseada no tempo, a política traz uma redução de aproximadamente 41% do custo de manutenção.

Finalmente, Melo *et al.*, 2022 apresentam uma política de manutenção híbrida com estrutura fixa de periodicidade composta de três fases – fase de inspeção, fase corretiva e fase oportuna, abrangendo assim diversos aspectos da manutenção, como as ações de inspeções, ações de manutenção preventiva, ações de manutenção corretiva e ações oportuna de manutenção. Além disso, o estudo toma como princípio a avaliação de gaps existentes na literatura para o atendimento mais adequado às dificuldades reais no que tange a gestão de manutenção de parques eólicos *offshore*. Alguns dos aspectos explorados no estudo é a influência das condições climáticas severas enfrentadas pelo sistema, manutenção imperfeita (através da consideração de possibilidade de más instalações), inadimplência das ações de manutenção (não possibilidade de realização de alguma ação de manutenção) e a restrição dos momentos de ações devido ao alto custo logístico associado ao sistema. Assim, o estudo reúne diversos aspectos relativos ao sistema trabalhado, de maneira não exemplificada na literatura anteriormente.

3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO PROPOSTO

3.1 CARACTERIZAÇÃO E PRESSUPOSTOS DO SISTEMA

O sistema se caracteriza como um sistema de componente crítico composto pela união de um componente e um suporte que resultam em uma função operacional. O componente que representa tal sistema é descrito e discutido na seção anterior, conhecido por caixa de engrenagens, apresentado como um dos componentes mais críticos de uma turbina eólica *offshore*.

Existe um intervalo de tempo entre visitas pré-planejadas ao sistema. Este intervalo é uma constante dada por s , que assume seu valor de acordo com restrições advindas do planejamento da manutenção. Além das visitas pré-planejadas, são considerados também que alguns eventos podem ocorrer de forma a criar oportunidades de visitas ao sistema. Essas visitas oportunas podem ser relacionadas a alguma ação de manutenção em outro componente do sistema sob estudo, bem como outros sistemas presentes no mesmo parque eólico *offshore*, que pode ter sido cancelada ou impedida, permitindo com que exista a possibilidade de realização de ações de manutenção.

O sistema se apresenta em um dos seus três estados durante qualquer visita feita ao mesmo. São eles: bom, defeituoso ou falho. Quando o sistema se apresenta em estado bom, ele estará operando de forma regular. É também proposto que no estado defeituoso o sistema continue funcionando normalmente, sendo necessária uma ação de inspeção para diferenciação entre esses dois estados. De forma contrária ao estado defeituoso, o estado falho é imediatamente revelado, sem precisar de uma inspeção para ser reconhecido.

Substituições são renovações do sistema e a partir disso, assume-se que o estado pode ser renovado através de dois tipos de substituição: a substituição corretiva, aquela que é feita quando o sistema se apresenta falho em uma das visitas pré-planejadas, e a substituição preventiva que pode ser realizada tanto durante inspeções no qual o sistema se encontra no estado defeituoso quanto no final do ciclo pré-planejado. Ambas também podem ser executadas através de visitas oportunas realizadas ao sistema.

A inadimplência durante uma ação de manutenção é dada pela constante p . Esta inadimplência, seja ela advinda de uma ação preventiva ou corretiva, acontece de acordo com manifestações de algum Estado da Natureza adverso – neste contexto, tempestades, ventos fortes ou altas ondas, que impedem a ação de manutenção de ser executada. Quando uma inadimplência acontece, a substituição do componente no estado defeituoso ou falho ocorre

somente em uma visita posterior àquela, visto que é considerado que não é possível ocorrer duas inadimplências consecutivas. É assumido que existe no máximo uma durante um ciclo de renovação. É assumido também que não há inadimplência da ação de manutenção no final do ciclo pré-planejado.

Considera-se também o q associado à variação da confiabilidade dos componentes durante uma ação de manutenção, fazendo com que existam duas diferentes populações de componentes, sendo uma fraca e uma forte. Este aspecto está relacionado a qualidade da manutenção do sistema, seja ela baseada nas ações de manutenção dos componentes, como também na definição de uso de sobressalentes de diferentes fornecedores. Dessa forma, x , tempo de chegada do defeito, é uma variável randômica e está relacionada a uma mistura de distribuição (Equação (3.1)), onde $f_1(x)$ e $f_2(x)$ são distribuições Weibull (Equação (3.2)) com parâmetros (η_1, β) e (η_2, β) , respectivamente.

$$F_x(x) = qf_1(x) + (1-q)f_2(x) \quad (3.1)$$

$$f_i(x) = \frac{\beta}{\eta_i} \left(\frac{x}{\eta_i} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta_i} \right)^\beta} \quad (3.2)$$

Quando o sistema já está no estado defeituoso, é possível que chegue uma falha, a duração do sistema em estado defeituoso é dada pela variável randômica h que está relacionada com uma distribuição exponencial (Equação (3.3)) com parâmetro λ .

$$f_H(h) = \lambda e^{-\lambda h} \quad (3.3)$$

As oportunidades são modeladas através de uma distribuição de Poisson com uma taxa de chegada μ , com isso, o tempo entre chegadas é determinado pela Equação (3.4). As oportunidades são independentes de x e h , que por sua vez, são estatisticamente independentes entre si.

$$f_Z(z) = \lambda e^{-\lambda z} \quad (3.4)$$

Inspeções são consideradas perfeitas, sem erro na classificação do estado do sistema, sem inadimplência ou indução de defeito. Cada uma das variantes das ações de substituição possuem um custo específico: c_P , c_F e c_O . O primeiro diz respeito ao custo de substituição preventiva, ou seja, quando um defeito é encontrado durante uma inspeção ou no instante final do ciclo de vida do sistema. O segundo custo diz respeito ao custo de substituição corretiva, ou seja, quando o sistema se encontra no estado falho durante a visita. Já o terceiro custo diz respeito ao custo

de substituição por oportunidade. Além desses custos, existe o custo de inspeção, dado por c_I e também o custo de downtime por unidade de tempo c_D visto que quando o componente falha entre duas visitas, ele permanece por um tempo sem funcionar, fazendo com que o sistema não produza energia até uma substituição, desta forma este custo de downtime considera a não produtividade do sistema durante esse período. Considera-se $c_p = 1$ (unidade de custo) sem perda de generalidade.

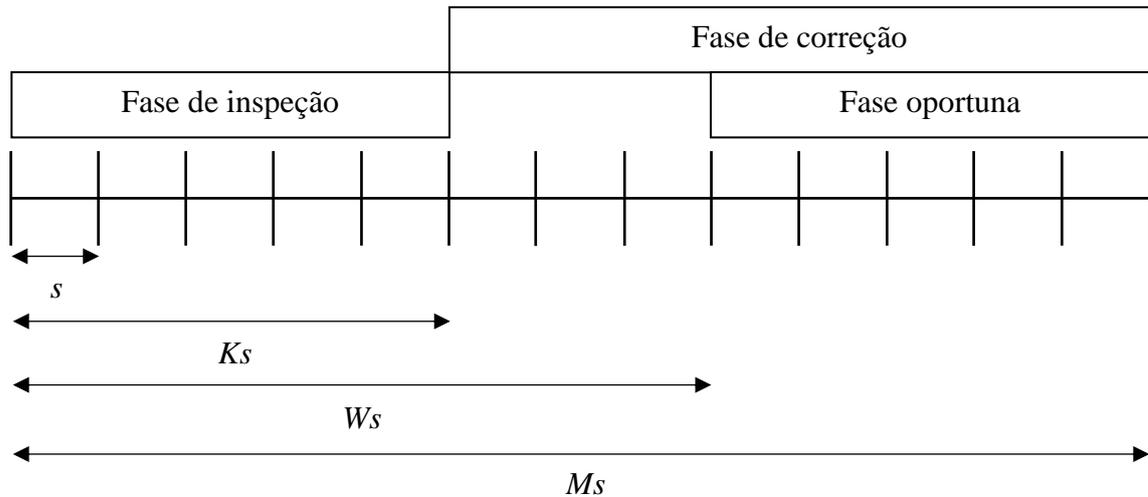
3.2 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO

A política de manutenção proposta em Melo *et al.* (2022) se apresenta ideal ao sistema trabalhado, visto que consegue atender à caracterização do modelo definida anteriormente, atendendo assim também às dificuldades reais no que tange a gestão de manutenção de sistemas geograficamente distribuídos, incluindo em seu desenvolvimento aspectos relacionados à inadimplência de realização de manutenção no sistema produtivo e qualidade destas manutenções, ambas muitas vezes atribuídas à condição severa no qual esses sistemas são submetidos, como ventos fortes, grandes ondas e tempestades, afetando a qualidade das ações de manutenção, ou até mesmo impedindo sua execução.

Outro aspecto importante considerado neste estudo que se alinha com a proposição em questão é o aproveitamento de oportunidades para realização de ações de manutenção no sistema. Além disso, um aspecto de grande proveito da política proposta é a estruturação periódica dela, motivado pelo planejamento da manutenção de sistemas geograficamente distribuídos, no qual os custos logísticos associados à manutenção são bem expressivos e as visitas potenciais feitas ao sistema devem ocorrer periodicamente, restrição relaxada em outras proposições. Com isso, a política proposta pelo estudo tratado é explicitada a seguir. Uma contribuição no que tange a ilustração dos cenários propostos na política é também apresentada. Além disso, são formulados alguns casos especiais advindos da política de manutenção proposta. Outra contribuição é a proposição de um protótipo que auxilia na aplicação da política de manutenção em questão.

A política possui três diferentes fases, como também três variáveis de decisão, são elas: K , W e M . A Figura 6 apresenta como essas variáveis são dispostas na política de manutenção.

Figura 6 - Representação gráfica da estrutura da política de manutenção proposta



Fonte: Adaptado de Melo et al. (2022).

A primeira fase, conhecida por fase de inspeção, é destinada às inspeções do sistema para descobrir o seu real estado. É proposto que do início do ciclo de vida até o final da primeira fase sejam realizadas K inspeções, sendo s o período entre uma inspeção e outra. Dessa forma, a primeira fase é dada no intervalo de tempo $[0, Ks]$. Nesta primeira fase pode ocorrer uma substituição preventiva, quando o componente se encontra no estado defeituoso em uma das inspeções efetivas, ou seja, aquela que não há inadimplência, e pode ocorrer uma substituição corretiva, quando um componente falha entre o período de duas inspeções efetivas.

A segunda fase é conhecida por fase de correção. As inspeções cessam a partir do tempo Ks e assim se inicia esta segunda fase, que dura até o final do ciclo dado pela M -ésima visita, logo a segunda fase é dada no período $[Ks, Ms]$. Ao contrário da primeira fase, as visitas não servem para distinguir o estado do sistema entre os estados bom e defeituoso e sim entre o estado bom e falho, visto que o estado falho pode ser observado sem necessidade de inspeção.

Uma terceira fase pode também ser observada dentro da fase de correção. Esta se dá através da abertura da janela de oportunidades dada por Ws e segue até o final do ciclo, dado por Ms . Com isso, esta fase é dada entre $[Ws, Ms]$. Para estas fases, uma substituição corretiva é realizada quando o sistema se encontra falho em uma das visitas efetivas, uma substituição preventiva ocorre quando o sistema atinge a idade limite Ms e uma substituição oportuna se dá quando surge uma oportunidade.

Com isso, temos que K é definido como o número de inspeções no sistema, Ws define a abertura da janela de oportunidades e Ms é o momento a ser definido para realização de uma

substituição preventiva. Diante disso, são determinados todos os cenários de renovação do sistema. Para a política de manutenção apropriada, são definidos 41 cenários, sendo 5 cenários de substituição preventiva, 16 cenários de substituição corretiva e 20 cenários com a finalização do ciclo de vida do sistema a partir de uma oportunidade.

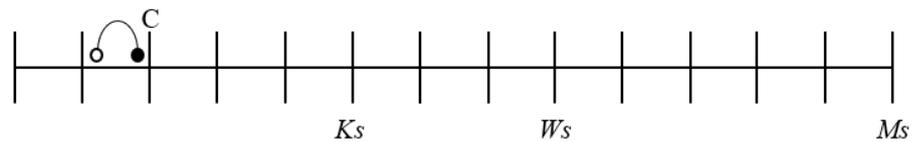
A seguir são apresentados os cenários referentes à política de manutenção trabalhada, através das Figuras 7 a 47. A legenda para os cenários está contida no Quadro 7. Uma síntese dos cenários é apresentada em Quadro 8.

Quadro 7 - Legenda das Figuras 7 a 47

Símbolo	Significado
○	Surgimento do defeito
●	Surgimento da falha
◆	Inadimplência
★	Surgimento de oportunidade
C	Substituição corretiva
P	Substituição preventiva
O	Substituição oportuna

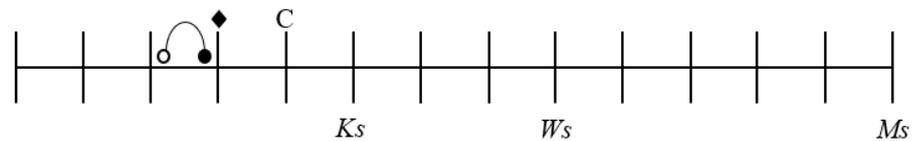
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 7 - Cenário de renovação 01



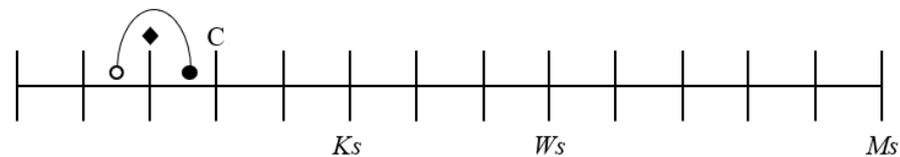
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 8 - Cenário de renovação 02



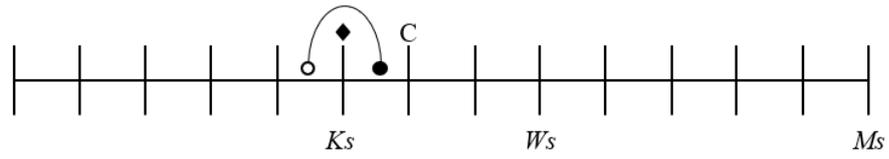
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 9 - Cenário de renovação 03



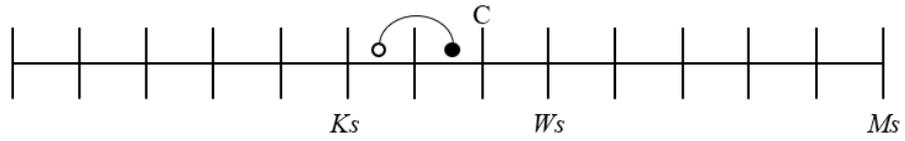
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 10 - Cenário de renovação 04



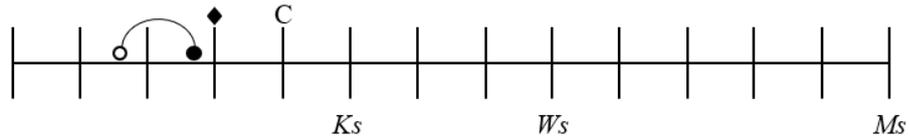
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 11 - Cenário de renovação 05



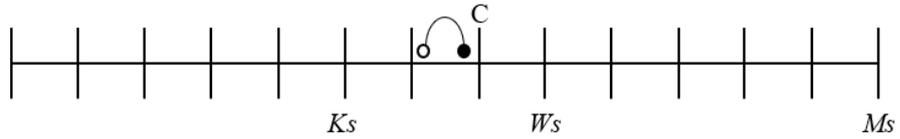
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 12 - Cenário de renovação 06



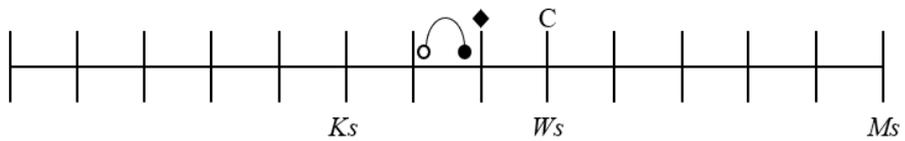
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 13 - Cenário de renovação 07



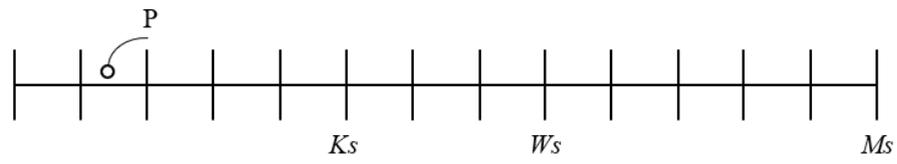
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 14 - Cenário de renovação 08



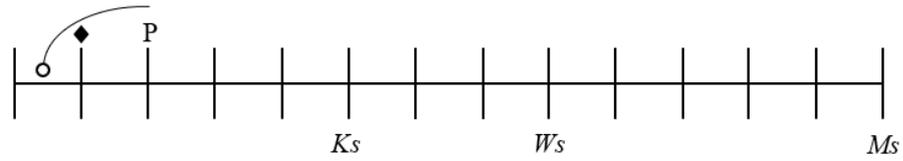
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 15 - Cenário de renovação 09



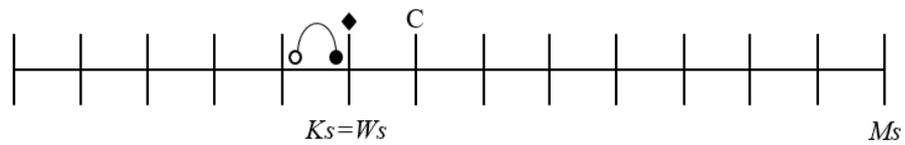
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 16 - Cenário de renovação 10



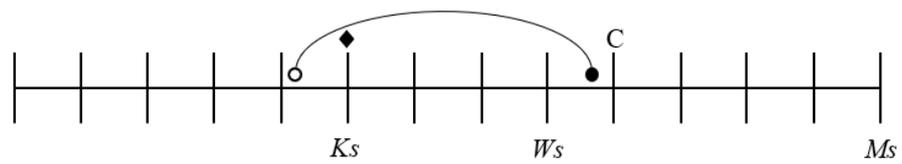
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 17 - Cenário de renovação 11



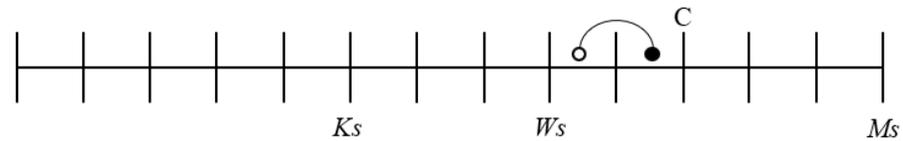
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 18 - Cenário de renovação 12



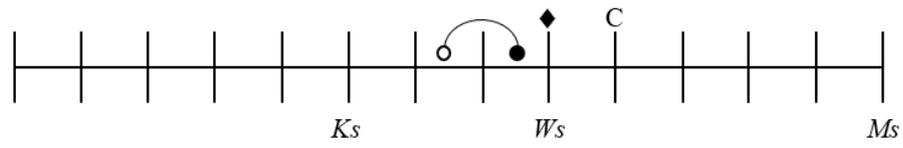
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 19 - Cenário de renovação 13



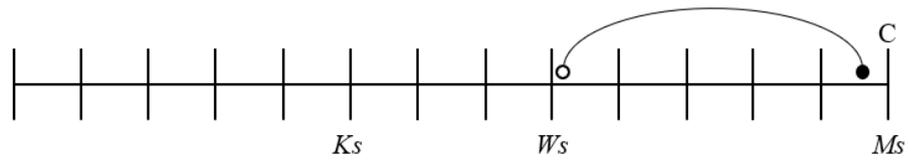
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 20 - Cenário de renovação 14



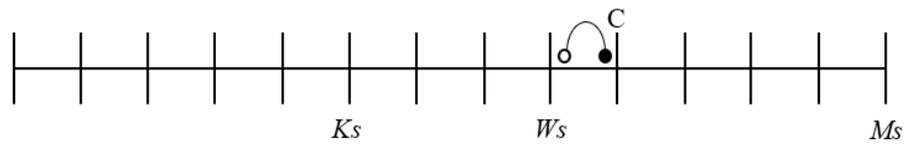
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 21 - Cenário de renovação 15



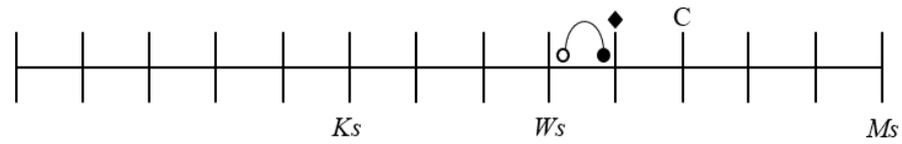
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 22 - Cenário de renovação 16



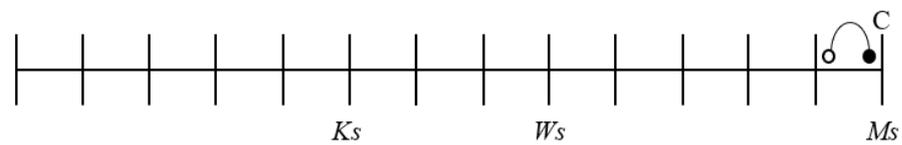
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 23 - Cenário de renovação 17



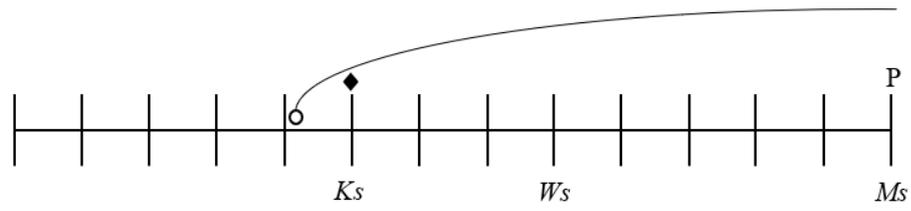
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 24 - Cenário de renovação 18



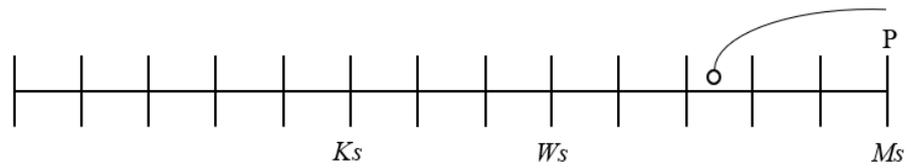
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 25 - Cenário de renovação 19



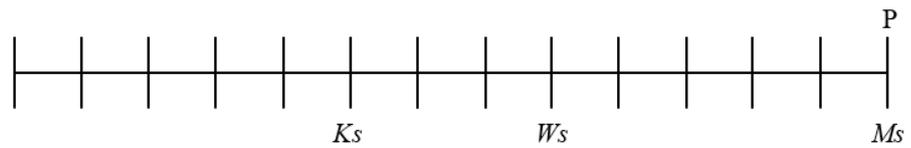
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 26 - Cenário de renovação 20



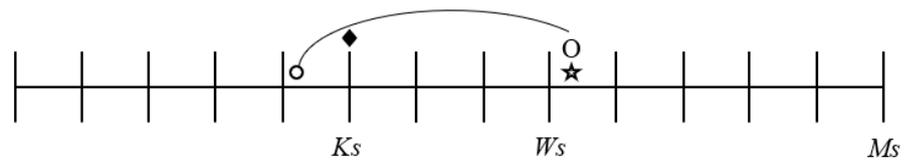
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 27 - Cenário de renovação 21



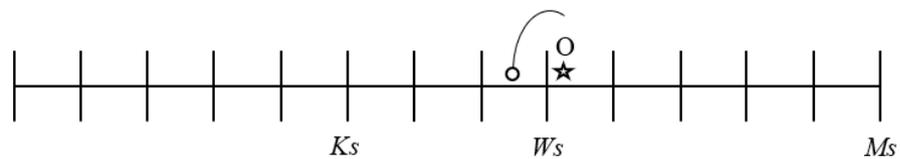
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 28 - Cenário de renovação 22



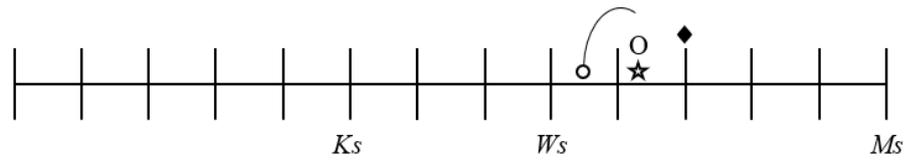
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 29 - Cenário de renovação 23



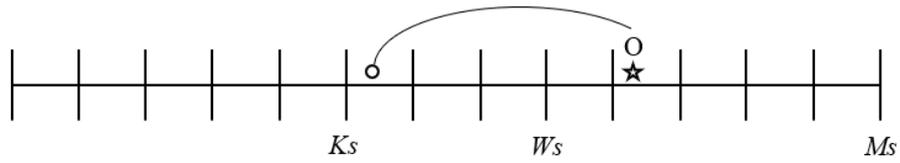
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 30 - Cenário de renovação 24



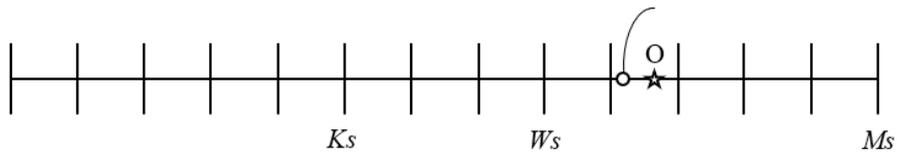
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 31 - Cenário de renovação 25



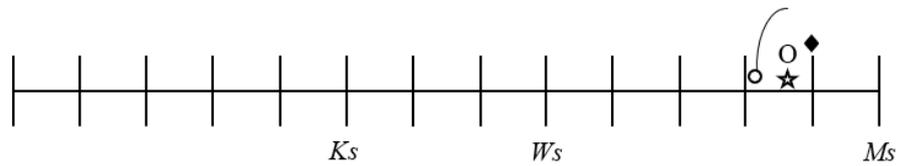
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 32 - Cenário de renovação 26



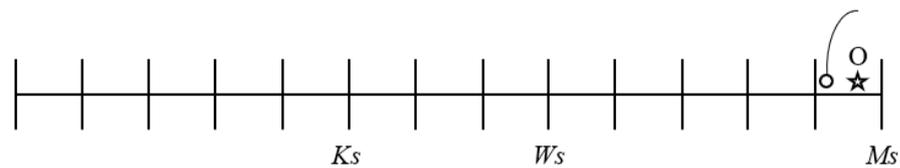
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 33 - Cenário de renovação 27



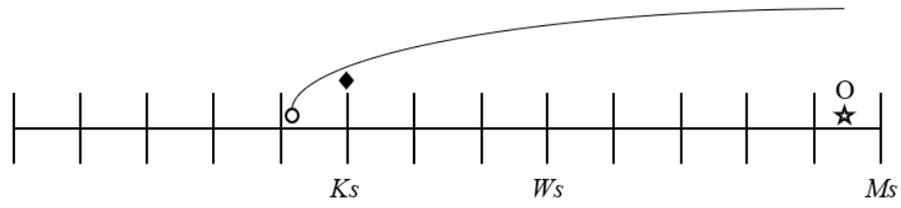
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 34 - Cenário de renovação 28



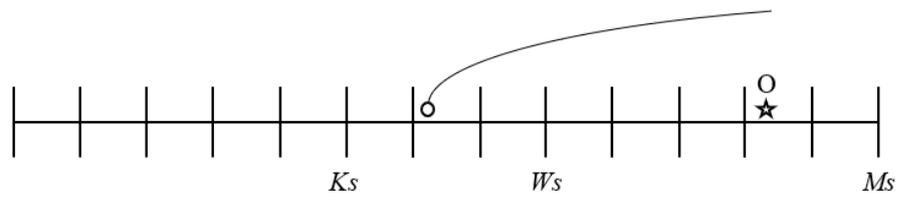
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 35 - Cenário de renovação 29



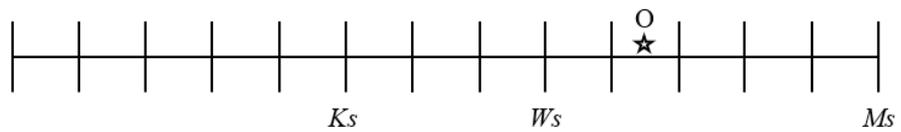
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 36 - Cenário de renovação 30



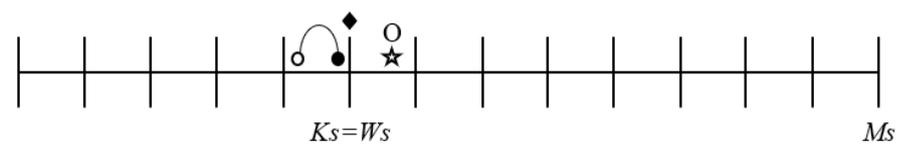
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 37 - Cenário de renovação 31



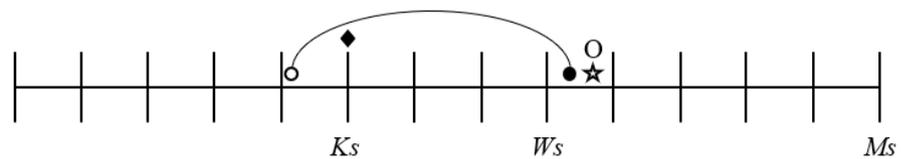
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 38 - Cenário de renovação 32



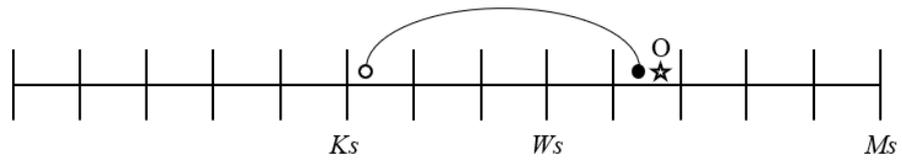
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 39 - Cenário de renovação 33



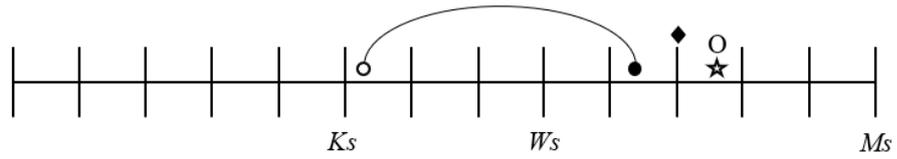
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 40 - Cenário de renovação 34



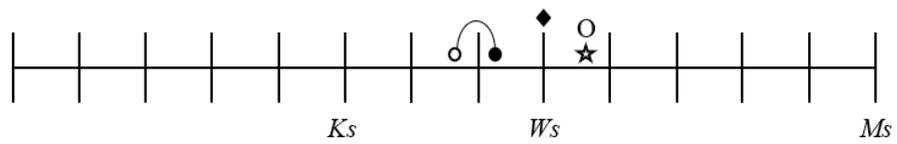
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 41 - Cenário de renovação 35



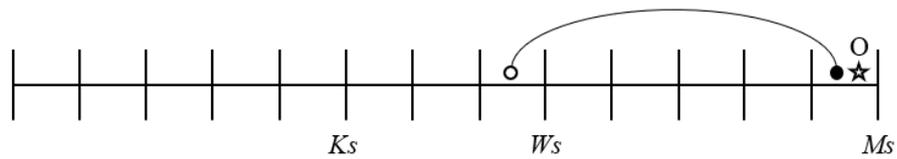
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 42 - Cenário de renovação 36



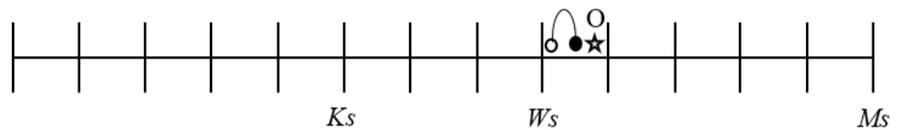
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 43 - Cenário de renovação 37



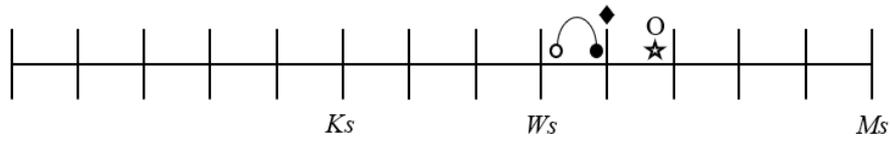
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 44 - Cenário de renovação 38



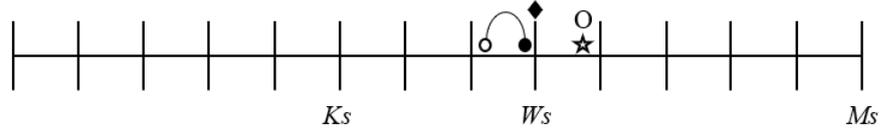
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 45 - Cenário de renovação 39



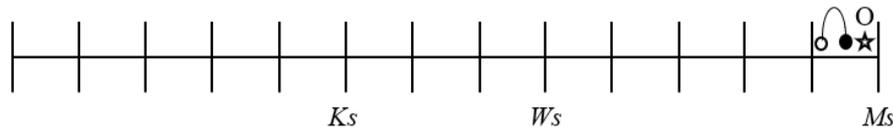
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 46 - Cenário de renovação 40



Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 47 - Cenário de renovação 41



Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Quadro 8 - Síntese matemática dos cenários apresentados em Figuras 7 a 47

Cenário	Momento de ocorrência do defeito	Momento de ocorrência da falha	Momento de inadimplência	Momento da ação de manutenção	Observações adicionais
01	$[(i-1)s, is]$	$[(i-1)s, is]$	-	is	$i = 1, \dots, K$ $K = 1, \dots, M-1$
02	$[(i-2)s, (i-1)s]$	$[(i-2)s, (i-1)s]$	$(i-1)s$	is	$i = 2, \dots, K+1$ $K = 2, \dots, M-1$
03	$[(i-2)s, (i-1)s]$	$[(i-1)s, is]$	$(i-1)s$	is	$i = 2, \dots, K$ $K = 2, \dots, M-1$
04	$[(K-1)s, Ks]$	$[(i-1)s, is]$	Ks	is	$i = K+1, \dots, W$ $W = K+1, \dots, M$ $K = 1, \dots, M-1$
05	$[(j-1)s, js]$	$[(i-1)s, is]$	-	is	$j = K+1, \dots, i-1$ $i = K+2, \dots, W$ $W = K+2, \dots, M$ $K = 0, \dots, M-3$
06	$[(j-1)s, js]$	$[(i-2)s, (i-1)s]$	$(i-1)s$	is	$j = K+1, \dots, i-2$ $i = K+3, \dots, W$ $W = K+3, \dots, M$ $K = 0, \dots, M-3$
07	$[(i-1)s, is]$	$[(i-1)s, is]$	-	is	$i = K+1, \dots, W$ $W = K+1, \dots, M$ $K = 0, \dots, M-1$
08	$[(i-2)s, (i-1)s]$	$[(i-2)s, (i-1)s]$	$(i-1)s$	is	$i = K+2, \dots, W$ $W = K+2, \dots, M$

					$K = 0, \dots, M - 2$
09	$[(i-1)s, is]$	-	-	is	$i = 1, \dots, K$ $K = 1, \dots, M - 1$
10	$[(i-2)s, (i-1)s]$	-	$(i-1)s$	is	$i = 2, \dots, K$ $K = 2, \dots, M - 1$
11	$[(K-1)s, Ks]$	$[(K-1)s, Ks]$	Ks	$(K+1)s$	$K = W$ $W = 1, \dots, M - 1$
12	$[(K-1)s, Ks]$	$[(i-1)s, is]$	Ks	is	$i = W + 1, \dots, M$ $W = K, \dots, M - 1$ $K = 1, \dots, M - 1$
13	$[(j-1)s, js]$	$[(i-1)s, is]$	-	is	$j = K + 1, \dots, i - 1$ $i = W + 1, \dots, M - 1$ $W = K, \dots, M - 2$ $K = 0, \dots, M - 3$
14	$[(j-1)s, js]$	$[(i-2)s, (i-1)s]$	Ws	is	$j = K + 1, \dots, i - 2$ $i = W + 1, \dots, M$ $W = K, \dots, M - 1$ $K = 0, \dots, M - 3$
15	$[(j-1)s, js]$	$[(M-1)s, Ms]$	-	Ms	$j = K + 1, \dots, M - 1$ $M = W, \dots, \infty$ $W = K, \dots, M$ $K = 0, \dots, M - 2$
16	$[(i-1)s, is]$	$[(i-1)s, is]$	-	is	$i = W + 1, \dots, M - 1$ $W = K, \dots, M - 2$ $K = 0, \dots, M - 2$
17	$[(i-2)s, (i-1)s]$	$[(i-2)s, (i-1)s]$	$(i-1)s$	is	$i = W + 1, \dots, M - 1$ $W = K, \dots, M - 2$ $K = 0, \dots, M - 2$
18	$[(M-1)s, Ms]$	$[(M-1)s, Ms]$	-	Ms	$M = W, \dots, \infty$ $W = K, \dots, M$ $K = 0, \dots, M - 1$
19	$[(K-1)s, Ks]$	-	Ks	Ms	$M = W, \dots, \infty$ $W = K, \dots, M$ $K = 1, \dots, M - 1$
20	$[(j-1)s, js]$	-	-	Ms	$j = K + 1, \dots, M$ $M = W, \dots, \infty$ $W = K, \dots, M$ $K = 0, \dots, M - 1$
21	-	-	-	Ms	$M = W, \dots, \infty$ $W = K, \dots, M$ $K = 0, \dots, M - 1$
22	$[(K-1)s, Ks]$	-	Ks	$[Ws, is]$	$i = W + 1, \dots, M$ $W = K, \dots, M - 1$ $K = 1, \dots, M - 1$
23	$[(j-1)s, js]$	-	-	$[Ws, is]$	$j = K + 1, \dots, i - 1$ $i = W + 1, \dots, M - 1$ $W = K, \dots, M - 1$ $K = 0, \dots, M - 1$
24	$[(j-1)s, js]$	-	$(i-1)s$	$[Ws, (i-1)s]$	$j = K + 1, \dots, i - 2$ $i = W + 2, \dots, M$ $W = K, \dots, M - 2$ $K = 0, \dots, M - 3$
25	$[(j-1)s, js]$	-	-	$[Ws, Ms]$	$j = K + 1, \dots, M - 1$ $W = K, \dots, M - 1$

					$K = 0, \dots, M - 1$
26	$[(i-1)s, is]$	-	-	$[Ws, is]$	$i = W + 1, \dots, M - 1$ $W = K, \dots, M - 2$ $K = 0, \dots, M - 2$
27	$[(i-2)s, (i-1)s]$	-	$(i-1)s$	$[Ws, (i-1)s]$	$i = W + 2, \dots, M$ $W = K, \dots, M - 2$ $K = 0, \dots, M - 2$
28	$[(M-1)s, Ms]$	-	-	$[Ws, Ms]$	$W = K, \dots, M - 1$ $K = 0, \dots, M - 1$
29	$[(K-1)s, Ks]$	-	Ks	$[Ws, Ms]$	$W = K, \dots, M - 1$ $K = 1, \dots, M - 1$
30	$[(j-1)s, js]$	-	-	$[Ws, Ms]$	$j = K + 1, \dots, M$ $W = K, \dots, M - 1$ $K = 0, \dots, M - 1$
31	$[(j-1)s, js]$	-	-	$[Ws, Ms]$	$j = K + 1, \dots, M$ $W = K, \dots, M - 1$ $K = 0, \dots, M - 1$
32	$[(K-1)s, Ks]$	$[(K-1)s, Ks]$	Ks	$[Ws, (W+1)s]$	$W = K$ $K = 1, \dots, M - 1$
33	$[(K-1)s, Ks]$	$[(i-1)s, is]$	Ks	$[Ws, is]$	$i = W + 1, \dots, M$ $W = K, \dots, M - 1$ $K = 1, \dots, M - 1$
34	$[(j-1)s, js]$	$[(i-1)s, is]$	-	$[(i-1)s, is]$	$j = K + 1, \dots, i - 1$ $i = W + 1, \dots, M - 1$ $W = K, \dots, M - 2$ $K = 0, \dots, M - 3$
35	$[(j-1)s, js]$	$[(i-2)s, (i-1)s]$	$(i-1)s$	$[(i-2)s, is]$	$j = K + 1, \dots, i - 2$ $i = W + 2, \dots, M$ $W = K, \dots, M - 2$ $K = 0, \dots, M - 3$
36	$[(j-1)s, js]$	$[(W-1)s, Ws]$	Ws	$[Ws, (W+1)s]$	$j = K + 1, \dots, W - 1$ $W = K + 2, \dots, M - 1$ $K = 0, \dots, M - 3$
37	$[(j-1)s, js]$	$[(M-1)s, Ms]$	-	$[(M-1)s, Ms]$	$j = K + 1, \dots, M - 1$ $M = W + 1, \dots, \infty$ $W = K, \dots, M - 1$ $K = 0, \dots, M - 2$
38	$[(i-1)s, is]$	$[(i-1)s, is]$	-	$[(i-1)s, is]$	$i = W + 1, \dots, M - 1$ $W = K, \dots, M - 2$ $K = 0, \dots, M - 2$
39	$[(i-2)s, (i-1)s]$	$[(i-2)s, (i-1)s]$	$(i-1)s$	$[(i-2)s, is]$	$i = W + 2, \dots, M$ $W = K, \dots, M - 2$ $K = 0, \dots, M - 2$
40	$[(W-1)s, Ws]$	$[(W-1)s, Ws]$	Ws	$[Ws, (W+1)s]$	$W = K + 1, \dots, M - 1$ $K = 0, \dots, M - 2$
41	$[(M-1)s, Ms]$	$[(M-1)s, Ms]$	-	$[(M-1)s, Ms]$	$M = W + 1, \dots, \infty$ $W = K, \dots, M - 1$ $K = 0, \dots, M - 1$

Fonte: Esta Pesquisa (2023).

A definição dos cenários de renovação tem grande importância para um maior entendimento da política de manutenção proposta. A análise de todos os cenários embasa o cálculo do critério de decisão definido para a otimização das variáveis de decisão.

O critério de decisão da política é a taxa de custo, justificada pelo Teorema da Recompensa da Renovação (Ross, 1995). Para a determinação da taxa de custo, é necessária a definição do custo esperado e vida esperada dos cenários de renovação, que por sua vez depende da probabilidade de cada cenário e tempo de inatividade esperado. As formulações matemáticas de cada uma das definições são apresentadas no (Apêndice A).

Com isso, a função objetivo é minimização de $C_{\infty}(K, W, M)$, sujeito à restrição de $K \leq W \leq M$, sendo $K, W, M \in \mathbb{Z}$. Assim, o modelo pode então ser implementado através da linguagem de programação *python* utilizando das bibliotecas *scipy* e *numpy*, enumerando todas as possíveis combinações das variáveis de decisão – isto é, realizando uma busca exaustiva da política de manutenção ótima, com limite de $M = 20$.

Para aplicação do modelo, é necessário que os parâmetros de entrada sejam definidos, e assim que definidos, o critério de decisão pode ser otimizado.

4. APLICAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO PROPOSTO

4.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

Os parâmetros de entrada podem ser observados através do Quadro 9, que apresenta a notação. Todos os parâmetros foram descritos nas seções anteriores.

Quadro 9 - Siglas e descrições dos parâmetros de entrada

Sigla	Descrição
η_1	Parâmetro de vida característica do componente fraco
η_2	Parâmetro de vida característica do componente forte
β	Parâmetro de forma do componente
q	Parâmetro de mistura
$1/\lambda$	Média do <i>delay-time</i>
μ	Taxa de chegada de oportunidades
s	Tempo entre visitas ao sistema
p	Probabilidade de inadimplência de uma ação de manutenção
c_I	Custo de uma inspeção
c_P	Custo de substituição preventiva em inspeção ou na idade de substituição
c_F	Custo de substituição corretiva
c_O	Custo de substituição oportuna
c_D	Custo de downtime por unidade de tempo

Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Os valores atribuídos aos parâmetros de entrada tiveram como base estudos prévios da literatura de turbinas eólicas *offshore* com características propostas anteriormente. Os parâmetros de distribuição do tempo de vida do componente, de *delay-time* e taxa de oportunidades são especificados com base nos dados fornecidos em (Kang & Soares, 2020; Cavalcante, Lopes & Scarf, 2021; Melo *et al.*, 2022) em bimestre, sendo o intervalo entre visitas o valor unitário. A relação dos custos de manutenção é advinda dos estudos apresentados em (Song *et al.*, 2018; Le & Andrews, 2016; Li *et al.*, 2020), sendo o custo de substituição preventiva o valor monetário unitário, sem perda de generalidade. O parâmetro de

indisponibilidade advém de (Xie *et al.*, 2019). Como observado, os dados apresentados foram estipulados a partir de outros estudos da literatura e podem variar de acordo com alguns fatores, discutidos e analisados mais detalhadamente posteriormente. Diante disso, a Tabela 1 apresenta os valores atribuídos a cada um dos parâmetros do estudo de caso desenvolvido nesta pesquisa.

Tabela 1 - Parâmetros do caso base

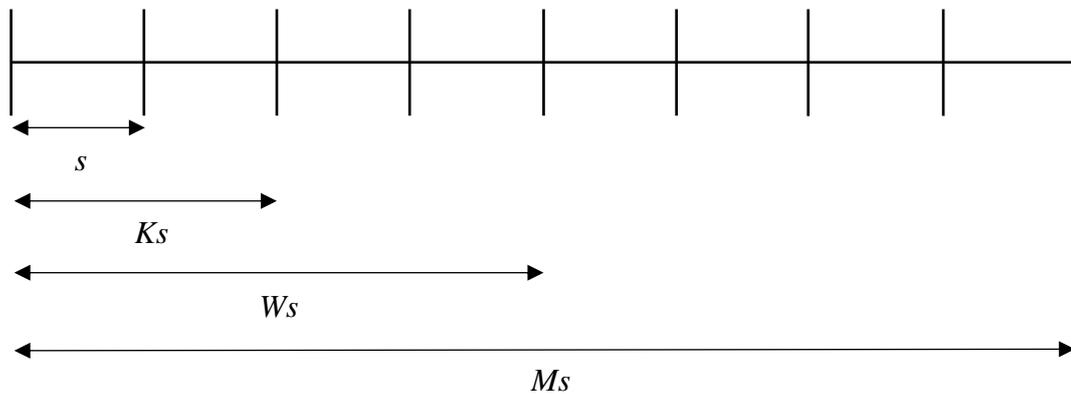
η_1	β	η_2	q	p	λ	s	c_P	c_F	c_I	c_D	c_O	μ
0,95	3	9,5	0,1	0,4	0,5	1	1	2	0,03	2,3	0,5	0,25

Fonte: Esta Pesquisa (2023).

4.2 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO RECOMENDADA

Com isso, a política de manutenção ótima recomendada para o sistema sob estudo é apresentada graficamente através da Figura 48, com as seguintes variáveis de decisão: K (número de inspeção) = 2, W (limiar inferior da janela de oportunidades) = 4, e M (idade de substituição preventiva) = 8. Isso significa que o sistema faz uso de todas as fases da política de manutenção de maneira estratégica de forma a torná-la otimizada, baseado nos parâmetros de entrada e pressupostos, resultado numa C_∞ (taxa de custo) = 0.2067.

Figura 48 - Representação gráfica da política de manutenção recomendada



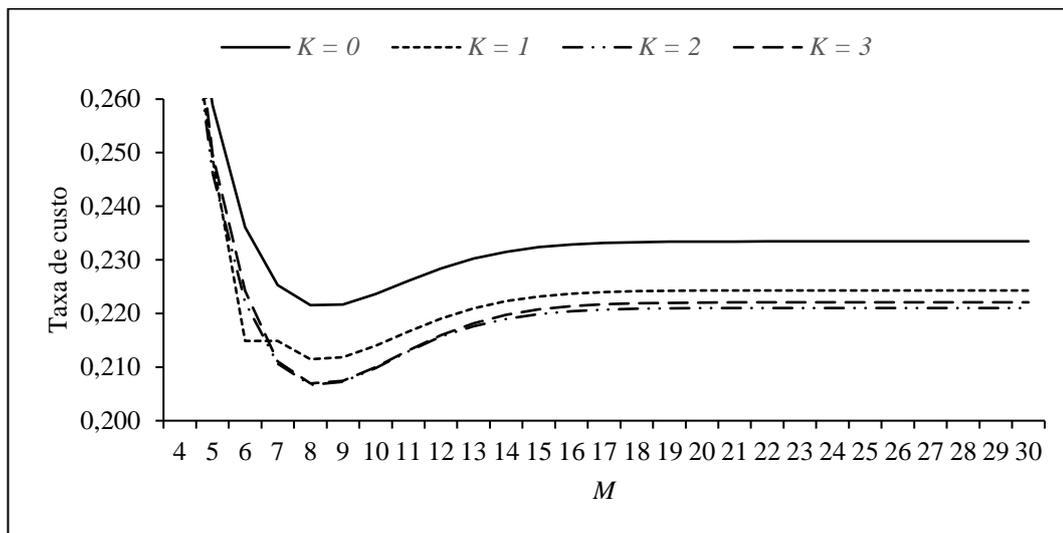
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

4.3 ANÁLISES E DISCUSSÕES

De maneira a não somente validar o resultado obtido através da otimização da política de manutenção proposta, mas também analisar qual a influência de cada variável de decisão no

critério estabelecido, foram realizadas as análises apresentadas nos Gráficos 1 e 2. Para o desenvolvimento destes, foram variadas as variáveis de decisão do eixo das abcissas e foram também variadas as variáveis de decisão das diferentes linhas. As variáveis de decisão remanescentes de cada gráfico foram então otimizadas. Neste sentido, para o Gráfico 1, foram variados os valores de M no intervalo de 4 a 30, com os valores de K variando entre 0 e 3, e otimizados os valores de W para cada combinação par a par entre os valores de K e M . Para o Gráfico 2, foi aplicada a mesma lógica.

Gráfico 1 - Análise de sensibilidade da idade de substituição preventiva

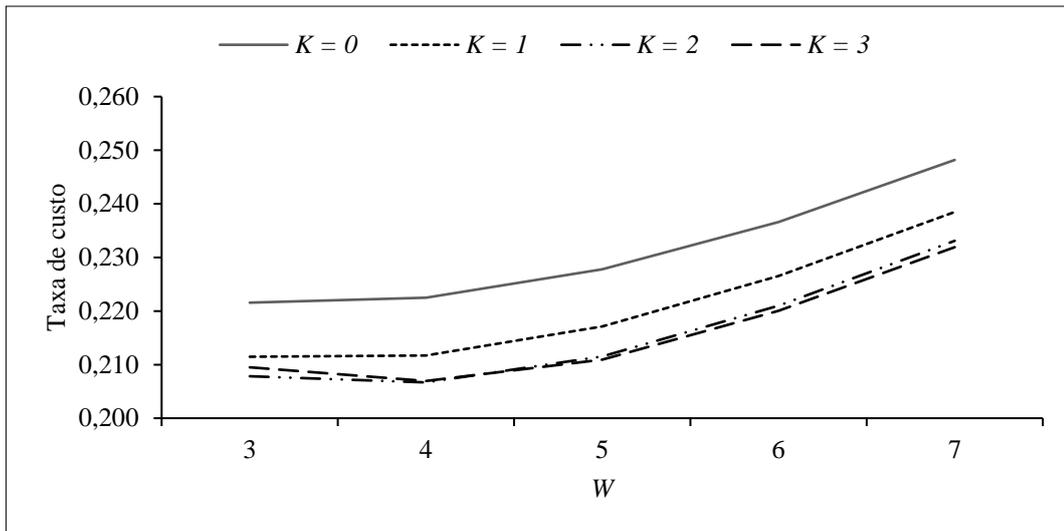


Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Os resultados obtidos no Gráfico 1 apontam que a determinação do limite superior da idade de substituição preventiva igual a 20 bimestres se mostra aceitável para a aplicação realizada. Isto devido ao fato de que a partir deste valor, a taxa de custo não apresenta variação significativa, se mantendo constante até um outro limite de tempo adotado para esta análise, de 30 bimestres. Isto ocorre devido ao fato de que o componente não mais se apresentará em seu estado operacional a partir do 20º bimestre, então a definição de uma idade de substituição preventiva para esse tempo ou superior a este não seria aproveitável para o componente sob estudo neste trabalho.

Uma análise geral que podemos identificar nos Gráficos 1 e 2 é que o aproveitamento das inspeções é economicamente favorável ao sistema. Isto é apresentado através da análise da linha $K = 0$ (que significa que a política de manutenção não prevê ações de inspeção), que se apresenta como aquela que traz maior retorno de taxa de custo de manutenção.

Gráfico 2 - Análise de sensibilidade do limiar inferior da janela de oportunidades



Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Os resultados apresentados também sugerem que a política de manutenção ótima para o conjunto de dados de entrada é sensível ao valor de K quando comparamos o retorno da taxa de custo entre as políticas [2, 4, 8] e [3, 4, 8], para $[K, W, M]$, que, por sua vez, possuem como retorno 0,2067 e 0,2069, respectivamente. Com isso, uma avaliação mais minuciosa quanto a este fato é importante de ser realizada. Para esta análise, foi estipulado um outro critério de decisão, a taxa de inatividade do sistema (I_∞), também desenvolvido no (Apêndice A).

A motivação para o uso deste outro critério na avaliação entre qual política seguir pode se dar através de restrições contratuais quanto ao tempo de inatividade do sistema, bem como também pelo objetivo de reduzir possíveis impactos negativos que podem ser gerados em outros componentes da turbina eólica causados pela permanência da caixa de engrenagem no estado falho. Diante disto, a Tabela 2 apresenta cada uma das políticas com seus respectivos retornos, tanto taxa de custo, quanto taxa de inatividade.

É possível conferir novamente através da Tabela 2 que a Política 1 traz um resultado mais favorável no que tange a taxa de custo relacionada à manutenção do sistema, critério de decisão estabelecido previamente. Para o critério de apoio, taxa de inatividade, a Política 2 apresenta melhor desempenho. Este último valor pode ser interpretado da seguinte maneira: para uma política de manutenção com K inspeções, janela de oportunidade abrindo a partir da W -ésima visita e idade de substituição na M -ésima visita à turbina eólica *offshore*, a caixa de engrenagens se encontrará no seu estado falho em uma proporção de $(I_\infty \times 100)\%$ do seu tempo de vida

esperado. Com isso, a Política 1 se apresenta com proporção de aproximadamente 2%, enquanto a Política 2 seria de aproximadamente 1,9%. Diante disto, apesar da Política 2 se apresentar com maior desempenho para o critério de apoio, foi interpretado que este desempenho não é significativo de maneira a anular a política definida anteriormente. Além disso, é possível entender que a Política 1 demanda um menor esforço da equipe de manutenção do que a Política 2, com uma inspeção a mais que a anteriormente mencionada. Com isso, o estudo seguiu tomando como política ótima a definida previamente, a Política 1.

Tabela 2 - Análise da taxa de custo e de inatividade do sistema

Políticas	K	W	M	C_{∞}	I_{∞}
Política 1	2	4	8	0,2067	0,0202
Política 2	3	4	8	0,2069	0,0186

Fonte: Esta Pesquisa (2023).

A fim de analisar ainda mais detalhadamente a política de manutenção recomendada para o componente sob estudo, as estimativas das probabilidades de cada cenário de renovação foram estipuladas e destrinchadas de acordo com as seguintes classificações: %RP (proporção de renovações preventivas) – relacionado com a probabilidade dos cenários de renovação do componente através de uma ação preventiva. Isto é, cenários 9, 10, 19, 20 e 21; %RC (proporção de renovações corretivas) – relacionado com a probabilidade dos cenários de renovação do componente através de uma ação corretiva. Isto é, cenários 1 ao 8 e 11 ao 18; e %RO (proporção de renovações oportunas) – relacionado com a probabilidade dos cenários de renovação do componente através de uma ação oportuna. Isto é, cenários 22 ao 41. Com isto, podemos observar a proporção de cada uma das renovações em Tabela 3.

Tabela 3 - Proporção de renovações preventivas, corretivas e oportunas

%RP	%RC	%RO
31,18%	15,37%	53,45%

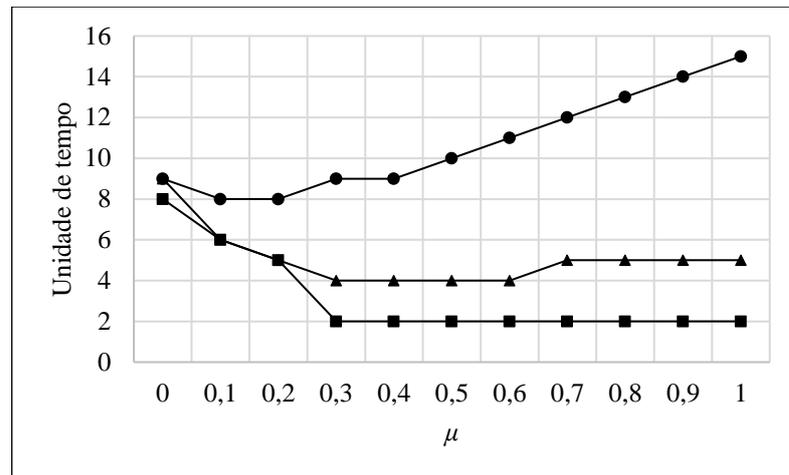
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Os resultados apontados na Tabela 3 indicam que a política de manutenção ótima possui uma maior tendência de renovação a partir de uma ação oportuna, com uma probabilidade de 53,45% de renovação através de uma oportunidade. Esse resultado instiga a exploração dos

parâmetros que envolvem esse tipo de ação, que neste caso seria a taxa de chegada de oportunidades (μ) e o custo de substituição oportuna (c_o).

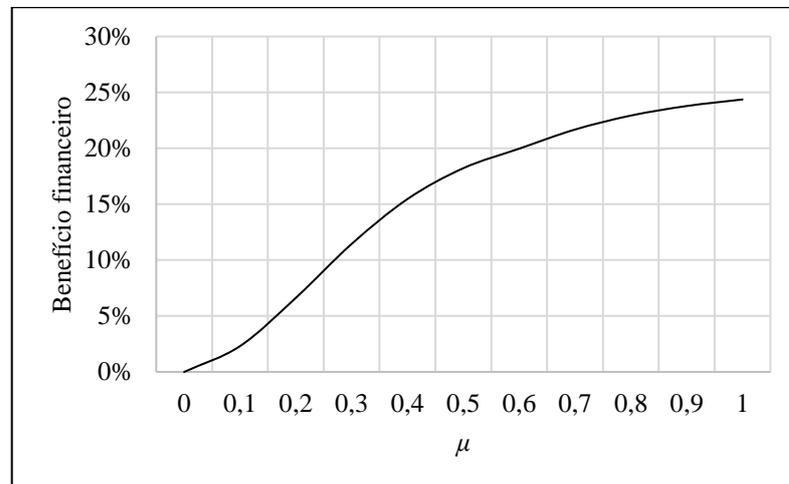
Primeiramente foi realizada uma análise voltada ao parâmetro de chegada de oportunidades, que pode ser observada através dos Gráficos 3 e 4.

Gráfico 3 - Política de manutenção ótima para cada taxa de oportunidade



Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Gráfico 4 - Benefício financeiro gerado pelas oportunidades



Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Esta análise busca entender qual o impacto da variação da taxa de chegada de oportunidades na política de manutenção para o componente caixa de engrenagens. Ao observar o Gráfico 3, percebe-se que as ações de manutenção preventiva planejadas do sistema se tornam cada vez menos necessárias a partir do maior aproveitamento das oportunidades. Isso pode ser observado através do aumento da idade de substituição preventiva (M) à medida que a taxa de

oportunidade também aumenta. Outro resultado que indica esta mesma ideia é a redução do número de inspeções realizados no sistema.

Através do Gráfico 4, pode-se perceber que o maior aproveitamento das ações de manutenção oportunas traz também grandes benefícios econômicos ao sistema, podendo reduzir em até aproximadamente 25% a taxa de custo de manutenção da caixa de engrenagens.

Foi então explorada uma outra variável referente às ações de manutenção oportuna, que neste caso é o custo de substituição a partir de uma oportunidade. Foi definido anteriormente que a manutenção oportuna para a caixa de engrenagem representa o valor de 50% de uma manutenção preventiva. Entretanto, esse valor pode variar. Apesar dos variados estudos que abordam o contexto de definição de política de manutenção para caixa de engrenagens de turbinas eólicas *offshore*, não existe unanimidade no que tange a definição da relação entre os custos das ações de manutenção, principalmente em se tratando da relação entre os custos de manutenção preventiva, corretiva e oportuna.

Tal incerteza pode ser atribuída a diversos fatores, que incluem a idade da turbina eólica *offshore* sob estudo, a natureza do problema a ser corrigido, a localização geográfica do campo de turbinas eólicas *offshore* no qual o componente pertence, bem como o tipo de contrato de manutenção estabelecido para o sistema proposto. Além disso, no contexto de custos de manutenção, pode ser levado em conta que em algumas considerações, os custos fixos conseguem ser diluídos mais facilmente – como em grandes campos de turbinas eólicas *offshore*, enquanto em outras, os custos variáveis são atribuídos de maneira fixa a uma determinada ação, como o custo de inatividade dos sistemas sendo considerado como um custo embutido no custo de manutenção corretiva.

Diante disso, uma análise de sensibilidade dos custos de manutenção é apresentada através da Tabela 4. Para esta análise, foram utilizados todos os parâmetros do caso base, com variação apenas dos custos de manutenção, salvo o de preventiva, que representa o custo unitário. A variação se deu através da divisão e multiplicação por 2 para os custos estabelecidos no estudo de caso.

Os resultados apresentados em Tabela 4 reforçam a coerência do modelo matemático utilizado para a aplicação do estudo, bem como a necessidade de estimativa correta dos valores de entrada dos parâmetros de custo, visto que esta estimativa pode alterar de maneira significativa a política ótima recomendada.

Tabela 4 - Variação dos parâmetros de custo

c_F	Parâmetros			Política de Manutenção			Taxa de custo
	c_I	c_D	c_O	K^*	W^*	M^*	C_∞
2	0,03	2,3	0,5	2	4	8	0,2067
1	0,03	2,3	0,5	2	4	9	0,1783
4	0,03	2,3	0,5	4	4	7	0,2504
2	0,015	2,3	0,5	5	5	8	0,1964
2	0,06	2,3	0,5	2	4	8	0,2165
2	0,03	1,15	0,5	2	4	10	0,1797
2	0,03	4,6	0,5	5	5	7	0,2416
2	0,03	2,3	0,25	2	3	9	0,1784
2	0,03	2,3	1	8	8	9	0,2265

Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Novamente consegue-se analisar que, para o sistema sob estudo, o aproveitamento das inspeções se mostra de suma importância para o planejamento da manutenção. Se torna ainda mais favorável quando o custo de inspeção é menor ($c_I = 0,015$), conforme esperado. Entretanto, as inspeções de apresentam ainda favoráveis com um alto custo de inspeção ($c_I = 0,06$). As inspeções se mostram mais beneficiárias ao sistema produtivo quando há o aumento em qualquer um dos outros custos, seja o de substituição corretiva, o de inatividade por unidade de tempo ou o de oportunidade.

Pode-se ainda identificar uma maior abertura da janela de oportunidades para um custo de oportunidade menor ($c_O = 0,25$), com um aumento de 2 unidades de tempo a partir não somente do adiantamento da janela de oportunidades (de $W = 4$ para $W = 3$), mas também com a postergação da idade de substituição preventiva (de $M = 8$ para $M = 9$).

O custo de inatividade do sistema aparenta ser o que mais restringe a idade de substituição preventiva. À medida que este custo aumenta, a idade de substituição preventiva tende a ser menor, isso indica que o sistema busca diminuir a susceptibilidade de falha operacional e consequentemente permanência no estado falho (quando $c_D = 1,15$, $M = 10$, quando $c_D = 2,3$, $M = 8$ e quando $c_D = 4,6$, $M = 7$).

Um outro parâmetro de entrada da política de manutenção analisado neste trabalho é o parâmetro de inadimplência de ações de manutenção. Este parâmetro teve como entrada no nosso modelo sendo igual a uma probabilidade de 40%. Este foi advindo do estudo apresentado em Xie *et al.* (2019), que apresenta a probabilidade de inacessibilidade de uma turbina eólica *offshore* durante cada uma das estações do ano, conforme Tabela 5. A estimativa para esse

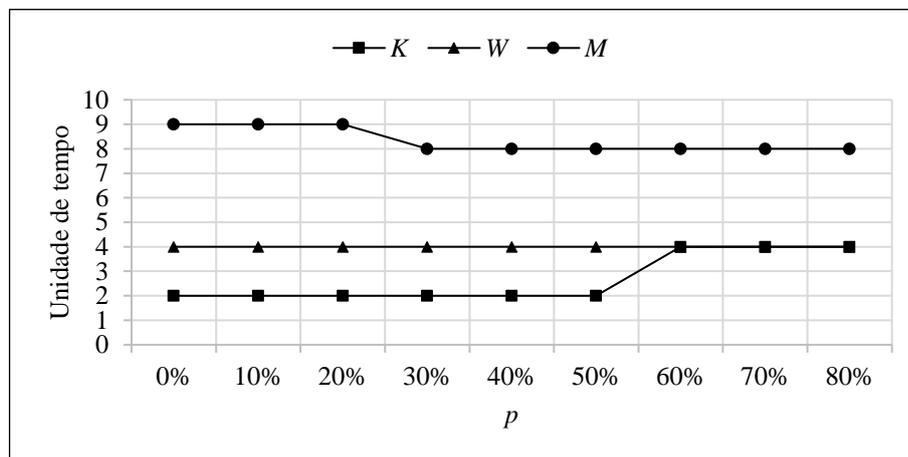
parâmetro se deu a partir da média da inacessibilidade para o ano inteiro. Entretanto, este parâmetro não apresenta uma estabilidade tão grande ao longo das estações do ano. No verão, em apenas 21,4% do tempo, o sistema se encontra indisponível para realização de uma ação de manutenção, enquanto no inverno, esta indisponibilidade ocorre para cerca de metade do tempo. Diante disso, uma análise da variação deste parâmetro é apresentada nos Gráficos 5 e 6.

Tabela 5 - Probabilidade de inacessibilidade de uma turbina eólica offshore

Parâmetro	Estações do ano			
	Primavera	Verão	Outono	Inverno
p	0,376	0,214	0,430	0,545

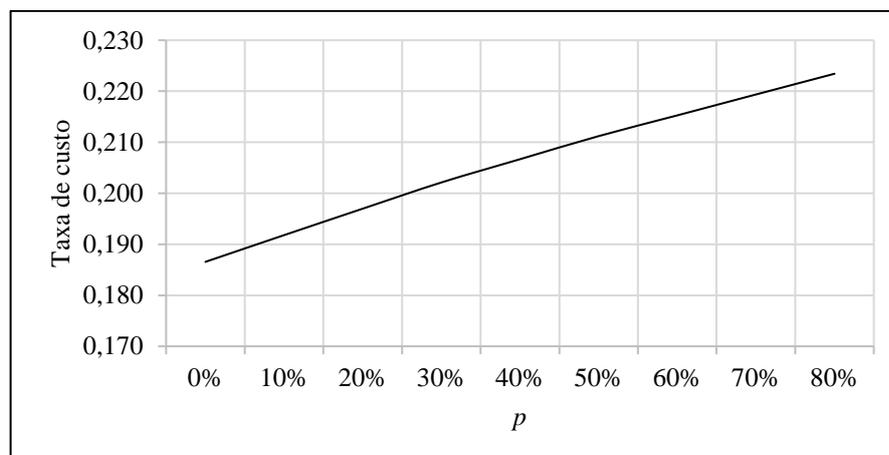
Fonte: Xie et al., 2019.

Gráfico 5 - Política de manutenção ótima para diferentes valores de p



Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Gráfico 6 - Retorno otimizado para diferentes valores de p



Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Através do Gráfico 5, é possível perceber que o parâmetro de indisponibilidade do sistema não implica em mudanças significativas da política de manutenção ótima. A abertura da janela de oportunidade permanece a mesma (a partir do quarto bimestre) para qualquer que seja o valor do parâmetro de entrada. Entre 20% e 30%, existe uma simples mudança na idade de substituição preventiva, passando de 9 bimestres para 8 bimestres. O número de inspeções se mantém constante em 2 até a probabilidade de 50% de haver uma inadimplência na ação de manutenção, mas passa a ser recomendado pela política ótima a realização de 4 inspeções a partir do momento que essa probabilidade ultrapassa o valor previamente mencionado.

Diante disso, percebe-se que as variáveis de decisão da política de manutenção ótima são pouco sensíveis ao valor de entrada do parâmetro p . Entretanto, é possível avaliar que a taxa de custo cresce de maneira quase linear à medida que a inadimplência da realização das ações de manutenção no sistema se torna mais frequente, com variação média de 2% à cada salto de 10% na probabilidade deste parâmetro. Com isso, é possível estimar que mesmo com a variação da indisponibilidade diante das diferentes épocas do ano, a política de manutenção originalmente atribuída se mantém adequada, existindo um impacto maior somente na taxa de custo deste sistema, que passa a ser maior à medida que esta indisponibilidade se torna mais evidente (veja Gráfico 6).

4.4 COMPARAÇÃO COM CASOS ESPECIAIS E LITERATURA

Nesta seção é proposta uma comparação entre a política aplicada neste estudo com os seus casos especiais, isto é, variações da política de manutenção principal. O primeiro caso especial se dá através do não aproveitamento de inspeções ($K = 0$), otimizando as variáveis de decisão de abertura da janela de oportunidades e idade de substituição preventiva. O segundo caso especial seria o seu oposto, manutenção puramente baseada em inspeções ($K = W = M = \infty$). O terceiro caso especial seria uma política de substituição em bloco puramente corretiva ($K = 0, W = M = \infty$), sem inspeções, janela de oportunidades ou idade de substituição preventiva. O quarto caso especial seria substituição baseada na idade ($K = 0$ e $W = M$), otimizando a idade de substituição preventiva. O quinto caso especial seria adaptar a política de manutenção proposta para a de oportunidade pura ($K = W = 0, M = \infty$). Considerando todos os parâmetros definidos previamente, quando aplicáveis, as políticas de manutenção foram definidas e apresentadas através da Tabela 6.

Tabela 6 - Casos especiais da política de manutenção

Política de Manutenção	K^*	W^*	M^*	C_∞	I_∞	%RP	%RC	%RO
K^*, W^*, M^*	2	4	8	0,2067	0,0202	31,18%	15,37%	53,45%
$K=0, W^*, M^*$	-	3	8	0,2216	0,0281	19,15%	17,69%	63,16%
$K=W=M=\infty$	-	-	-	0,2439	0,0261	66,43%	33,57%	0,00%
$K=0, W=M=\infty$	-	-	-	0,3833	0,0848	0,00%	100%	0,00%
$K=0, W=M^*$	-	-	7	0,2608	0,0299	74,82%	25,18%	0,00%
$K=W=0, M=\infty$	-	-	-	0,2690	0,0328	0,00%	12,05%	87,95%

Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Dos casos especiais apresentados, é possível perceber que, como esperado, nenhum deles apresenta uma taxa de custo menor que a apresentada pela política de manutenção principal. Além disso, é possível perceber também que nenhum caso especial apresenta uma taxa de inatividade menor que a apresentada pela política de manutenção principal, o que não era necessariamente esperado, mas é um indicativo de uma ainda maior vantagem quanto à utilização da política de manutenção proposta.

A maior diferença referente ao retorno do critério de decisão é quando a política principal é comparada com a política de substituição em bloco puramente corretiva, onde podemos notar uma economia de aproximadamente 46% na taxa de custo. Este caso especial é também o que traz maior taxa de inatividade do sistema, retornando que em aproximadamente 8,5% do tempo de vida do componente dentro do sistema, ele estará no estado falho, comparado com 2%, resultado da política principal.

Quando não há possibilidade de inspeções no sistema (caso especial 1), pode-se avaliar uma antecipação da abertura da janela de oportunidades, aumentando a proporção de substituições oportunas realizadas no sistema. Este caso especial se apresenta como mais favorável ao sistema sob estudo, depois da política principal.

Um outro resultado que se pode observar é a antecipação da idade de substituição preventiva no que tange ao caso especial 4, que considera somente a variável de decisão M na sua definição. Quanto a este caso especial, a política proposta promove uma redução de aproximadamente 20,74% da taxa de custo.

Com isso, é possível comparar o resultado deste estudo com outros apresentados na literatura que também consideram a caixa de engrenagens como componente crítico do sistema de turbina eólica *offshore*. Este comparativo é apresentado em Tabela 7, que avalia as economias trazidas pelas aplicações dos diferentes modelos aplicados ao campo de turbinas

eólicas *offshore* quando comparado com a política baseada no tempo (que para o nosso modelo seria o caso especial 4). As referências que compõem a Tabela 7 são descritas na seção anterior, na revisão de estudos previamente estabelecidos da área.

Tabela 7 - Comparativo com outros estudos na literatura

Referências	Benefício econômico quando comparado com a manutenção baseada no tempo (%)
Nguyen & Chou (2018)	04,56%
Li <i>et al.</i> (2020)	06,30%
Xie <i>et al.</i> (2019)	10,00%
Esta Pesquisa (2023).	20,74%
Lu <i>et al.</i> (2018)	31,52%
Zhou & Yin (2019)	32,46%
Kang & Soares (2020)	41,90%

Fonte: Adaptado de Kang & Soares (2020).

A aplicação da política de manutenção trazida através desta pesquisa obtém a redução de aproximadamente 20,74% dos custos de manutenção quando comparado com a manutenção baseada no tempo. É esperado que uma melhor performance das estratégias de manutenção oportuna possa ser alcançada a partir do momento em que o número de componentes considerados para análise, bem como o número de turbinas eólicas seja aumentado.

Este trabalho é aplicado para o contexto de um único componente de uma turbina eólica *offshore* ao invés de considerar um campo de turbina eólica *offshore* de grande escala com seus diversos componentes. Isso pode explicar sua performance não tão boa quando comparados com os estudos que o superam nesta comparação. Além disso, é possível realizar uma análise dos estudos apresentados na Tabela 7 quanto a aplicação dos contextos restritivos considerados nesta pesquisa, como a (1) inadimplência das ações de manutenção, (2) qualidade de manutenção e (3) restrição de intervalo entre visitas ao sistema para realização de ação de manutenção. A marcação no Quadro 10 indica o uso de tal contexto restritivo na política de manutenção proposta pelo estudo referenciado.

Quadro 10 - Levantamento dos contextos restritivos considerados

Referências	(1)	(2)	(3)
Nguyen & Chou (2018)			X
Li <i>et al.</i> (2020)		X	
Xie <i>et al.</i> (2019)	X		

Esta Pesquisa (2023).	X	X	X
Lu <i>et al.</i> (2018)			X
Zhou & Yin (2019)	X		
Kang & Soares (2020)	X	X	

Fonte: Esta Pesquisa (2023).

É possível observar através do levantamento dos contextos restritivos considerados nas referências utilizadas para comparação com o estudo desta pesquisa que nenhum deles engloba os contextos atribuídos em sua totalidade (observe Quadro 10). Aqueles que englobam a qualidade da manutenção como um dos parâmetros da modelagem da política de manutenção proposta, não considera a restrição de intervalos entre visitas ao sistema para realização da ação de manutenção. Aqueles que consideram essas restrições, não consideram também a inadimplência de ações de manutenção. Entretanto, a inadimplência das ações de manutenção é o contexto restritivo mais considerado entre os diferentes estudos avaliados.

É importante frisar que, apesar de restritivos, estes contextos trazem a aplicação desta pesquisa para uma maior proximidade com a realidade, que é o objetivo desta pesquisa. Além disso, a indicação de que os estudos não abordam os contextos detalhados anteriormente não implica numa suposta irrelevância destes estudos para a área sob estudo. O presente trabalho reconhece a grande relevância e importância dos estudos apresentados na Tabela 7 e Quadro 10 para o possível desenvolvimento do campo de turbinas eólicas *offshore*.

4.5 PROTÓTIPO

Os dados apresentados neste trabalho foram calculados usando diferentes códigos escritos na linguagem *python* pelo autor, conforme detalhado anteriormente. Um demonstrador do código que calcula os retornos de taxa de custo, taxa de indisponibilidade e proporção de renovações (preventiva, corretiva e oportuna) foi desenvolvido durante esta pesquisa e pode ser visualizado em Melo & Cavalcante (2023). Este conta com a implementação do cálculo numérico das expressões apresentadas no (Apêndice A). A Figura 49 apresenta a tela inicial do protótipo desenvolvido.

Para utilizar o demonstrador, basta inserir os parâmetros de entrada do modelo, conforme parcialmente apresentado na Figura 50, assim como também as variáveis de decisão, apresentadas na Figura 51. Em seguida, clicar no botão para rodar a aplicação.

O protótipo retorna a taxa de custo da política de manutenção inserida, bem como a taxa de indisponibilidade. Além disso, o protótipo traz resultados que podem gerar *insights* ao

usuário quanto ao sistema sob estudo como a proporção de renovações preventivas, corretivas e oportunas da política de manutenção inserida, conforme apresentado em Figura 52.

Todos os parâmetros e variáveis de decisão defaults do protótipo desenvolvido são, respectivamente, os parâmetros estipulados anteriormente e as variáveis de decisão da política ótima recomendada pela otimização. Entretanto, o usuário poderá acessar ao endereço eletrônico presente nas referências desta pesquisa e variar os valores atribuídos a tais parâmetros e/ou variáveis de decisão (veja Melo & Cavalcante (2023)).

Figura 49 - Tela inicial do protótipo



Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 50 - Inserção de parâmetros de entrada do modelo

Insira os parâmetros de entrada do modelo		
Insira o parâmetro de vida característica do componente fraco - α_1	0,95	- +
Insira o parâmetro de vida característica do componente forte - α_2	9,50	- +
Insira o parâmetro de forma do componente - β	3,00	- +
Insira o parâmetro de mistura - q	0,10	- +
Insira o inverso da média do delay time - λ	0,50	- +
Insira a taxa de chegada de oportunidades - μ	0,25	- +
Insira o tempo entre visitas ao sistema - s	1,00	- +

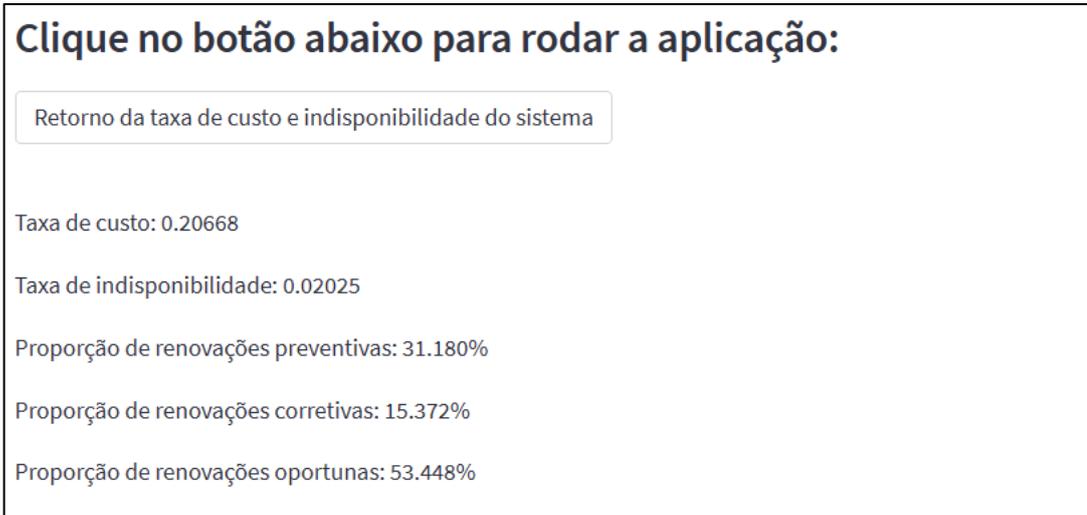
Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 51 - Inserção das variáveis de decisão do modelo

Insira as variáveis de decisão do modelo		
Insira o número de inspeções - K	2	- +
Insira o limiar inferior da janela de oportunidades - W	4	- +
Insira a idade de substituição preventiva - M	8	- +

Fonte: Esta Pesquisa (2023).

Figura 52 - Apresentação dos resultados



Fonte: Esta Pesquisa (2023).

5. CONCLUSÃO

O aquecimento global e os problemas de escassez de energia estão sendo os principais responsáveis na reação populacional de exploração e desenvolvimento de fontes de energias renováveis e sustentáveis. A energia eólica, parte do que conhecemos por energia verde tem atraído grande atenção e se desenvolvendo com grande rapidez. Entretanto, esse sistema ainda se apresenta com bastante ineficiência econômica no que tange as suas ações de O&M. Com isso, o desenvolvimento de estudos que auxiliem no aumento da eficiência desses aspectos é essencial.

Diante disso, diversos estudos vêm sendo publicados quanto ao tópico de O&M de campos de turbinas eólicas *offshore*, como a revisão de diferentes tecnologias, proposição de diferentes políticas de manutenção, investigação dos mecanismos de deterioração e falha desses sistemas, análise de custos para diferentes ações de manutenção, entre outros contextos que tangenciam o tema. Entretanto, muitos desses estudos são apresentados de forma fragmentada e são baseados em preposições subjetivas, negligenciando diversos aspectos importantes como a inadimplência das ações de manutenção, devido à falta de sobressalentes ou das dificuldades inerentes ao ambiente hostil no qual o sistema de turbina eólica *offshore* se encontra (como tempestades, altas ondas e fortes ventos), a perda de custo causado pela inatividade do sistema, a restrição de visita ao sistema devido aos altos custos logísticos, variação da qualidade das ações de manutenção ou até mesmo a realização de ações de manutenção oportunas.

Com isso, foi proposto neste trabalho o estudo detalhado do sistema de turbinas eólicas *offshore* para identificação de seu componente crítico, bem como também do contexto detalhado no qual esse sistema se encontra. Em seguida, uma revisão dos diferentes tipos de manutenção e políticas propostas para este sistema foi realizada. Foi então possível aplicar uma política de manutenção que considerasse a maioria dos aspectos comumente negligenciados na literatura – mas, de antemão, um estudo quanto aos parâmetros requisitados pela política foi desenvolvido, composto por uma análise dos custos das ações de manutenção, da deterioração e falha do componente sob estudo, entre outros aspectos determinados. A política de manutenção foi explorada de maneira detalhada e, quando aplicada, validada pelos resultados das análises de sensibilidade.

A principal limitação do trabalho está na consideração de componente único para a proposição e aplicação da política de manutenção estudada. Apesar de bastante crítica, a caixa de engrenagens não é o único componente que merece atenção nos sistemas de turbinas eólicas

offshore e a definição de políticas de manutenção distintas para cada componente pode ser economicamente ineficiente, visto que não toma proveito do agrupamento de manutenção. Outra limitação está atrelada às ações de manutenção que a política trabalhada engloba, que seria de inspeção e substituição. É possível observar na literatura a exploração de outras atividades associadas ao sistema sob estudo, como ação de reparos mínimos e grandes reparos, que podem ser executados de forma a retornar o sistema ao seu estado operacional.

Diante das limitações previamente estipuladas, sugere-se para trabalhos futuros, a expansão do modelo matemático da política de manutenção apresentada neste estudo para a consideração de dois ou mais componentes do sistema trabalhado e outras ações de manutenção que são consideradas. Para isto um novo estudo bibliográfico dos componentes do sistema deve ser realizado de forma a obter o conjunto de componentes ideal para propor a política de manutenção, bem como para realização de novas análises de custo de manutenção, deterioração e falha dos componentes sob estudo. Uma outra sugestão para trabalhos futuros é integração do planejamento da manutenção com a resolução do problema de roteirização dos transportes que atendem ao sistema sob estudo.

REFERÊNCIAS

AB-SAMAT, H.; KAMARUDDIN, S. Opportunistic maintenance (OM) as a new advancement in maintenance approaches: A review. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 20, n. 2, p. 98-121, 2014.

AHMAD, R.; KAMARUDDIN, S. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. **Computers & industrial engineering**, v. 63, n. 1, p. 135-149, 2012.

ALMEIDA, A.; SOUZA, F. (org.) Gestão da Manutenção na direção da competitividade, **Ed. Universitária da UFPE**, 2001.

ANDRAWUS, J.A.; WATSON, J.; KISHK, M.; GORDON, H. Optimisation of wind turbine inspection intervals. **Wind Engineering**, v. 32, n. 5, p. 477-490, 2008.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASEE, H. **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

BAKHTIARY, A.; ZAKERI, J.A.; MOHAMMADZADEH, S. An opportunistic preventive maintenance policy for tamping scheduling of railway tracks. **International Journal of Rail Transportation**, v. 9, n. 1, p. 1-22, 2021.

BARLOW, R.; HUNTER, L. Optimum preventive maintenance policies. **Operations research**, v. 8, n. 1, p. 90-100, 1960.

BARLOW, R.; PROSCHAN, F. **Mathematical theory of reliability**. 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.

BOUSDEKIS, A.; MAGOUTAS, B.; APOSTOLOU, D.; MENTZAS, G. A proactive decision making framework for condition-based maintenance. **Industrial Management & Data Systems**, 2015.

CARROLL, J.; MCDONALD, A.; MCMILLAN, D. Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines. **Wind Energy**, v. 19, n. 6, p. 1107-1119, 2016.

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

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

CAVALCANTE, C.A.V.; LOPES, R.S. Multi-criteria model to support the definition of opportunistic maintenance policy: A study in a cogeneration system. **Energy**, v. 80, p. 32-40, 2015.

CAVALCANTE, C.A.V.; LOPES, R.S.; SCARF, P.A. A general inspection and opportunistic replacement policy for one-component systems of variable quality. **European Journal of Operational Research**, v. 266, n. 3, p. 911-919, 2018.

CAVALCANTE, C.A.V.; LOPES, R.S.; SCARF, P.A. Inspection and replacement policy with a fixed periodic schedule. **Reliability engineering & system safety**, v. 208, p. 107402, 2021.

CHAOWASAKOO, P.; SEPPÄLÄ, H.; KOIVO, H. Age-based maintenance for a fleet of haul trucks. **Journal of quality in maintenance engineering**, 2018.

CHATEAUNEUF, A.; LAGGOUNE, R. Condition based opportunistic preventive maintenance policy for utility systems with both economic and structural dependencies—application to a gas supply network. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 165, p. 214-223, 2018.

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

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

DEKKER, R.; SMEITINK, E. Opportunity-based block replacement. **European Journal of Operational Research**, v. 53, n. 1, p. 46-63, 1991.

DÍAZ, H.; SOARES, C.G. Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms. **Ocean Engineering**, v. 209, p. 107381, 2020.

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

DONG, E.; GAO, T.; CHENG, Z.; WANG, R.; BAI, Y. Opportunistic Maintenance Strategy for Complex Equipment with a Genetic Algorithm Considering Failure Dependence: A Two-Dimensional Warranty Perspective. **Sensors**, v. 22, n. 18, p. 6801, 2022.

DONG, W.; XING, Y.; MOAN, T. Time domain modeling and analysis of dynamic gear contact force in a wind turbine gearbox with respect to fatigue assessment. **Energies**, v. 5, n. 11, p. 4350-4371, 2012.

ELUSAKIN, T.; SHAFIEE, M. Fault diagnosis of offshore wind turbine gearboxes using a dynamic Bayesian network. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 41, n. 11, p. 1849-1867, 2022.

ELUSAKIN, T.; SHAFIEE, M.; ADEDIPE, T. Towards implementing condition-based maintenance (CBM) policy for offshore blowout preventer (BOP) system. In: **International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. American Society of Mechanical Engineers, 2019. p. V003T02A076.

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.

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

GUNDEGJERDE, C.; HALVORSEN, I.B.; HALVORSEN-WEARE, E.E.; HVATTUM, L.M.; NONÅS, L.M. 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.

HABES, M.; SALLOUM, S.; ALGHIZZAWI, M.; ALSHIBLY, M. The role of modern media technology in improving collaborative learning of students in Jordanian universities. **International Journal of Information Technology and Language Studies**, v. 2, p. 71–82, 2018.

HANSEN, J.P.; NARBEL, P.A.; AKSNES, D.L. Limits to growth in the renewable energy sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 769-774, 2017.

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

HEDJAZI, D.; LAYACHI, F.; BOUBICHE, D.E. A multi-agent system for distributed maintenance scheduling. **Computers & Electrical Engineering**, v. 77, p. 1-11, 2019.

HUYNH, K.T.; CASTRO, I.T.; BARROS, A.; BÉRENGUER, C. Modeling age-based maintenance strategies with minimal repairs for systems subject to competing failure modes due to degradation and shocks. **European journal of operational research**, v. 218, n. 1, p. 140-151, 2012.

ISO 14224:2016. Petroleum, petrochemical and natural gas industries -- Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. **Geneva: International Organization for Standardization**, p. 15, 2016.

JIANG, Z. Installation of offshore wind turbines: A technical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, p. 110576, 2021.

JONES, B.; JENKINSON, I.; WANG, J. Methodology of using delay-time analysis for a manufacturing industry. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 94, n. 1, p. 111-124, 2009.

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

KUNTZ, P.A.; CHRISTIE, R.D.; VENKATA, S.S. A reliability centered optimal visual inspection model for distribution feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 16, n. 4, p. 718-723, 2001.

LAGGOUNE, R.; CHATEAUNEUF, A.; AISSANI, D. Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units. **Computers & Chemical Engineering**, v. 33, n. 9, p. 1499-1510, 2009.

LE, B.; ANDREWS, J. Modelling wind turbine degradation and maintenance. **Wind Energy**, v. 19, n. 4, p. 571-591, 2016.

LI, H.; TEIXEIRA, A.P.; SOARES, C.G. A two-stage Failure Mode and Effect Analysis of offshore wind turbines. **Renewable Energy**, v. 162, p. 1438-1461, 2020.

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.

LU, Y.; SUN, L.; KANG, J.; SUN, H.; ZHANG, X. Opportunistic maintenance optimization for offshore wind turbine electrical and electronic system based on rolling horizon approach. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 9, n. 3, p. 033307, 2017.

LU, Y.; SUN, L.; ZHANG, X.; FENG, F.; KANG, J.; FU, G. Condition based maintenance optimization for offshore wind turbine considering opportunities based on neural network approach. **Applied Ocean Research**, v. 74, p. 69-79, 2018.

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

MÁRQUEZ, F.P.G.; TOBIAS, A.M.; PÉREZ, J.M.P.; PAPAELIAS, M. Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. **Renewable energy**, v. 46, p. 169-178, 2012.

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.R.; CAVALCANTE, C.A.; SCARF, P.; LOPES, R.S. A hybrid maintenance policy with fixed periodic structure and opportunistic replacement. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability**, p. 1748006X221100365, 2022.

MELO, Y.R.; CAVALCANTE, C.A.V. **Protótipo para aplicação de política de manutenção oportuna para componente crítico de turbina eólica em plataforma offshore**. Ano de criação: 2023. Disponível em: <<https://yanribeiomelo-tcc-main-qmnotj.streamlit.app>>. Acesso em: 17 abr. 2023.

MOBLEY, R. Condition based maintenance. In: DAVIES, A. (Ed.). **Handbook of condition monitoring: techniques and methodology**. Springer Science & Business Media, 2012.

NGUYEN, H.S.H.; DO, P.; VU, H.C.; IUNG, B. Dynamic maintenance grouping and routing for geographically dispersed production systems. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 185, p. 392-404, 2019.

NGUYEN, T.A.T.; CHOU, S.Y. Maintenance strategy selection for improving cost-effectiveness of offshore wind systems. **Energy conversion and management**, v. 157, p. 86-95, 2018.

PAPATZIMOS, A.K.; DAWOOD, T.; THIES, P.R. Data insights from an offshore wind turbine gearbox replacement. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2018. p. 012003.

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

REN, Z.; VERMA, A.S.; LI, Y.; TEUWEN, J.J.; JIANG, Z. Offshore wind turbine operations and maintenance: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 110886, 2021.

ROCKMANN, C.; LAGERVELD, S.; STAVENUITER, J. Operation and maintenance costs of offshore wind farms and potential multi-use platforms in the Dutch North Sea. **Aquaculture Perspective of Multi-Use Sites in the Open Ocean: The Untapped Potential for Marine Resources in the Anthropocene**, p. 97-113, 2017.

RODRIGUES, A.J.S.; CAVALCANTE, C.A.V.; ALBERTI, A.R. A multicriteria model to support the selection of inspection service providers based on the delay time model. **International Transactions in Operational Research**, 2023.

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

SARKER, B.R.; FAIZ, T.I. Minimizing maintenance cost for offshore wind turbines following multi-level opportunistic preventive strategy. **Renewable energy**, v. 85, p. 104-113, 2016.

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

SCARF, P.A.; CAVALCANTE, C.A.V.; LOPES, R.S. An opportunistic maintenance policy for heterogeneous components. In: **Safety and Reliability—Safe Societies in a Changing World**. CRC Press, 2018. p. 693-699.

SHAFIEE, M. A fuzzy analytic network process model to mitigate the risks associated with offshore wind farms. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 4, p. 2143-2152, 2015a.

SHAFIEE, M. Maintenance logistics organization for offshore wind energy: Current progress and future perspectives. **Renewable energy**, v. 77, p. 182-193, 2015b.

SHAFIEE, M.; FINKELSTEIN, M.; BÉRENGUER, C. An opportunistic condition-based maintenance policy for offshore wind turbine blades subjected to degradation and environmental shocks. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 142, p. 463-471, 2015.

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

SHEUT, C.; KRAJEWSKI, L.J. A decision model for corrective maintenance management. **The International Journal of Production Research**, v. 32, n. 6, p. 1365-1382, 1994.

SONG, S.; LI, Q.; FELDER, F.A.; WANG, H.; COIT, D.W. Integrated optimization of offshore wind farm layout design and turbine opportunistic condition-based maintenance. **Computers & Industrial Engineering**, v. 120, p. 288-297, 2018.

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

TSANG, A.H. Condition-based maintenance: tools and decision making. **Journal of quality in maintenance engineering**, v. 1, n. 3, p. 3-17, 1995.

WANG, J.; MIAO, Y.; YI, Y.; HUANG, D. An imperfect age-based and condition-based opportunistic maintenance model for a two-unit series system. **Computers & Industrial Engineering**, v. 160, p. 107583, 2021.

WANG, J.; ZHANG, X.; ZENG, J. Optimal group maintenance decision for a wind farm based on condition-based maintenance. **Wind Energy**, v. 24, n. 12, p. 1517-1535, 2021.

WANG, W. Delay time modelling. **Complex system maintenance handbook**, p. 345-370, 2008.

WANG, W.; MAJID, H.B.A. Reliability data analysis and modelling of offshore oil platform plant. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 6, n. 4, p. 287-295, 2000.

WANG, W.; SCARF, P.A.; SMITH, M.A.J. On the application of a model of condition-based maintenance. **Journal of the Operational Research Society**, v. 51, n. 11, p. 1218-1227, 2000.

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

WERBIŃSKA-WOJCIECHOWSKA, S. **Technical system maintenance. Delay-time-based modelling**. Cham: Springer Nature, 2019.

XIE, L.; RUI, X.; LI, S.; HU, X. Maintenance optimization of offshore wind turbines based on an opportunistic maintenance strategy. **Energies**, v. 12, n. 14, p. 2650, 2019.

YUAN, J.; ZHOU, W.; XU, X.; LIAO, Y.; ZHOU, C. Time-delay concept-based approach to maintenance scheduling of HV cables. **High Voltage**, v. 5, n. 6, p. 724-730, 2020.

ZHAO, F.; WANG, W.; PENG, R. Delay-time-based preventive maintenance modelling for a production plant: a case study in a steel mill. **Journal of the Operational Research Society**, v. 66, n. 12, p. 2015-2024, 2015.

ZHOU, P.; YIN, P.T. 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.

APÊNDICE A

Este apêndice apresenta a formulação matemática por trás da política de manutenção proposta. O cálculo da probabilidade de cada cenário é denotado por $C_{4,m}$. Para cada cenário m , é calculado o tempo de inatividade esperado – condicionado aos cenários que possuem, através de $C_{1,m}$. Então, o tempo de inatividade total esperado do ciclo de renovação é calculado por $C_1 = \sum_{m=1}^{41} C_{1,m} C_{4,m}$. Isso é também realizado tanto para o custo de manutenção esperado em um ciclo de renovação, através de $C_2 = \sum_{m=1}^{41} C_{2,m} C_{4,m}$, quanto para o tempo de vida esperado para o componente em um ciclo de renovação, através de $C_3 = \sum_{m=1}^{41} C_{3,m} C_{4,m}$.

Os valores de $C_{l,m}$, sendo $l = 1, \dots, 4$, são definidos para cada cenário, utilizando a função $\theta_{l,m}$ (definida em Quadro 11), onde o $l = 1$ representa o tempo de inatividade, $l = 2$ o custo de manutenção, e $l = 3$ o tempo de vida para cada um dos cenários m , sendo $m = 1, \dots, 41$. A probabilidade de cada cenário m é obtida através de $\theta_{4,m} = 1$.

Diante disso, os valores para a taxa de custo e taxa de indisponibilidade do sistema pode ser calculado, através das Equações (A.1) e (A.2), que utiliza das Equações (A.3) a (A.43) e Quadro 11 para sua definição. Nas expressões abaixo, dH e dX são abreviações para $f_H dh$ e $f_X dx$.

$$C_\infty(K, W, M) = (c_D C_1 + C_2) / C_3 \quad (\text{A.1})$$

$$D_\infty(K, W, M) = C_1 / C_3 \quad (\text{A.2})$$

$$C_{l,1} = (1-p) \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)s}^{is} \int_0^{is-x} \theta_{l,1} dHdX \quad (\text{A.3})$$

$$C_{l,2} = \begin{cases} p \sum_{i=2}^{K+1} \int_{(i-2)s}^{(i-1)s} \int_0^{(i-1)s-x} \theta_{l,2} dHdX, & \text{if } W > K, \\ p \sum_{i=2}^K \int_{(i-2)s}^{(i-1)s} \int_0^{(i-1)s-x} \theta_{l,2} dHdX, & \text{if } W = K. \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

$$C_{l,3} = p \sum_{i=2}^K \int_{(i-2)s}^{(i-1)s} \int_{(i-1)s-x}^{is-x} \theta_{l,3} dHdX. \quad (\text{A.5})$$

$$C_{l,4} = p \sum_{i=K+1}^W \int_{(K-1)s}^{Ks} \int_{(i-1)s-x}^{is-x} \theta_{l,4} dHdX . \quad (\text{A.6})$$

$$C_{l,5} = \begin{cases} (1-p) \sum_{i=K+2}^W \sum_{j=K+1}^{i-1} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-1)s-x}^{is-x} \theta_{l,5} dHdX, & \text{if } W \leq M-1, \\ (1-p) \sum_{i=K+2}^{M-1} \sum_{j=K+1}^{M-1} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-1)s-x}^{is-x} \theta_{l,5} dHdX, & \text{if } W > M-1. \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

$$C_{l,6} = p \sum_{i=K+3}^W \sum_{j=K+1}^{i-2} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-2)s-x}^{(i-1)s-x} \theta_{l,6} dHdX . \quad (\text{A.8})$$

$$C_{l,7} = \begin{cases} (1-p) \sum_{i=K+1}^W \int_{(i-1)s}^{is} \int_0^{is-x} \theta_{l,7} dHdX, & \text{if } W \leq M-1, \\ (1-p) \sum_{i=K+1}^{M-1} \int_{(i-1)s}^{is} \int_0^{is-x} \theta_{l,7} dHdX, & \text{if } W > M-1. \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

$$C_{l,8} = p \sum_{i=K+2}^W \int_{(i-2)s}^{(i-1)s} \int_0^{(i-1)s-x} \theta_{l,8} dHdX . \quad (\text{A.10})$$

$$C_{l,9} = (1-p) \sum_{i=1}^K \int_{(i-1)s}^{is} \int_{is-x}^{\infty} \theta_{l,9} dHdX . \quad (\text{A.11})$$

$$C_{l,10} = p \sum_{i=2}^K \int_{(i-2)s}^{(i-1)s} \int_{is-x}^{\infty} \theta_{l,10} dHdX . \quad (\text{A.12})$$

$$C_{l,11} = p \int_{(K-1)s}^{Ks} \int_0^{Ks-x} e^{-\mu((K+1)s-Ks)} \theta_{l,11} dHdX . \quad (\text{A.13})$$

$$C_{l,12} = p \sum_{i=W+1}^M \int_{(K-1)s}^{Ks} \int_{(i-1)s-x}^{is-x} e^{-\mu(is-Ws)} \theta_{l,12} dHdX . \quad (\text{A.14})$$

$$C_{l,13} = \begin{cases} (1-p) \sum_{i=W+1}^{M-1} \sum_{j=K+1}^{i-1} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-1)s-x}^{is-x} e^{-\mu(is-Ws)} \theta_{l,13} dHdX, & \text{if } W \geq K+2, \\ (1-p) \sum_{i=K+2}^{M-1} \sum_{j=K+1}^{i-1} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-1)s-x}^{is-x} e^{-\mu(is-Ws)} \theta_{l,13} dHdX, & \text{if } W < K+2. \end{cases} \quad (\text{A.15})$$

$$C_{l,14} = \begin{cases} p \sum_{i=W+1}^M \sum_{j=K+1}^{i-2} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-2)s-x}^{(i-1)s-x} e^{-\mu(is-Ws)} \theta_{l,14} dHdX, & \text{if } W \geq K+3, \\ p \sum_{i=K+3}^M \sum_{j=K+1}^{i-2} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-2)s-x}^{(i-1)s-x} e^{-\mu(is-Ws)} \theta_{l,14} dHdX, & \text{if } W < K+3. \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

$$C_{l,15} = \sum_{j=K+1}^{M-1} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(M-1)s-x}^{Ms-x} e^{-\mu(Ms-Ws)} \theta_{l,15} \, dHdX . \quad (\text{A.17})$$

$$C_{l,16} = (1-p) \sum_{i=W+1}^{M-1} \int_{(i-1)s}^{is} \int_0^{is-x} e^{-\mu(is-Ws)} \theta_{l,16} \, dHdX . \quad (\text{A.18})$$

$$C_{l,17} = \begin{cases} p \sum_{i=W+1}^M \int_{(i-2)s}^{(i-1)s} \int_0^{(i-1)s-x} e^{-\mu(is-Ws)} \theta_{l,17} \, dHdX, & \text{if } W \geq K+2, \\ p \sum_{i=K+2}^M \int_{(i-2)s}^{(i-1)s} \int_0^{(i-1)s-x} e^{-\mu(is-Ws)} \theta_{l,17} \, dHdX, & \text{if } W < K+2. \end{cases} \quad (\text{A.19})$$

$$C_{l,18} = \int_{(M-1)s}^{Ms} \int_0^{Ms-x} e^{-\mu(Ms-Ws)} \theta_{l,18} \, dHdX . \quad (\text{A.20})$$

$$C_{l,19} = p \int_{(K-1)s}^{Ks} \int_{Ms-x}^{\infty} e^{-\mu(Ms-Ws)} \theta_{l,19} \, dHdX . \quad (\text{A.21})$$

$$C_{l,20} = \sum_{j=K+1}^M \int_{(j-1)s}^{js} \int_{Ms-x}^{\infty} e^{-\mu(Ms-Ws)} \theta_{l,20} \, dHdX . \quad (\text{A.22})$$

$$C_{l,21} = \int_{Ms}^{\infty} e^{-\mu(Ms-Ws)} \theta_{l,21} \, dX . \quad (\text{A.23})$$

$$C_{l,22} = p \sum_{i=W+1}^M \int_{(K-1)s}^{Ks} \int_{(i-1)s-x}^{is-x} \int_{Ws}^{x+h} \mu e^{-\mu(z-Ws)} \theta_{l,22} \, dzdHdX . \quad (\text{A.24})$$

$$C_{l,23} = \begin{cases} (1-p) \sum_{i=K+2}^{M-1} \sum_{j=K+1}^{i-1} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-1)s-x}^{is-x} \int_{Ws}^{x+h} \mu e^{-\mu(z-Ws)} \theta_{l,23} \, dzdHdX, & \text{if } W = K, \\ (1-p) \sum_{i=W+1}^{M-1} \sum_{j=K+1}^{i-1} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-1)s-x}^{is-x} \int_{Ws}^{x+h} \mu e^{-\mu(z-Ws)} \theta_{l,23} \, dzdHdX, & \text{if } W > K. \end{cases} \quad (\text{A.25})$$

$$C_{l,24} = \begin{cases} p \sum_{i=K+3}^M \sum_{j=K+1}^{i-2} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-2)s-x}^{(i-1)s-x} \int_{Ws}^{x+h} \mu e^{-\mu(z-Ws)} \theta_{l,24} \, dzdHdX, & \text{if } W = K, \\ p \sum_{i=W+2}^M \sum_{j=K+1}^{i-2} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-2)s-x}^{(i-1)s-x} \int_{Ws}^{x+h} \mu e^{-\mu(z-Ws)} \theta_{l,24} \, dzdHdX, & \text{if } W > K. \end{cases} \quad (\text{A.26})$$

$$C_{l,25} = \sum_{j=K+1}^{M-1} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(M-1)s-x}^{Ms-x} \int_{Ws}^{x+h} \mu e^{-\mu(z-Ws)} \theta_{l,25} \, dzdHdX . \quad (\text{A.27})$$

$$C_{l,26} = (1-p) \sum_{i=W+1}^{M-1} \int_{(i-1)s}^{is} \int_0^{is-x} \int_{W_s}^{x+h} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,26} dz dH dX . \quad (\text{A.28})$$

$$C_{l,27} = p \sum_{i=W+2}^M \int_{(i-2)s}^{(i-1)s} \int_0^{(i-1)s-x} \int_{W_s}^{x+h} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,27} dz dH dX . \quad (\text{A.29})$$

$$C_{l,28} = \int_{(M-1)s}^{Ms} \int_0^{Ms-x} \int_{W_s}^{x+h} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,28} dz dH dX . \quad (\text{A.30})$$

$$C_{l,29} = p \int_{(K-1)s}^{Ks} \int_{Ms-x}^{\infty} \int_{W_s}^{Ms} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,29} dz dH dX . \quad (\text{A.31})$$

$$C_{l,30} = \sum_{j=K+1}^M \int_{(j-1)s}^{js} \int_{Ms-x}^{\infty} \int_{W_s}^{Ms} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,30} dz dH dX . \quad (\text{A.32})$$

$$C_{l,31} = \int_{Ms}^{\infty} \int_{W_s}^{Ms} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,31} dz dX . \quad (\text{A.33})$$

$$C_{l,32} = p \int_{(K-1)s}^{Ks} \int_0^{Ks-x} \int_{K_s}^{(K+1)s} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,32} dz dH dX . \quad (\text{A.34})$$

$$C_{l,33} = p \sum_{i=W+1}^M \int_{(K-1)s}^{Ks} \int_{(i-1)s-x}^{is} \int_{x+h}^{is} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,33} dz dH dX . \quad (\text{A.35})$$

$$C_{l,34} = \begin{cases} (1-p) \sum_{i=K+2}^{M-1} \sum_{j=K+1}^{i-1} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-1)s-x}^{is} \int_{x+h}^{is} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,35} dz dH dX, & \text{if } W = K, \\ (1-p) \sum_{i=W+1}^{M-1} \sum_{j=K+1}^{i-1} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-1)s-x}^{is} \int_{x+h}^{is} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,35} dz dH dX, & \text{if } W > K. \end{cases} \quad (\text{A.36})$$

$$C_{l,35} = \begin{cases} p \sum_{i=K+3}^M \sum_{j=K+1}^{i-2} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-2)s-x}^{is} \int_{x+h}^{is} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,35} dz dH dX, & \text{if } W = K, \\ p \sum_{i=W+2}^M \sum_{j=K+1}^{i-2} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(i-2)s-x}^{is} \int_{x+h}^{is} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,35} dz dH dX, & \text{if } W > K. \end{cases} \quad (\text{A.37})$$

$$C_{l,36} = p \sum_{j=K+1}^{W-1} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(W-1)s-x}^{Ws-x} \int_{W_s}^{(W+1)s} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,36} dz dH dX . \quad (\text{A.38})$$

$$C_{l,37} = \sum_{j=K+1}^{M-1} \int_{(j-1)s}^{js} \int_{(M-1)s-x}^{Ms-x} \int_{x+h}^{Ms} \mu e^{-\mu(z-W_s)} \theta_{l,37} dz dH dX . \quad (\text{A.39})$$

$$C_{l,38} = (1-p) \sum_{i=W+1}^{M-1} \int_{(i-1)s}^{is} \int_0^{is-x} \int_{x+h}^{is} \mu e^{-\mu(z-Ws)} \theta_{l,38} dz dH dX . \quad (\text{A.40})$$

$$C_{l,39} = p \sum_{i=W+2}^M \int_{(i-2)s}^{(i-1)s} \int_0^{(i-1)s-x} \int_{x+h}^{is} \mu e^{-\mu(z-Ws)} \theta_{l,39} dz dH dX . \quad (\text{A.41})$$

$$C_{l,40} = p \int_{(W-1)s}^{Ws} \int_0^{Ws-x} \int_{Ws}^{(W+1)s} \mu e^{-\mu(z-Ws)} \theta_{l,40} dz dH dX . \quad (\text{A.42})$$

$$C_{l,41} = \int_{(M-1)s}^{Ms} \int_0^{Ms-x} \int_{x+h}^{Ms} \mu e^{-\mu(z-Ws)} \theta_{l,41} dz dH dX . \quad (\text{A.43})$$

Quadro 11 - Funções para definição de cada cenário

m	Tempo de inatividade	Custo de manutenção	Tamanho de vida
	$\theta_{1,m}$	$\theta_{2,m}$	$\theta_{3,m}$
1	$is - (x+h)$	$(i-1)c_1 + c_F$	is
2	$is - (x+h)$	$(i-1)c_1 + c_F$	is
3	$is - (x+h)$	$(i-1)c_1 + c_F$	is
4	$is - (x+h)$	$Kc_1 + c_F$	is
5	$is - (x+h)$	$Kc_1 + c_F$	is
6	$is - (x+h)$	$Kc_1 + c_F$	is
7	$is - (x+h)$	$Kc_1 + c_F$	is
8	$is - (x+h)$	$Kc_1 + c_F$	is
9	0	$ic_1 + c_P$	is
10	0	$ic_1 + c_P$	is
11	$(K+1)s - (x+h)$	$Kc_1 + c_F$	$(K+1)s$
12	$is - (x+h)$	$Kc_1 + c_F$	is
13	$is - (x+h)$	$Kc_1 + c_F$	is
14	$is - (x+h)$	$Kc_1 + c_F$	is
15	$Ms - (x+h)$	$Kc_1 + c_F$	Ms
16	$is - (x+h)$	$Kc_1 + c_F$	is
17	$is - (x+h)$	$Kc_1 + c_F$	is
18	$Ms - (x+h)$	$Kc_1 + c_F$	Ms
19	0	$Kc_1 + c_F$	Ms

20	0	$Kc_1 + c_F$	Ms
21	0	$Kc_1 + c_F$	Ms
22	0	$Kc_1 + c_0$	z
23	0	$Kc_1 + c_0$	z
24	0	$Kc_1 + c_0$	z
25	0	$Kc_1 + c_0$	z
26	0	$Kc_1 + c_0$	z
27	0	$Kc_1 + c_0$	z
28	0	$Kc_1 + c_0$	z
29	0	$Kc_1 + c_0$	z
30	0	$Kc_1 + c_0$	z
31	0	$Kc_1 + c_0$	z
32	$z - (x+h)$	$Kc_1 + c_0$	z
33	$z - (x+h)$	$Kc_1 + c_0$	z
34	$z - (x+h)$	$Kc_1 + c_0$	z
35	$z - (x+h)$	$Kc_1 + c_0$	z
36	$z - (x+h)$	$Kc_1 + c_0$	z
37	$z - (x+h)$	$Kc_1 + c_0$	z
38	$z - (x+h)$	$Kc_1 + c_0$	z
39	$z - (x+h)$	$Kc_1 + c_0$	z
40	$z - (x+h)$	$Kc_1 + c_0$	z
41	$z - (x+h)$	$Kc_1 + c_0$	z

Fonte: Esta Pesquisa (2023).