POLITICA DE MANUTENÇÃO COM BASE EM SUBSTITUIÇÃO POR OPORTUNIDADE E POR IDADE PARA TURBINAS EÓLICAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Tulio Fidel Orrego Rodriguez.
Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 – Cidade Universitária, Recife/PE
tuliofor@gmail.com

Luis Gustavo Barros
Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 – Cidade Universitária, Recife/PE
lgustavobarros@uol.com.br

Cristiano Alexandre Virginio Cavalcante
Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 – Cidade Universitária, Recife/PE
cristianogesm@gmail.com

RESUMO

Os sistemas de geração de energia eólica têm se mostrado como uma das principais fontes energéticas no mundo, atingido elevados patamares de produção e crescimento. Nesse cenário, o presente trabalho busca analisar o impacto das atividades de manutenção no custo dessa energia e propor estratégias com o objetivo de minimizar esse fator fundamental à viabilidade da tecnologia. Foi desenvolvida uma política de manutenção mesclando atividades de inspeções com o modelo de oportunidades para ser aplicada a equipamentos compostos por rolamentos, cuja criticidade foi observada após uma coleta de dados com base na literatura existente. Os resultados dessa modelagem foram comparados com a política proposta por Scarf (2009), que se aproxima do que é praticado nos parques eólicos atuais. A estratégia proposta apresentou diversos casos de redução de custo, especialmente quando a taxa de ocorrência de oportunidades durante a vida útil do equipamento é alta.

PALAVRAS CHAVES. Modelo de Manutenção, Turbinas Eólicas, Rolamentos, Delay-Time.

Tópico (PO - na Indústria / MP - Modelos Probabilísticos / OA - Outras aplicações em PO)

ABSTRACT

Wind power generation systems have proven to be one of the main energy sources in the world, reaching high levels of production and growth. In this scenario, the present work seeks to analyse the impact of maintenance activities on the cost of this energy and propose strategies with the objective of minimizing this fundamental factor to the viability of the technology. A maintenance policy was developed, merging inspection activities with the model of opportunities to be applied to equipment composed of bearings, whose criticality was observed after a data collection based on the existing literature. The results of this modelling were compared with the policy proposed by Scarf (2009), which approaches what is practiced in the current wind farms. The proposed strategy presented several cases of cost reduction, especially when the rate of occurrence of opportunities during the useful life of the equipment is high.

KEYWORDS. Maintenance Model, Wind Turbines, Bearings, Delay-Time.

Paper topic (PO – at industry / MP – Probabilistic models / OA - Others aplications in PO)

https://proceedings.science/p/85294?lang=pt-br

1. Introdução

A crescente pressão mundial pela redução dos impactos ambientais causados pelas atividades humanas tornou incessante a busca pelo desenvolvimento de tecnologias de geração de energia limpa. A energia eólica tem se apresentado como uma alternativa bastante promissora em termos ambientais, de custos e produtividade [Sawyer et al. 2016].

A tecnologia ainda apresenta um enorme potencial de crescimento. Segundo o [Sawyer et al. 2016], no documento emitido pelo Conselho Mundial de Energia Eólica (GWEC), as previsões são de que as taxas anuais de crescimento se mantenham na faixa de 7% até 2030, podendo chegar a 2.870 GW em instalações globais em 2050. É crucial que se identifique os processos que mais influenciam no custo da energia e, assim, definir ações voltadas à redução desse parâmetro para facilitar a continuidade da evolução para a qual aponta o potencial rastreado. De acordo com a consultoria *Navigant Consulting*, em um relatório de 2013, os custos de manutenção e operação chegam a responder por 21% dos custos de todo o ciclo de vida de um parque eólico. Em um parque eólico offshore, esse percentual pode chegar a 30% do custo da energia [Sarker e Faiz 2016].

Além da questão financeira, a manutenção possui também papel fundamental na confiabilidade do sistema. [Tracht et al. 2013] afirma que o planejamento da manutenção é importante para reduzir os tempos de parada não previstos em parques eólicos. Além disso, a confiabilidade é um fator de grande influência na performance dos sistemas de potência da planta [Liang et al. 2015]. Esse conjunto de fatores motivou o presente trabalho a buscar por formas eficientes de planejar a manutenção. No modelo desenvolvido, a estratégia escolhida para nortear as ações de manutenção foi a política de oportunidades, que consiste em aproveitar condições nas quais a parada do processo é inevitável para realizar as atividades de manutenção com algum tipo de indicativo.

A política de oportunidades possui um histórico de aplicação em diversos sistemas, como sistemas de turbinas a gás e compressores como foi demostrado por [Hu e Zhang 2014], sistemas de bombas de água de alimentação em usinas nucleares [Nilsson et al. 2009], sistemas de cogeração [Cavalcante e Lopes 2015) e infraestrutura ferroviária [Garambak et al. 2016]. Em parques eólicos, o estudo desse modelo de manutenção vem ganhando ênfase, como, por exemplo, nas publicações de [Ding e Tian 2011]; [Shafiee et al. 2015]; [Yildirim et al. 2017]**.**

Um resultado da aplicação dessa política pode ser observado em [Besnard et al. 2009]**,** onde a execução da estratégia proporcionou uma redução de 43% nos custos de manutenção. O diferencial do modelo aqui exposto está na conciliação entre uma política estritamente baseada em inspeções com uma fase de oportunidades onde nenhuma outra tarefa de manutenção no equipamento em questão é feita até que surja uma oportunidade, buscando-se assim, reduzir custos logísticos e operacionais atrelados à atividade.

2. Analises de Equipamentos Alvo

A primeira etapa do desenvolvimento do modelo consistiu em uma coleta de dados, com o objetivo de identificar componentes críticos à operação e manutenção de um aerogerador, para os quais seria interessante estudar os efeitos da aplicação da política desenvolvida.

Encontra-se em **[**Greco et al. 2013] que, no período de 2003 a 2007, caixa de engrenagens e gerador foram responsáveis por paradas que sumarizaram aproximadamente 108000 e 80000 horas, respectivamente; já entre 2008 e 2012, os números foram de 80000 e 50000 horas, como é apresentado no gráfico 1.

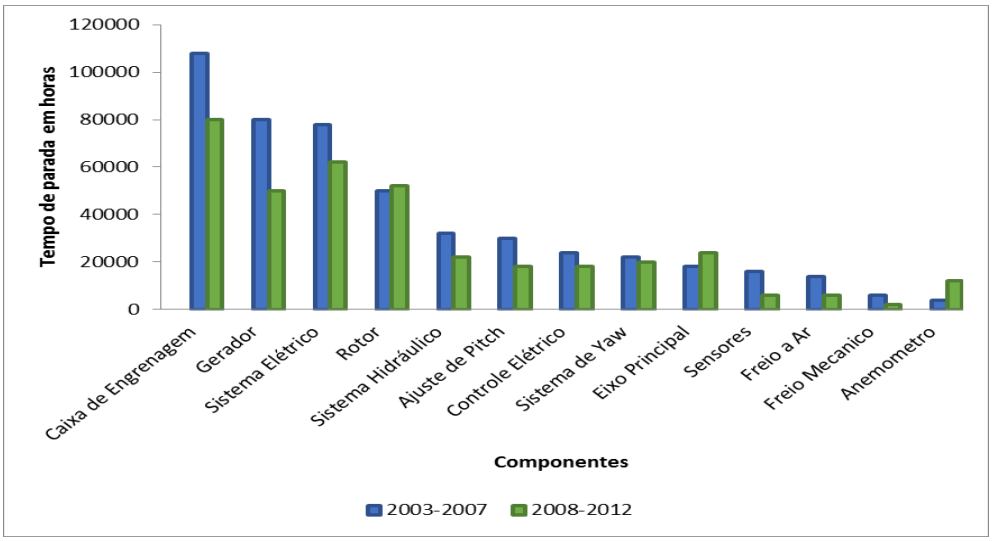


Gráfico 1 Tempo de parada de uma turbina eólica por componente
Fonte Adaptado de Greco et al. (2013)

Analisando o gráfico 2, percebe-se que, juntamente aos dados de tempo de parada, é possível concluir acerca da criticidade de alguns equipamentos através da frequência de falha desse sistema. Tanto em [Tavner et al. 2007] quanto em [Foley e Gutowski 2008], que caixa de engrenagens e gerador somam, juntos, 13% de todas as falhas de uma turbina eólica. Essas informações combinadas indicam um alto nível de criticidade desses dispositivos.

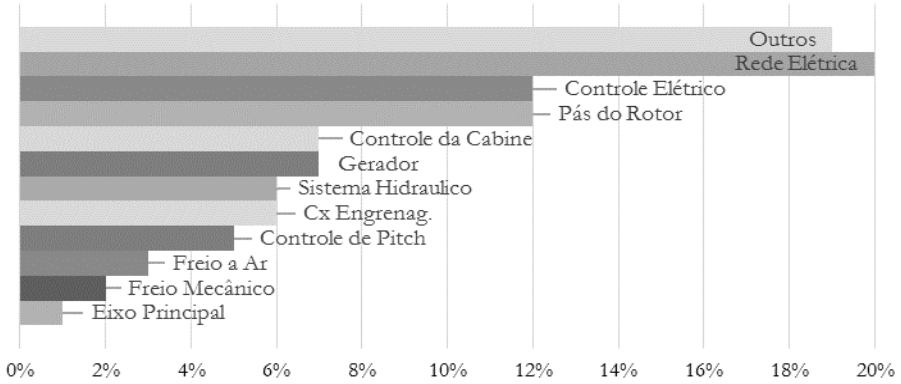


Gráfico 2 Frequência de falha dos componentes de um aerogerador
Fonte Adaptado de [Foley e Gutowski 2008] e [Tavner et al. 2007]

A partir desses dados, buscou-se compreender as causas raízes que determinavam a criticidade do gerador e da caixa de engrenagens. De acordo **[**Greco et al. 2013] no gráfico 3, os rolamentos são responsáveis por 70% do tempo total de parada das caixas de engrenagens. Já em [Whittle et al. 2013], os elementos rolantes responderam por um índice de 58% do período de inatividade do gerador.

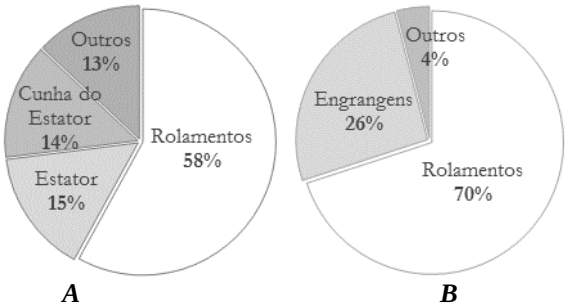


Gráfico 3 Distribuição do tempo de parada no gerador (*A*); Distribuição do tempo de parada na caixa de engrenagens (*B*)
Fonte: Adaptado de (*A*) **[**Whittle et al. 2013]; (*B*) [Greco et al. 2013]

Esses dados convergem com a informação apresentada em [Greco et al. 2013], onde se afirma que grande parte das contribuições para os custos de Operação e Manutenção (O&M) de uma turbina eólica provém do sistema de transmissão. O acúmulo dessas informações forneceu a base para a escolha dos rolamentos e seus sistemas como dispositivos alvos para o desenvolvimento da modelagem matemática da estratégia de manutenção.

A partir dessa definição, foi necessário tomar conhecimento de aspectos de falha particulares desses componentes. Na Figura 1, são apresentados os principais modos de falha dos rolamentos em cada equipamento da turbina que contém esse componente, permitindo extrair informações como a previsibilidade das falhas de acordo com o mecanismo de maior ocorrência e os planos de manutenção que podem contribuir para mitigar os efeitos dessas causas.

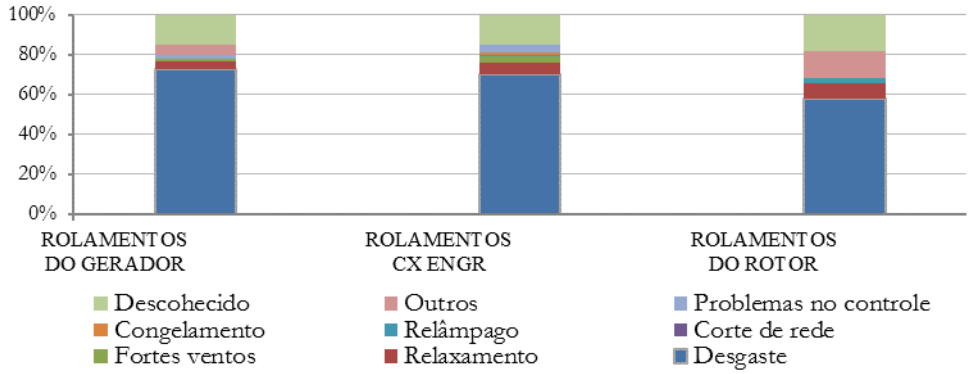


Figura 1 Modo de falha dos principais componentes de uma turbina eólica
Fonte: adaptado de [Greco et al. 2013]

3. Política de Manutenção

3.1. Descrição técnica da politica

A identificação da gravidade dos rolamentos permitiu a construção de uma política adequada. Dividiu-se a população de dispositivos em uma mistura: componentes fracos e componentes fortes. A mistura é definida por um parâmetro p que configura a proporção de componentes fracos no grupo heterogêneo.

O objetivo de classificar os rolamentos em uma mistura é levar em consideração no modelo determinadas imperfeições inerentes a alguns processos, como por exemplo, fabricação, instalação e transporte, o que torna alguns componentes mais suscetíveis à falha prematura. Como se trata de um equipamento produzido e utilizado em grandes quantidades, é plausível concluir que nem todos entrem em operação em perfeito e homogêneo estado de integridade. Esse aspecto é determinante no momento de se avaliar a quantidade de inspeções e o intervalo entre elas, podendo influenciar se haverá tempo para manutenções preventivas ou se o componente atingirá a vida útil de projeto.

A chegada do defeito nesses componentes, é gerada por uma distribuição Weibull de parâmetros η_1 e β_1, para os componentes fracos, e η_2 e β_2 para os dispositivos fortes. O parâmetro de mistura impacta diretamente na distribuição das falhas, que passa a ser calculada por $F(t) = pF_1(t) + (1-p)F_2(t)$, com os índices 1 e 2 representando os itens fracos e fortes, respectivamente. A modelagem desses defeitos a partir da distribuição de Weibull se deve ao fato de essa função representar adequadamente a matemática de processos como o desgaste, que como mostra a figura 1, é o principal mecanismo desencadeador de falhas nos rolamentos presentes nas turbinas eólicas.

O intervalo delay-time é gerado por uma distribuição exponencial de parâmetro λ_h, que foi escolhida por se tratar de uma função sem memória, ou seja, a cada simulação executada no modelo, seus valores não sofrem qualquer influência de casos passados, dando à variável um caráter completamente aleatório, visto que, na prática, um equipamento não pode ter seu tempo de falha determinado com exatidão.

Esse conceito é utilizado no modelo pelo fato de que a política de manutenção contém casos nos quais se opta por substituir o equipamento preventivamente e a referência para a tomada dessa decisão é a detecção do defeito. Essa estratégia só faz sentido se houver um espaço de tempo entre os estados defeituoso e de falha, pois se a falha acontecer sem indicativos prévios, elimina-se a ideia da substituição preventiva descrita. Nesse sentido, Yang et al. (2016) infere que as atividades de inspeção só podem surtir o efeito desejado em uma política de manutenção se houver, entre o início do e executar planos de ação com o objetivo de se evitar uma falha.

A Figura 2 representa graficamente o conceito de *delay-time,* explicitando o parâmetro *h* que define a ideia, sendo, portanto, o tempo existente entre a chegada do defeito e uma eventual ocorrência da falha.

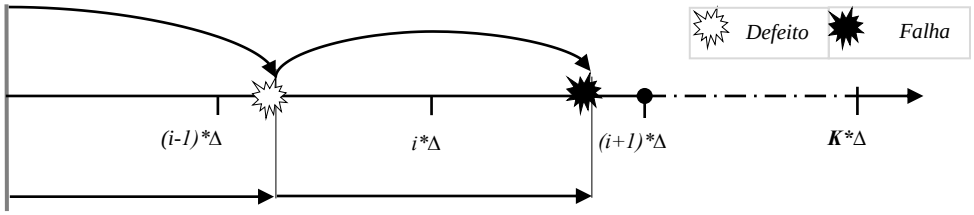


Figura 2 Delay time na politica

Observando a Figura 1 e constatando que a principal forma de falha dos rolamentos é o desgaste, o *delay time*, torna-se um conceito bastante pertinente, já que esse mecanismo não ocasiona falhas abruptas, mas que entre o defeito e a falha há, de fato, um intervalo temporal na maioria dos casos. Somando-se o tempo de chegada do defeito ao delay time, encontra-se o tempo a chegada da falha Y, modelado para os rolamentos. O valor de *Y* é referenciado na escala de tempo para ser comparado com o período de inspeções a fim de averiguar que tipo de manutenção será realizado nessa fase e com *Z* para determinar se será possível o aproveitamento de uma oportunidade.

As oportunidades surgem a partir das falhas de outros equipamentos do sistema. Esses eventos são gerados por uma distribuição exponencial devido ao caráter aleatório do surgimento de avarias em uma gama de componentes, independentes entre si, pertencentes ao sistema. A função é definida pelo parâmetro λ_Z e devolve o tempo de chegada da oportunidade. Uma abordagem parecida foi proposta por Cavalcante et al. (2018). Porém, tendo em vista as vantagens decorrentes de uma oportunidade para aero geradores, foi considerado o pressuposto de que todas as oportunidades surgidas desde o final do período de inspeção até o período de substituição são aproveitadas. Tal pressuposto modificou a estrutura da política anteriormente proposta.

3.2. Política de Manutenção

A simulação do modelo matemático gera como resultado três possíveis casos de manutenção: preventiva, corretiva e oportunidade, sendo detalhadas a seguir.

Caso 1

Nesse primeiro caso, há uma inspeção entre o defeito e a falha e, portanto, a possibilidade da realização de uma substituição preventiva. A Figura 3 ilustra esquematicamente como uma inspeção, ao detectar um defeito que surge, evita que uma falha iminente a ocorrer caso nenhuma intervenção fosse realizada. Essa ação permite descartar a realização de uma manutenção corretiva para que seja feita uma preventiva em seu lugar, com menor custo, mais segurança ao sistema e maior previsibilidade já que a inspeção é uma tarefa agendada.

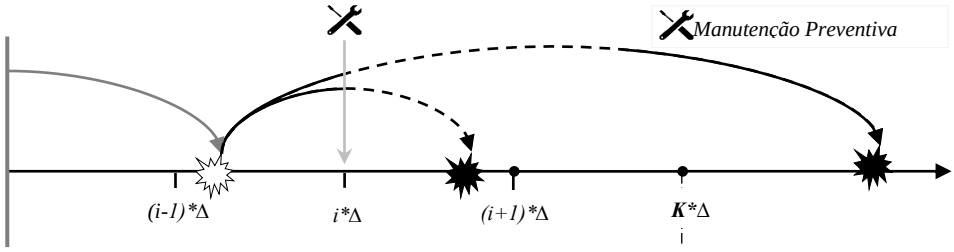


Figura 3 Substituição preventiva durante uma inspeção

Caso 2

Falha e defeito se encontram num mesmo intervalo Δ delta de inspeções, sem que haja a possibilidade de intervenção, o que implica na falha do componente.

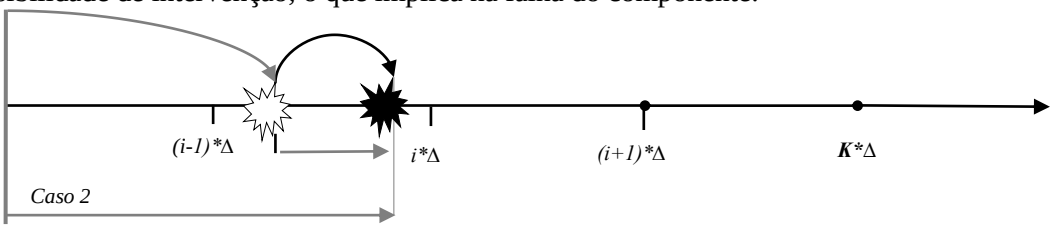


Figura 4 Ocorrência de manutenção corretiva

Como observado na Figura 4, o pequeno tamanho do intervalo *h* acarreta em falta de tempo hábil para que uma intervenção seja feita após o surgimento do defeito, o que configura na falha do componente. Nesse caso, é necessária a realização de uma manutenção corretiva para a substituição do componente falho.

Os casos 1 e 2 compõem a fase de inspeções do modelo. O principal objetivo dessa fase é manter o controle acerca dos componentes fracos inseridos na mistura, que são aqueles que podem chegar à operação em estados pré-defeituosos decorrentes de avarias inerentes a processos de fabricação ou montagem, por exemplo. Em consequência, estes dispositivos possuem maior tendência a falhar prematuramente, e por isso o monitoramento inicial foi considerado importante ao modelo. Quando o equipamento passa pelo período de inspeções sem precisar ser substituído, inicia-se a janela de oportunidades, representada pelo caso 3.

Caso 3

Nesse caso, o equipamento entra em um período livre de atividades de inspeção, de modo a operar até o momento da falha, a menos que uma ocasião de oportunidade surja e implique, necessariamente, na substituição preventiva do componente.

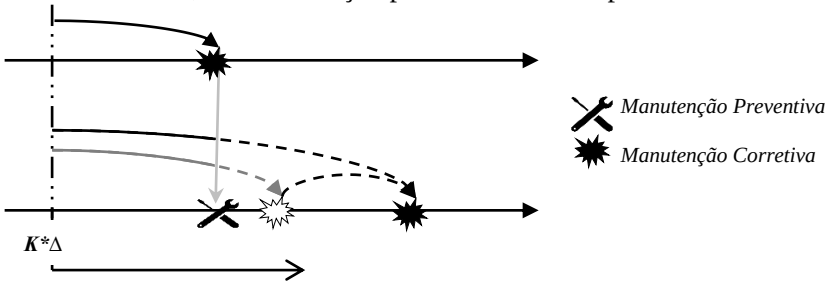


Figura 5 Janela de Oportunidade – Manutenção Preventiva (por oportunidade)

A Figura 5 ilustra a situação na qual o período *K*Δ* transcorre sem substituições e, portanto, foi aberta a janela de oportunidades. Diante da necessidade de manutenção corretiva no equipamento A, no que é o gerador de oportunidades e é monitorado paralelamente aos rolamentos, representados pela letra B, aproveita-se a parada do sistema e a alocação de pessoas e recursos demandados pela falha ocorrida para realizar uma manutenção preventiva em B, de modo a evitar que todos esses esforços sejam executados de forma redundante no futuro. Nesse

caso, a atividade preventiva em B é de substituição preventiva do equipamento, dando fim ao seu ciclo de vida com o objetivo de evitar a falha futura.

A ocorrência desses casos traz diferentes impactos em variáveis como segurança, custo, confiabilidade e entre outros, proporcionando ganhos em alguns aspectos e perdas em outros. Desse modo, a análise do modelo deve ser feita considerando as implicações de cada evento em relação aos parâmetros que são prioridades para o planejamento sistema em questão.

Nesse sentido, é importante considerar os pontos positivos e negativos de cada situação. Na substituição preventiva, por exemplo, a desvantagem é que durante a inspeção, o equipamento perde algumas horas de operação nas quais poderia produzir, mesmo defeituoso, até a falha. Porém, como não há como prever com exatidão em que momento a falha irá ocorrer, essa ação é uma medida de segurança que visa evitar falhas que possam levar a danos no sistema, custos elevados e maiores dificuldades na hora da substituição devido à falha já ocorrida.

Semelhantemente ao caso das inspeções, uma substituição por oportunidade pode acarretar uma redução da vida útil do equipamento, porém, o objetivo dessa estratégia é otimizar condições de logística, como evitar duplos deslocamentos ao parque para atividades que podem ser feitas em mesmo momento e diminuir os tempos de parada da planta, já que o tempo de uma tarefa de manutenção servirá para a execução de duas. Em consequência desses aspectos, é esperado que o custo total de manutenção diminua.

3.3. Descrição matemática do modelo

A simulação do modelo analítico descrito na seção 3.2 é executada a partir de uma base matemática que permite tratar os casos ilustrados como eventos estatísticos e a geração de dados de probabilidade que possibilitam a otimização de parâmetros como número de inspeções e intervalo entre elas. A seguir, são apresentados os fundamentos lógicos que culminam nas expressões de probabilidade para cada caso do modelo.

A ocorrência de uma manutenção preventiva durante a fase de inspeções, definida pelo caso 1, depende de o intervalo de *delay-time* (h) ser longo o suficiente para que espaço de tempo delimitado por duas inspeções subsequentes seja capaz de intercepta-lo antes que o defeito se converta em uma falha. Matematicamente, essa lógica pode ser descrita pela equação 3.1 e representada pela variável P1, indicando a probabilidade de tal evento ocorrer.

$$P1 = \sum_{i=1}^{k} \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f(x) R_h(i\Delta - x) dx \quad (3.1)$$

Na expressão, Δ é o intervalo definido entre duas inspeções, i representa a i-ésima atividade de inspeção, f(x) é a função de densidade de probabilidade na variável x e k é o número total de inspeções, que faz parte do conjunto de parâmetros que devem ser otimizados na política de forma a fornecer base paras as decisões em um sistema real.

A função R_h, que representa a função de distribuição cumulativa de h após a fase de inspeções, pode ser calculada para T = iΔ – x pela equação (3.2).

$$R_h(T) = \int_T^{\infty} f_h(h) dh \quad (3.2)$$

Em consequência, somando as inspeções ocorridas até a i-ésima inspeção e a substituição preventiva necessária devido à detecção do defeito.

Para o caso 2, falha e defeito se encontram num mesmo intervalo Δ delta de inspeções, sem que haja a possibilidade de intervenção, o que implica na falha do componente. Assim, é necessário que o h esteja compreendido no intervalo entre duas inspeções (i-1)*Δ e i*Δ. A probabilidade desse evento é calculada por P2 seguindo essa premissa, como mostra a equação (3.3). F_h é a função de distribuição cumulativa do tempo de *delay-time* (h) e é obtida em T pela equação (3.4).

$$P2 = \sum_{i=1}^{k} \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f(x) F_h(i\Delta - x) dx \quad (3.3)$$

$$F_h(T) = \int_0^T f_h(h) dh, \ T = i\Delta - x. \quad (3.4)$$

https://proceedings.science/p/85294?lang=pt-br

Passado o período de inspeções sem que haja a necessidade de uma substituição do equipamento, inicia-se a janela de oportunidades. Desse modo, fica intuitivo imaginar que é necessária uma combinação de probabilidades, que vão desde o evento de não substituição na fase $K^*\Delta$ até a o tempo Z de chegada de a oportunidade ser menor que o Y da falha. Desse modo, temos a seguinte expressão:

$$P3 = \int_{k\Delta}^{\infty} f(x) \int_{0}^{\infty} f(h) \int_{k\Delta}^{x+h} u e^{-u(z-k\Delta)} dz dh dx \quad (3.5)$$

3.4. Conjunto de hipóteses para o modelo

Para modelar a política, foi fundamental assumir determinadas considerações. As principais são:

- Quando surge um defeito, este sempre será identificado pelo agente de manutenção durante a realização de uma inspeção;
- As manutenções são executadas de forma perfeita, sem que sejam deixados ou inseridos estados defeituosos;
- Existe um intervalo temporal entre o surgimento de um defeito e a culminação deste em uma falha (*Delay-time*);
- A equipe de manutenção pode ser dividida em duas, de modo que duas tarefas de manutenção possam ser realizadas simultaneamente, o que torna plausível a ideia de manutenção oportuna;
- A política foi modelada em duas fases. Na primeira, são realizadas inspeções periódicas com a finalidade de avaliar o estado operacional do equipamento e, consequentemente, evitar que o mesmo falhe prematuramente.

3.5. Calculo dos Custos

Para avaliar os benefícios do modelo proposto, a métrica selecionada para análise foi o custo. Essa escolha foi feita levando-se em consideração o peso que a manutenção possui sobre o custo da energia. Como já citado na introdução deste trabalho, [Sarker e Faiz 2016] traz a dimensão do grande impacto da manutenção nos custos da geração de energia eólica. Convergindo com essa informação, [Tamilselvan et al. 2012] infere que os custos com operação e manutenção (O&M) de uma turbina eólica são os que mais contribuem com o custo total da energia elétrica produzida.

De acordo com [Faiz 2014] a estratégia e a política de manutenção são as principais formas de controlar os gastos em grandes proporções. [Florian & Sørensen 2017] também apontam que uma estratégia de manutenção otimizada para auxiliar o operador dos parques eólicos pode reduzir significativamente os custos relacionados a O&M.

Esse conjunto de informações motivou os esforços do presente trabalho a buscar nos resultados da política desenvolvida possíveis alternativas que possam minimizar esse custo, permitindo a redução de investimentos e viabilizando desenvolvimentos futuros da tecnologia em questão [Ding 2012] [Tian 2012].

Desse modo, os parâmetros e relações entre eles foram definidos da seguinte forma:

- C_I: Custo da inspeção;
- C_P: Custo de substituição preventiva de um componente defeituoso;
- C_F: Custo para substituição de um componente após a falha;
- C_O: Custo da oportunidade aproveitada, onde $C_O < C_P < C_F$

O cálculo desses custos foi utilizado para avaliar os benefícios da política e em quais casos o modelo possui uma melhor funcionalidade, o que posteriormente trará informações valiosas ao gestor da manutenção no momento de definir suas estratégias. A seguir as equações de custo definidas para cada caso da política proposta.

$$C_1 = (i-1)C_I + C_p \quad (3.6)$$

$$C_2 = (i-1)C_I + C_F \quad (3.7)$$

$$C_3 = K.C_I + C_{op} \quad (3.8)$$

4. Exemplo Numérico

A título de comparação, foi tomado como referência o trabalho desenvolvido por [Scarf et al. 2009], no qual é apresentado um modelo em que a idade do componente é a base para a substituição, o que se aproxima do que é realizado nas turbinas eólicas atualmente, onde equipamentos são projetados para durar um tempo previamente definido, como os 20 anos desejados para a caixa de engrenagens [Greco et al. 2013]. O autor também usou sua política na aplicação em sistemas multicomponentes e heterogêneos, assim como é o caso dos rolamentos e semelhante às definições presentes na pesquisa apresentada, o que tornou a comparação válida e coerente. Apesar da idade para a qual o componente foi desenhado se manifestar de maneira sutil, principalmente no que se refere à definição do comprimento do intervalo *K*Δ*, o diferencial do modelo aqui proposto é justamente o fato de utilizar o conceito de oportunidades como uma forma de se levar em consideração algumas questões práticas, como a estrutura logística da manutenção em um parque.

Para que a comparação pudesse ser feita de maneira coerente, os parâmetros das distribuições construídas foram todos iguais aos usados para a simulação apresentada no trabalho do referido autor. Com isso, a análise teve como fim estabelecer em quais condições de parâmetros a política proposta pode apresentar menores custos em uma eventual aplicação.

A tabela 1 permite a extração de informações acerca das variáveis de decisão *K* e Δ que serão a base para que um possível gestor de manutenção possa avaliar em que cenário poderá aplicar a política proposta e obter vantagens. Além disso, possibilita o estudo da sensibilidade do modelo aos parâmetros que descrevem as distribuições. Essas funções possuem impacto direto nos cálculos das probabilidades dos casos descritos na seção 3.2 e, desse modo, geram dados valiosos para quem planeja a manutenção, pois apresenta em quais taxas de ocorrência de cada evento o modelo é vantajoso.

Basicamente, a análise da tabela permite pensar a estratégia de manutenção da seguinte forma: tendo em mãos documentos como curva de falha dos componentes pertencentes ao sistema, histórico de falhas, entre outros, será possível ao gestor estimar os parâmetros das distribuições que regem esses aspectos e, combinando essa informação com as decisões tomadas acerca das variáveis de entrada, ter uma noção para esperar por determinados valores de taxas de ocorrência dos eventos possíveis. Assim, o planejador será capaz de definir se a aplicação do modelo será vantajosa ao seu caso ou não.

Na tabela 1, *CS* representa a relação de custo entre as políticas para cada simulação, assumindo valor negativo quando o modelo desenvolvido no trabalho é mais vantajoso, e positivo quando do contrário. *MP*, *MC e MP oportunidade* denominam as taxas de ocorrência de manutenções preventivas, manutenções corretivas e manutenções preventivas oportunas, respectivamente, em cada simulação. O valor de P na tabela representa o percentual de componentes fracos na mistura, que são aqueles que chegam à operação em estado pré-defeituoso em decorrência de imperfeições quaisquer, como por exemplo variações no processo de fabricação ou montagem. Os parâmetros β e η são referentes aos parâmetros de forma e escala da função de Weibull, que definem o desvio padrão da curva e a escala da distribuição, enquanto que os 1 e 2 índices relacionam, como indicado na seção 3.2, esses parâmetros aos componentes fracos e fortes respectivamente, influenciando diretamente no comportamento de falha dos equipamentos analisados.

Os resultados mostram que a vantagem do modelo de oportunidades desenvolvido neste trabalho está associada a maiores ocorrências de oportunidades, em geral com índice de *MP* de oportunidade acima de 80% dos casos totais, apresentando economias que vão de 0,6% a 1,9% em relação às contenções já alcançadas pela política de [Scarf et al. 2009], exceto quando não há realização de inspeções, isto é, *K = 0*, ou quando o custo de falha é muito alto. Na prática, isto quer dizer que quando for possível prever parâmetros e condições de entrada correspondentes a

altas taxas de oportunidades nas simulações, a estratégia de manutenção descrita pelo modelo apresentado pode ser mais vantajosa do que o sistema centrado na idade proposto pelo referido autor.

Parâmetros de entrada											Comparativo (%)					
Nº	**β1**	**η1**	**β2**	**η2**	**P**	**λ**	**CI**	**CR**	**CF**	**Cop**	**K**	**Δ**	**CS**	**MP**	**MC**	**MP**
1	**2.5**	**3**	**5**	**18**	**0,1**	**0,5**	**0,05**	**1**	**10**	**0,5**	5.00	0,85	-1,8	9,7	7,4	82,8
2	2										5.00	0.87	-1.80	10.00	7.20	82.80
3	3										5.00	0.83	-1.80	9.40	7.60	83.00
4		2									5.00	0.60	-0.60	7.60	8.00	84.40
5		4									7.00	1.44	1.30	23.10	10.80	66.10
6			4								10.00	0.99	0.00	22.00	14.00	64.10
7			3.5								11.00	0.88	-1.00	21.30	16.00	62.70
8			3								13.00	0.75	-2.10	20.70	19.50	59.80
9				12							9.00	0.78	9.60	30.10	13.40	56.50
10				24							5.00	0.84	-1.80	5.40	7.40	87.20
11					0.25						1.00	2.74	8.60	16.10	9.00	74.90
12						1					8.00	1.33	9.90	30.50	9.10	60.40
13					0.05						1.00	2.96	-0.20	8.50	2.00	89.60
14					0.15						7.00	0.64	-2.80	9.90	12.10	78.00
15							0.025				16.00	0.68	3.70	23.10	14.30	62.60
16							0.075				2.00	1.75	-1.90	10.20	5.30	84.50
17									2		1.00	1.00	2.90	7.50	0.00	92.50
18									20		10.00	0.48	2.80	9.80	8.80	81.40
19										0.2	5.00	1.00	0.00	10.80	7.80	81.40
20										0.7	5.00	1.00	0.00	10.70	7.70	81.70

Tabela 1 Parâmetros e resultados

Na simulação de número 14 é possível encontrar a configuração na qual o modelo proporcionou o maior índice de economia, 2,8%. Esse resultado mostra que, em uma situação na qual o parâmetro P = 0.15, indicando que 15% dos componentes da mistura são classificados como fracos, é maior que na maioria das outras simulações, um alto número de inspeções e um baixo intervalo entre elas pode trazer benefícios em decorrência de haver uma maior prevenção em maior potencial de ocorrência de falhas prematuras decorrente do maior número de itens propensos a perderem totalmente sua capacidade de operação. Essa conclusão é corroborada na rodada de número 11, onde P = 0.25, acompanhado de um baixo número de inspeções (K = 1) e alto intervalo entre elas (Δ = 2.74), implicou em um custo 8,6% maior que a estratégia de Scarf et al. (2009).

Além dessa situação, é possível observar na Figura 3 que há casos onde o número de inspeções em valores de *K* maiores que 10 implica em vantagens por parte do modelo, possivelmente pelo fato da quantidade maior de inspeções diminuir o risco de se deixar o equipamento sem a realização de atividades de manutenção por muito tempo, o que pode acarretar em um menor número de *MC*, que são as mais dispendiosas.

Analisando a sensibilidade do modelo às variações de Δ na Figura 4, é possível notar que, em linhas gerais, valores dessa variável acima de 1 acarretam em casos nos quais a estratégia proposta é mais dispendiosa que a de Scarf et al. (2009). Nessas situações, um longo intervalo de tempo entre inspeções torna a política mais vulnerável a equipamentos com menores comprimentos de *delay-time*, aumentando a ocorrência de manutenções corretivas em detrimento às preventivas, resultando, consequentemente, em custos maiores.

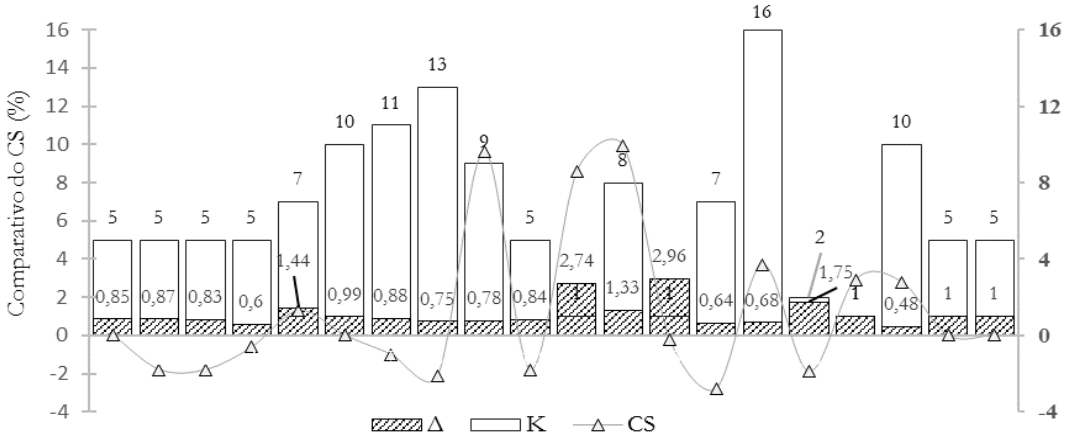


Figura 3: Comparativo (%) dos resultados da otimização para o custo de serviço em relação aos parâmetros Δ e K obtidos.

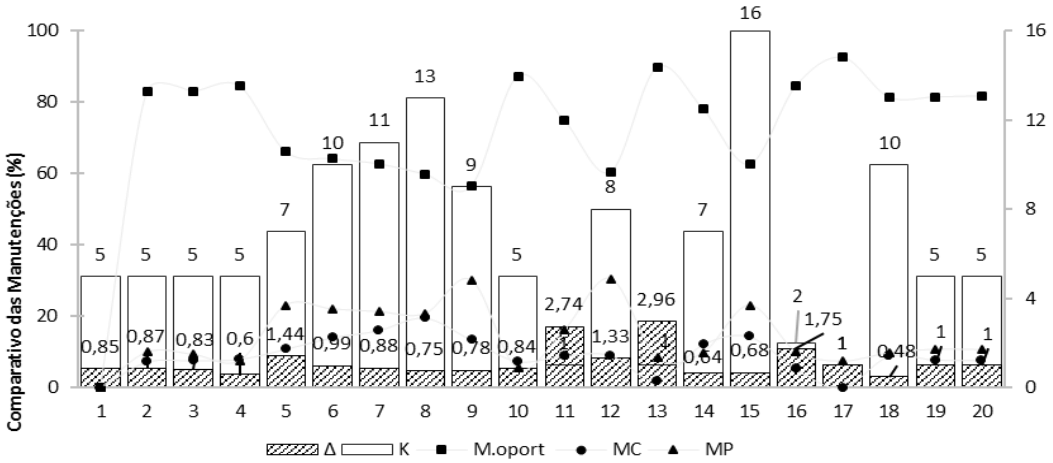


Figura 4: Comparativo das atividades de manutenção (%) dos resultados da otimização em relação aos parâmetros Δ e K obtidos.

5. Conclusões

A análise dos dados e resultados apresentados mostram que o sistema de oportunidades pode trazer benefícios entre 0,6% e 1,9% em termos de custo aos sistemas de geração eólica quando a taxa de manutenções preventivas está acima de 80%. Apesar das vantagens que já foram obtidas em alguns casos com relação à política proposta por Scarf et al. (2009), é possível que outras propostas de estudo possam trazer ainda mais contribuições. Assim, torna-se necessária a utilização em sistemas cujos parâmetros sejam os indicados para trazer uma alta taxa de manutenções por oportunidade. Levar em conta aspectos logísticos como custo de transporte e acesso à turbina, por exemplo, pode trazer à tona a verdadeira vantagem do modelo de oportunidades, assim como buscar outras formas de geração de oportunidades, como momentos de baixa produção da planta ou até mesmo baixa demanda do sistema que é abastecido pela central eólica. Todas essas análises podem trazer maiores índices de economia.

Além dessas questões, outros trabalhos podem ser desenvolvidos a partir da análise dos resultados da política do ponto de vista de outras questões, como confiabilidade e vida útil dos equipamentos, podendo gerar dados capazes de fornecer um suporte mais abrangente para a decisão de quem gerencia uma planta de energia eólica de acordo com as prioridades e particularidades do sistema ao qual a estratégia será aplicada.

Referências

Besnard, F. (2009). An optimization framework for opportunistic maintenance of offshore wind power system. 2009, [S.l: s.n.], 1–7.

Cavalcante, C. A. V., Lopes, R. S. (2015). Multi-criteria model to support the definition of opportunistic maintenance policy: A study in a cogeneration system. *Energy*, 80:32–40.

Cavalcante, C. A. V., Lopes, R. S. e Scarf, P. A. (2018). A general inspection and opportunistic replacement policy for one-component systems of variable quality. *European Journal of Operational Research*, 266(3):911–919.

Ding, F. e Tian, Z. (2012). Opportunistic maintenance for wind farms considering multi-level imperfect maintenance thresholds. *Renewable Energy*, 45:175–182.

Ding, F. e Tian, Z. (2011). Opportunistic Maintenance Optimization for Wind Turbine. *Renewable Energy*, 18(5): 1–18.

Faiz, T. I. (2014). Minimization of Transportation, Installation and Maintenance Operations Costs for Offshore Wind Turbines.

Florian, M. e Sørensen, J. D. (2017). Risk-based planning of operation and maintenance for offshore wind farms. *Energy Procedia*, 137:261–272.

Foley, J. T.; Gutowski, T. G. (2008). TurbSim: Reliability-based wind turbine simulator. [S.l.]: *IEEE*, 1–5.

Garambaki, A. H. S. Opportunistic inspection planning for Railway eMaintenance. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 28, p. 197–202, 1 jan. 2016.

Greco, A. Material wear and fatigue in wind turbine Systems. *Wear*, v. 302, n. 1–2, p. 1583–1591, 2013.

Hu, J.; Zhang, L. (2014). Risk based opportunistic maintenance model for complex mechanical systems. *Expert Systems with Applications*, 41(6):3105–3115.

Liang, H. (2015). Research on maintenance strategy optimization of wind turbines based on operation risk. *International Conference on Renewable Power Generation*, 1–5.

Nilsson, J. (2009). An opportunistic maintenance optimization model for shaft seals in feed-water pump systems in nuclear power plants. [S.l.]: *IEEE*, 1–8.

Sarker, B. R. e Faiz, T. I. (2016). Minimizing maintenance cost for offshore wind turbines following multi-level opportunistic preventive strategy. *Renewable Energy*, 85:104–113.

Sawyer, S., Teske, S. e Dyrholm, M. (2016). The Global Wind Energy Outlook. *Gwec*.

Scarf, P. A. e Cavalcante, C. A. V. (2009). An age-based inspection and replacement policy for heterogeneous components. *IEEE Transactions on Reliability*, 58(4):641–648.

Shafiee, M.; Finkelstein, M. e Bérenguer, C. (2015). An opportunistic condition-based maintenance policy for offshore wind turbine blades subjected to degradation and environmental shocks. *Reliability Engineering & System Safety*, 142:463–471.

Tamilselvan, P. e Wang, Y.; Wang, P. (2012). Optimization of wind turbines operation and maintenance using failure prognosis. [S.l.]: *IEEE*, 1–9.

Tavner, P. J., Xiang, J. e Spinato, F. (2007). Reliability analysis for wind turbines. *Wind Energy*, 10(1):1–18.

Tracht, K., Westerholt, J. e Schuh, P. (2013). Spare Parts Planning for Offshore Wind Turbines Subject to Restrictive Maintenance Conditions. *Procedia CIRP*, 7:563–568.

Whittle, M., Trevelyan, J. e Tavner, P. J. (2013). Bearing currents in wind turbine generators. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(5), 053128-1 - 053128-14.

Yang, L. (2016). A delay time model for a mission-based system subject to periodic and random inspection and postponed replacement. *Reliability Engineering & System Safety*, 150:96–104.

Yildirim, M., Gebraeel, N. Z. e Sun, X. A. (2017). Integrated Predictive Analytics and Optimization for Opportunistic Maintenance and Operations in Wind Farms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(6):4319–4328.