



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

TULIO FIDEL ORREGO RODRIGUEZ

**PROPOSIÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO BASEADAS NA
GESTÃO DE SOBRESSALENTE E PRODUÇÃO**

Recife
2020

TULIO FIDEL ORREGO RODRIGUEZ

**PROPOSIÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO BASEADAS NA
GESTÃO DE SOBRESSALENTE E PRODUÇÃO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.

Recife

2020

R696p	Rodriguez, Tulio Fidel Orrego. Proposição de políticas de manutenção baseadas na gestão de sobressalentes e produção / Tulio Fidel Orrego Rodriguez. – 2020. 97 folhas, il., gráfs., tabs. Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virginio Cavalcante. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2020. Inclui Referências e Apêndice. 1. Engenharia de Produção. 2. Políticas de manutenção. 3. Gestão de sobressalentes. 4. Sistemas multicomponentes. 5. Parques eólicos. I. Cavalcante, Cristiano Alexandre Virginio. (Orientador). II. Título.
	UFPE
658.5 CDD (22. ed.)	BCTG/2020-98

TULIO FIDEL ORREGO RODRIGUEZ

**PROPOSIÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO BASEADAS NA
GESTÃO DE SOBRESSALENTE E PRODUÇÃO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 05 / 03 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virginio Cavalcante (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dra. Ana Paula Cabral Seixas Costa (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Leandro Chaves Rego (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza (Examinador Externo)
Escola Politécnica da USP

Prof. Dr. Alex Maurício Araújo (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Tulio Orrego e Edilma Rodriguez, irmãos, Aura, Yhonathan e Edward, e companheira, Susane Gomes, pelo amor incondicional que me alenta a perseguir meus sonhos e a compreensão ante os momentos de ausência causados pela distância.

Ao meu orientador, *Cristiano Alexandre Virginio Cavalcante*, pela confiança na minha capacidade e os conhecimentos transmitidos, assim como pelo seu apoio e interesse no aprendizado ao longo dos meus estudos de mestrado e doutorado.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – PPGEPP, da Universidade Federal de Pernambuco que compartilharam o seu conhecimento, permitindo meu crescimento intelectual.

Ao governo Brasileiro e a CAPES, pela bolsa de estudos a mim concedida, que fez possível meus estudos e minha permanência no Brasil.

À minha família adotiva, formada por brasileiros e estrangeiros, pessoas maravilhosas, que ofereceram a parceria necessária para aliviar a saudade e que espero se tornem amizades duradouras através do tempo, e especialmente ao amigo Lucas que desde o início da caminhada esteve presente.

Muito obrigado

RESUMO

A eficácia das políticas de manutenção em um sistema produtivo pode ser influenciada por decisões desde a produção, a estratégia de reposição de peças sobressalentes, a distribuição do inventário ou decisões feitas no momento de execução das atividades de manutenção. Essas decisões podem determinar a disponibilidade dos componentes que devem ser usados nas ações de manutenção planejadas pelo gerente de manutenção, e influenciam diretamente no nível de disponibilidade do sistema e, conseqüentemente, na produção. Portanto, o racionamento do estoque disponível torna-se uma tarefa complexa e vital, na qual tomar decisões de inventário e manutenção em conjunto é essencial para otimizar a eficácia do sistema fabricante, principalmente em parques eólicos offshore, trazendo oportunidades de melhorar a confiabilidade e a eficiência dos custos operacionais. Nesse sentido, esta tese propõe uma série de políticas de manutenção aplicadas em um parque eólico situado em alto mar, avaliando em primeiro lugar a operação em conjunto, referente à gestão de sobressalentes-manutenção, para em seguida, propor uma política de racionalização de seu inventário, assim como, uma política de manutenção envolvendo o sistema multicomponente e que define a estratégia de manutenção em função da velocidade do vento para planejar as atividades a serem executadas. As aplicações apresentadas em cada um dos modelos propostos resultaram em redução de custos de operação e manutenção, aumento da disponibilidade do sistema, e uma melhor performance apresentada através da estratégia de racionalização de inventário, quando comparada com metodologias clássicas de seleção, como a FIFO.

Palavras-chave: Políticas de manutenção. Gestão de sobressalentes. Sistemas multicomponentes. Parques eólicos.

ABSTRACT

The maintenance policies effectiveness in a production system can be influenced by other decisions, such as the replacement of spare parts in stock, the inventory distribution or decisions made at the time of carrying out maintenance activities. These decisions can determine the availability of components that must be used in maintenance actions planned by the maintenance manager, and directly influence the availability of system level and, consequently, in production. Therefore, rationing the available stock becomes a complex and vital task, in which making joint inventory and maintenance decisions is essential to optimize the manufacturing system effectiveness, specially in a wind farm , bringing opportunities to improve the reliability and efficiency of operating costs. In this sense, this thesis proposes a series of maintenance policies evaluating first the joint operation, referring to the management of spare-maintenance, and then proposing a policy of rationalizing the inventory in a wind farm, and finally, a maintenance policy involving the same multicomponent system that defines the maintenance strategy according to the wind speed to plan the activities to be performed. The applications presented in each of the proposed models resulted in operation and maintenance costs reduction and an increase in system availability, as well as in a better performance presented through the inventory rationalization strategy, when compared with classic selection methodologies, such as FIFO.

Keywords: Maintenance policies. Spare management. Multicomponent systems. Wind farms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Questionamentos base dos capítulos.....	19
Figura 2 — Processo de renovação ($T_1=T_2=T_3=T$).....	31
Figura 3 — Ciclo de atividades da política.....	32
Figura 4 — Fluxograma da política conjunta	36
Figura 5 — Ciclo do inventário sequencial (A) e integrada (B).....	42
Figura 6 — Desempenho do modelo de manutenção	44
Figura 7 — T vs custos de inventário, política sequencial.....	45
Figura 8 — T vs custos de inventário *política integrada	46
Figura 9 — CS vs T, política conjunta e sequencial	47
Figura 10 — Disponibilidade.....	49
Figura 11 — Estoque vs CS, política integrada e sequencial.....	50
Figura 12 — Planejamento de ordens de manutenção	57
Figura 13 — Base de dados da Velocidade do vento	63
Figura 14 — Tempo de vida do componente	70
Figura 15 — Fluxograma da política.....	73
Figura 16 — CS vs variáveis de decisão.....	77
Figura 17 — Taxa de falhas	78
Figura 18 — Disponibilidade, tempo (A), energia(B)	78
Figura 19 — Taxa de custo de manutenção.....	81
Figura 20 — Disponibilidade baseada no tempo.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Notações do capítulo 3	30
Tabela 2 — Parâmetros da simulação.....	41
Tabela 3 — Resultados da otimização	42
Tabela 4 — Informações do inventario	43
Tabela 5 — Notações do capítulo 4	52
Tabela 6 — Parâmetros do modelo.....	62
Tabela 7 — Lista da demanda	64
Tabela 8 — Lista da demanda de planejamento.....	65
Tabela 9 — Taxa de utilização de inventario	66
Tabela 10 — Notações do capítulo 5	68
Tabela 11 — Parâmetros dos componentes.....	77
Tabela 12 — Resultados da otimização	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	JUSTIFICATIVA.....	16
1.3	METODOLOGIA.....	18
1.4	ESTRUTURA DA TESE	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	MODELAGEM E MANUTENÇÃO	21
2.2	REVISÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE SOBRESSALENTES	22
2.3	MANUTENÇÃO OPORTUNISTA EM PARQUES EÓLICOS	26
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	27
3	POLÍTICA INTEGRADA DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE SOBRESSALENTES PARA UM SISTEMA DE MANUFATURA: IMPLICAÇÕES GERENCIAIS	29
3.1	MODELO DE MANUTENÇÃO OPORTUNISTA.....	29
3.2	MODELO DE GESTÃO DE PEÇAS SOBRESSALENTES	32
3.2.1	Módulo para ordenar	34
3.2.2	Módulo de estado inoperante	34
3.2.3	Módulo de controle das ordens	35
3.3	POLÍTICA INTEGRADA	35
3.4	CRITÉRIOS DE DESEMPENHO DA POLÍTICA.....	37
3.4.1	Custo total de serviço.....	37
3.4.2	Disponibilidade	40
3.5	APLICAÇÃO E RESULTADOS DA POLÍTICA.....	40
3.5.1	Contextualização do caso em estudo	41
3.5.2	Resultados e discussões.....	41
3.6	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA POLÍTICA PROPOSTA	43
3.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	50
4	POLÍTICA DE PLANEJAMENTO DE ORDENS DE MANUTENÇÃO PARA PARQUES EÓLICOS INSTALADOS EM ALTO MAR COM BASE EM UMA ABORDAGEM DE RACIONAMENTO DE PEÇAS DE REPOSIÇÃO	52
4.1	MODELO DE MANUTENÇÃO BASEADO EM OPORTUNIDADE	52
4.2	MODELO DE RACIONAMENTO DE PARTES DE REPOSIÇÃO	54
4.3	POLÍTICA DE PLANEJAMENTO DE ORDENS DE SERVIÇO	57
4.4	CRITÉRIOS DE DESEMPENHO DA POLÍTICA.....	60

4.4.1	Custo total de serviço	60
4.4.2	Taxa de ordens de manutenção atendidas (OFR)	61
4.5	APLICAÇÃO E RESULTADOS DA POLÍTICA.....	61
4.5.1	Contextualização do caso em estudo	61
4.5.2	Resultados e discussões.....	63
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	66
5	POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PARA UM PARQUE EÓLICO EM ALTO MAR SUJEITA AO PROGNÓSTICO DO CLIMA.....	68
5.1	POLÍTICA DE MANUTENÇÃO	69
5.1.1	Critério de adoção da estratégia de manutenção	71
5.1.2	Plano de inspeção no parque eólico	71
5.2	DESENVOLVIMENTO DA POLÍTICA VIA SIMULAÇÃO	72
5.3	CRITÉRIOS DE DESEMPENHO DA POLÍTICA.....	74
5.3.1	Custo total de serviço	74
5.3.2	Disponibilidade.....	75
5.4	APLICAÇÃO E RESULTADOS DA POLÍTICA.....	76
5.4.1	Contextualização do caso em estudo	76
5.4.2	Resultados e discussões.....	77
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	82
6	CONCLUSÃO	83
6.1	LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	85
	REFERÊNCIAS.....	86
	APÊNDICE A – ALGORITMOS.....	92

1 INTRODUÇÃO

A concepção de estratégias de manutenção adequadas pode levar os sistemas industriais à altos padrões de eficiência, aumentando a disponibilidade do equipamento, além de ser mais benéfica ao meio ambiente, tornando as operações mais confiáveis, produtivas e lucrativas. Esse desempenho pode impactar não apenas as operações de manutenção, mas também outras áreas da organização (Ding e Kamaruddin, 2015), (Dekker, 1996).

Em sistemas industriais, a equipe de manutenção geralmente enfrenta a tomada de decisões de manutenção em sistemas complexos, como conjuntos de turbinas (parques eólicos) ou simplesmente uma turbina, nos quais é necessário manter mais de um componente ao mesmo tempo. Nesse contexto, a disponibilidade e a confiabilidade do sistema dependem da interação de diferentes componentes.

Considerando isso, é muito importante estudar a atividade de manutenção em sistemas multicomponentes (Horenbeek, Van, Buré, *et al.*, 2013) e desenvolver políticas de manutenção simples e intuitivas que permitam aumentar a aplicabilidade dos modelos em problemas reais (Nicolai e Dekker, 2008; Nowakowski e Werbińska, 2009).

Nesse sentido, as políticas baseadas em manutenção oportunista tem sido amplamente abordadas levando à melhorias na eficiência dos sistemas (DING e TIAN, 2011; Shafiee, Finkelstein e Bérenguer, 2015; Zhu, Fouladirad e Bérenguer, 2015), especialmente em turbinas offshore (Besnard *et al.*, 2009); (Sarker e Faiz, 2016); (Nguyen e Chou, S. Y., 2018); (Shafiee, Finkelstein e Bérenguer, 2015). Para uma profunda revisão sobre este tópico, leia (Alaswad e Xiang, 2017; Cavalcante, Lopes e Scarf, 2018; Zhang *et al.*, 2017, 2019).

Por outro lado, o tipo e a quantidade dos componentes demandados são um resultado direto da política de manutenção adotada, que estabelece a frequência das ações preventivas e de falha a serem executadas, tornando-se necessário integrar as decisões desde a política de manutenção e de gestão de sobressalentes (Panagiotidou, 2014).

A integração acima mencionada tem sido amplamente investigada na literatura em vários contextos, incluindo manutenção e manufatura (Nahas e Nourelfath, 2018); produção, qualidade e manutenção (Bouslah, Gharbi e Pellerin,

2018); pedido e manutenção (Moghaddass e Ertekin, 2018). Os principais aspectos dos modelos integrados foram resumidos por (Kennedy, Wayne Patterson e Fredendall, 2002), (Basten e Houtum, van, 2014), e, mais recentemente, por (Hu *et al.*, 2018). Alguns desses autores desenvolveram modelos integrados usando uma abordagem sequencial. Essa abordagem representa uma otimização hierárquica na qual as decisões de manutenção são otimizadas em primeiro lugar e, com base nessa solução, a política de inventário é otimizada.

No entanto, a abordagem sequencial pode limitar a decisão e, como consequência, limitar as oportunidades de melhorar a eficiência de custos das políticas de estoque e manutenção. Em (Hu *et al.*, 2018) estabeleceram que, para alcançar um equilíbrio adequado entre o estoque, o custo de peças de reposição e os requisitos de manutenção, é importante desenvolver modelos conjuntos, que permitam a otimização conjunta das decisões. Outros autores também desenvolveram modelos conjuntos de manutenção e inventário (Gento, 2004; Horenbeek, Van, Buré, *et al.*, 2013; Horenbeek, Van, Scarf, *et al.*, 2013; Huiskonen, 2001; Panagiotidou, 2014; Zhang e Zeng, 2017) apoiando a declaração de (Hu *et al.*, 2018).

Particularmente, a operação de parques eólicos offshore apresenta desafios importantes, quando se trata de produzir energia, executar ações de manutenção de instalações e especialmente ao gerenciamento de sobressalentes. Às vezes, o acesso às turbinas e plataformas durante a operação pode ser restrito devido à alta velocidade do vento no mar e ao mar turbulento. Além disso, as ações de manutenção podem se tornar caras, devido ao alto custo do transporte de peças de reposição e à equipe de manutenção no alto mar (Sarker e Faiz, 2016).

Essas limitações, aliadas ao alto custo dos componentes das turbinas, exigem um gerenciamento eficiente das operações de manutenção em parques eólicos offshore (alto mar), nas quais é necessário tomar decisões como o tipo de ações a serem executadas, turbinas e componentes a serem mantidos e momento adequado para acesso ao parque eólico.

Considerando o último, é vital realizar uma manutenção eficiente e um gerenciamento de estoque em parques eólicos (Zhang *et al.*, 2019). Apesar disso, os modelos de manutenção propostos na literatura para parques eólicos offshore

geralmente se baseiam no pressuposto de que os recursos de manutenção estão sempre disponíveis e em número suficiente. Assim, existem poucas pesquisas que incluam o gerenciamento de sobressalentes em parques eólicos offshore (Zhang *et al.*, 2019).

Alguns pesquisadores incluem restrições do ambiente na área de produção de energia offshore, para estabelecer aspectos como o nível máximo e mínimo de estoque e os pontos de reabastecimento. No entanto, o emprego desses modelos implica que, quando ocorrer uma falha e o inventário for insuficiente para executar as ações de manutenção, as turbinas deverão permanecer em tempo de inatividade até a chegada do pedido de peças de reposição. Nos parques eólicos offshore, isso pode representar uma enorme quantidade de energia não produzida devido à alta velocidade do vento em alto mar.

Portanto, o racionamento adequado de peças sobressalentes em parques eólicos offshore é particularmente importante. Essa atividade auxilia os gerentes a decidir qual demanda de manutenção deve ser atendida com o estoque até a chegada de um pedido de peças sobressalentes e qual demanda de manutenção deve ser terceirizada devido à falta de estoque (Jimenez G, Orrego R e Cavalcante, 2019) (Jimenez G *et al.*, 2020).

O uso da energia provida pelos ventos vem como uma das alternativas à geração de energia que impactem o ambiente o mínimo possível. De acordo com a Global Wind Energy Council (GWEC), prevê-se que as taxas de crescimento anual das fontes de energia renovável permaneçam na faixa de 7% até 2030, atingindo um total global de 2.870 GW até 2050 (Sawyer, Teske e Dyrholm, 2016). No Brasil, algumas estimativas apontam para perspectivas para 2030 de que os campos eólicos serão o segundo maior fornecedor de eletricidade no Brasil (EPE (Empresa de Pesquisa Energética), 2017).

Portanto, o sucesso da energia gerada por esses campos depende da efetividade de seu planejamento de manutenção (Cavalcante, Lopes e Scarf, 2018; Lantz *et al.*, 2018; Lei e Sandborn, 2018; Nilsson e Bertling, 2007b) e estaria relacionado mesmo com a fase de desenvolvimento do projeto (Bilgili, Yasar e Simsek, 2011), (Li e Wang, 2017).

Para o sistema de turbinas eólicas, a complexidade da manutenção deve levar em conta uma variedade mais ampla de aspectos, como a degradação e

falha, transporte, gerenciamento dos componentes, acesso, mas também às condições climáticas, pois a previsão do tempo é essencial para evitar decisões que ponham em risco o reparador e que resultem em grandes perdas de geração de energia (Zhang e Zeng, 2017); (); (Besnard *et al.*, 2009; Lei e Sandborn, 2018; Nguyen e Chou, S.-Y., 2018). Além disso, neste aspecto, uma turbina eólica é um sistema multicomponente; por esse motivo, existem algumas falhas em vários componentes que não são críticas (falhas leves), e elas podem ser reduzidas.

Dessa forma, para realizar tarefas de manutenção preventiva, será interessante observar não apenas o nível de degradação do dispositivo, mas também a velocidade do vento que, por um certo intervalo, torna-se mais atraente a realização da manutenção preventiva (Sarker e Faiz, 2016). Por exemplo, será preferível realizar tarefas de manutenção preventiva durante períodos de baixa velocidade do vento, porque não é apenas mais seguro para a equipe de manutenção, mas também haverá menos impacto na produção de energia (Kovács *et al.*, 2011; O'Connor, Lewis e Dalton, 2013).

Pela complexidade no acesso ao parque eólico, a manutenção deve observar vantagens em realizar a manutenção em mais de um componente, de forma oportunista. Esse aspecto é ainda mais importante pelo fato de que as ações de manutenção são realizadas em alturas elevadas e envolvem uma enorme dificuldade operacional, o que resulta em longos tempos de instalação para manutenção; portanto, se for possível realizar mais atividades, uma vez que a turbina está em intervenção, tende a reduzir os custos por ação (Lu *et al.*, 2018), (Song *et al.*, 2018).

Tendo em mente essas dificuldades para realizar as tarefas de manutenção, e considerando que a eficácia dessas ações está relacionada às condições climáticas, que podem mudar muito rapidamente, encontrar uma janela de tempo adequada para realizar a manutenção que concilie esse aspecto com o processo de degradação dos componentes é uma tarefa desafiadora (Cavalcante, Lopes e Scarf, 2018; Nilsson e Bertling, 2007b). Decisões erradas podem resultar em níveis inaceitáveis de disponibilidade, além de altos custos.

Nesse cenário, para evitar a manutenção, se não for necessário, como forma de atender às restrições de disponibilidade, muitos autores utilizam a manutenção baseada em condições (Arabian-Hoseynabadi, Oraee e Tavner,

2010; Lu *et al.*, 2018; Nilsson e Bertling, 2007a; Shafiee, Finkelstein e Bérenguer, 2015; Spinato *et al.*, 2009; Zhang e Zeng, 2017). Por outro lado, para encapsular mais ações em uma intervenção, reduzindo o número de intervenções e, conseqüentemente, reduzindo o tempo de inatividade, as políticas oportunistas provaram ser muito úteis para alcançar a meta de aumentar o poder de disponibilidade:(Song *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2017, 2019); redução do custo do serviço(Dekker e Smeitink, 1991; DING e TIAN, 2011), (Almeida, de *et al.*, 2015; Cavalcante, Lopes e Scarf, 2018) ou ambos (Carlos *et al.*, 2013; Conroy, Deane e O Gallachoir, 2011; Mabel, Raj e Fernandez, 2011; Yildirim, Gebraeel e Sun, 2017).

Por conseguinte, verifica-se que há um interessante espaço para a elaboração de pesquisa no desenvolvimento de políticas de manutenção que propiciem a manutenibilidade dos sistemas produtivos que conciliem com as principais áreas da organização visando a otimização dos recursos envolvidos, sendo este tema que fundamenta as proposições desta tese.

1.1 OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos a serem atingidos nesta pesquisa.

1.1.1 Objetivo geral

Fornecer modelos de manutenção que estabeleçam a relação da manutenção com a operação, considerando os critérios de custo de serviço, custo de operação, disponibilidade e taxa de atendimento, os quais envolvem a gestão de peças sobressalentes, gestão da operação e da manutenção.

1.1.2 Objetivos específicos

Pretende-se explorar a potencialidade das políticas de manutenção quando estas são conectadas com importantes decisões dentro de unidades produtivas. Desta forma, almejam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Construção de modelos de manutenção, usando o conceito de manutenção oportuna para sistemas com um único componente e multicomponentes.
- b) Construção de modelos de manutenção usando como critério de decisão o nível de produção e segurança em parques eólicos;

- c) Integração de modelos de manutenção com a gestão de sobressalentes visando estudar a interação entre as áreas;
- d) Analisar o comportamento dos diferentes elos que compõem o sistema manutenção-operação;
- e) Desenvolvimento de estratégias para a manutenção, buscando otimizar alocação de recursos para garantir a execução das atividades;
- f) Identificar as implicações das variáveis de decisão em âmbitos da gerência, a partir da modelagem de um problema específico para a operação de parques eólicos;

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar dos esforços para melhorar a eficiência da operação de manutenção, a maioria dos modelos relatados que utilizam abordagens como manutenção com base em degradação com custo-benefício e otimização com base em simulação foi desenvolvida e otimizada com base em sistemas de componente único. Além disso, as regras e modelos desenvolvidos parecem ser complexos para entender e implementar na vida real pelos gerentes (Cavalcante, Lopes e Scarf, 2018).

Por outra parte, quando um sistema multicomponente está inoperante, devido à falha de seus componentes, a prioridade nas decisões de manutenção é restaurar o sistema ao seu estado operacional, para mantê-lo disponível. Isso exige que a equipe de manutenção repare ou substitua os componentes afetados o mais rápido possível.

Além de executar uma ação de manutenção sobre esses componentes, a equipe de manutenção também poderia aproveitar a oportunidade de acessar outros componentes para fazer manutenção preventiva neles. Ao fazer isso, falhas futuras que poderiam causar interrupções no sistema podem ser evitadas e, como consequência, o custo de manutenção da execução de ações corretivas pode ser diminuído.

A integração do inventário e a decisão de manutenção não é uma tarefa fácil, pois requer uma grande quantidade de recursos, humanos e financeiros, dentro da empresa. Apesar disso, a otimização conjunta dessas decisões pode ser de grande valia para as organizações, uma vez que os departamentos de estoque

e manutenção são responsáveis por grande parte do custo operacional, por exemplo, as peças de reposição usadas nas atividades de manutenção representam quase 2,5 % do orçamento anual (Gallagher, Mitchke e Rogers, 2005). A integração permite ao gerente executar as ações de manutenção sem atrasos e com um custo menor, garantindo menores custos de pedidos e manutenção de estoque (Kaio e Osaki, 1978).

Mas quando o processo de reposição de sobressalentes é altamente susceptível as condições ambientais ou do sistema, como é o caso de parques eólicos offshore, o modelo de racionamento de peças sobressalentes surge como a necessidade de decidir quais ações de manutenção devem ser executadas pela equipe de manutenção interna de um parque eólico e quais devem ser terceirizadas, devido a um estoque limitado.

O racionamento de inventário é importante em parques eólicos offshore que usam uma abordagem de manutenção oportunista, uma vez que, os modelos oportunistas incentivam o agrupamento ou o acúmulo de demandas de manutenção para aproveitar oportunidades como interdependência de componentes e condições climáticas adequadas. Tais oportunidades permitem que os gerentes diminuam as viagens de manutenção desnecessárias para os parques eólicos e, portanto, diminuam os custos de manutenção (Sarker e Faiz, 2016).

A demanda acumulada de ações de manutenção deve ser atendida no mesmo período, mas, às vezes, não há peças sobressalentes disponíveis suficientes no inventário para executar tais ações. Portanto, é necessário priorizar as ações de manutenção até que o estoque seja reabastecido.

O cenário de falta de peças sobressalentes é possível, pois é assumido que o estoque possui uma quantidade muito restritiva de peças sobressalentes. A razão disso é que o fato de ter muitas peças de reposição de turbinas no estoque pode representar um alto custo de manutenção e capital, que pode ser causado pelo alto custo dos componentes, bem como pelo grande espaço de armazenamento ocupado por elas, por exemplo, pás e rotores (Shafiee, 2015) (Ardente *et al.*, 2008).

Nesse caso, é preferível ter uma quantidade menor de peças de reposição no estoque e terceirizar a participação de algumas ações de manutenção quando

necessário, o que inclui trazer as peças de reposição e executar as ações. Além disso, as ações de manutenção de terceirização podem ser preferíveis, pois o pedido regular de peças de reposição pode durar muito tempo, o que pode ser caro devido à perda de oportunidade da produção de energia.

A perda de energia é particularmente verdadeira em parques eólicos offshore, nos quais a velocidade do vento é muito alta, sendo mais alta quando comparadas às turbinas em terra (Pryor e Barthelmie, 2001). Finalmente, o pedido de peças de reposição de emergência pode ser considerado caro ou inviável.

Vale ressaltar que, quando a velocidade do vento é considerada alta, com bom impacto na geração de energia, devem ser evitadas interrupções e reprogramadas para intervalos de baixa geração. Isto implica utilização de modelos de prognóstico do vento ou até de banco de dados de velocidade do vento, para decidir o melhor momento de ativação do plano de inspeção dos componentes das turbinas eólicas e o momento para realizar as tarefas de manutenção.

1.3 METODOLOGIA

Considerando que esta pesquisa propõe estratégias que visam fazer com que as atividades em unidades de produção sejam mais eficientes e considerando as limitações pertinentes, os problemas aqui tratados podem ser classificados de problemas de engenharia segundo (Gil, 2002).

No entanto, (Berto, R. M. V. S., & NAKANO, 1998) fazem uma classificação da pesquisa em função dos objetivos pretendidos, são eles: de caráter exploratório, descritivo, explanatório e preditivo. Enquadramos esta pesquisa em cada um dos citados anteriormente por razões que serão argumentadas em seguida.

A pesquisa exploratória e descritiva procura conhecer e expor maiores informações sobre determinado assunto e busca analisar o fenômeno tal e como ele se apresenta. O que é crucial durante o processo de modelagem para representar os fenômenos mais próximos à realidade, e assim seus resultados possam ser aplicados.

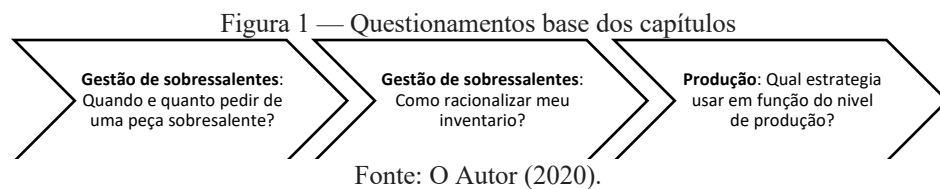
Também, o estudo também apresenta caráter explanatório e preditivo ao utilizar a simulação como meio para avaliar diferentes cenários e prever as

consequências perante variantes ao modelo original, propondo alternativas que façam com que a performance do modelo seja incrementada.

Enquanto ao desenvolvimento da metodologia de pesquisa para alcançar os objetivos que tem sido formulados, a metodologia adotada neste trabalho está aderida à proposta de (Moore e Rivett, 1981). Esta possui como base o sequenciamento de estágios para a formulação e desenvolvimento de problemas de pesquisa operacional.

Assim, (Moore e Rivett, 1981) propõe então percorrer de forma sequencial desde a formulação do problema e passando pela sua construção, a proposição de soluções, o envolvimento de testes de controle para a solução até a implementação da solução que melhor represente as preferências do decisor.

Com tudo, as políticas propostas nesta pesquisa abordam a relação da manutenção com áreas de suporte, e na que questionamentos apresentados na figura 1 são a base do capítulo.



Para o desenvolvimento da metodologia de pesquisa, é proposta uma revisão da bibliografia em fontes como livros, artigos e material de eventos de reconhecimento científico, que contribuem com a apresentação e exploração das problemáticas aqui abordadas, como também respaldam as propostas submetidas.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está dividida em seis capítulos, incluindo a introdução, a qual foram expostos diversos aspectos de relevância, os objetivos e a metodologia empregada na pesquisa.

O capítulo inicial apresenta uma visão dos problemas associados às unidades produtivas e a importância da função manutenção relacionada à função produção. Também apresenta os objetivos e a justificativa deste trabalho.

No capítulo 2 são apresentados conceitos básicos referentes a este trabalho para o seu entendimento, passando por uma explicação da estruturação dos sistemas multicomponentes e critérios na adoção de políticas.

No capítulo 3 são vistas algumas conceituações novas e proposições readaptadas para o cenário da política de manutenção atrelada à gestão de peças sobressalentes, para serem utilizadas e desenvolvidas conceitualmente através de um exemplo. No capítulo 4, e visando a importância da racionalização de partes de reposição no inventário para sistemas multicomponentes, especialmente na área de geração eólica e cuja produção e manutenção depende diretamente da velocidade do vento, é apresentada uma política cuja estratégia visa otimizar os recursos para atender a maior quantidade de ordens de serviço de manutenção com a equipe própria e conciliando com as condições climáticas.

Como foi abordado capítulo anterior, a produção em parques eólicos depende diretamente da velocidade do vento e, portanto, o capítulo 5, descreve uma política de manutenção em sistemas complexos de geração de energia atuando em função dos níveis de produção, sendo este ilustrado com o exemplo numérico para demonstrar sua eficácia.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as considerações finais da pesquisa, incluindo suas limitações e as perspectivas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, tem-se como propósito expor uma revisão dos conceitos base utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, bem como a evolução das políticas de manutenção fazendo referência às estratégias baseadas na oportunidade, e que, por conseguinte, são utilizadas em parques eólicos. Para este fim, são referenciados trabalhos que contribuem para o desenvolvimento na área da manutenção propriamente dito. Também serão discutidos os conceitos relacionados à gestão de sobressalentes, e aos principais critérios aqui usados para definir o acionamento de políticas de manutenção.

2.1 MODELAGEM E MANUTENÇÃO

No processo de concepção das políticas é necessário compreender a importância das etapas envolvidas para sua construção na qual constitui-se primordialmente da modelagem, na qual deverá garantir a representação dos fenômenos em estudo os mais próximos da realidade.

Para Goldbarg e Luna (2005) e Alencar, De *et al.* (2017) a modelagem é o conjunto de técnicas destinadas à representação da realidade através de modelos para auxiliar no desenvolvimento de novas estratégias que proporcionem alternativas de melhoria nos sistemas que estão sendo abordados. Portanto, ainda que um modelo não represente fielmente a realidade, deve ser suficientemente similar para que as conclusões obtidas através de sua análise e operação possam ser estendidas à realidade.

No entanto, e ainda que a manutenção seja um processo complexo que é acionado por falha do equipamento ou reparo planejado, algumas abordagens existentes para modelagem de manutenção dependem de suposições simplificadas que os impedem de refletir a complexidade encontrada em sistemas industriais.

É recomendado por Duffuaa *et al.*, (2001) a utilização de módulos para efetuar a simulação de modelos de manutenção. Onde cada um dos módulos é responsável por uma parte do sistema (modelagem da manutenção, planejamento e programação, gestão de peças sobressalentes, disponibilidade de equipamentos entre outros).

2.2 REVISÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE SOBRESSALENTES

Outros estudos, como em Energy e Heege (2015; Liang, (1985); Marsaro e Cavalcante (2017) utilizam abordagens com base em degradação econômica, e cuja otimização se baseia na simulação, a qual é desenvolvida para sistemas em que um único componente do sistema é assistido. Além disso, Cavalcante, Lopes e Scarf, (2018) promovem que as regras e modelos desenvolvidos devem ser menos complexos serem entendidos e implementados pelos gerentes.

Alrabghi e Tiwari (2016) sugere uma abordagem que permite a modelagem de sistemas multi-unidades (complexos) não idênticos sem suposições restritivas sobre o número de unidades ou as suas características de manutenção. Esta abordagem é fundamentada na integração de simulação de eventos discretos (Discrete Event Simulation - DES) com modelos vinculados à manutenção, como são a gestão de sobressalentes e os sistemas de produção.

Desta forma, Atashgar e Abdollahzadeh (2016) formula um modelo de redundância conjunta e otimização da manutenção oportunista por blocos usando reparo imperfeito, cujo objetivo é determinar o nível de redundância do parque eólico e a estratégia de manutenção que retorne o menor custo do ciclo de vida.

Nilsson e Bertling (2007b), por sua vez, apresenta uma estratégia para gestão da manutenção baseada no custo do ciclo de vida (LCC) interligada a um sistema de monitoramento de condição (Condition Monitoring System - CMS) para melhorar o planejamento de manutenção de uma única turbina eólica onshore e um parque eólico offshore.

Na prática, as políticas de manutenção e estoque de peças de reposição são tratadas separadamente ou sequencialmente. Porém, peças de reposição e manutenção são atividades de logística intimamente relacionadas, nas quais a manutenção gera a necessidade de peças de reposição.

Também entre outros critérios na manutenção, a qualidade das peças sobressalentes é ponto central e que tem sido abordado por Horenbeek, Van, Scarf, *et al.* (2013b), que avaliam o efeito das propriedades das peças sobressalentes e do tamanho da frota na variabilidade na demanda por peças de reposição.

Já Huiskonen (2001), usa os critérios de criticidade, especificidade, padrão de demanda e valor de peças para a definição de políticas de operação, fazendo uma análise das características de controle operacional de peças de reposição como base para apoiar o planejamento do sistema logístico de sobressalentes.

Entretanto, o nível de estoque de peças de reposição depende da política de manutenção. Portanto, os programas de manutenção devem ser projetados para reduzir os custos relacionados à manutenção e ao estoque. Resultado que, quando a manutenção preventiva está presente, ela pode precisar de mais peças de reposição ao mesmo tempo, devido às atividades de manutenção preventiva planejadas.

Porém, uma das estratégias comumente usadas para garantir a disponibilidade de peças de reposição para uso em um sistema de produção, é a tendência de estocá-las em excesso, sendo que envolve capital de giro substancial.

Song *et al.*, (2018), apresenta uma política que agrega três variáveis intimamente relacionadas na área da manutenção e que se encontram envolvidas no processo decisório, sendo estas: a quantidade de pedidos a serem lançados, o intervalo entre estes e o intervalo da inspeção da política de manutenção. Além disso, envolve o conceito de delay time no processo de falha e inspeção por blocos.

Por outra parte, Almeida, de *et al.*, (2015a) abordam a problemática de dimensionamento de inventário, propondo um modelo baseado na teoria de utilidade multiatributo (Multi-Attribute Utility Theory - MAUT). Assim, estes autores avaliam o planejamento de peças de reposição através dos objetivos multidimensionais como custos, lucratividade, confiabilidade, disponibilidade e probabilidade de falta de estoque. Critérios que comumente são conflitantes.

Uma outra solução que alguns pesquisadores encontraram para priorizar o inventário limitado foi pospor as substituições em função da condição da peça garantindo maior utilização do ciclo de vida e, portanto, reduzindo os custos por trocas excessivas outorgando assim, maior tempo de preparação dos sobressalentes. Esta ideia foi adotada por Oosterom, Van *et al.*, (2014) que propôs um modelo de tempo de atraso (baseado no delay time) sob a suposição de substituição adiada, o que difere da maioria das políticas em que a troca é instantânea. No entanto, inspeções são realizadas.

Sarker e Haque (2000), consideram o estudo de um sistema de fabricação e por sua complexidade é tratado via simulação. Neste estudo, falhas estocásticas dos equipamentos como os tempos de reposição dos sobressalentes são consideradas simultaneamente. Substituição em bloco é o centro da política de manutenção e revisão contínua para a política de inventário.

Panagiotidou (2014), por sua vez, estende a otimização conjunta de manutenção-gestão de sobressalentes, em que os componentes operacionais podem sofrer dois tipos de falhas silenciosas incorrendo assim ao estado de mau funcionamento ou completamente fora de ação. O fenômeno de multiestado também é explorado por Sarker e Faiz (2016), Cavalcante, Lopes e Scarf, (2018) e Marsaro e Cavalcante (2017). Neste, inspeções são também frequentemente realizadas para a identificação dos estados e em função destes uma ação é realizada (multiação). E tratando-se da gestão de sobressalentes, são estudadas as abordagens de revisão contínua e periódica.

Zhang e Zeng (2017b), investiga a otimização conjunta da estratégia para manutenção preventiva oportunista periódica baseada em condições e uma política de segurança para o fornecimento de peças de reposição para sistemas de várias unidades com um número conhecido de unidades idênticas, demonstrando sua aplicação em componentes instalados em um parque eólico.

Assim, e vislumbrando o grande crescimento no setor de energia eólica nos últimos anos, se concentra um mercado crescente no desenvolvimento de grandes turbinas e parques offshore com um impacto provavelmente baixo para o meio ambiente, como supracitado por Tavner (2012). Porém, existem problemas a serem resolvidos para fornecer energia a preços competitivos.

Um deles é a longevidade das turbinas, problemática abordada por Lei e Sandborn (2018), que utiliza um modelo de prognóstico e gerenciamento de saúde (Pronostic Health Management - PHM) para prever a vida útil restante de turbinas eólicas e assim realizar o planejamento da manutenção mediante um contrato de compra de energia.

Outros são abordados visando a disponibilidade e confiabilidade necessários durante o ciclo de vida dos equipamentos, e nos que a logística e o gerenciamento da cadeia de suprimentos de manutenção possuem responsabilidade.

Para isso, Wang, Zhao e Guo (2019) constroem uma política na que o desempenho do sistema em termos de disponibilidade do sistema, confiabilidade, tempo médio até a falha e emissões de gases são envolvidas no contrato da prestação de serviços. Assim, a política reúne manutenção oportunista, preventiva e corretiva com o intuito de atingir a maximização dos critérios lucro, emissões e disponibilidade.

Zhou e Yin (2019) por sua vez, propõe uma estratégia dinâmica de manutenção oportunista baseada na condição dos componentes instalados em turbinas offshore, considerando diferentes prazos de manutenção para cada componente, vislumbrando também as condições climáticas e de carga operacional.

Portanto, a criação de programas de inspeção e manutenção para parques eólicos que se traduzam em baixo custo e que garantam continuidade na operação é uma tarefa complexa que envolve um alto grau de incerteza devido à heterogeneidade de ativos e seus modos de falha correspondentes como também as condições de transporte dependentes do clima (offshore), demanda aleatória de peças de reposição, difícil acesso para manutenção ou reparo, disponibilidade limitada de recursos em termos de equipamentos e mão de obra qualificada entre outros.

Assim, uma falha na prestação de serviços de manutenção adequados pode afetar adversamente a disponibilidade do parque eólico, reduzindo assim a produção de energia e a lucratividade, visto que a terceirização no suprimento de peças de reposição ou até das atividades de manutenção é um fator estratégico para as indústrias que buscam melhorar o desempenho do seu sistema.

Para Godoy, Pascual e Knights (2014), a avaliação da razão de custo permite decidir quais serviços são prestados pelo terceirizado e quais pela equipe própria (contrato ideal), desenvolvem uma estratégia de manutenção imperfeita com horizonte finito, na qual uma estrutura de tomada de decisão envolve as condições contratuais com o estoque de sobressalentes considerados com um alto nível de importância para o sistema.

Igualmente, a alta disponibilidade técnica de turbinas eólicas vem com uma grande necessidade de manutenção frequente, porque o planejamento das instalações deve conscientemente estar ligado ao planejamento da manutenção,

sendo esta ligação um quesito a ser otimizado para tornar a manutenção mais eficiente.

Ainda relacionado, Song *et al.*, (2018) promovem a concepção de um modelo de otimização em dois estágios: o primeiro garante maior aproveitamento do recurso com o layout (posição e número de turbinas) do parque eólico para maximizar a produção de energia, enquanto o segundo baseia-se na otimização da manutenção oportunista.

Qiu, Cui e Yang (2018) visam ao desenvolvimento da política de condições de compra de energia para um sistema complexo de geração de energia (parque eólico). Nesse estudo, dois processos de falha são estudados: o primeiro reduz a taxa de produção, enquanto o segundo causa a parada do sistema. Ações de manutenção são definidas em função do estado do sistema, e no que manutenção perfeita e imperfeita são utilizadas.

2.3 MANUTENÇÃO OPORTUNISTA EM PARQUES EÓLICOS

Do mesmo modo, a manutenção de turbinas eólicas instaladas em alto mar (*offshore*) proporciona um grande desafio desde o ponto de vista teórico e prático devido principalmente às condições de acesso, dimensionamento dos equipamentos e condições climáticas adversas.

Como explorado por Stålhane *et al.*, (2019), que consideram determinar a frota ideal de embarcações para apoiar as operações de manutenção de um parque eólico visando a incerteza nas condições climáticas, também abordado por (Rinaldi *et al.*, 2019) que mediante algoritmos genéticos e visando a confiabilidade e disponibilidade do parque eólico estudam o planejamento logístico da operação de manutenção, e por Zhong *et al.* (2019), que incorporam dentre seu modelo de programação da manutenção a incerteza devido ao estado do mar e a demanda do mercado.

Igualmente, Zhang *et al.*, (2019b) apresentam uma estratégia de manutenção oportunista para turbinas eólicas, considerando condições climáticas estocásticas e gerenciamento de peças de reposição com a política de estoque (S, s). Porém, as condições do clima aqui são tratadas para definir o tempo de espera como a oportunidade para fazer a manutenção nos componentes com o intuito de diminuir as perdas na geração de energia.

Ao mesmo tempo Zhu, Castanier e Bettayeb (2019) propõe um modelo de falha que inclui vários modos de falha com diferentes consequências, e no que considera atrasos logísticos e condições climáticas como restrições para efetuar a manutenção.

Em conclusão, a manutenção de parques eólicos apresenta grandes desafios para a conformação da estratégia, principalmente quando deve estar atrelada à estratégia organizacional. Assim, Shafiee, Finkelstein e Bérenguer (2015c), propõe um esquema de classificação envolvendo três escalões de tomada de decisão estratégica, tática e operacional.

O escalão estratégico lida com as decisões relativas ao projeto dos parques eólicos quanto à confiabilidade, localização e capacidade das acomodações de manutenção, seleção da estratégia de manutenção dos parques eólicos e terceirização dos serviços de reparo.

O escalão tático abrange o gerenciamento de estoque de peças de reposição, a organização de suporte de manutenção e todas as decisões relacionadas à compra ou locação de recursos de manutenção. O escalão operacional inclui agendamento de tarefas de manutenção, roteamento de embarcações e medição do desempenho da manutenção.

Assim, Shafiee e Sørensen, (2017) apresenta uma estrutura conceitual de classificação para a literatura disponível sobre otimização de políticas de manutenção e planejamento de inspeção de sistemas e estruturas eólicas. Para este trabalho, são consideradas questões teóricas e práticas, incluindo modelos, métodos e estratégias empregadas para otimizar decisões de manutenção e procedimentos de inspeção em parques eólicos

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo buscou descrever os diferentes modelos de manutenção para sistemas simples e complexos, e que também envolvem a gestão de sobressalentes como um dos critérios a serem considerados críticos no atuar dos parques eólicos.

Da mesma forma, foram apresentados modelos que abordam as condições do clima como elementos de decisão para o acionamento das políticas de

manutenção, e que por sua vez, envolvem a disponibilidade e confiabilidade os quais se traduzem na capacidade de geração de energia elétrica.

Nos capítulos seguintes abordagens tratam a manutenção oportuna, gestão de sobressalentes, estratégias de racionamento de inventario e as velocidades do vento como fundamentos para a concepção de novas políticas, principalmente para parques eólicos.

3 POLÍTICA INTEGRADA DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE SOBRESSALENTES PARA UM SISTEMA DE MANUFATURA: IMPLICAÇÕES GERENCIAIS

Esta seção propõe um modelo conjunto para manutenção oportunista e reposição de peças sobressalentes, que otimiza o tempo de abertura das janelas de oportunidades de manutenção, o ponto de reordenação de peças sobressalentes para pedidos regulares e de emergência, e o custo do serviço conjunto.

O desenho da política de manutenção em um sistema de fabricação pode ser influenciado pelas decisões de produção ou a estratégia de reabastecimento de peças sobressalentes. Essa decisão pode determinar a disponibilidade dos componentes, que devem ser usados nas ações de manutenção planejadas pelo gerente de manutenção.

Por outro lado, a frequência de ações preventivas e corretivas determina a demanda de peças de reposição, e a sua frequência de reordenamento na estratégia de estoque. Portanto, tomar as decisões de inventário e manutenção em conjunto é essencial para otimizar a eficácia do sistema do fabricante, trazendo oportunidades de melhorar a confiabilidade e a eficiência de custos das operações.

Para integrar as decisões de manutenção e as decisões de inventário, foi necessário primeiro estabelecer a estratégia da política de manutenção e a política de reabastecimento de peças de reposição que melhor atendessem aos requisitos dos sistemas multicomponentes.

A política de manutenção foi adaptada do modelo oportunista proposto por Liang (1985), enquanto a política de reabastecimento foi desenvolvida com base em uma estratégia de revisão contínua. Nas seções a seguir, a política de manutenção e a política de inventário usadas para compor o modelo conjunto são exploradas em detalhes.

3.1 MODELO DE MANUTENÇÃO OPORTUNISTA

A política de manutenção utilizada no modelo conjunto foi desenvolvida com base no conceito *Piggyback* proposto por Liang (1985). Esse modelo foi aplicado em um sistema de duas partes com dependência funcional, onde, se uma parte falhar, o sistema entrará em tempo de inatividade. O termo 'Piggyback' é usado

para definir o relacionamento entre essas duas partes, no sentido de que apenas uma parte depende da outra.

Tabela 1 — Notações do capítulo 3

Q	Nível de inventario	t_c	Tempo de reparo corretivo
s	Mínimo nível de inventario	t_p	Tempo de reparo preventivo
S	Máximo nível de inventario	t_{br}	Tempo de parada
E	Nível de inventario de emergência	t_h	Tempo de manter o estoque ($t_{h1} + t_{h2} + t_{h3}$)
T	Tempo de abertura da janela de oportunidade	Δ_I	Tempo de vida inutilizado
Fb	Número de ações corretivas	C_{mp}	Custo total por manutenção preventiva
Pb	Número de ações preventivas	C_{mc}	Custo total por manutenção corretiva
cm	Custo da manutenção corretiva	C_{life}	Custo total de vida remanescente
pm	Custo da manutenção preventiva	SC_m	Custo total de serviço por manutenção
Eo	Ordem de emergência	$C_{Ro/Eo}$	Custo total de ordenar
Ro	Ordem regular	C_{Br}	Custo total por parada
$T_{Ro/}$	Tempo de liberação do pedido	C_H	Custo total por manter sobressalentes
Eo			
$t_{Ro/E}$	Tempo de espera (lead time)	C_L	Custo de penalização por falta de inventario
o			
$q_{Ro/E}$	Número de partes em uma ordem	SC_{sp}	Custo total de serviço da gestão de sobressalentes
o			
$c_{Ro/E}$	custo de ordem	SC	Custo total de serviço da política
o			
c_{br}	Taxa de custo de parada	$A_{m/sp}$	Disponibilidade
c_h	Taxa de custo por manter estoque		

Fonte: O Autor (2020)

A deterioração do componente dependente b é considerada dependente da idade, portanto, uma "oportunidade" de fazer manutenção preventiva nesse componente chega quando ocorre uma falha no componente independente a , após atingir a idade de substituição preventiva (T) do componente b . Esse intervalo, de T para ∞ , representa a janela de oportunidade, relacionadas à idade de b , na qual a manutenção preventiva pode ser executada aproveitando a interrupção do sistema na ocorrência da falha de um dos seus componentes instalados.

O horizonte de manutenção da política proposta difere de outras políticas oportunistas que definem períodos de manutenção com limites, desde a abertura da janela de oportunidade (t) até a substituição preventiva programada de b (T_p).

No sistema de duas partes com dependência funcional, o componente a falha com muita frequência e seu modo de falha é representado por uma função de distribuição exponencial. Essa falha frequente dá à equipe de manutenção a oportunidade de fazer manutenção preventiva em b , que possui um modo de falha representado por uma função de distribuição Weibull.

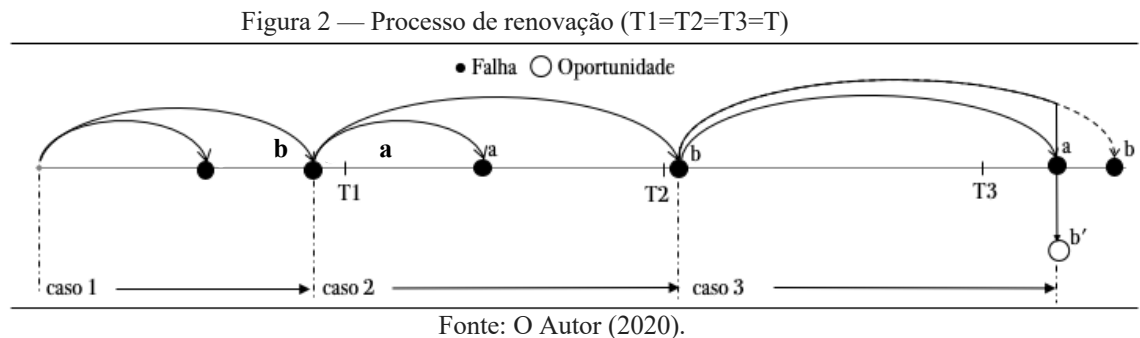
Além disso, as peças são consideradas irreparáveis; por tanto, diante de uma falha, é necessário substituí-las para retornar o sistema ao estado

operacional. Essa substituição deve ser feita usando uma peça idêntica que retorne o sistema à "*tão bom quanto novo*". Isso constitui um ciclo de renovação devido à propriedade sem memória da distribuição de falhas de *a*.

A política de manutenção *piggyback* envolve três casos com base na chegada da falha nos dois componentes. O primeiro é quando a falha de *b* chega antes do ponto de partida da janela de oportunidade e antes da falha de *a*. Nesse caso, o sistema para *b* deve ser substituído corretivamente.

No caso 2, a falha de *b* chega após o ponto de partida da janela de oportunidade (*T*) que tem sido predefinido para a execução da política, mas a falha de *a* chega antes desse ponto. Nesse caso, o sistema para *a* deve ser substituída corretivamente.

Finalmente, no caso 3, a falha de *b* ocorre após o ponto de partida da janela de oportunidade, e a falha de *a* ocorre entre o ponto de partida e a falha de *b*. Esse cenário oferece uma oportunidade de executar manutenção preventiva em *b*, o que permite evitar a falha futura de *b* e evita que o sistema entre em inatividade. A figura 2 mostra os casos 1, 2 e 3, respectivamente.



Considerando os cenários mencionados acima, a política deve ser otimizada para encontrar o ponto de partida da janela de oportunidade (intervalo *T*) que fornece a melhor relação de custo-vida dos componentes.

Na política oportunista adaptada deste estudo, *b* é considerado um componente de alto custo que é complexo para ser substituído após uma falha e, portanto, é considerado um componente crítico. Por esse motivo, a vida útil não utilizada de *b* resultante da manutenção preventiva é penalizada e o custo total do serviço é calculado com base na sua substituição.

O tempo de substituição do componente também é considerado. Essa abordagem tem dois benefícios: primeiro, o tempo de vida das peças pode ser

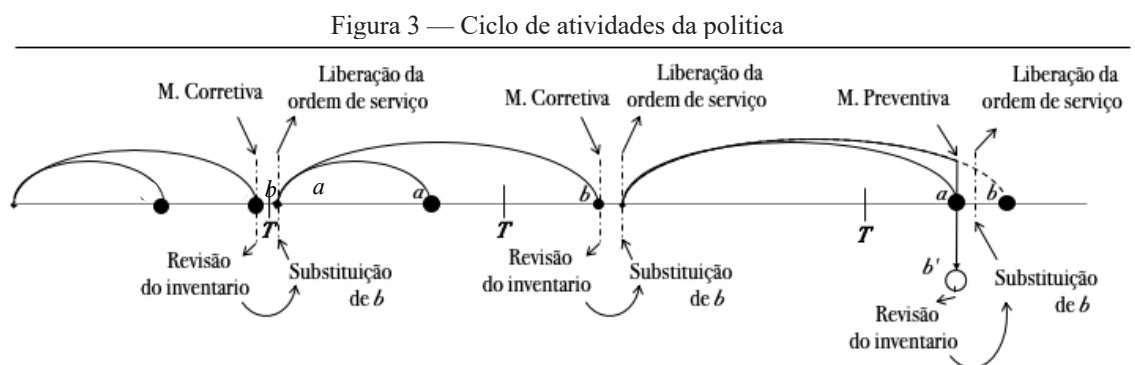
melhor explorado, devido à manutenção contingente das peças, e segundo, as inspeções podem ser evitadas, diminuindo o tempo e o desperdício de dinheiro.

3.2 MODELO DE GESTÃO DE PEÇAS SOBRESSALENTES

O gerenciamento das peças de reposição é baseado em um conjunto de regras e procedimentos que orientam as decisões de estoque, que compõem a política de estoque. No caso de sistemas multicomponentes, a demanda de peças de reposição pela equipe de manutenção se encaixa na definição de demanda independente. Portanto, o sistema de revisão contínua foi adotado como base da política de estoque.

Conforme estabelecido na última seção, a política de inventário é otimizada com base nos requisitos de manutenção de b , portanto o sistema de revisão contínua é aplicado a esse componente.

Consequentemente, o gerenciamento de inventário da parte a pode ser efetivamente tratado separadamente por outros modelos, como o proposto por Almeida, de *et al.* (2015b). Essa abordagem é flexível em relação à diversidade de recursos de controle operacional de peças de reposição, mas, como as falhas de a são muito frequentes, elas não são o objetivo deste estudo. A figura 3 mostra a relação entre a política de manutenção oportunista e o sistema de estoque.



Fonte: O Autor (2020).

A otimização do sistema de inventário geralmente leva a uma série de decisões, que neste caso também são orientadas pelos requisitos de manutenção. Assim, duas das perguntas mais importantes são: (1) quando deve ser o pedido peças de reposição e (2) quantas peças devem ser solicitadas para garantir a operação do sistema a um custo mínimo.

Para responder a essas perguntas, é importante estabelecer algum elemento do contexto da decisão. Primeiro, o nível de estoque (Q) é monitorado após cada manutenção. Conforme mencionado na última seção, a manutenção preventiva em b é realizada como uma oportunidade dada pela falha do componente a . Em seguida, um pedido pode ser liberado sempre que Q atingir um ponto de reabastecimento.

Em segundo lugar, o nível mais alto do inventário é definido como número de peças S e é o número máximo de peças que podem ser armazenadas. A determinação desse número dependerá de espaço de armazenamento, custos de manutenção de estoque, prazo de entrega, entre outros.

Terceiro, o nível mais baixo do estoque é representado pelo número de s -peças. Esse nível é estabelecido para garantir que, se o pedido não chegar logo, o departamento de estoque não enfrente escassez. A determinação dessa quantidade depende da taxa de consumo e do *lead time* de um pedido regular.

Quarto, dois pontos de reabastecimento são permitidos; o primeiro quando Q atinge s e o segundo quando Q atinge o nível de emergência (E) do inventário. Os pedidos liberados nesses pontos são definidos como um pedido regular (R_o) e um pedido de emergência (E_o), respectivamente.

Já o *lead time* é independente da quantidade solicitada, mas depende do tipo de pedido. O pedido regular contém o número de peças necessárias q_{R_o} para ajustar os níveis de estoque e evitar paradas do sistema, com seu prazo de entrega definido como dois dias, sendo este prazo definido pela empresa transportadora para efetuar a entrega quando o tipo do frete é normal.

No entanto, se um pedido regular estiver atrasado ou o tempo de vida útil estimado da peça for menor que o tempo de espera do pedido, também haverá o risco de tempo de inatividade; por esse motivo, é necessário obter uma peça o mais rápido possível. Isso pode ser feito por um pedido de emergência, que contém q_{E_o} peças e cujo prazo de entrega é de um dia a menos do que o pedido regular, mas o custo de envio se ve incrementado.

Sexto, pressupõe-se que a quantidade de peças de reposição encomendadas seja entregue de uma só vez e que as peças não interajam com outras peças.

Considerando as premissas acima, o objetivo desta pesquisa em relação à decisão de estoque é determinar os melhores níveis de estoque por meio de uma análise dos diferentes parâmetros apresentados acima e o melhor custo-benefício.

Depois que os elementos da política de inventário são configurados, o algoritmo das principais decisões de inventário é construído e as condições de seu funcionamento são estabelecidas. Os algoritmos estão organizados em módulos apresentados a seguir.

3.2.1 Módulo para ordenar

Este módulo mostra o procedimento de pedido de peças de reposição. Apresenta as condições necessárias para solicitar um pedido regular. Assim, um pedido regular só pode ser liberado quando o nível de estoque Q atingir o nível mínimo de estoque permitido ou menor que isso. Outro requisito é que outro pedido regular ainda não esteja em andamento.

Portanto, um pedido emergencial pode ser emitido se: outro pedido de emergência ainda não estiver em andamento; e uma ordem regular está em andamento; O nível do inventário Q é igual ou menor que o ponto de reabastecimento de emergência; o número de peças q_{Eo} é pelo menos uma unidade para garantir sua disponibilidade; o ponto de reabastecimento de emergência é menor que s -partes.

3.2.2 Módulo de estado inoperante

Quando uma parte do sistema falha e não há peças sobressalentes disponíveis no inventário para substituí-lo, o sistema entra em tempo de inatividade. Como consequência, é necessário aguardar a chegada de um pedido, para que a operação do sistema possa ser restabelecida. Essas paradas não programadas significam custos mais altos, que são a consequência de entregas atrasadas e clientes insatisfeitos, que podem ter suas necessidades atendidas pelos concorrentes.

Considerando o último, o objetivo deste módulo é avaliar o tempo de inatividade (t_{br}) do sistema, causado pela falta de peças sobressalentes, e determinar os pontos de reabastecimento do inventário, para garantir a disponibilidade do sistema.

3.2.3 Módulo de controle das ordens

Para qualquer modelo desse tipo, é necessário um módulo para verificar as condições necessárias para estocar um item. Identificando as condições para receber cada pedido, seu status e comparando o tempo de envio com o tempo decorrido para estimar o horário de chegada. Se esse tempo for maior que o prazo de entrega, o pedido foi estocado com sucesso. Então, o número de peças disponíveis é aumentado com as respectivas quantidades. O tempo decorrido desde o reabastecimento do pedido que chegou à próxima revisão de estoque é considerado para estimar o custo de manter o pedido no estoque.

3.3 POLÍTICA INTEGRADA

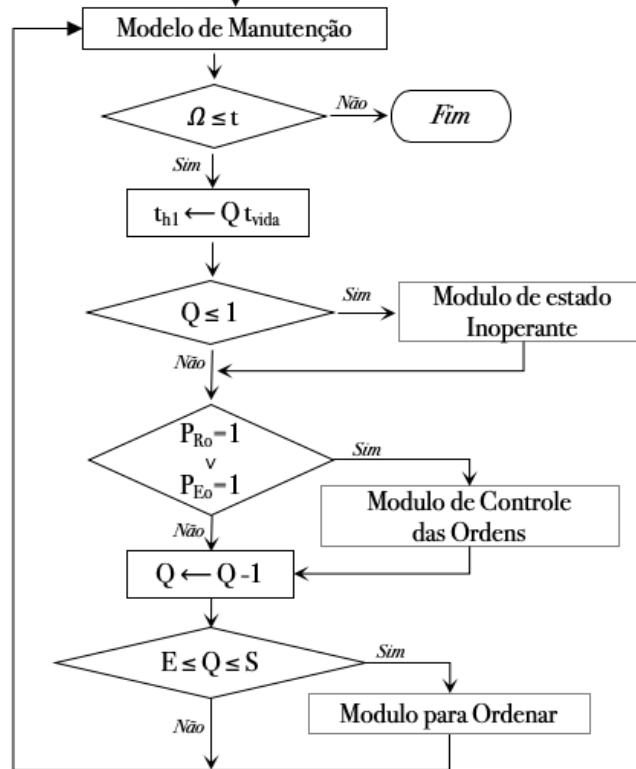
O principal objetivo da integração das políticas de reposição de estoque e peças de reposição é encontrar valores para as variáveis de decisão que ofereçam o menor custo de serviço conjunto, o que, por sua vez, melhora a disponibilidade do sistema. Portanto, a unificação das políticas alcança uma sincronização dinâmica e em tempo real do intervalo T para manutenção preventiva e para os níveis de estoque S e s .

Um fator que se beneficia fortemente da sincronização das duas áreas aqui estudadas é a disponibilidade do sistema; é diretamente afetada pela quantidade de peças de reposição no estoque que, por sua vez, influencia a taxa de falhas e as substituições preventivas. Além disso, a integração permite a redução do número de variáveis que podem dificultar o desenvolvimento normal das ações em cada uma das decisões.

Na figura 4, o modelo de manutenção e o modelo de peças de reposição são integrados e organizados graficamente e logicamente.

Em primeiro lugar, os parâmetros envolvidos nos modelos devem ser definidos juntamente com as variáveis de decisão (T , S , s) e o período t no qual a política deve ser avaliada.

Figura 4 — Fluxograma da política conjunta
 Política Integrada ← Parâmetros de entrada



Fonte: O Autor (2020).

O processo de decisão começa avaliando os tempos de falha das respectivas distribuições de probabilidade das partes a e b. Em seguida, eles são comparados com o intervalo T da manutenção preventiva e, conseqüentemente, o modelo de manutenção é executado (seção 3.1). Dando sequência, os possíveis resultados são avaliados em relação às atividades de manutenção, juntamente com seu impacto no gerenciamento de peças de reposição, antes que uma substituição parcial esteja disponível.

Quando uma substituição é necessária, o modelo de peças de reposição e os módulos mostrados na seção 3.2 começam a operar, configurando assim os possíveis estados do modelo nos quais o sistema será avaliado dependendo do seu comportamento.

Os cálculos são realizados na seguinte sequência: custos relacionados a eventos de manutenção: (i) número de manutenção corretiva e preventiva; (ii) tempo de vida útil da parte perdido devido a manutenção oportunista; (iii) custos relacionados ao estoque: (iv) número de pedidos regulares e de emergência; (v) intervalo em que o inventário carecia de peças de reposição; (iv) intervalo de inatividade do sistema devido à falta de estoque.

O processo é repetido por um período “ t ” para entender o comportamento da variável de decisão, que deve atuar no caso de uma falha e é estabelecida de maneira aleatória. Eles refletem o custo das taxas de serviço integradas, pedidos regulares e de emergência e tempo de inatividade do sistema devido à falta de estoque.

Para atingir o primeiro objetivo, de acordo com os valores estabelecidos para as variáveis de decisão (T , S , s), foi desenvolvido um algoritmo para otimizar as variáveis de decisão em função do custo serviço para as políticas. A ferramenta de busca da variável de decisão é apresentada a seguir.

Algoritmo 1 — Motor de busca

-
- 1: Espaço de busca (T , S , s) e t -período para avaliar são definidos. Para o ciclo inicial, $SC_{joint}^* = inf$.
 - 2: O algoritmo é iniciado para encontrar a possível configuração ótima (T_i , S_i , s_i) para a política.
 - 3: i -valores para os parâmetros da política são definidos.
 - 4: $SC_{joint}^* i$ resultados da política são obtidos.
 - 5: Custo de serviço $-i-$, é comparado com SC_{joint}^* . Por tanto, se ($SC_{joint}^* i < SC_{joint}^*$) a configuração i -provê a melhor alternativa e cujo resultado será $(SC_{joint}^*, T^*, S^*, s^*) \leftarrow (SC_{joint}^* i, T_i^*, S_i^*, s_i^*)$. Por outro lado, o ótimo obtido anteriormente permanece como a melhor alternativa.
 - 6: reinicia ao ponto 2.
 - 7: Resultados $\leftarrow (SC_{joint}^*, T^*, S^*, s^*)$
-

Fonte: O Autor (2020).

3.4 CRITÉRIOS DE DESEMPENHO DA POLÍTICA

O desempenho do modelo conjunto foi avaliado com base em dois fatores principais: o custo total do serviço e a disponibilidade do sistema. Particularmente, o primeiro é composto pelos custos das ações de manutenção e pelo gerenciamento de peças de reposição. Esses fatores são explicados em detalhes.

3.4.1 Custo total de serviço

A seguir são expostos os custos envolvidos na política proposta.

3.4.1.1 Custos produto das ações de manutenção

O custo de manutenção é composto pelo custo das ações de manutenção corretiva e preventiva executadas dentro do período t , bem como pelo custo incorrido pela vida útil não utilizada dos componentes. Particularmente, o custo das ações de falha e manutenção preventiva depende do tempo gasto na execução das ações, t_c e t_p , respectivamente. Representa com precisão a realidade, pois, dependendo do tempo gasto nas ações de manutenção, mais ou menos deve ser

pago aos trabalhadores que aguardam o sistema em operação (c_{op}), maior ou menor pode ser o custo de reparo (c_{re}) e então a perda de produtividade (R_{pr}), que pode ser traduzida em função de custo pela sua taxa de perda de produtividade (c_{pr}).

O tempo gasto na manutenção corretiva t_c é composto por três elementos: o tempo administrativo necessário para organizar os materiais e implantar a equipe de manutenção, o tempo gasto no diagnóstico do problema t_d e o tempo gasto na substituição do t_{rpl} de peças quebradas. Por outro lado, o tempo gasto em manutenção corretiva t_p é composto por t_{rpl} . Adicionalmente, o custo da vida não utilizado (C_{life}) pode ser mensurado através da sua taxa de custo (c_{life}) e a variável que quantifica a vida útil da parte que não foi utilizada devido a uma substituição preventiva (Δ_l).

A expressão matemática para os custos de vida corretiva, preventiva e não utilizada e o custo total do serviço de manutenção são apresentados nas equações 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

$$C_{mc}(t) = t_c \sum_i^t (c_{op} + c_{re} + R_{pr} \cdot c_{pr})_i \quad (1)$$

$$C_{mp}(t) = t_p \sum_i^t (c_{re})_i \quad (2)$$

$$C_{life}(t) = c_{life} \sum_i^t (\Delta_l)_i \quad (3)$$

$$sc_m(t) = C_{mc}(t) + C_{mp}(t) + c_{life}(t) \quad (4)$$

3.4.1.2 Custos derivados das ações da gestão de sobressalentes

O custo de gerenciamento de peças de reposição é incorrido pela configuração do sistema de estoque. Eles são explicados a seguir.

a) Custos relacionados ao encomendar peças de reposição

Esse é o custo do pedido de peças de reposição, que envolve os custos desde a solicitação do pedido até o estoque das peças de reposição. Inclui custos como os relacionados à equipe, aluguel, transporte e revisão de inventário. Além

disso, o custo depende do tipo de pedido solicitado. Se um pedido regular for solicitado, a estrutura de custos estará relacionada às operações e transporte realizados em condições regulares e será cobrada por peça solicitada da seguinte maneira:

$$C_{Ro}(t) = c_{Ro} q_{Ro} \sum_{i=1}^t Ro_i \quad (5)$$

Por outro lado, se uma ordem de emergência for solicitada, a estrutura de custos está relacionada com condições de operação não rotineiras, nas quais o gerente procura aumentar as velocidades de remessa na tentativa de diminuir o tempo de entrega. Este custo é representado por:

$$C_{Eo}(t) = c_{Eo} q_{Eo} \sum_{i=1}^t Eo_i \quad (6)$$

b) Custos referentes ao armazenamento de peças sobressalentes no inventário

O armazenamento de peças de reposição representa custos fixos de capital para as organizações, que poderiam ser investidos de outra forma em atividades que geram lucro imediato. Além disso, alguns custos de armazenamento relacionados a almoxarifado, seguros, taxas, danos materiais ou obsolescência do produto podem ser incorridos enquanto o estoque é mantido. Portanto, para equilibrar o custo de manter peças de reposição no estoque, é importante dimensionar adequadamente a política de estoque.

A expressão matemática para o custo de manutenção de estoque c_h por unidade de peça de reposição é apresentada na Eq. 7.

$$C_H(t) = c_h \sum_{i=1}^t (t_{h1} + t_{h2} + t_{h3})_i \quad (7)$$

c) Custo em decorrência de períodos de falta de peças de reposição

Representa os custos c_{br} associados ao tempo em que o sistema não está operacional devido à falta de peças sobressalentes, quando elas devem ser realmente substituídas. Portanto, t_{br} reflete perdas de produção, tempo ocioso dos trabalhadores, entre outros. O custo das quebras do sistema é apresentado na equação 8

$$C_{Br}(t) = c_{br} \sum_{i=1}^t (t_{br})_i \quad (8)$$

A soma dos custos definidos anteriormente compôs o custo de gerenciamento de peças de reposição relacionado à estratégia de estoque, como pode ser visto na Eq. 9.

$$SC_{sp}(t) = C_{Ro}(t) + C_{Eo}(t) + C_H(t) + C_L(t) + C_{Br}(t) \quad (9)$$

Além disso, o custo total do serviço é obtido a partir da integração dos custos de manutenção e estoque no período t , conforme mostrado na Eq. 10.

$$SC(t) = SC_{sp}(t) + SC_m(t) \quad (10)$$

3.4.2 Disponibilidade

Neste estudo, a disponibilidade do sistema foi avaliada com base na abordagem proposta por Barringer (1997). Ele definiu a disponibilidade em termos de quantas vezes o sistema está operacional, usando a seguinte expressão:

$$A = (\text{Operacional}) / (\text{Operacional} + \text{Não operacional}) \quad (12)$$

Para adaptar o conceito anterior à política conjunta de manutenção e estoque, primeiro é necessário entender que o sistema está em estado operacional (ou seja, em tempo de atividade) quando houver peças sobressalentes disponíveis em estoque e quando a peça em funcionamento estiver funcionando devidamente. Assim, a indisponibilidade do sistema pode ser definida como a falta de peças sobressalentes quando um componente está sendo exigido do inventário para realizar uma substituição (ver Eq. 13)

$$U_{joint} = U_m U_{sp} \quad (13)$$

Consequentemente, a indisponibilidade do sistema pode ser calculada como mostrado na Eq. 14:

$$A_{joint} = 1 - U_{joint} \quad (14)$$

3.5 APLICAÇÃO E RESULTADOS DA POLÍTICA

Nesta seção, a política integrada proposta é comparada com uma abordagem sequencial através de um exemplo numérico. Permite avaliar a política conjunta e explorar possíveis vantagens e desvantagens de ambas as abordagens.

3.5.1 Contextualização do caso em estudo

No modelo sequencial, a otimização das decisões de inventário foi feita após a otimização das decisões de manutenção. Em outras palavras, os níveis de estoque (S , s) foram otimizados usando o intervalo ideal de manutenção preventiva (T) que forneceu o menor custo do serviço de manutenção. Ele permite que o modelo sequencial atinja o menor custo de serviço de estoque. Por outro lado, a otimização da política conjunta foi feita otimizando a manutenção e as decisões de inventário ao mesmo tempo, manipulando simultaneamente as três variáveis (T , S , s) para encontrar os melhores custos de serviço.

Os parâmetros de manutenção utilizados e gerenciamento de peças de reposição utilizados para o exemplo numérico foram retirados e adaptados da operação de sistemas sujeitos a intensa degradação de uso, como prensas e máquinas de impressão (Liang, 1985). Os parâmetros principais usados para o exemplo numérico estão detalhados na tabela 2.

Tabela 2 — Parâmetros da simulação

β	η	θ	t_c	t_p	c_m	p_m	E	T_{Ro}	T_{Eo}	Cl	C_{br}	C_h	C_{Ro}	C_{Eo}	q_{Eo}
2.5	120	40	4	2.5	828.56	117.85	0	180	90	5	10	0.5	140	168	2

Fonte: O Autor (2020).

Além dos dados apresentados na tabela 2, S e T foram inicialmente definidas como 15 unidades e 200 dias, respectivamente. Esses valores foram usados como parâmetros de entrada para limitar o ambiente de pesquisa e são os limites para iniciar a otimização de cada política.

3.5.2 Resultados e discussões

O experimento de simulação foi executado por uma busca exaustiva para encontrar o intervalo de serviço e os níveis de estoque que oferecem o menor custo de serviço para cada política. A tabela 3 mostra os resultados após a otimização das políticas conjuntas e sequenciais.

Tabela 3 — Resultados da otimização

Política		SC	T	S	s
Sequencial	Manutenção	49506.02	48.1	-	-
	↓				
	Inventário	27781.50	48.1	7	3
		77287.52	48.1	7	3
Integrada	Manutenção				
	↑				
	Inventário	75233.9	69	6	3

Fonte: O Autor (2020).

Como é possível ver na tabela 3, a otimização da política sequencial estabeleceu o ponto de partida das janelas de oportunidade de manutenção em 48,1 dias e os níveis de estoque em 7 e 3 unidades. Essa configuração gera um custo esperado do serviço de manutenção de \$49.506,02 e um custo esperado do serviço de inventário de \$27.781,50. No final, a política sequencial leva a um custo total de serviço de \$77.287,52.

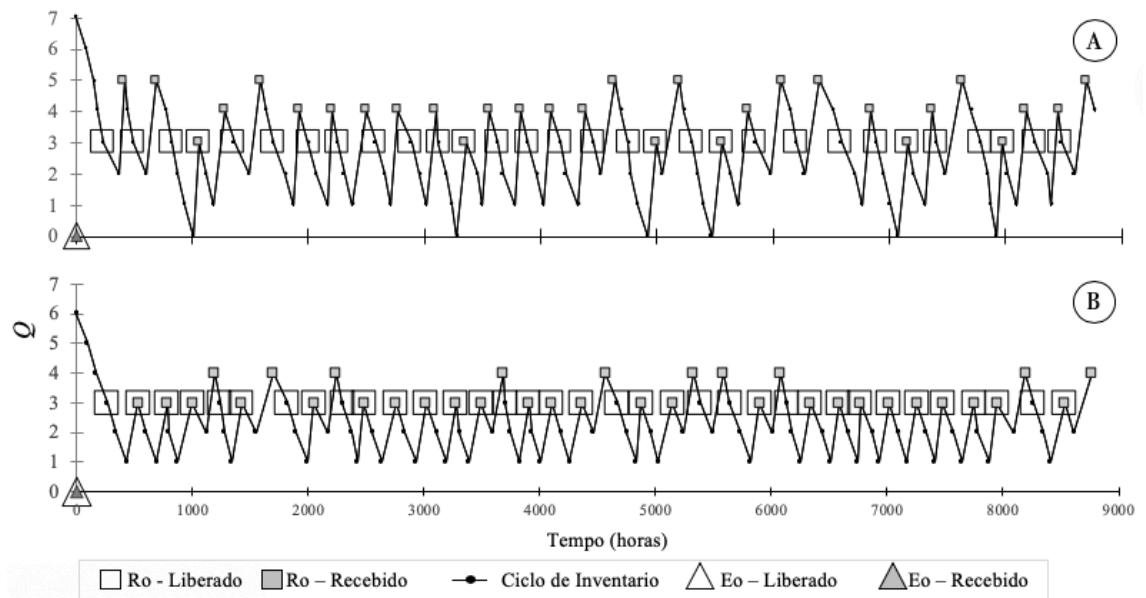
Por outro lado, a otimização da política conjunta estabeleceu o ponto de partida das janelas de oportunidade de manutenção em 69 dias e os níveis de estoque em 6 e 3 unidades, levando a um custo total de serviço esperado de \$75.233,9.

É possível ver que a política conjunta supera a política sequencial em alguns aspectos. Primeiro, o modelo conjunto promoveu uma queda de 2,7% no custo total do serviço em comparação com a política sequencial. É um aspecto importante, pois as indústrias estão tentando reduzir os custos de manutenção, minimizando as operações de interrupção.

Em segundo lugar, o intervalo de manutenção aumentou em 20,9 dias na política conjunta, indicando uma melhor utilização da vida útil dos componentes. Também indica uma melhor utilização da equipe de manutenção, que pode dar suporte à manutenção de outros setores do sistema, em vez de fazer substituições desnecessárias. Por fim, o inventário pode ter uma capacidade menor S ao usar um modelo conjunto, pois as atividades de manutenção exigirão menos peças de reposição. Como consequência, um pedido regular pode ser menor.

Para entender melhor as implicações do uso de uma abordagem ou de outra, o ciclo de inventário de ambas as políticas correspondentes à variável de decisão ideal encontrada no processo de otimização é detalhado por meio de uma amostra de otimização. O ciclo do inventário é apresentado na figura 5.

Figura 5 — Ciclo do inventário sequencial (A) e integrada (B)



Fonte: O Autor (2020).

Na figura 5, é possível ver a variação das peças de reposição no estoque, à medida que surgem interrupções e oportunidades preventivas. As peças de reposição são solicitadas no inventário de acordo com a frequência das ações corretivas e preventivas determinadas por T . À medida que a posição do inventário varia, os níveis de limiar S e s são verificados para decidir se uma emergência ou uma ordem regular é lançada.

A falta de disponibilidade de peças de reposição ao longo de todo o ciclo de estoque configura os diferentes custos que compõem o estoque e os custos de manutenção para a operação do sistema. Esses custos estão detalhados na tabela 4.

Tabela 4 — Informações do inventario

Política	Fal.	Par.	P_b	F_b	C_{Ro}	C_{Eo}	C_H	C_L	C_{br}	SC_m	SC_{sp}	A_m	A_{sp}
	(número)							(\$)				(%)	
Seq.	6	0	69	54	16800	0	9264	1818	0	59290	27880	95.8	100
Int.	0	0	61	46	14700	0	8111	0	0	48980	22810	96.3	100

Fonte: O Autor (2020).

A análise acima mencionada sobre os resultados da otimização de políticas conjuntas e sequenciais será estendida na próxima subseção.

3.6 ANÁLISE DE SENSABILIDADE DA POLÍTICA PROPOSTA

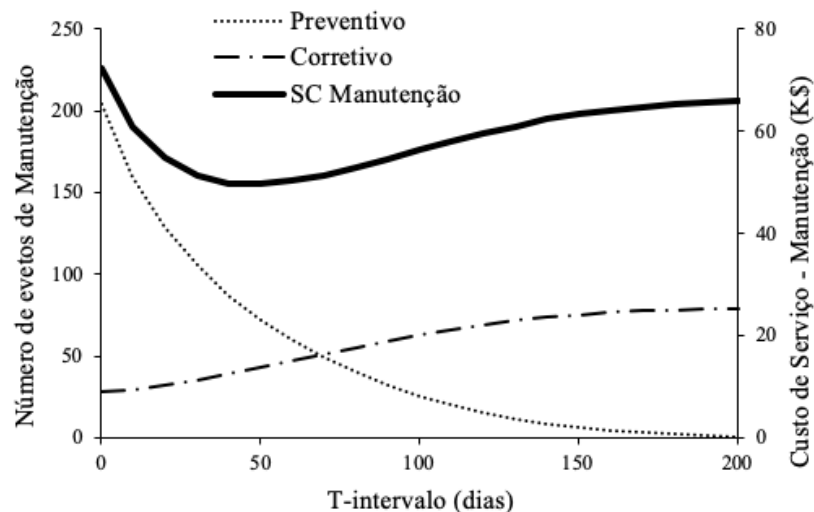
O objetivo desta subseção é mostrar a influência da tomada de decisão em T , S e s sobre a eficácia das operações de inventário e manutenção. Essa análise é necessária para destacar a importância de otimizar essas decisões.

Quando se trata de tomar decisões em conjunto sobre operações de manutenção e estoque, é interessante reconhecer a influência do tempo de abertura das janelas de oportunidade sobre a frequência de ações corretivas e preventivas e, portanto, sobre o custo do serviço de manutenção. Essa relação é explorada na figura 6 usando os níveis ótimos de estoque encontrados.

Na figura 6 é possível deduzir que, quando o gerente define um T baixo, o número de ações preventivas para o componente b é alto. É possível, pois as janelas de oportunidade começam muito em breve, permitindo as falhas de uma chegada após T e muito antes da falha de b .

Em outras palavras, é fácil que a falha do componente a atinja a janela de oportunidade, substituindo b sempre que a falhar. Complementar uma baixa quantidade de ações corretivas para b é executada devido ao fato de que a falha de b ainda está longe. Nesse cenário, o custo do serviço é muito alto, pois a vida útil não pode ser explorada corretamente.

Figura 6 — Desempenho do modelo de manutenção

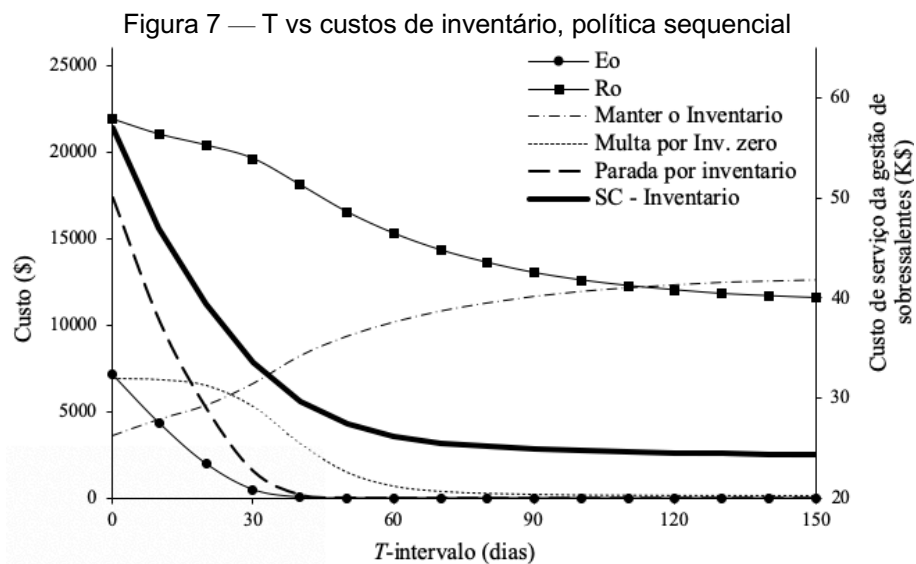


Fonte: O Autor (2020).

Por outro lado, quando os gerentes definem um valor T mais próximo da falha de b , o número de ações preventivas para b diminui consideravelmente. Essas ações preventivas reduzidas são benéficas, uma vez que se aproveitam da vida útil do componente. Complementares, as ações corretivas aumentam um pouco, pois o intervalo é relativamente curto, causando que a falha de a ocorra principalmente imediatamente antes da falha de b , e dando origem a algumas ações corretivas em b . Nesse ponto, o custo mínimo de manutenção ocorre.

Finalmente, quando o gerente define um valor T alto, ele fica extremamente próximo à falha de b e, conseqüentemente, as janelas de oportunidade são muito curtas. Como consequência, b falha muitas vezes antes da falha de a , dando origem a muitas ações corretivas nela. Nesse cenário, o custo do serviço também é alto, pois as oportunidades para a manutenção preventiva em b não existem em termos práticos.

Quando o gerente define um valor para T , também é importante entender o efeito no desempenho da política de inventário. É necessário, uma vez que a frequência de ações preventivas e corretivas ditadas pelo valor T determina quando os níveis de estoque S e s são adequados para atender ou não aos requisitos de peças de reposição. Esta análise é mostrada nas figuras 6 e 7 para o modelo sequencial e integrado, respectivamente, usando os níveis ótimos de estoque encontrados.

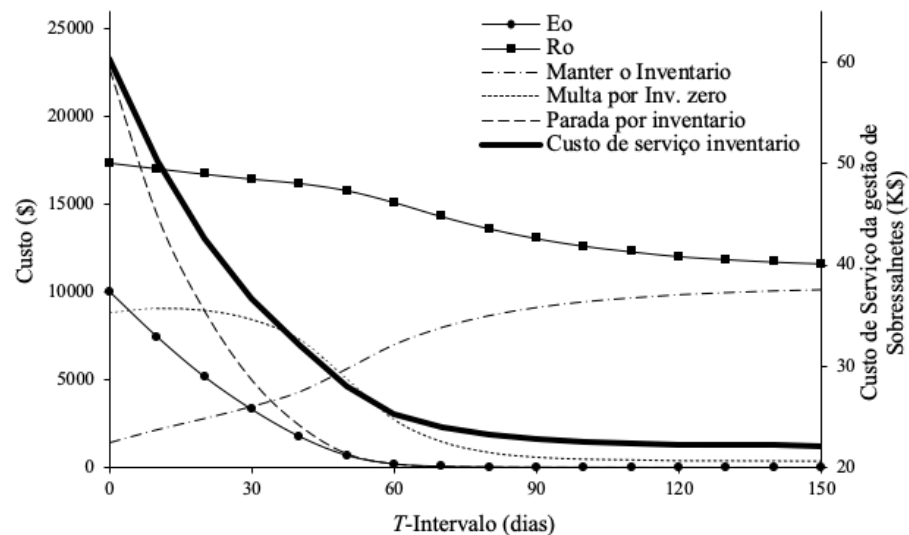


Fonte: O Autor (2020).

Nas figuras 7 e 8, é possível ver que o custo de desagregação, o custo da ordem de emergência e o custo devido à falta de estoque são mais altos para a política conjunta do que para a política sequencial. Esse comportamento de custo é explicado pelas diferenças no nível de estoque, que é reduzido para a política conjunta.

A existência de uma quantidade decrescente de peças de reposição no inventário mostra a necessidade de solicitar mais pedidos de emergência quando necessário, pois o tempo de vida de b é melhor explorada. Também contribui para diminuir a frequência de pedidos regulares.

Figura 8 — T vs custos de inventário *política integrada



Por outro lado, os custos de manutenção e pedidos regulares são mais altos para a política sequencial. Na política sequencial, o número de peças contidas em um pedido regular é maior, levando a um aumento significativo no custo por pedido feito e a uma quantidade maior de peças de reposição a serem mantidas no estoque. No final, a combinação de custos permite que o modelo conjunto ofereça uma solução de baixo custo para a manutenção conjunta e a decisão de estoque.

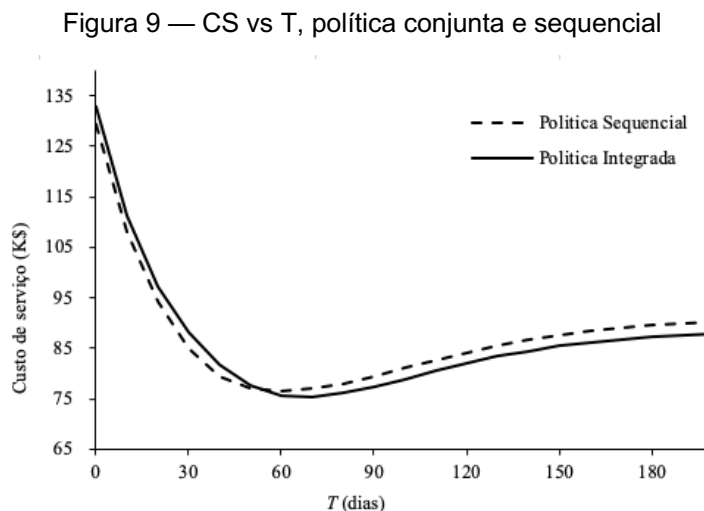
Outra análise que pode ser feita nas figuras 6 e 7 está relacionando o valor T com a frequência das ações corretivas e preventivas e com os custos de inventário para as duas políticas. Quando T aumenta muito, as janelas de oportunidade ficam mais curtas para ambas as políticas e as substituições de b tornam-se corretivas gradualmente.

Portanto, o tempo de substituição de b se torna constante, dissipando a eficácia da manutenção preventiva oportunista. Quando isso ocorre, menos peças sobressalentes de b são necessárias para ações preventivas, pois a vida útil dela é completamente destruída. Como consequência, tende a falhar antes de a . Quando menos partes de b são necessárias no inventário, menos pedidos regulares e emergenciais são necessários e, portanto, os custos relacionados a esses pedidos e o custo de quebras são diminuídos. Além disso, o custo de manutenção aumenta desde que as peças de reposição permaneçam mais tempo no estoque devido à vida útil completamente explorada do componente b .

A partir da análise mencionada, parece que quanto maior T , menor o custo de estoque para ambas as políticas. Pode sugerir que é preferível um T mais alto, pois permite que o sistema solicite menos quantidade de peças de reposição a um baixo custo de estoque. No entanto, não é conveniente para a política de manutenção, que pode sofrer alta quantidade de ações corretivas e, portanto, altos custos corretivos. Por isso, é conveniente analisar o custo total do serviço, que inclui o estoque e os custos de manutenção. A figura 9 mostra a relação entre T e o custo total do serviço.

Como pode ser observado na figura 9, o custo total do serviço para as abordagens conjunta e sequencial diminui rapidamente quando T aumenta até 60 dias, aproximadamente. Nesse ponto, o custo total mínimo do serviço ocorre, onde a política conjunta tem um desempenho superior à política sequencial. Depois disso, os custos do serviço aumentam um pouco.

Também é possível ver que o custo total do serviço é um pouco diferente quando as políticas são comparadas através de toda a faixa de valores T . Essa diferença é caracterizada principalmente pela combinação de diferentes níveis de estoque e tempo de abertura de oportunidades de manutenção, como resultado da eficácia de cada abordagem.



Fonte: O Autor (2020).

Quando T adota um valor abaixo de T -ótimo para ambas as políticas, mais substituições preventivas são feitas desnecessariamente, sem explorar a vida útil de b . Como consequência, o custo de manutenção é aumentado.

Por outro lado, uma grande quantidade de substituições preventivas desnecessárias demanda muitas peças de reposição do estoque, aumentando o risco de falta de peças de reposição, a necessidade de solicitar pedidos mais emergenciais e regulares, além de aumentar o tempo de inatividade do sistema.

Como consequência, o custo do estoque aumenta. Tendo um aumento no custo de manutenção e estoque, aumenta-se o custo total do serviço. Esse custo é muito alto no início, porque os dois custos aumentam simultaneamente.

Por outro lado, se o T adotado estiver acima do T -ótimo, teremos menos ações preventivas para b , mas, como mencionado anteriormente, a oportunidade surge muito próxima da falha de b , portanto muitas vezes falha antes da falha de a , aumentando o número de ações corretivas e, em seguida, o custo de manutenção.

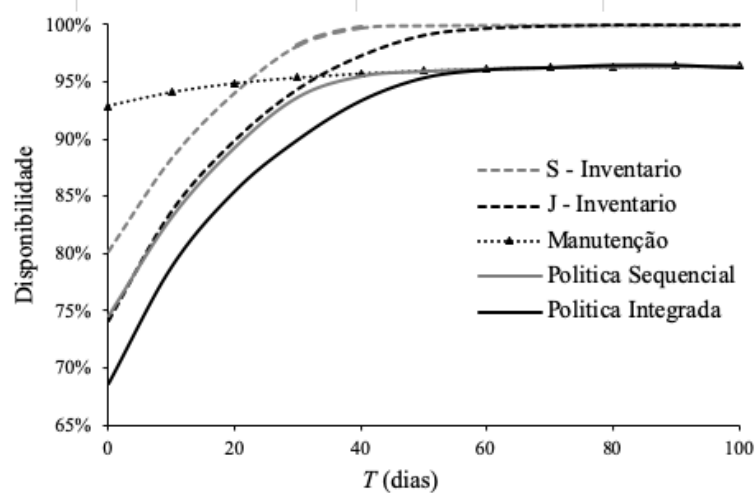
Como também, à medida que T aumenta em relação ao T ideal, a quantidade de peças de reposição necessárias para b diminui, porque o tempo de vida útil consumido por b , o que diminui a frequência de pedidos regulares de emergência e solicitações, bem como o risco de falta de peças sobressalentes e o tempo de inatividade do sistema.

Igualmente, o custo do estoque diminui, isso explica o pequeno aumento no custo total do serviço, uma vez que apenas o custo de manutenção aumenta após o T -ótimo.

Além disso, a política integrada apresenta um custo total mais baixo em relação à abordagem sequencial em seus respectivos aspectos T -ótimo. Isso pode ser explicado por um equilíbrio entre o estoque e o custo de manutenção.

No entanto, o valor ótimo de T é o valor que permite reduzir as ações preventivas para um número que aproveite adequadamente a vida útil do componente b , sem permitir a ocorrência de muitas futuras falhas. Já o último implica que há um equilíbrio entre as substituições preventiva e corretiva de b e as ações de manutenção incorridas por este plano de manutenção são suportadas com sucesso por S e s , que determinam uma frequência adequada de pedidos de peças de reposição, evitando assim a falta de peças de reposição.

Figura 10 — Disponibilidade



Fonte: O Autor (2020).

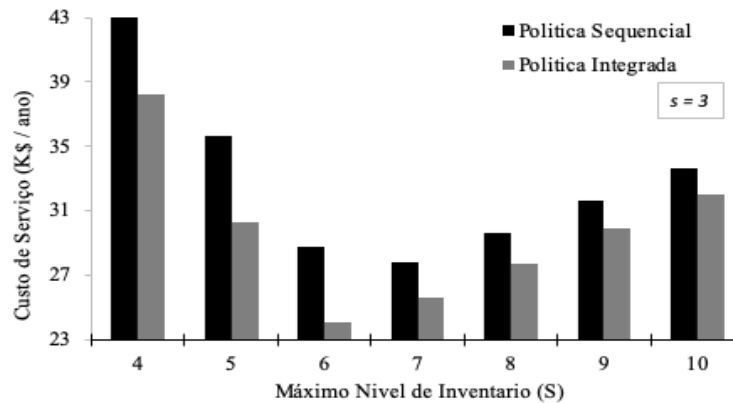
Uma quantidade adequada de ações preventivas e uma quantidade reduzida de substituições corretivas em b levam a um baixo custo de manutenção e também a uma diminuição na retenção dos custos de solicitação de pedidos regulares, que por sua vez diminuem o custo total do estoque.

Outro fator que explica o custo mínimo de serviço no ponto T -ótimo para a política integrada é a ausência de tempo de inatividade causado pela falta de estoque, o que resulta no uso mínimo de pedidos de emergência. Também pode ser traduzido em uma maior disponibilidade do sistema, como mostra a figura 10.

Além da decisão sobre T , também é importante analisar a influência dos níveis de estoque S e s sobre o custo do serviço. Essa análise é mostrada na figura 10.

Pode-se inferir, com base na figura 11, que um aumento no nível máximo de estoque implica uma rápida diminuição no custo do serviço, até 6 e 7 unidades para a política conjunta e a política sequencial, respectivamente. Nesses pontos, o custo do serviço atinge o valor mínimo para as duas políticas. Depois disso, o custo do serviço aumenta um pouco. Como é possível ver, o custo do serviço é sempre menor para a política conjunta para diferentes valores do máximo nível de inventário.

Figura 11 — Estoque vs CS, política integrada e sequencial



Se S for menor que os valores ótimos, o custo do serviço das políticas tende a aumentar, esse comportamento pode ser explicado porque a quantidade de peças de reposição não é suficiente para executar o número de ações preventivas e as falhas de b , conforme determinado pelo tempo T .

Além disso, níveis baixos de estoque podem levar a um aumento nos pedidos de emergência, nos pedidos regulares, no custo da falta de estoque e no tempo de inatividade do sistema e como consequência, o custo do estoque é aumentado.

Por outro lado, se S for maior que os valores ótimos, o custo do serviço das políticas tende a aumentar, o que explica o porquê a quantidade de peças de reposição excede a quantidade necessária para executar as ações de manutenção e, portanto, o custo de manutenção aumenta, o que, por sua vez, aumenta o custo de estoque.

A análise mencionada acima demonstra a importância de não apenas otimizar decisões como T , S e s para melhorar a relação custo-benefício e a disponibilidade das operações, mas também tomar essas decisões usando uma abordagem conjunta.

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Como pode ser visto nos resultados, este capítulo contribui para sincronizar as áreas de manutenção e estoque, trazendo benefícios globais para as organizações. Particularmente, contribui para reduzir as interrupções causadas pela falta de estoque e melhorar a disponibilidade do sistema, garantindo a

confiabilidade das operações. Em outras palavras, o proposto promove um equilíbrio entre os custos de estoque e manutenção.

Além disso, usando técnicas de simulação para comparar a operação do sistema sob diferentes condições e políticas operacionais pode-se obter uma compreensão profunda do contexto da decisão. Ele pode promover um processo de aprendizado que pode ajudar a desenvolver soluções de gerenciamento mais eficientes.

O problema é estudado considerando alguns critérios complementares que tornam o modelo proposto mais realista. Esses elementos incluem a frequência do pedido de peças de reposição e o tempo de inatividade do sistema devido à falta de estoque. Esses elementos vinculam diretamente as decisões de inventário ao desempenho da manutenção e, portanto, ao desempenho do sistema.

A seguir, o capítulo seguinte aborda uma das problemáticas na gestão de sobressalentes, quando o inventário possui dificuldades de reabastecimento, principalmente, em sistemas multicomponentes atuando em áreas de difícil acesso como parques eólicos, instalados em mar aberto.

Além disso, as turbinas eólicas que compõem os parques eólicos requerem componentes que, por sua complexidade estrutural, sua fabricação é feita por poucas companhias, da mesma forma que o seu transporte. Portanto, estes devem ser encomendados com um grande intervalo de tempo antes de sua requisição pela manutenção.

Assim, a próxima política propõe uma estratégia para o racionamento de peças sobressalentes com o intuito de otimizar seu inventário com base nas ordens de serviço resultantes da estratégia de manutenção em um parque eólico instalado em alto mar (*offshore*). Esta última, envolve condições de segurança e de produção atreladas à velocidade do vento.

A proposta visa atender a maior quantidade de ordens de serviço com a equipe própria, e terceirizar as unidades que, pelo estoque limitado, tornam-se inviáveis os atendimentos.

4 POLÍTICA DE PLANEJAMENTO DE ORDENS DE MANUTENÇÃO PARA PARQUES EÓLICOS INSTALADOS EM ALTO MAR COM BASE EM UMA ABORDAGEM DE RACIONAMENTO DE PEÇAS DE REPOSIÇÃO

A política de manutenção determina as condições operacionais, a frequência e o tipo de ações de manutenção e, portanto, as peças de reposição necessárias para executar essas ações. Essas informações são usadas para racionalizar o estoque e decidir como a demanda deve ser dividida entre a equipe de manutenção interna e a empresa terceirizada. A seguir, são explicadas a política de manutenção oportunista, as regras para o racionamento do estoque disponível e o algoritmo que simulou a operação do parque eólico *offshore* e o procedimento de otimização do planejamento da ordem de manutenção.

Tabela 5 — Notações do capítulo 4

Notação	Definição
M	Número de turbinas no parque eólico
K	Número de subcomponentes instalados
tp_k	Idade de substituição preventiva
C_p	Custo de substituição preventiva
C_f	Custo de substituição corretiva
C_{crew}	Custo fixo por enviar a equipe de manutenção
C_{access}	Custo fixo de acesso á turbina
SC	Custo de serviço de manutenção
$U(t)$	Velocidade do vento no tempo t
$TA_{k,m}$	Tempo absoluto de falha do subcomponente k na turbina m
$Age_{k,m}$	Idade do subcomponente k na turbina m
D_k	Demanda do subcomponente k
$d_{k,m}$	Demanda do subcomponente k na turbina m
I_k	Nível de inventario
q	Inventario remanescente
e_k	Grau de comprometimento do inventario para o subcomponente de tipo k
E_m	Grau de comprometimento do inventario da ordem da turbina m
Cr_m	Nível de criticidade da ordem gerada pela turbina m
OFR	Taxa de cumprimento das ordens

Fonte: O Autor (2020).

4.1 MODELO DE MANUTENÇÃO BASEADO EM OPORTUNIDADE

As condições necessárias para a manutenção dos ativos dos parques eólicos serão apresentadas nesta subseção. No entanto, a política aqui apresentada é orientada apenas para componentes de turbinas, e não para outros

ativos do sistema de geração, como componentes que compõem estruturas de suporte, subestações ou sistemas de transmissão elétrica.

O contexto de decisão da operação de manutenção em parques eólicos é definido com base nas seguintes características: 1) o parque eólico é composto por um conjunto de M turbinas, cada uma possui o mesmo número e tipo de componentes; 2) os componentes possuem dependência funcional, significa que, se um componente falhar, a turbina para; 3) o parque eólico possui determinadas condições climáticas, dependendo da sua posição geográfica, que determinam um perfil específico de velocidade do vento e influencia a taxa de produção de energia; 4) as turbinas só podem gerar energia em um certo umbral de velocidade do vento, e ele pode operar em condições seguras acima de um certo corte de velocidade do vento; essas condições operacionais determinam a vida útil dos componentes e, portanto, permitem ao departamento de manutenção definir o melhor tempo de substituição para cada um dos K componentes da turbina.

Considerando o contexto do problema, a estratégia de manutenção é composta pelas seguintes condições: 1) toda vez que uma turbina falha, é avaliada a idade dos componentes que não falham; 2) uma turbina eólica com falha é adequada para ser acessada pela equipe de manutenção se existem pelo menos outras quatro turbinas com falha, este número visando atingir a máxima capacidade do navio no transporte de turbinas (para acumular ações e diminuir o custo total de serviço); 3) quando cinco turbinas falham, os componentes que originam a falha das turbinas são substituídos corretivamente e os componentes sem falha são substituídos preventivamente por reparos perfeitos. A idade do componente k atinge o limiar de substituição preventiva (t_{pk}) que é considerado o tempo em que o componente usou toda a sua vida útil antes de uma falha futura; 4) uma turbina eólica com falha é adequada para ser acessada se todos os componentes necessários para correção e prevenção estão disponíveis no inventário; caso contrário, o reparo da turbina deve ser terceirizado (essa estratégia permite que os gerentes diminuam o custo total do acesso à turbina); 5) a terceirização de reparo inclui as peças sobressalentes da turbina terceirizada e as ações preventivas e corretivas, se necessário; 6) quando cinco turbinas falham, é necessário garantir que a velocidade do vento $U(t)$ seja menor que 5 m/s para acessar ao parque eólico e iniciar as ações de reparo, 7) caso contrário, é necessário aguardar 5 m/s (ver.

(Carlos *et al.*, 2013)), que é considerada a velocidade do vento de segurança para evitar acidentes durante a operação de manutenção e é superior ao corte; 8) as turbinas em operação podem ser interrompidas para manutenção preventiva somente se houver outras cinco turbinas com falha e alguns componentes do operacional alcançaram t_{pk} .

4.2 MODELO DE RACIONAMENTO DE PARTES DE REPOSIÇÃO

O uso da estratégia de manutenção acima mencionada no parque eólico origina uma lista de peças de reposição necessárias para executar a ação de manutenção corretiva e preventiva em diferentes turbinas. As turbinas com falha exigem peças de reposição para os componentes com falha e para os componentes que atingiram o t_{pk} . Enquanto isso, as turbinas que ainda estão em operação possuem componentes que atingem o t_{pk} . São, portanto, realizados reparos preventivos nestes componentes no mesmo acesso ao parque eólico, como uma forma de oportunidade.

Como o objetivo do modelo é atender o maior número possível de turbinas com o estoque disponível e a baixo custo, é necessário desenvolver uma regra para priorizar pedidos orientados para esses objetivos. Para tanto, considerou-se racionalizar o estoque de peças de reposição disponível, adaptando um critério denominado “crítica dinâmica”, proposto por Jimenez G, Orrego R e Cavalcante (2019).

Este modelo demonstrou oferecer operações de atendimento de pedidos produtivas e orientadas a serviços no ambiente de comércio eletrônico, onde o varejista eletrônico do estoque é limitado e parte da demanda é enviada diretamente para oferecer maiores oportunidades de lucro. Os autores sugeriram usar sua abordagem no campo de manutenção, onde as ações de manutenção poderiam ser assistidas por duas equipes de manutenção em um estoque limitado de peças de reposição.

No contexto de parques eólicos em alto mar (*offshore*), o critério “criticidade dinâmica” funciona como um índice que classifica as ações de manutenção, de acordo com dois fatores: o nível em que as ações de manutenção comprometem a disponibilidade do estoque e o custo das ações de manutenção.

O primeiro está diretamente relacionado à demanda de peças de reposição; portanto, quanto menos peças de reposição forem demandadas por uma turbina, menor será a probabilidade de o estoque ser esgotado para esse tipo de componente. Como consequência, é provável que atenda a um grande número de turbinas que exigem os mesmos componentes.

O segundo fator está relacionado ao custo de execução das ações; portanto, é preferível que as ações caras sejam atendidas pela equipe interna e não pela empresa terceirizada. A razão disso é que, se as ações caras são executadas pela empresa terceirizada, elas se tornam ainda mais caras.

Em resumo, o estoque de peças de reposição deve ser otimizado priorizando pedidos que comprometam menos o estoque e que são dispendiosos. Garante que a equipe interna atenda a mais pedidos e a operação do parque eólico tenha um custo de serviço de manutenção reduzido. As Equações 1, 2 e 3 apresentam as expressões matemáticas para a “criticidade dinâmica” e seus elementos.

$$Cr_m = E_m / Sc_m \quad (1)$$

$$E_m = \sum_{k=1}^n e_k * d_{k,m} \quad (2)$$

O nível em que uma demanda de manutenção de turbina compromete a disponibilidade do estoque é chamado compromisso de estoque (E_m). Depende do grau de comprometimento de cada tipo de item (e_k), que é composto da relação entre a quantidade total de unidades demandadas pelas ordens de manutenção e o estoque total disponível do mesmo tipo de componente. Pode ser entendida como a sensibilidade ou a probabilidade de um tipo específico de componente ser esgotado quando uma unidade é reduzida do inventário. A expressão matemática para e_k é apresentada na equação 3.

$$e_k = \frac{\sum_{m=1}^n d_{k,m}}{I_k} \quad (3)$$

O racionamento de peças de reposição é feito comparando as ordens de manutenção com base em sua criticidade, sendo esta última, a relação do comprometimento da parte do inventário em função do custo da ordem.

Assim, o procedimento para a seleção de ordens a serem atendidas é apresentado da seguinte forma: as ordens de manutenção são organizadas em ordem crescente, de acordo com sua criticidade. Em seguida, o estoque é alocado para a primeira ordem na sequência, que é a ordem que menos compromete o estoque e representa o custo mais alto. Esse pedido é colocado em uma lista chamada G1. Depois disso, o número de peças sobressalentes disponíveis e as ações restantes a serem executadas são atualizadas, a fim de recalcular a criticidade para as demais ordens.

A criticidade varia sempre que o estoque é alocado para uma ordem de manutenção, uma vez que o estoque disponível de cada componente e a demanda de manutenção diminuem e, como consequência, o grau de comprometimento dos componentes e_k varia. Depois que a criticidade é atualizada, uma nova ordem é estabelecida e a ordem menos crítica da nova sequência é a primeira a ser atendida novamente e colocada na lista G1, representado assim por um algoritmo do tipo guloso, o qual fornece melhores resultados comparado à regra de primeiro a chegar, primeiro a ser atendido (FIFO), e a uma regra estática na qual a seleção dos pedidos a serem atendidos é feita uma única vez após a ordenação dos pedidos, para mais informações ver (Jimenez G, Orrego R e Cavalcante, 2019).

Esse processo continua até que a quantidade de peças de reposição solicitadas para algum componente seja maior que a quantidade total disponível de peças de reposição desse componente no estoque. Quando o último ocorre, o pedido é desconsiderado e colocado na lista G2.

O processo continua até que todos os componentes estejam com falta de estoque ou até que toda a demanda seja alocada para uma lista. No final, a demanda é dividida nas listas G1 e G2, que são os pedidos a serem atendidos pela equipe de manutenção interna e pela empresa terceirizada, respectivamente.

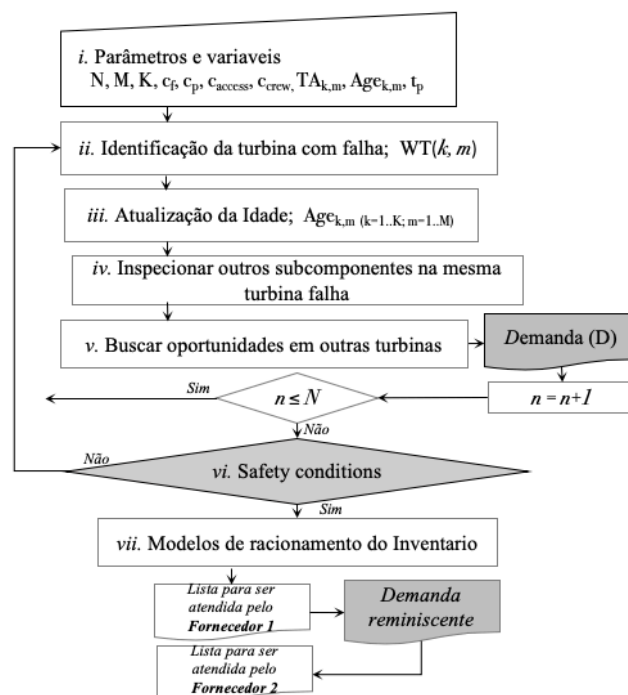
4.3 POLÍTICA DE PLANEJAMENTO DE ORDENS DE SERVIÇO

A política de planejamento da ordem de manutenção verifica as condições de operação do parque eólico, o estado de degradação dos componentes em cada turbina, determina a lista de ações de manutenção a serem executadas em cada turbina e planeja como a demanda deve ser atendida pela equipe de manutenção interna e a empresa terceirizada. É apresentado na figura 12 e explicado passo a passo da seguinte maneira.

a) Parâmetros de entrada

A entrada inclui parâmetros de custo, técnicos e geográficos que caracterizam o contexto de operação e manutenção de parques eólicos. O primeiro é composto pelo custo de manutenção preventivo (c_p) e pelo custo de manutenção corretiva (c_r), incorridos para retornar o estado dos subcomponentes ao estado como em seu uso original. Também inclui o custo de enviar a equipe de manutenção desde terra para o parque eólico (c_{crew}) e o custo de acesso à turbina (c_{access}).

Figura 12 — Planejamento de ordens de manutenção



Fonte: O Autor (2020).

Por outro lado, os parâmetros técnicos são aqueles que caracterizam a configuração do parque eólico e a distribuição de falhas dos K componentes. Os

primeiros são os parâmetros que incluem a geração de energia, como o diâmetro do rotor (R_d), o coeficiente de energia (c_e) e os limiares de velocidade do vento para geração de energia (*cut-in*, *cut-off*). Além disso, inclui o número total de turbinas eólicas (M), o número total de subcomponentes (K) em cada turbina e o número de turbinas falhas (N) necessárias para viabilizar o envio à equipe de manutenção. Para os parâmetros que definem a distribuição de falha, assume-se que a falha do componente segue uma distribuição Weibull, sendo definida por um parâmetro de escala (β) e um parâmetro de forma (α). Finalmente, os parâmetros geográficos são compostos pelo banco de dados de velocidade do vento (Ws) e pela densidade do ar (A_d).

Após a entrada dos parâmetros técnicos, o tempo absoluto e a idade inicial para cada subcomponente são gerados. O tempo absoluto ($TA_{k,m}$) é a vida útil cumulativa dos componentes do tipo k , que é usada para identificar o componente com falha e, ao mesmo tempo, fornece a turbina falha. No início, para o $TA_{k,m}$ são geradas as vidas úteis dos componentes K de cada turbina eólica (WT).

Por outro lado, a idade dos K componentes instalados na m -WT ($Age_{k,m}$) é usada para avaliar o estado do componente e decidir a próxima ação. A idade inicial do componente é gerada assumindo uma distribuição uniforme com o limite 0 e $MTBF_k$. Portanto, cada matriz tem dimensões $K * M$.

b) Identificar a turbina eólica falha

Para identificar a turbina eólica em estado falho, o primeiro passo é detectar o componente com falha que induz a quebra da turbina eólica. Para isso, é necessário encontrar o valor mínimo na matriz TA , que será declarado como o tempo de falha para o WT com falha i . Portanto, a posição ocupada para esse valor na matriz fornece o número de identificação do subcomponente com falha e o WT ao qual ele pertence.

c) Atualizar a idade dos subcomponentes

Depois que os estados do subcomponente são verificados entre a ocorrência de duas falhas da turbina, a idade de cada subcomponente no parque eólico é atualizada em base no tempo entre dois eventos de falha (Δ).

d) Procurando oportunidades na turbina eólica em estado de quebra

Nesta etapa, buscam-se oportunidades entre os subcomponentes da turbina eólica com falha m . Portanto, subcomponentes cuja idade é maior ou igual ao tempo ótimo de substituição preventiva (tp), cumula uma ação preventiva para o componente k na turbina m .

e) Verificando oportunidades em turbinas eólicas operantes

Nesta etapa, outras oportunidades no restante das turbinas são procuradas, usando o mesmo procedimento da etapa *iv*. Se pelo menos um subcomponente for adequado para receber manutenção preventiva, o número de acessos à WT aumentará em uma (1) unidade.

Todas as oportunidades de ações de manutenção preventiva ou corretiva identificadas nas etapas *iii*, *iv* e *v* exigem uma certa quantidade e tipo de peças de reposição. Essas peças de reposição são acumuladas em uma lista de demanda, que especifica os subcomponentes exigidos pelas M turbinas eólicas. Essas informações são fornecidas ao almoxarifado, que deve decidir como as ações de manutenção devem ser atendidas pelas duas equipes.

f) Verifique as condições meteorológicas

A velocidade atual do vento no parque eólico é medida e comparada com a velocidade limite segura do vento recomendada pelos fabricantes. Se a velocidade do vento for menor que 5 m/s (ver. (Carlos *et al.*, 2013)), a lista de demanda estabelecida na etapa *v* é estabelecida como a lista de demanda final a ser planejada. Caso contrário, é necessário esperar até que outra turbina eólica falhe para reavaliar as condições climáticas. Se as condições ambientais forem favoráveis, a demanda atualizada com base na idade atualizada dos componentes e nas novas ações corretivas e preventivas é definida como a lista final de demandas a ser planejada.

g) Planejamento de demanda

Planejar como atender à lista de demanda final (ou seja, quais WT serão atendidos pela equipe interna e quais pela empresa terceirizada), exigem o racionamento do inventário da equipe interna (I). Isso é feito usando o

procedimento detalhado na seção 0.2.2, com base no critério de criticidade dinâmica (Cr).

Os resultados do planejamento da lista de demanda final são duas listas de ações (ou seja, G1 e G2), que são enviadas às equipes de manutenção para execução imediata.

h) Execução de ações de manutenção

O processo de renovação dos componentes envolve a execução de ações de manutenção para as duas equipes, para gerar uma nova vida útil para elas e atualizar o tempo absoluto e a idade. Depois disso, as equipes de manutenção devem esperar até que uma nova lista de demandas chegue.

Uma vez claro o procedimento para executar o planejamento da ordem de manutenção, é necessário entender como avaliar a eficiência do plano.

4.4 CRITÉRIOS DE DESEMPENHO DA POLÍTICA

O principal objetivo da política de planejamento da demanda de manutenção é dividir a demanda entre as duas equipes de manutenção, minimizando o custo do serviço e maximizando o total de pedidos atendidos pela equipe interna. Particularmente, a quantidade total de pedidos que a equipe interna pode atender é uma medida importante para avaliar o nível de serviço da operação de manutenção em parques eólicos offshore.

Quanto mais pedidos os tripulantes puderem atender, maior o controle sobre a operação de manutenção das turbinas e menos provável que os pedidos de manutenção sejam adiados devido a falha da empresa terceirizada. Isto é vital em parques eólicos offshore, pois, como mencionado anteriormente, a falta de peças de reposição tem um grande efeito na produção de energia devido à alta velocidade do vento em alto mar. As expressões matemáticas para o custo total do serviço e as ordens atendidas pela equipe interna são apresentadas a seguir.

4.4.1 Custo total de serviço

O custo total do serviço é composto pelo custo das substituições dos subcomponentes (isto é, corretivas e preventivas), o custo do transporte da tripulação da terra para o parque eólico e vice-versa e o custo do acesso às turbinas. É apresentado na Eq. 4.

$$SC(N) = C_{crew} + \left\{ \sum_1^M N_{access_m} * C_{access} + \sum_1^K (N_{c_{k,m}} * C_{C_k} + N_{p_{k,m}} * C_{p_k}) \right\} \quad (4)$$

4.4.2 Taxa de ordens de manutenção atendidas (OFR)

Por outro lado, a quantidade total de pedidos que a equipe interna pode atender é avaliada por uma medida chamada “OFR (taxa de atendimento das ordens de serviço)”. A qual pode ser definida como a proporção de turbinas em relação ao total de turbinas que precisam ser reparados na lista de demanda final. É apresentado na equação 5.

$$OFR = \frac{(WT_{G1})}{(WT_{G1} + WT_{G2})} \quad (5)$$

O resultado da execução do planejamento da ordem de manutenção é uma quantidade específica de energia produzida, que é a consequência direta das ações de manutenção executadas. Outro parâmetro que poderia ser interessante de analisar é a energia não gerada incorrida devido a paradas em turbinas eólicas. Os custos incorridos por essas medidas são difíceis de serem calculados, pois dependem não apenas das tarefas de manutenção, mas também da previsão da velocidade do vento.

A energia gerada ($P_{w-gerada}$) considerou o número de turbinas operando até a enésima turbina falha (isto é, N) e o período de contribuição. Por outro lado, a potência esperada ($P_{w-esperada}$) é definida como a quantidade de energia gerada quando todas as turbinas eólicas estão funcionando, até a enésima turbina falhar. Consequentemente, a energia não gerada é a diferença entre as duas medidas anteriores.

4.5 APLICAÇÃO E RESULTADOS DA POLÍTICA

A seguir são apresentados os resultados alcançados no desenvolvimento do exemplo numérico.

4.5.1 Contextualização do caso em estudo

Nesta seção, um caso numérico que envolveu um parque eólico com uma equipe de manutenção interna (fornecedor 1) e uma empresa terceirizada (fornecedor2), localizada em uma determinada região, é usado para ilustrar e

comparar a eficácia do planejamento da demanda de ordens de manutenção na política proposta com uma política de base.

O parque eólico usado para ilustrar o desempenho do modelo é integrado por 20 turbinas eólicas (WT) idênticas de 1MW, cujo diâmetro do rotor (Rd) e coeficiente de potência (ce) são iguais a 57 metros e 0,593, respectivamente. Além disso, cada turbina eólica possui 15 subcomponentes (K) instalados. Os parâmetros relativos à distribuição de falhas (Weibull) e ao serviço estão listados na tabela 6 (Ciang, Lee e Bang, 2008)(Zhu e Li, 2018). Além disso, quando as equipes de manutenção são enviadas para o parque eólico, elas são cobradas em \$ 50, e \$ 7 por cada acesso e, o número de turbinas eólicas resultantes com falha que viabiliza o envio da equipe (N) é igual a 5.

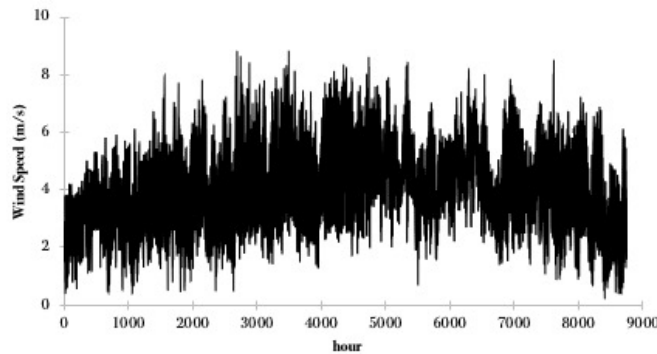
Tabela 6 — Parâmetros do modelo

<i>k</i>	<i>Subcomponente</i>	α	β	c_f	c_p	t_p (h)	cs (\$/h)
1	Pás	2497	2.86	112	48	1950	39.9
2	Rotor	3258	2.76	60	35	3150	18.7
3	Rolamentos de guinada	2422	3.71	152	58	1730	47.5
4	Cabos de força	2812	2.86	100	45	2140	32.8
5	Freio	3507	2.73	120	50	2440	30.6
6	Eixo de baixa velocidade	2322	3.68	125.6	51.4	1610	43.2
7	Caixa de velocidade	2649	2.81	131.2	52.8	1900	43.2
8	Gerador	3059	2.75	136.8	54.2	1930	39.1
9	Controlador	2623	3.55	142.4	55.6	1860	42.9
10	Anemômetro	2448	2.89	148	57	1490	51.4
11	Cata-vento	2962	2.73	153.6	58.4	1970	45.2
12	Eixo de alta velocidade	2338	3.72	159.2	59.8	1670	52.1
13	Unidade de guinada	2697	2.86	164.8	61.2	1830	51.3
14	Motor de guinada	3358	3.13	170.4	62.6	2290	40.5
15	Transformador	2482	3.64	176	64	1680	52.5

Fonte: adaptado de Ciang, Lee e Bang (2008) e Zhu e Li (2018)

O parque eólico está localizado no Nordeste do Brasil. Um banco de dados de velocidade do vento da região foi obtido de hora em hora e medido a 100 metros sobre a superfície (Instituto Nacional de Meteorologia, [s.d.]). É apresentado na Figura 13. Além disso, a densidade média do ar é apontada em 1.223kg / m³ (“Atlas Eólico da Bahia - SECTI - Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação - Governo da Bahia”).

Figura 13 — Base de dados da Velocidade do vento



Fonte: adaptado de Instituto Nacional de Meteorologia, [2019])

4.5.2 Resultados e discussões

Nesta seção, o desempenho da estratégia proposta e uma estratégia comum é comparado através da avaliação da taxa de custo do serviço e da taxa de atendimento de pedidos. Além disso, a taxa de melhoria do OFR e a taxa de economia são usadas para destacar a comparação. Por fim, os efeitos na manutenção e operação são discutidos.

A tabela 6 apresentada na seção 4.5.1 mostra a política ótima baseada na idade para os 15 subcomponentes instalados nas turbinas eólicas. Esses valores foram imediatamente utilizados na estratégia de manutenção do parque eólico para obter a lista de demanda de peças de reposição. Dessa forma, são fornecidos o momento ideal para a substituição preventiva (TP) e a taxa de vida útil da política (custos em 10^3).

Os resultados da estratégia de manutenção do parque eólico em relação à geração de energia e as generalidades da estratégia estão detalhados a seguir: o longo prazo da estratégia de manutenção foi de 545 horas. Durante esse período, os dados de velocidade do vento e a operação do parque eólico foram verificados, portanto, a potência esperada é igual a 1.356 MWh. Além disso, a energia gerada atingiu 1.244 MWh (91,74% P_w esperado), o que significa 111 MWh que não são gerados no parque eólico devido à 5 turbinas eólicas inoperantes durante o ciclo avaliado.

A lista de demanda de peças de reposição é apresentada na tabela 7. Os subcomponentes com falha e os adequados para receber manutenção preventiva em cada WT foram especificados. Essa demanda é a entrada da etapa de racionamento de peças de reposição. No total, 5 WT com falha e 12 WT adequados

para manutenção preventiva integram a demanda de peças de reposição. Finalmente, as turbinas 1, 18 e 19 não precisam de nenhuma intervenção.

Tabela 7 — Lista da demanda
(■ Substituição preventiva & ■ corretiva)

m	Subcomponente de tipo - k															d_m
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2
5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2
6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	2
8	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2
9	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	4
10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
11	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
12	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	6
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	3
14	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
16	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
17	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

Fonte: O Autor (2020).

Posteriormente, por razões de segurança, a velocidade do vento é verificada. Como observado na figura 13, a velocidade do vento para o período final avaliado foi menor que a velocidade recomendada, ou seja, 5 m/s [15]. Nessas condições, é possível enviar a equipe de manutenção para o parque eólico e, portanto, a lista de demanda continua no almoxarifado para executar o modelo de planejamento de demanda de peças de reposição na estratégia proposta e comum.

A estratégia comum prioriza as turbinas eólicas com falha, a fim de alocar o inventário e, em seguida, as turbinas adequadas para a tarefa de manutenção preventiva. A tabela 8 fornece a demanda alocada nos dois fornecedores para cada estratégia em conjunto com os custos que correspondem a cada uma das ordens.

Na estratégia comum para o fornecedor 1, foram designadas treze turbinas. Significa um custo de serviço igual a $\$(1796 + 50 + 7 \times 13) \times 10^3$, executando as tarefas de manutenção, enviando a equipe de manutenção e acessando às turbinas eólicas designadas.

Assim, o percentual de turbinas eólicas atendidas pelo fornecedor 1, em relação ao número total de turbinas a serem atendidas (OFR) atingiu 76,47%. Enquanto isso, o fornecedor 2, empresa terceirizada, possui maior capacidade de estoque e pode atender quatro unidades. Para isso, o custo do serviço é 20% mais caro. Portanto, o custo do serviço é igual a \$ $(1,2 \times (473 + 50 + 7 \times 4) \times 10^3)$.

Tabela 8 — Lista da demanda de planejamento

Fornecedor	Estratégia			
	Críticidade		Comum	
	<i>m</i>	SC	<i>m</i>	SC
1	15	50	12	378
	7	193.8	20	148
	10	54.2	9	240.4
	16	114.2	7	193.8
	5	119.6	16	114.2
	8	103.6	2	115
	12	378	3	62.6
	3	62.6	5	119.6
	20	148	6	58
	9	240.4	8	103.6
	11	158.8	10	54.2
	13	178	11	158.8
	14	122	15	50
	17	58	-	-
	1981.2		1796	
2	4	115	4	115
	2	115	13	178
	6	58	14	122
	-	-	17	58
1.2 x Viagem	288		473	
Acesso	50	7(14)	7(13)	
Total	2560		2598	

Fonte: O Autor (2020).

Por outro lado, analisando a estratégia crítica, pode-se ver que, para o fornecedor 1 um catorze turbinas foram designados. Significa um custo de serviço igual a \$ $(1981,2 + 50 + 7 \times 14) \times 10^3$ e um OFR de 82,35%. Enquanto isso, o fornecedor 2 pode atender a três unidades, portanto, seu custo de serviço é igual a \$ $(1,2 \times (288 + 50 + 7 \times 13) \times 10^3)$.

Como consequência, para a abordagem baseada na criticidade, o custo total do serviço é igual a \$ 2560×10^3 e, para a estratégia comum, é igual a \$ $2598,2 \times 10^3$.

Ao comparar as duas estratégias, a taxa mínima de economia obtida com a estratégia crítica é igual a 1,48% sobre a estratégia comum, o que significa uma economia de aproximadamente \$ 38200. Complementarmente, a melhoria da OFR

é igual a 7,69%. Esses resultados demonstram uma melhor utilização dos recursos de manutenção e operação ao usar a política proposta.

A tabela 9 fornece informações sobre a demanda e o inventário para o fornecedor 1 em cada estratégia. Como pode ser observado, a melhoria da taxa de utilização de inventário é igual a 9,32%.

Tabela 9 — Taxa de utilização de inventario

1	Subcomponente de tipo – k														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Demanda total (D_k)	3	2	7	1	1	1	3	2	2	5	0	3	1	3	2
Inventario total (I_k)	4	3	4	4	5	5	5	5	4	3	5	5	5	4	4
Criticidade															
Demanda atendida pelo fornecedor 1	3	2	4	1	1	1	3	2	2	3	0	3	1	3	2
Inventario residual (q_k)	1	1	0	3	4	4	2	3	2	0	5	2	4	1	2
Taxa de utilização de inventario	0.8	0.7	1.0	0.3	0.2	0.2	0.6	0.4	0.5	1.0	0.0	0.6	0.2	0.8	0.5
															50.77%
Comum															
Demanda atendida pelo fornecedor 1	3	2	4	1	1	1	3	2	2	3	0	2	0	3	1
Inventario residual (q_k)	1	1	0	3	4	4	2	3	2	0	5	3	5	1	3
Taxa de utilização de inventario	0.8	0.7	1.0	0.3	0.2	0.2	0.6	0.4	0.5	1.0	0.0	0.4	0.0	0.8	0.3
															46.44%

Fonte: O Autor (2020).

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Nesta seção, foi proposto um modelo de planejamento de demanda de manutenção de um parque eólico *offshore* que trabalha sob uma estratégia de manutenção oportunista. Os dados de velocidade do vento do Instituto Nacional de Meteorologia - Brasil (INMET) são utilizados para avaliar as condições de segurança de acesso à turbina eólica e, em seguida, realizar a tarefa de manutenção designada.

Tarefas de manutenção assinaladas são o resultado da acumulação de um número N de turbinas eólicas com falha no parque eólico, para oferecer uma oportunidade de executar a manutenção em subcomponentes com falha ou em estado defeituoso apropriados para manutenção preventiva.

Frequentemente, as estratégias de manutenção usadas nos parques eólicos *offshore* assumem que as peças de reposição estão sempre disponíveis; portanto, as políticas de gerenciamento de inventário raramente são investigadas. De fato, esta é uma decisão importante nos parques eólicos *offshore*, que possuem um grande número de turbinas eólicas, e a velocidade do vento é alta. Assim, paradas

de turbinas devido à falta de peças de reposição podem ter uma influência significativa na produção de energia.

Adicionalmente, além da gestão de sobressalentes como visto neste capítulo, a geração de energia e a manutenção nas turbinas eólicas, é comprometida pela velocidade do vento. Por esta razão, no capítulo seguinte será apresentado uma política de manutenção que visa otimizar a geração de energia, utilizando a manutenção oportuna para evitar acessar a turbina de forma recorrente e que, além disso, propõe ações de manutenção em dependência do estado do componente.

5 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO PARA UM PARQUE EÓLICO EM ALTO MAR SUJEITA AO PROGNÓSTICO DO CLIMA

A política proposta é desenvolvida em um parque eólico, cuja abordagem de manutenção tem sido suportada pelas condições climáticas considerando uma mistura das atividades preventivas e corretivas. Assim, em um período semanal, se houver altas velocidades do vento, a equipe de manutenção será ativada unicamente para atividades corretivas e inspeção oportuna em outros componentes na mesma turbina. Caso contrário, a estratégia flexibiliza a equipe de manutenção para fazer inspeções nos componentes das turbinas eólicas cujo cronograma de tempo de inspeção foi alcançado, como também repara aquelas que resultaram em falha.

Tabela 10 — Notações do capítulo 5

M	Número de turbinas no parque eólico
K	Número de componentes na turbina
Q	Porcentagem de redução do tempo de vida por manutenção imperfeita
L	Período entre inspeções da turbina
U	Base de dados da velocidade do vento
$u(t)$	Velocidade do vento no tempo t
v	Velocidade média do vento uma semana a frente
U	Umbraal da velocidade do vento
G	Estado bom do componente
$D1$	Estado defeituoso 1
$D2$	Estado defeituoso 2
F	Estado de falha
PR	Reparo perfeito
IR	Reparo imperfeito
t_i^A	Tempo para realizar a atividade A no componente i
c_i^A	Custo para realizar a atividade A no componente i
$TAD_{i,j}$	Tempo absoluto do defeito
$TAF_{i,j}$	Tempo absoluto da falha
TAl_j	Tempo absoluto da inspeção na turbina
$Age_{i,j}$	Idade do componente i na turbina j
$TLD(i)$	Tempo no estado defeituoso 1
$TLF(i)$	Tempo no estado defeituoso 2
$IP_{n\ i,j}$	Indicador de atividade

Fonte: O Autor (2020)

5.1 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO

Como sinalizado na seção anterior a velocidade do vento é um fator essencial na geração de energia, além disso, desempenha um papel vital no planejamento da manutenção de parques eólicos, especialmente na decisão sobre quando as tarefas de manutenção podem ser realizadas sem afetar a produção.

Portanto, a programação de inspeções é considerada com base na velocidade do vento, a fim de evitar interrupções deliberadas na geração de energia, quando a velocidade do vento obtiver melhores condições para isso. Essa estratégia promove não apenas a continuidade da operação, mas ocorre quando a continuidade da operação tem o maior impacto na geração de energia.

Nesta política, uma base histórica de dados da velocidade do vento para um local do território brasileiro é fornecido por Instituto Nacional de Meteorologia (2019) e usada para conhecer a média simples da velocidade do vento (v) para o período de 168 horas (1 semana) à frente do tempo atual, desconsiderando assim, os períodos de sazonalidade. Em seguida, v é comparado com o valor da velocidade do vento considera como alta (U ; variável de decisão) e assim decidir que tipo de estratégia será adotada na próxima semana. Além disso, é usado para quantificar a potência que não gera em consequência de qualquer evento, quando a velocidade do vento permanece entre o limiar de geração e segurança (*Cut-in & Cut-off*).

Os K componentes da turbina eólica são independentes; portanto, seus estados não interagem. Sobre o processo de falha, cada componente pode estar em um dos quatro estados: Bom (G), Defeito 1 ($D1$), Defeito 2 ($D2$) e falha (F). Todos esses estados são detectados apenas através de uma inspeção.

No entanto, se algum componente estiver no estado F , ele forçará a detenção da turbina eólica. A ocorrência dos estados é sequencial e seu nível de gravidade representa ações mais complicadas para retorná-lo a um estado anterior. Portanto, a ordem dos estados por nível de gravidade é $F > D2 > D1 > G$.

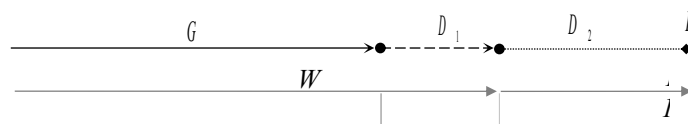
Esses estados ilustram a realidade na área de manutenção, onde cada um deles representa uma demanda de tarefas específicas de manutenção que uma equipe em uma rotina deve executar. Primeiro, o estado G do componente representa a funcionalidade completa; portanto, não precisa de nenhuma tarefa de manutenção.

Por outro lado, o estado D1 representa o surgimento de um defeito menor no elemento, que corresponde a ações mínimas de manutenção (ou seja, lubrificação ou reajustes, aperto), que podem retardar ou interromper a evolução para um estado mais diversos.

Em seguida, o estado D2 significa o ponto em que é obrigatório substituir o componente como um todo para evitar a falha. Finalmente, o componente no estado de falha corresponde à incapacidade de fornecer a função do componente, isto significa que a turbina eólica se torna inoperante e para recuperar a operação, é necessária uma substituição completa do componente com falha.

O tempo de vida dos componentes até a falha é uma soma de variáveis aleatórias, que consistem na permanência de cada estado específico. A Figura 14 ilustra a estrutura do modelo de vida útil para esta política.

Figura 14 — Tempo de vida do componente



Fonte: O Autor (2020).

A distribuição Weibull representa a permanência dos estados G e D1. A permanência do estado D2 é modelada por uma distribuição exponencial com o parâmetro λ . Assim, a permanência de dois estados defeituosos é gerada no componente i com distribuições diferentes

Para o primeiro (Weibull), o componente permanece em bom estado, desde o início de sua vida até o início da segunda parte de sua vida, que é o intervalo de (D1-D2), correspondente a 20% do tempo total ($G + D1$), que corresponde ao tempo de chegada de D2. Consideramos que em D1, chega um defeito mínimo, que corresponde ao primeiro momento em que uma certa anomalia no funcionamento do componente pode ser observada.

O componente no estado D1 pode migrar para D2, se nenhuma tarefa de manutenção for executada. Posteriormente, a permanência no estado D2 é modelada por uma distribuição exponencial. O final desse período corresponde à chegada da falha, o que significa um estado avançado de deterioração, que faz com que o componente não seja capaz de fornecer sua função.

5.1.1 Critério de adoção da estratégia de manutenção

É considerado estado de alta geração quando a velocidade média semanal do vento (v) é maior a variável de decisão (U) sendo esta decisão independente de ações passadas. Portanto, quando a velocidade média do vento para a semana seguinte é maior que U , na estratégia definida para essa semana o atendimento da equipe de manutenção será baseado na detenção de turbinas em estado de falha para agir de forma reativa.

Por outro lado, quando $v < U$, a estratégia flexibiliza o atendimento das turbinas tanto preventiva como corretivamente. Reparando as turbinas com falha e realizando inspeções em turbinas sem falha e cujo período de inspeções (L) esteja sendo atingido visando a ordem de prioridade (quanto maior a diferença de $t - L$, maior a prioridade) seguindo assim o plano de manutenção preventivo até que o recurso de manutenção (tempo) seja esgotado.

As turbinas com falha têm prioridade. Quando não há turbinas com falha e há mais de uma turbina com inspeção vencida, a turbina com o maior tempo desde a última inspeção tem prioridade. Além disso, para efetuar qualquer atividade dentro da turbina a velocidade do vento no instante da intervenção deve ser menor que o limite de segurança.

O tempo para realizar uma atividade de manutenção de tipo A no componente k é t_k^A (horas), cujo custo do serviço é denotado como c_k^A (em K\$). O tempo de execução inclui o tempo para acessar a turbina eólica e contribui para o tempo de avaliação da política.

5.1.2 Plano de inspeção no parque eólico

Como exposto na subseção anterior o plano de inspeção no parque eólico depende da velocidade média do vento uma semana à frente (v) e do limite de velocidade do vento (U) a ser ativado. Portanto, se $v \leq U$, ativa-se o plano de inspeção no parque eólico e repara-se as unidades que entrem em estado inoperante.

Em seguida, e caso o plano de inspeção seja ativado, determinar a turbina eólica adequada para inspeção, o qual depende do seu tempo absoluto de inspeção (TAI) em referência ao tempo atual (t). Portanto, se $t \geq TAI_m$, a turbina

eólica m é adequada para inspeção. Além disso, poderia ter mais de uma turbina adequada, sendo priorizada a mais antiga.

A inspeção é realizada nos K componentes da turbina eólica m , e seus estados revelados; conseqüentemente, uma tarefa de manutenção está relacionada a cada estado, como abaixo:

- Se G , então não faça nada;
- Se $D1$, faça reparo imperfeito (IR) imediatamente e agende um reparo perfeito (PR) para a próxima oportunidade;
- Se $D2$ ou F , então faça reparo perfeito (PR) imediatamente;

Por fim, a atualização para o tempo absoluto de inspeção da turbina eólica m depende do intervalo de inspeção (L) e de sua inspeção atual, visto que sua próxima inspeção deve ocorrer em $L + t$ horas.

O resultado desse modelo é fornecer uma projeção ótima de manutenção sobre a taxa de custo sobre as condições climáticas específicas e determinar o tempo ótimo entre inspeções (L) e o limite médio da velocidade do vento que define a estratégia a ser implementada (U).

Assumimos que uma equipe de manutenção está sempre disponível e permanece no parque eólico; também a velocidade do vento é analisada hora a hora. Além disso, cada abordagem tem uma duração de sete dias e, depois disso, a velocidade média do vento é novamente avaliada para uma nova decisão.

5.2 DESENVOLVIMENTO DA POLÍTICA VIA SIMULAÇÃO

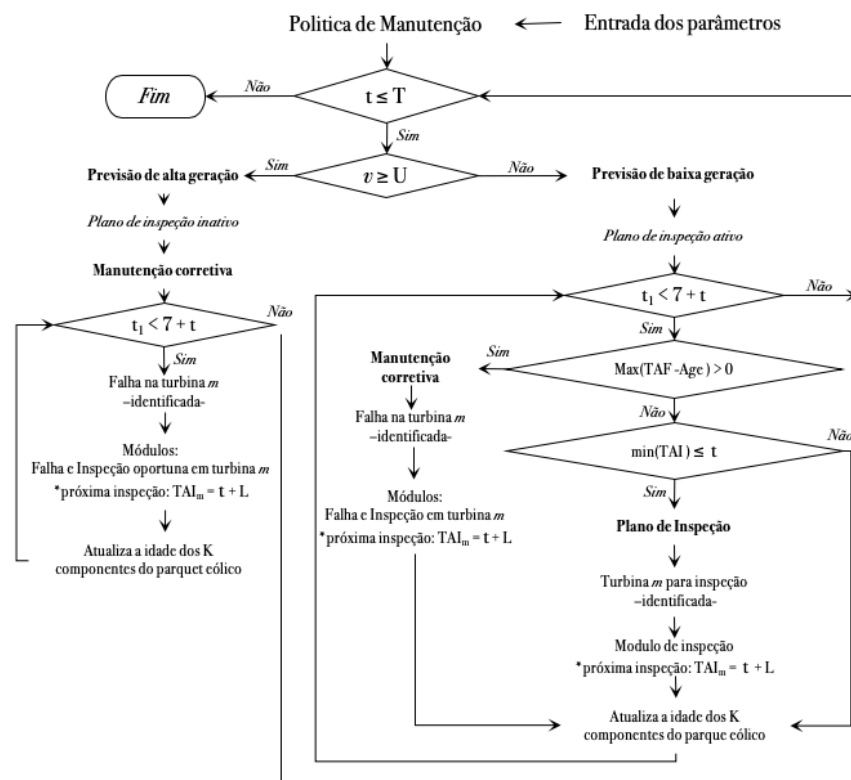
Nesta subseção são comentados os detalhes da política via simulação, explicando-a passo a passo e descrevendo como a manutenção e a velocidade do vento interagem com a geração de energia.

Assim, a modelagem da política de manutenção foi concebida o mais próximo possível da realidade. Portanto, o fluxograma apresentado na figura 15 representa a política de manutenção proposta e cujo conteúdo fornece informações passo a passo para desenvolver esta estratégia. Além disso, as informações contidas no fluxograma simulam os algoritmos 1,2,3,4 e 5 presentes no APENDICE 1 e usados para o desenvolvimento da política, também denominados de módulos.

As duas principais decisões que definem a abordagem de manutenção (U , L) são baseadas principalmente na velocidade média do vento uma semana a frente (v).

Assim, o início da política é definido pela entrada dos parâmetros e das variáveis de controle, além do banco de dados de velocidade do vento hora a hora (u). Em seguida, para conhecer a média da velocidade do vento nos próximos sete dias (v), retiramos do banco de dados e calculamos a média simples para os próximos dias. Em seguida, a decisão sobre o tipo de abordagem de manutenção para a próxima semana (168h) será avaliada em função da previsão de geração para essa semana.

Figura 15 — Fluxograma da política



Fonte: O Autor (2020).

Portanto, na primeira abordagem, na qual a previsão da semana é de *alta geração*, a equipe de manutenção se concentrará apenas na recuperação das turbinas eólicas paradas e, conseqüentemente, aproveitará a oportunidade para inspecionar outros componentes na mesma turbina. Para isto, ele procura pela turbina eólica parada e, em seguida, torna-se necessário encontrar o componente com a maior diferença entre a falha em tempo absoluto e sua idade.

Quando identificada a turbina eólica m , são executados os módulos de inspeção e falha. Em seguida, o tempo de inspeção absoluta e a variável de controle por falha são atualizados. No caso que nenhuma turbina fosse intervinda no tempo de avaliação, o tempo atual e a idade dos componentes serão renovados em uma hora.

Por outro lado, a segunda abordagem de manutenção considerada em períodos que preveem *baixa geração* devido à diminuição da velocidade do vento contempla ativar o plano de inspeções executando as intervenções preventivas nas turbinas eólicas cujo tempo de inspeção tem sido atingido e atender as turbinas eólicas paradas sendo prioritária a atenção corretiva.

De acordo com o plano de inspeção, a turbina eólica indicada para inspeção será aquela cujo tempo absoluto de inspeção (TAI) seja menor dentro do parque eólico e, ao mesmo tempo, seja menor que o tempo atual t .

Posteriormente, a identificação da turbina eólica esta será inspecionada e, o tempo absoluto de inspeção e a variável de controle serão atualizados. Por fim, se nenhuma atividade tiver sido realizada, o período e a idade dos componentes serão atualizados em uma hora.

5.3 CRITÉRIOS DE DESEMPENHO DA POLÍTICA

Para avaliar a política de manutenção, consideramos os fatores envolvidos e que representam os maiores desafios sobre o processo de planejamento. Portanto, os custos derivados das tarefas de manutenção foram medidas e serão desdobrados nesta seção.

5.3.1 Custo total de serviço

A seguir, as variáveis que contribuíram para a taxa de custo da política. Em primeiro lugar o custo de serviço pela indisponibilidade dos ativos (CS_A), o termo devido à falta de disponibilidade de ativos, o qual computa o tempo no qual as turbinas permaneceram inoperantes (t_{off}) com a taxa de custo por indisponibilidade (CA).

Em seguida, o custo de serviço resultante de ações de manutenção de tipo perfeita (CS_{PR}), o qual computa as substituições dos componentes do tipo k em turbina m de forma corretiva ($IP_{3,k,m}$) e preventiva ($IP_{2,k,m}$), multiplicado pela taxa da

ação de manutenção do componente de tipo k (Eq. 1). Por outra parte, o custo de serviço devido as ações de manutenção imperfeita (CS_{IR}) são agrupadas na Eq. 2.

Imediatamente, as variáveis de acesso às turbinas devido a um componente em estado F (FT_m), e pelo acesso seguindo o plano de inspeção (IT_m) são avaliados em razão ao custo de acesso (c_{acesso}) e agrupados no termo (CS_{acesso}) da Eq. 3.

$$CS_{PR} = \sum_m^M \sum_k^K (IP_{3k,m} \cdot c_k^{PR_f} + IP_{2k,m} \cdot c_k^{PR}) \quad (1)$$

$$CS_{IR} = \sum_m^M \sum_k^K IP_{1k,m} \cdot c_k^{IR} \quad (2)$$

$$CS_{acesso} = \sum_m^M (FT_m + IT_m) \cdot c_{acesso} \quad (3)$$

Por último, o custo de serviço da política é expressado como a taxa de custo do custo de serviço em razão do número de turbinas no parque eólico no período de avaliação (Eq. 4).

$$CS_{politica} = \frac{CS_A + CS_{PR} + CS_{IR} + CS_{acesso}}{M \cdot T} \quad (4)$$

5.3.2 Disponibilidade

A indisponibilidade de ativos refere-se ao período de inatividade das turbinas eólicas devido a falhas ou inspeções realizadas. Além disso, cada evento é independente, por isso foi medido isoladamente e agrupado para fornecer as informações dos critérios. A seguir, apontamos a maneira de quantificar cada um: para a tarefa de inspeção, o tempo de inatividade é calculado em base no valor do tempo mais prolongado entre as atividades de manutenção realizadas.

Por outro lado, quando uma falha causa a interrupção, o tempo de inatividade tem duas partes, a primeira é o intervalo entre a falha e o tempo de atenção e, a segunda é o tempo de reparo necessário para recuperar a operação. Por fim, o termo t_{off} contém o tempo total inoperante pelas turbinas eólicas no parque eólico e, T o tempo total de operação. Assim, a disponibilidade de ativos é definida por $A = [(T - t_{off}) / T] \cdot 100\%$.

Em relação à estimativa de potência, a disponibilidade está vinculada ao módulo 2 referente à geração de energia localizado no APENDICE 1 que fornece os procedimentos e as informações para o cálculo da potência esperada (P_E) e a potência não gerada (P_w). Por fim, a disponibilidade de energia (A_w) é definida assim $[(P_E - P_w) / P_E] \cdot 100\%$

5.4 APLICAÇÃO E RESULTADOS DA POLÍTICA

Avaliamos o desempenho da política de manutenção usando um conjunto de valores de variáveis inseridas na literatura científica e algumas informações sobre custo foram adaptadas para refletir a realidade.

5.4.1 Contextualização do caso em estudo

A abordagem deste exemplo é conhecer o comportamento da política em condições, especialmente no território brasileiro. Assim, este exemplo numérico é suportado com dados reais pela organização do governo brasileiro “Instituto Nacional de Meteorologia - INMET” Esta base de dados é usada comumente para avaliar os locais promissores para instalação de parques eólicos e apoio à agricultura.

A turbina do parque eólico, para exemplificar a política, é organizado por 20, 40 e 60 turbinas de 2MW, com limites de velocidade para início de geração e de segurança de 3 e 8 m/s, respectivamente. Além disso, é composta por quatro componentes principais (Rotor, rolamento principal, caixa de engrenagens e gerador). Para cada um dos componentes, valores de custo por atividade, como também a razão custo-tempo tem sido definida. Por outra parte, a restauração da idade por reparo imperfeito é fixada em 30% e a taxa por indisponibilidade (c_{un}) é fixada em 70 K\$/h.

Tabela 11 — Parâmetros dos componentes

Componente - k	α	β	λ	c^{IR}	c^{PR}	c^{PR-f}	C_{acesso}
Rotor	3000	3	0.012	25.8	53	112	32
Rolamento principal	3750	2	0.012	25.4	40	60	
Caixa de engrenagens	2400	3	0.016	26.0	63	152	
Gerador	3300	2	0.013	25.7	50	100	

Fonte: O Autor (2020).

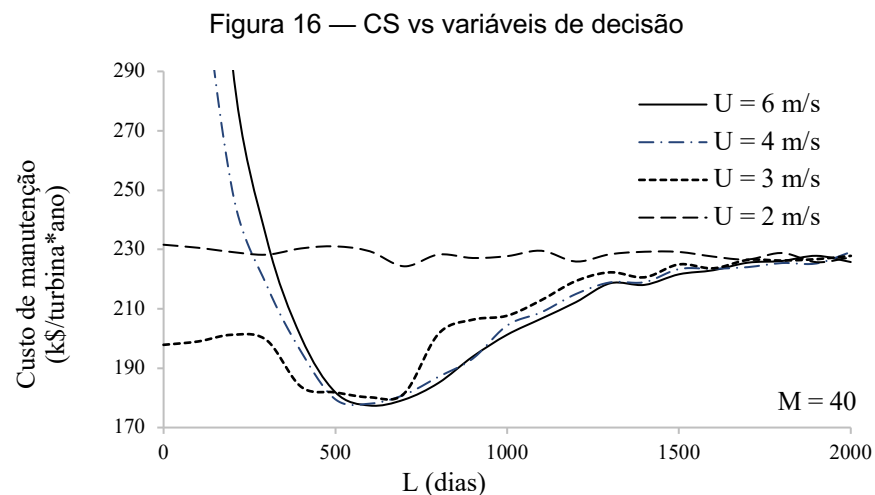
Custo (K\$); tempo (dias); razão 32(K\$/dia)

Por fim, a tabela 11 apresenta os dados sobre a vida útil (DING e TIAN, 2011) e os custos das tarefas de manutenção para 4 componentes.

5.4.2 Resultados e discussões

O comportamento da função objetivo na dependência do limite máximo e mínimo da velocidade do vento para um parque eólico com 40 unidades é fornecido abaixo. As figuras 16 e 17 mostram o comportamento dos critérios, quando as tarefas de manutenção foram executadas na proporção mais significativa em consequência dos componentes com falha ($U = 6$ m/s).

Por outro lado, o limite de velocidade do vento igual a 2 m/s permite executar o plano de inspeções nas turbinas eólicas com um limite igual a L . No início, a figura 16 fornece informações sobre a taxa de custo de manutenção para quatro limiares diferentes de velocidade do vento.

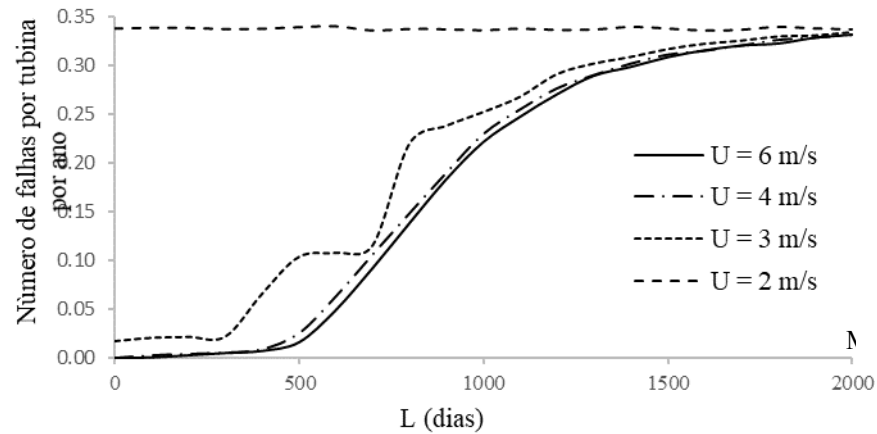


Fonte: O Autor (2020).

Como resultado, ao executar a inspeção programada, o número de falhas por unidade mostrou uma relação direta com o limite de inspeção e, como consequência, fornece menor custo de manutenção do que apenas reagir às

falhas. Por último, pode ser observado na figura 17, que ilustra o funcionamento do número de falhas por turbina por ano, acima do limite de inspeção.

Figura 17 — Taxa de falhas



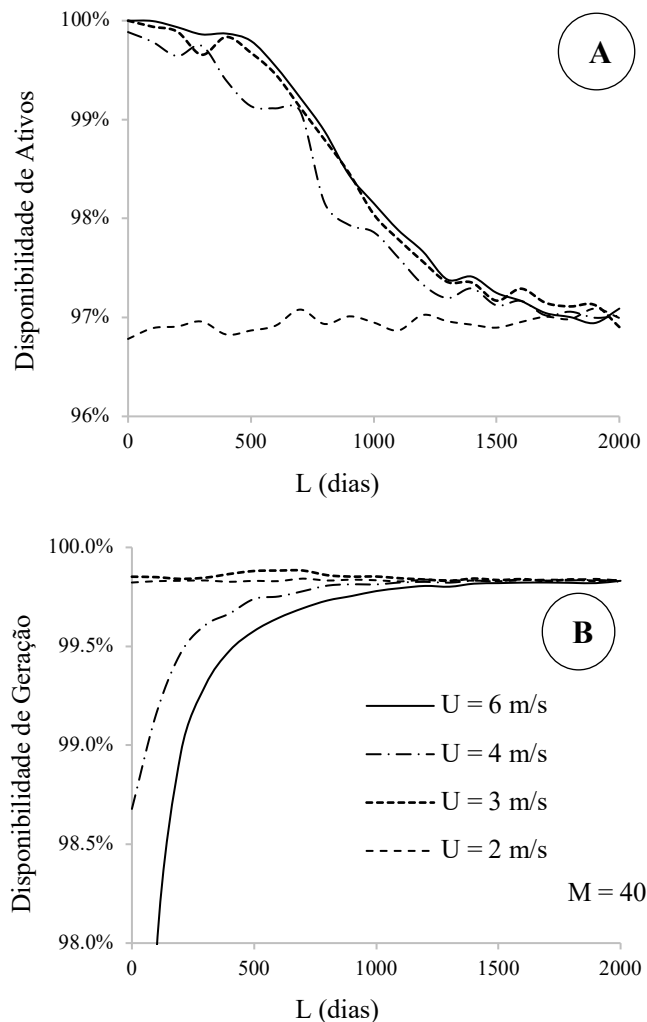
Fonte: O Autor (2020).

Por outro lado, e como é esperado, quando o limite de velocidade do vento é baixo, as atividades de manutenção como resultado da falha permanecerão no mesmo nível, passando pelas opções dos limites de inspeção.

Em consequência, os níveis de disponibilidade respondem ativamente através do limite de inspeção. Portanto, a figura 18-A mostra como a disponibilidade de ativos diminui gradualmente enquanto o limite de inspeção aumenta. Assim, a relação com o crescimento do número de falhas pode explicar seu comportamento.

Por outro lado, o comportamento da disponibilidade de energia (figura 18-B) é aumentado em uma pequena quantidade quando o intervalo médio entre inspeções estabelecidas no plano de inspeção para as turbinas, motiva a frequência excessiva que resulta na diminuição da geração por manter fora de operação a turbina eólica.

Figura 18 — Disponibilidade, tempo (A), energia(B)



Fonte: O Autor (2020).

5.4.2.1 Otimização

Os resultados da otimização são apresentados na tabela 12, cujo critério é baseado na taxa de custo de serviço da manutenção. Portanto, nas linhas 1 e 2 foram mostrados os valores mínimos encontrados sobre as variáveis de decisão U e L .

Como visto na seção anterior, ter intervalo de inspeção significativamente curto resulta em um maior número de inspeções por período avaliado o que aumenta principalmente os custos provenientes de acessar, a execução de manutenções do tipo imperfeito que dão lugar a programação de ações perfeitas e, conseqüentemente, de custos por indisponibilidade.

Tabela 12 — Resultados da otimização

		M		
		20	40	60
1:	Tempo médio entre inspeções L^* (dias)	645	620	610
2:	Velocidade média do vento limite para ativar o plano de inspeção U^* (m/s)	4.7	4.7	4.7
		(turbina/ano)		
3:	Taxa de inspeções	0.573	0.592	0.602
4:	Taxa de falhas	0.067	0.055	0.055
5:	Taxa de reparos imperfeitos	0.439	0.462	0.458
6:	Taxa de reparos perfeitos	0.422	0.444	0.441
		(turbina/ano)		
7:	Taxa de inatividade (dias)	0.827	0.632	0.675
8:	Taxa de energia esperada (GW)	3.568	3.568	3.568
9:	Taxa de energia não gerada (MW)	10.53	11.02	10.61
10:	Taxa de custo de manutenção (K\$)	173.4	173.6	174.0

Fonte: O Autor (2020).

Portanto, a diferença do intervalo de inspeção entre os parques eólicos, fundamenta-se principalmente na necessidade de retornar prontamente para executar atividades de substituição programadas e, assim, evitar que a unidade permaneça inoperante por longos períodos por causa da falha de um dos seus componentes.

Na medida que o número de turbinas que compõem o parque eólico aumenta, torna-se mais requisitada a equipe de manutenção, dificultando o seguimento do plano de inspeção e, por sua vez, a execução das atividades programadas, agindo de forma reativa à falha constantemente.

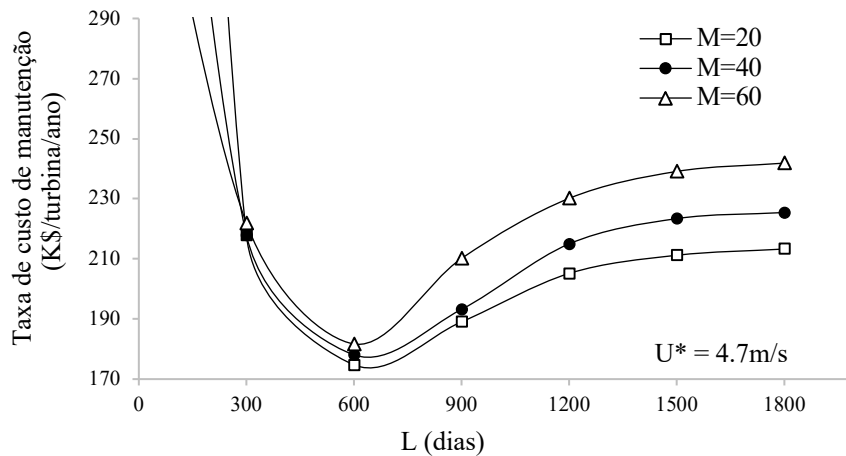
Com relação a velocidade média do vento que limita a ação de plano de inspeção, encontra-se que nos parques eólicos considerados ela permanece constante, indicando que a estratégia da política executando o plano de inspeção para os casos citados retorna maiores ganhos que aquela em que unicamente ações corretivas são consideradas.

Por outra parte, visando entender o impacto que a definição dos intervalos de inspeção nos parques eólicos em avaliação, a figura 19 apresenta o comportamento da taxa de custo de serviço em relação ao intervalo meio entre inspeções para as turbinas, usando a velocidade média obtida na otimização.

É demonstrado assim, que o melhor desempenho desse critério se ajusta aos resultados encontrados na tabela 12, encontrando-se o ótimo próximo a 650 dias. Além disso, intervalos abaixo de 300 dias resultam em taxas de custo

exageradamente altas o que inviabiliza sua utilização, bem como seu incremento acima dos valores ótimos encontrados.

Figura 19 — Taxa de custo de manutenção

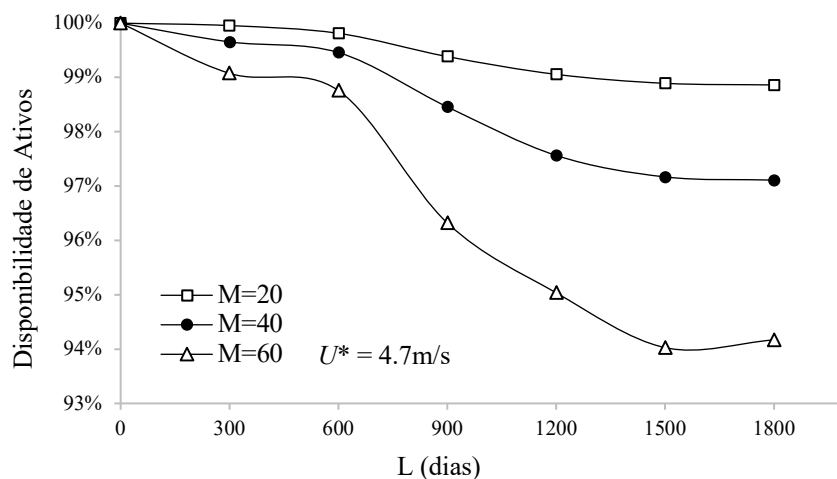


Fonte: O Autor (2020).

Na figura 20, em semelhança à taxa de custo de serviço de manutenção, a disponibilidade dos ativos é avaliada em função do intervalo médio de inspeção das turbinas. Ratificando que o aumento do número de turbinas eólicas nos parques eólicos exige mais esforços, assim como uma quantidade considerável de peças de reposição disponíveis e maior capacidade de reação da equipe de manutenção para atender as falhas e ao plano de inspeção.

Em resposta, um parque eólico é afetado por um número mais significativo de turbinas eólicas em estado de falha e por um tempo de inatividade mais prolongado.

Figura 20 — Disponibilidade baseada no tempo



Fonte: O Autor (2020).

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi proposta uma política de manutenção sujeita à previsão de velocidade do vento para inspeção, execução ou agendamento de ações imperfeitas e perfeitas nos componentes das turbinas eólicas que compõem um parque eólico offshore.

Assim, foi possível estabelecer a relação da velocidade média do vento com a velocidade predefinida para a seleção das estratégias de manutenção e, que administra as ações de reparo. Dessa forma, encontrou-se que a velocidade média que define qual estratégia de manutenção será desenvolvida durante uma semana a frente esteja no valor de 4.7 m/s para cada um dos parques eólicos estudados. Além disso, o intervalo de inspeção é aproximadamente de 600 horas. Também, é possível visualizar que um menor número de turbinas permite que o intervalo de inspeção seja maior sem prejudicar a disponibilidade dos equipamentos.

Por outra parte, após a otimização da política, a velocidade média do vento (U) encontrada é baixa o suficiente para estabelecer com frequência a estratégia de inspeção programada que garante manter as turbinas eólicas em operação.

6 CONCLUSÃO

Visando maior utilização de sistemas de geração elétrica desde fontes renováveis, a manutenção exerce um papel fundamental no que se refere a impulsionar a instalação destas unidades principalmente pela complexidade de seus componentes e o custo da energia gerada por estes, além disso, os benefícios sócio ambientais gerados em locais onde são instalados.

Frequentemente, as estratégias de manutenção assumem que as peças de reposição estão sempre disponíveis, visto que a gestão de sobressalentes é em grande medida desagregada e com isto, as decisões gerenciais também são. Na primeira parte deste trabalho foi desenvolvida uma política integrada de gerenciamento de manutenção e peças de reposição, que permite a otimização integrada das decisões de manutenção e estoque.

O problema é estudado considerando alguns critérios complementares que tornam o modelo proposto mais realista. Esses elementos incluem a frequência do pedido de peças de reposição e o tempo de inatividade do sistema devido à falta de estoque. Esses elementos vinculam diretamente as decisões de inventário ao desempenho da manutenção e, portanto, ao desempenho do sistema.

De fato, esta é uma decisão importante nos parques eólicos offshore, que possuem um grande número de turbinas eólicas, e a velocidade do vento em alto mar é alta. Assim, paradas de turbinas devido à falta de peças de reposição podem ter uma influência significativa na produção de energia. Por conseguinte, uma política de racionamento de inventário visando a demanda de sobressalentes de um parque eólico *offshore* que trabalha sob uma estratégia de manutenção oportunista foi desenvolvido.

O modelo proposto é baseado no critério de criticidade, que considera o nível em que uma ordem de manutenção compromete o estoque e o custo do serviço de manutenção, para racionalizar o estoque disponível. Os dados de velocidade do vento do Instituto Nacional de Meteorologia - Brasil (INMET) são utilizados para avaliar as condições de segurança de acesso à turbina eólica e, em seguida, realizar a tarefa de manutenção designada.

Em seguida, visualizando os efeitos da velocidade do vento tanto para a produção/geração quanto para a manutenção em parques eólicos *offshore*, uma

política de manutenção oportunista em que as ações de manutenção são planejadas em função do estado do componente e baseada no prognóstico da velocidade do vento foi proposta. A política estabelece a velocidade do vento como critério para decidir qual abordagem de manutenção deve ser implementado durante o próximo período.

Exemplos numéricos são fornecidos para ilustrar a funcionalidade, as vantagens econômicas e operacionais das estratégias propostas. Os resultados mostram que políticas que consideram a integração entre as áreas de manutenção e gestão de sobressalentes promovem uma melhor utilização dos recursos e diminuem os custos operacionais. Particularmente, contribui para reduzir as interrupções causadas pela falta de estoque e melhorar a disponibilidade do sistema, garantindo a confiabilidade das operações.

Em outras palavras, o documento promove um equilíbrio entre os custos de estoque e manutenção. Por outro lado, na política de racionamento do inventário, foi constatado que a taxa de economia do custo do serviço é menor para um grande número de turbinas eólicas e oposta à taxa de melhoria, que aumenta seu nível.

Também, a política de manutenção oportunista que considera a velocidade do vento como critério de decisão para o planejamento da manutenção a curto prazo, apresentou como resultado a diminuição da taxa de custo de serviço de manutenção, aumento da disponibilidade dos ativos e maior tempo de operação do sistema, o que se traduz em uma maior geração de energia e, por conseguinte, maior lucratividade para os investidores.

Algumas respostas para estes resultados foram a maior utilização do tempo de vida dos componentes ao propor estratégias com múltiplos estados, como também dois tipos de manutenções em diferentes períodos de acordo com o estado do componente.

Finalmente, pode-se afirmar que as principais contribuições deste documento fomentam a utilização de sistemas para geração elétrica com o uso de recursos renováveis, fornecendo estratégias que permitem uma maior utilização da vida útil dos equipamentos minimizando os efeitos de transporte e disposição final das peças utilizadas que prejudicam o meio ambiente. Igualmente, garante que o serviço de energia elétrica seja ininterrupto, o que proporciona menores

custos repassados ao consumidor final tornando-se competitivo ante os outros métodos de geração de energia elétrica.

6.1 LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Embora este trabalho forneça insights gerenciais interessantes, ele ainda tem algumas limitações. Neste trabalho, o estudo do comportamento da gestão de sobressalentes foi limitado para uma única classe de componentes na qual a reposição do inventário era monitorada e, por isso, em trabalhos futuros o modelo conjunto proposto pode ser adaptado para o estudo de diferentes políticas de manutenção que também podem ser integradas ao gerenciamento de peças de reposição.

Para o gerenciamento de peças, é necessário avaliar diferentes critérios de acordo com a natureza do problema e as preferências do tomador de decisão. Por exemplo, atividades de serviço que devem ser fornecidas aos usuários de forma intermitente e não permitem o armazenamento de produtos, tornando a disponibilidade um critério essencial. Por outro lado, em setores que lidam com a distribuição de produtos para os quais o armazenamento é permitido e as interrupções não causariam grandes contratempos. Assim, o custo do serviço de estoque se torna o critério essencial.

Também, a estrutura alvo de manutenção proposta foi desenvolvida para manutenção em componentes de turbinas, mas também pode incluir outros elementos do sistema offshore, como estrutura de suporte, subestações e sistema de transmissão elétrica. Igualmente, estas políticas podem ser utilizadas para qualquer outro sistema no qual a falha de um dos seus componentes forneça a oportunidade de manter preventivamente outros. Assim mesmo, além de utilizar algoritmos do tipo guloso como aquele usado no capítulo 4, podem ser explorados outros os quais garantam a busca de máximos globais.

Por último, quando estudado o racionamento de peças sobressalentes, o modelo não considera o reabastecimento dos itens, portanto, recomenda-se estendê-lo desenvolvendo conjuntamente políticas de reabastecimento de estoque, juntamente com o racionamento proposto. Além disso, a otimização da política de manutenção pode ser integrada.

REFERÊNCIAS

- ALASWAD, S.; XIANG, Y. A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 157, p. 54–63, jan. 2017.
- ALENCAR, D. B. DE *et al.* Different Models for Forecasting Wind Power Generation: Case Study. **Energies**, v. 10, n. 12, 2017.
- ALMEIDA, A. T. DE *et al.* Spare Parts Planning Decisions. *In: International Series in Operations Research and Management Science*. New York: Springer, Cham, 2015. v. 231, p. 273–296.
- ALRABGHI, A.; TIWARI, A. A novel approach for modelling complex maintenance systems using discrete event simulation. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 154, p. 160–170, 2016.
- ARABIAN-HOSEYNABADI, H.; ORAEE, H.; TAVNER, P. J. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind turbines. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 32, n. 7, p. 817–824, 1 set. 2010.
- ARDENTE, F. *et al.* Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 1, p. 200–217, 1 jan. 2008.
- ATASHGAR, K.; ABDOLLAHZADEH, H. Reliability optimization of wind farms considering redundancy and opportunistic maintenance strategy. **Energy Conversion and Management**, v. 112, p. 445–458, 2016.
- BAHIA. Governo do Estado. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação. **Atlas Eólico da Bahia**. Salvador: SECTI, 2019. Disponível em: <http://www.secti.ba.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=20>. Acesso em: 28 ago. 2019.
- BARRINGER, H. P. **Availability, reliability, maintainability, and capability**. 1997.
- BASTEN, R. J. I.; HOUTUM, G. J. VAN. System-oriented inventory models for spare parts. **Surveys in Operations Research and Management Science**, v. 19, n. 1, p. 34–55, 1 jan. 2014.
- BERTO, R. M. V. S., & NAKANO, D. N. Metodologia de pesquisa e a engenharia de produção. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 1988, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ENEP, 1998.
- BESNARD, F. *et al.* **An optimization framework for opportunistic maintenance of offshore wind power system**. 2009 IEEE Bucharest PowerTech. **Anais...IEEE**, jun. 2009. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5281868/>. Acesso em: 28 ago. 2019.
- BILGILI, M.; YASAR, A.; SIMSEK, E. Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 2, p. 905–915, 1 fev. 2011.
- BOUSLAH, B.; GHARBI, A.; PELLERIN, R. Joint production, quality and maintenance control of a two-machine line subject to operation-dependent and

quality-dependent failures. **International Journal of Production Economics**, v. 195, p. 210–226, 1 jan. 2018.

CARLOS, S. *et al.* Onshore wind farms maintenance optimization using a stochastic model. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 57, n. 7–8, p. 1884–1890, 1 abr. 2013.

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.

CIANG, C. C.; LEE, J.-R.; BANG, H.-J. Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods. **Measurement Science and Technology**, v. 19, n. 12, p. 122001, 1 dez. 2008.

CONROY, N.; DEANE, J. P.; O GALLACHOIR, B. P. Wind turbine availability: Should it be time or energy based? - A case study in Ireland. **Renewable Energy**, v. 36, n. 11, p. 2967–2971, 2011.

DEKKER, R. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 51, n. 3, p. 229–240, 1 mar. 1996.

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

DING, F.; TIAN, Z. OPPORTUNISTIC MAINTENANCE OPTIMIZATION FOR WIND TURBINE SYSTEMS CONSIDERING IMPERFECT MAINTENANCE ACTIONS. **International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering**, v. 18, n. 05, p. 463–481, 2 out. 2011.

DING, S.-H.; KAMARUDDIN, S. Maintenance policy optimization—literature review and directions. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 5–8, p. 1263–1283, 16 fev. 2015.

DUFFUAA, S. O. *et al.* A generic conceptual simulation model for maintenance systems. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 7, n. 3, p. 207–219, 12 set. 2001.

ENERGY, W.; HEEGE, A. Fatigue load computation of wind turbine gearboxes by coupled finite element. n. September 2007, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota técnica DEA 025/17-Monitorando o Progresso da eficiência energética no Brasil**. Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA_025-17_-_Indicadores_de_Eficiencia_Energetica.pdf. Acesso em: 28 ago. 2019.

GALLAGHER, T.; MITCHKE, M. D.; ROGERS, M. C. Profiting from spare parts. **The McKinsey Quarterly**, v. 2, n. Exhibit 2, p. 1–4, 2005.

GENTO, A. M. Decision rules for a maintenance database. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 10, n. 3, p. 210–220, set. 2004.

GIL, A. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Saraiva, 2002.

GODOY, D. R.; PASCUAL, R.; KNIGHTS, P. A decision-making framework to integrate maintenance contract conditions with critical spares management. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 131, p. 102–108, 2014.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear**: modelos e algoritmos. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

HORENBEEK, A. VAN; BURÉ, J.; *et al.* Joint maintenance and inventory optimization systems: A review. **International Journal of Production Economics**, v. 143, n. 2, p. 499–508, 1 jun. 2013.

HORENBEEK, A. VAN; SCARF, P. A.; *et al.* The Effect of Maintenance Quality on Spare Parts Inventory for a Fleet of Assets. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 62, n. 3, p. 596–607, set. 2013.

HU, Q. *et al.* OR in spare parts management: A review. **European Journal of Operational Research**, 2018.

HUISKONEN, J. Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices. **International Journal of Production Economics**, v. 71, n. 1–3, p. 125–133, 2001.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estações automáticas**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. Acesso em: 22 ago. 2019.

JIMENEZ G, H. S. *et al.* A dynamic inventory rationing policy for business-to-consumer e-tail stores in a supply disruption context. **Computers & Industrial Engineering**, v. 142, p. 106379, abr. 2020.

JIMENEZ G, H. S.; ORREGO R, T. F.; CAVALCANTE, C. A. V. Order planning policies for business-to-consumer e-tail stores. **Computers & Industrial Engineering**, v. 136, p. 106–116, out. 2019.

KAIO, N.; OSAKI, S. Optimum Ordering Policies with Lead Time for an Operating Unit in Preventive Maintenance. **IEEE Transactions on Reliability**, v. R-27, n. 4, p. 270–271, out. 1978.

KENNEDY, W. J.; WAYNE PATTERSON, J.; FREDENDALL, L. D. An overview of recent literature on spare parts inventories. **International Journal of Production Economics**, v. 76, n. 2, p. 201–215, 21 mar. 2002.

KOVÁCS, A. *et al.* Scheduling the Maintenance of Wind Farms for Minimizing Production Loss. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 44, n. 1, p. 14802–14807, 1 jan. 2011.

LANTZ, E. J. *et al.* **Historical and Current Trends in Wind Energy Operations Costs and Project Availability**: July 2012 - July 2013. Golden, CO (United States): [s.n.]. Disponível em: <http://www.osti.gov/servlets/purl/1468332/>. Acesso em: 28 dez. 2018.

LEI, X.; SANDBORN, P. A. Maintenance scheduling based on remaining useful life predictions for wind farms managed using power purchase agreements. **Renewable Energy**, v. 116, p. 188–198, fev. 2018.

LI, Q.; WANG, H. Two-stage simulation optimization for optimal development of

offshore wind farm under wind uncertainty. **Proceedings - Winter Simulation Conference**, n. i, p. 2891–2902, 2017.

LIANG, T. Y. Optimum Piggyback Preventive Maintenance Policies. **IEEE Transactions on Reliability**, v. R-34, n. 5, p. 529–538, 1985.

LU, Y. *et al.* Condition based maintenance optimization for offshore wind turbine considering opportunities based on neural network approach. **Applied Ocean Research**, v. 74, p. 69–79, 2018.

MABEL, M. C.; RAJ, R. E.; FERNANDEZ, E. Analysis on reliability aspects of wind power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 2, p. 1210–1216, 1 fev. 2011.

MARSARO, M. F. M. F.; CAVALCANTE, C. A. V. C. A. V. Random preventive maintenance policy based on inspection for a multicomponent system using simulation. **Eksplotacja i Niezawodnosc**, v. 19, n. 4, p. 552–559, 21 set. 2017.

MOGHADDASS, R.; ERTEKIN, Ş. Joint optimization of ordering and maintenance with condition monitoring data. **Annals of Operations Research**, v. 263, n. 1–2, p. 271–310, 4 abr. 2018.

MOORE, P. G.; RIVETT, B. H. P. Model Building for Decision Analysis. **Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)**, 1981.

NAHAS, N.; NOURELFATH, M. Joint optimization of maintenance, buffers and machines in manufacturing lines. **Engineering Optimization**, v. 50, n. 1, p. 37–54, 2 jan. 2018.

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, 1 fev. 2018.

NGUYEN, T. A. T.; CHOU, S. Y. Maintenance strategy selection for improving cost-effectiveness of offshore wind systems. **Energy Conversion and Management**, v. 157, n. September 2017, p. 86–95, 2018.

NICOLAI, R. P.; DEKKER, R. Optimal Maintenance of Multi-component Systems: A Review. *In*: **Complex System Maintenance Handbook**. London: Springer London, 2008. p. 263–286.

NILSSON, J.; BERTLING, L. Maintenance Management of Wind Power Systems Using Condition Monitoring Systems—Life Cycle Cost Analysis for Two Case Studies. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 22, n. 1, p. 223–229, mar. 2007a.

NOWAKOWSKI, T.; WERBIŃKA, S. On problems of multicomponent system maintenance modelling. **International Journal of Automation and Computing**, v. 6, n. 4, p. 364–378, 21 nov. 2009.

O'CONNOR, M.; LEWIS, T.; DALTON, G. Weather window analysis of Irish west coast wave data with relevance to operations & maintenance of marine renewables. **Renewable Energy**, v. 52, p. 57–66, abr. 2013.

OOSTEROM, C. D. VAN *et al.* Optimal policies for a delay time model with postponed replacement. **European Journal of Operational Research**, v. 232, n. 1,

p. 186–197, 2014.

PANAGIOTIDOU, S. Joint optimization of spare parts ordering and maintenance policies for multiple identical items subject to silent failures. **European Journal of Operational Research**, v. 235, n. 1, p. 300–314, 2014.

PRYOR, S. C.; BARTHELMIE, R. J. Comparison of potential power production at on- and offshore sites. **Wind Energy**, v. 4, n. 4, p. 173–181, out. 2001.

QIU, Q.; CUI, L.; YANG, L. Maintenance policies for energy systems subject to complex failure processes and power purchasing agreement. **Computers & Industrial Engineering**, v. 119, n. October 2017, p. 193–203, maio 2018.

RINALDI, G. *et al.* Multi-objective optimization of the operation and maintenance assets of an offshore wind farm using genetic algorithms. **Wind Engineering**, v. 31, n. 7, p. 0309524X1984982, 29 maio 2019.

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, R.; HAQUE, A. Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation. **Applied Mathematical Modelling**, v. 24, n. 10, p. 751–760, ago. 2000.

SAWYER, S.; TESKE, S.; DYRHOLM, M. The Global Wind Energy Outlook. **Gwec**, p. 44, 2016.

SHAFIEE, M. Maintenance logistics organization for offshore wind energy: Current progress and future perspectives. **Renewable Energy**, v. 77, n. 1, p. 182–193, 1 maio 2015.

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, 1 out. 2015.

SHAFIEE, M.; SØRENSEN, J. D. Maintenance optimization and inspection planning of wind energy assets: Models, methods and strategies. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 000, p. 1–19, 2017.

SONG, S. *et al.* Integrated optimization of offshore wind farm layout design and turbine opportunistic condition-based maintenance. **Computers and Industrial Engineering**, v. 120, n. April, p. 288–297, 2018.

SPINATO, F. *et al.* Reliability of wind turbine subassemblies. **IET Renewable Power Generation**, v. 3, n. 4, p. 387, 2009.

STÅLHANE, M. *et al.* Optimizing vessel fleet size and mix to support maintenance operations at offshore wind farms. **European Journal of Operational Research**, v. 276, n. 2, p. 495–509, jul. 2019.

TAVNER. **Offshore Wind Turbines: Reliability, availability and maintenance**. [s.l.] Institution of Engineering and Technology, 2012.

WANG, J.; ZHAO, X.; GUO, X. Optimizing wind turbine's maintenance policies under

performance-based contract. **Renewable Energy**, v. 135, p. 626–634, 2019.

YILDIRIM, M.; GEBRAEEL, N. Z.; SUN, X. A. Integrated Predictive Analytics and Optimization for Opportunistic Maintenance and Operations in Wind Farms. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 32, n. 6, p. 4319–4328, 2017.

ZHANG, C. *et al.* Opportunistic maintenance for wind turbines considering imperfect, reliability-based maintenance. **Renewable Energy**, v. 103, p. 606–612, abr. 2017.

_____. Opportunistic maintenance strategy for wind turbines considering weather conditions and spare parts inventory management. **Renewable Energy**, v. 133, p. 703–711, 1 abr. 2019.

ZHANG, X.; ZENG, J. A general modeling method for opportunistic maintenance modeling of multi-unit systems. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 140, p. 176–190, 2015.

_____. Joint optimization of condition-based opportunistic maintenance and spare parts provisioning policy in multiunit systems. **European Journal of Operational Research**, v. 262, n. 2, p. 479–498, out. 2017.

ZHONG, S. *et al.* A reliability-and-cost-based fuzzy approach to optimize preventive maintenance scheduling for offshore wind farms. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 124, p. 643–663, jun. 2019.

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, 1 jul. 2019.

ZHU, C.; LI, Y. Reliability Analysis of Wind Turbines. *In*: **Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines**. [s.l.] InTech, 2018. .

ZHU, W.; CASTANIER, B.; BETTAYEB, B. A dynamic programming-based maintenance model of offshore wind turbine considering logistic delay and weather condition. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 190, p. 106512, out. 2019.

ZHU, W.; FOULADIRAD, M.; BÉRENGUER, C. CONDITION-BASED MAINTENANCE POLICIES FOR A COMBINED WEAR AND SHOCK DETERIORATION MODEL WITH COVARIATES. **COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING**, V. 85, P. 268–283, 1 JUL. 2015.

APÊNDICE A – ALGORITMOS

Algoritmo 2 Tipologia do reparo

Reparo perfeito - PR

- 1: $IP_{2k,m} \leftarrow 1$
 - 2: $Age_{k,m} \leftarrow t$
 - 3: $D2 \leftarrow TLD(i)$
 - 4: $F \leftarrow D2 + TLF(i)$
 - 5: $TAD_{k,m} \leftarrow t + D2$
 - 6: $TAF_{k,m} \leftarrow t + F$
-

Reparo imperfeito-IR

- 7: $IP_{1k,m} \leftarrow 1$
 - 8: $t_d \leftarrow q.TLD(i)$
 - 9: $TAD_{k,m} \leftarrow TAD_{k,m} + t_d$
 - 10: $TAF_{k,m} \leftarrow TAF_{k,m} + t_d$
-

Algoritmo 3 Modulo de energia - $P_w(t, t_{off})$

```
1:   $t_{h1} \leftarrow t_{off} \cdot 24$ 
2:   $t_{h2} \leftarrow t \cdot 24$ 
3:   $t_n \leftarrow t_{h2} - t_{h1}$ 
4:  while ( $t_n \leq t_{h2}$ )
5:      if  $cut_{off} \geq u(t_n) \geq cut_{in}$ 
6:           $p_w \leftarrow \frac{1}{2} \cdot cp \cdot p \cdot A \cdot (u(t_n))^3$ 
7:           $P_w = P_w + p_w$ 
8:      end if
9:  end while
10: return  $P_w$ 
```

Algoritmo 4 Modulo de inspeção

```

1:  ITm ← 1
   for k in 1...K
2:      if S2k,m = 1
3:          if TADk,m > Agek,m > TADk,m(1-x)
4:              t0 ← tkIR
5:              if Agek,m ≥ TADk,m
6:                  t0 ← tkPR
7:              if t0 > tmax
8:                  tmax ← t0
           end if
       end for
9:  t ← t + tmax
10: Pw ← Pw (t, toff)

```

←

Algoritmo 3

```

11: Φk,m ← Agek,m      k ∈ m
12: Agek,m ← Agek,m + tmax
   for k in 1...K
13: Agek,m ← Φk,m
   end for
14: toff ← tmax
return ( )

```

Algorithm 5 Modulo de Falha

```

2: for k in 1...K
3:   if  $\text{Age}_{k,m} \geq \text{TAF}_{k,m}$ 
4:      $\text{IP}_{3k,m} \leftarrow 1$ 
5:      $\text{toff} \leftarrow (\text{Age}_{k,m} - \text{TAF}_{k,m}) + t_k^f$ 
6:      $P_w \leftarrow P_w(t, \text{toff})$   $\Leftarrow$ 

```

Algoritmo 3

```

7:    $\text{Age}_{k,m} \leftarrow t_k^f$ 
8:    $k,m \leftarrow \text{PR}$ 
   for k in 1...K
9:      $\text{Age}_{k,m} \leftarrow \text{Age}_{k,m} - \text{toff}$  .
   end for
10:   $t \leftarrow t + t_k^f$ 
   end if
   end for
return ( )

```

Algoritmo 6 Política de manutenção

```

1: Input data
2: while (t ≤ T)
3:   t1 ← t
4:   if (v ≥ U)                                     Alto nível de geração
5:     while t ≤ (t1 + 7)
6:       if max(TAF - Age) > 0                     Busca: turbina parada
7:         m ← ID{max (TAF - Age)}                 Identificação da turbina
8:         Falha (m) e Inspeção (m)                aplicação dos algoritmo 4 e 5
9:         TAIm ← TAIm + L                         Atualização ao próximo período de inspeções
10:        FTm ← 1                                    falha na turbina j
11:       otherwise
12:         t ← t + 1                                se não eventos> atualiza um dia
13:         Age ← Age + 1
14:     end while
15:   Otherwise                                     Baixo nível de geração
16:     while t ≤ (t1 + 7)
17:       r ← 0
18:       if max(TAF - Age) > 0                     Busca: turbina parada
19:         m ← ID{max (TAF - Age)}                 Identificação da turbina
20:         Falha (m) e Inspeção (m)                aplicação dos algoritmo 4
21:         TAIm ← TAIm + L                         Atualização ao próximo período de inspeções
22:         FTm ← 1                                    falha na turbina j
23:         r ← 1
24:       if min(TAI) ≤ t                           Busca: Turbina apta para inspeção inspected
25:         m ← ID{min (TAI)}                       Identificação da turbina
26:         Inspeção (m)                             algoritmo 5
27:         TAIm ← TAIm + L                         Atualização ao proximo periodo de inspeções
28:         ITm ← 1                                    turbina j inspecionada
29:         r ← 1
30:       if r = 0                                    se não eventos> atualiza ao próximo
31:         dia
32:         t ← t + 1
33:         Age ← Age + 1
34:     end while
35: return ()

```
