

Impacto da modelagem do *wake effect* na otimização do *layout* de um parque eólico *offshore*

Adriana Oliveira de Mendonça* Thais Cruz de Oliveira**
Vinicius Alburquerque Cabral*** Ivo Chaves da Silva Junior****

* e-mail: adriana.mendonca@engenharia.ufjf.br

** e-mail: thais.cruz@engenharia.ufjf.br

*** e-mail: albuquerque.vinicius@engenharia.ufjf.br

**** e-mail: ivo.junior@ufjf.br

† Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de
Fora, Juiz de Fora, MG

Abstract: This paper will compare two wake effect modeling, regarding their impacts on optimal positioning of turbines in a wind plant offshore, looking to get a physical setup that extracts the maximum power plant. For the optimization, there is a problem of discreet nature, non linear and with dimension related directly to the plant size and then, because of that, was chose to apply the computational intelligence called: Bat Algorithm, with some modifications. In order to estimate the wake effect and the potential wind Generation of the plant, this study proposes the comparasion of two models: the reduction results obtained by the Frandsen model, which is the latest in the studies and the Jensen model, the widespread in the literature and the most used in softwares nowadays. The results of this work validated the use of both wake effect methods for the proposed problem and showed the satisfactory performance of the ophimization algorithm in obtaining solutions to the problem.

Resumo: O presente trabalho visa comparar duas modelagens de *wake effect*, quanto aos seus impactos no posicionamento ótimo das turbinas em um parque eólico *offshore*, a fim de obter uma configuração física que extraia o máximo de potência. Quanto à otimização, tem-se um problema de natureza discreta, não linear e cuja dimensão relaciona-se, diretamente, ao tamanho do parque e optou-se por aplicar a técnica de inteligência computacional denominada *Bat Algorithm*, com algumas modificações, para a solução desse. Para avaliar o efeito esteira e o potencial de geração eólica do parque, o trabalho propõe a comparação dos resultados de redução obtidos pelo modelo de Frandsen, que é o mais atual nos estudos, com o modelo de Jensen, que é o mais difundido na literatura e o mais utilizado em *softwares* atualmente. Os resultados obtidos validaram a utilização de ambos os modelos de *wake effect* para o problema proposto e demonstraram o desempenho satisfatório do algoritmo de otimização na obtenção de soluções para o problema.

Keywords: Wake effect, Optimization, Bat Algorithm, Jensen, Frandsen.

Palavras-chaves: Wake effect, Otimização, Bat Algorithm, Jensen, Frandsen.

1. INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira passou por mudanças na última década e atualmente é considerada hidro-termo-eólica, possuindo 53,4% de fonte hidráulica, 30,1% de fonte térmica e 10,6% de fonte eólica no país, sendo dados da Empresa de Pesquisa Energética do ano de 2022, ano base 2021 EPE (2022). Um parque eólico pode ser *onshore* ou *offshore*, isto é, instalado na terra ou no mar, e isso determina diversas características que cada parque deve possuir.

Há um efeito que ocorre quando os aerogeradores estão a jusante um do outro na direção do vento, chamado de *wake effect*, ou efeito da esteira. Esse efeito causa uma redução da velocidade do vento na esteira a jusante, o que influencia diretamente na produção de energia do

parque eólico. Esse efeito em um aerogerador ainda pode ser múltiplo, quando há um sucessão de turbinas em uma fileira de vento. Isso justifica o impacto que a otimização do *layout* do parque eólico influencia em sua produção de energia, e assim, a importância de uma boa modelagem e simulação para uma melhor previsão sobre a geração do parque.

Dessa forma, há a necessidade de se analisar o efeito da esteira na localização proposta dos parques, pois esse efeito impacta no *layout* que deve ser construído os aerogeradores para se obter uma maior potência destes. Sendo assim, o foco do presente estudo é analisar e comparar dois modelos de *Wake Effect*, sendo o modelo de Jensen o mais antigo e amplamente difundido na literatura quando comparado ao modelo de Frandsen, que é consideravelmente mais recente. Para a otimização do *layout*, foi implementado

o método *Bat Algorithm*, com algumas modificações, a fim de tornar mais eficiente o processo de busca do algoritmo de ecolocalização.

Na Seção 2, são apresentadas as principais contribuições bibliográficas para esse artigo, na Seção 3, são equacionadas as duas modelagens utilizadas do *wake effect*, a Seção 4 apresenta a meta-heurística, *Bat Algorithm*, utilizada nos estudos realizados. A Seção 5 apresenta os dois parques simulados nesse estudo e, por fim, a Seção 6 apresenta a conclusão acerca dos estudos aqui realizados, com propostas de aprimoramentos da metodologia para trabalhos futuros.

2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

O tema em estudo é bastante amplo na literatura, sendo as principais contribuições para esse trabalho resumidas nesse capítulo. Na dissertação apresentada em Cabral (2020), é determinada a otimização do *layout* de um parque eólico *offshore* considerado o *wake effect* através da modelagem de Jensen e a otimização do sistema coletor através da redução das perdas elétricas e dos custos com aquisição de cabos do projeto. O autor analisou que, para a resolução de ambos os problemas, foram utilizados os algoritmos *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Grey Wolf Optimizer* (GWO), o *Bat-Algorithm* (BA) e uma versão deste algoritmo com modificações propostas que resultaram em um algoritmo BA Modificado. Os resultados obtidos demonstraram que as modificações realizadas sobre o BA fizeram com que a técnica apresentasse um melhor desempenho na obtenção de soluções desses problemas.

No estudo Gao (2020) é realizada uma comparação da potência extraída, custo de energia e eficiência da usina eólica, com o método de otimização *Multi-Population Genetic Algorithm* (MPGA) a fim de se obter o melhor *layout*. Foram considerados quatro modelos do *wake effect*, sendo eles: Jensen, Frandsen, 2D Jensen e 2D Jensen-Gaussiano. Os dois primeiros modelos são considerados lineares na descrição dos déficits de velocidade na região, enquanto os outros dois modelos são bidimensionais. A análise dos resultados dos modelos mostram que o modelo de Jensen obteve uma maior geração e eficiência do parque eólico, justificado por ele subestimar o déficit de velocidade na esteira, assim como no modelo de Frandsen, em que a velocidade na esteira é subestimada, resultando em uma geração de energia morta. O artigo concluiu que o modelo 2D Jensen-Gaussiano teve melhor desempenho na otimização do *layout* do parque eólico.

O autor em Cortez (2020) apresenta um estudo com o objetivo de avaliar a produção de energia anual de um parque eólico, considerando uma limitação de um *wake effect* em 5%. Estudo este feito através de 11 casos com diferentes distribuições dos aerogeradores, mas com todas as distribuições em forma de "V" com o objetivo de se ter baixo *wake effect* e foram considerados nos casos diferentes distâncias entre os aerogeradores e diferentes direções predominantes do vento. O estudo foi feito para os ventos de um local no município de Assunção Ixtaltepec, Oaxaca, México. Cada projeto de *layout* de parque eólico é simulado no *softwares* MATLAB e WAsP por meio da modelagem de Jensen, levando em consideração a rugosidade do terreno.

O artigo Barthelmie (2006) tem o objetivo de se comparar 6 modelagens do *wake effect*, sendo eles: modelo de engenharia, modelo WAsP (Jensen), modelo analítico, modelo FLaP (Ainslie), modelo UPMWAKE (Crespo) e o modelo de dinâmica de fluidos computacional. Os modelos foram comparados com os perfis de velocidade do vento de corrente livre e de esteira, medidos através de um sodar montado em um navio em um parque eólico *offshore* existente na cidade de Vindeby, Dinamarca - 11 aerogeradores. Os experimentos foram conduzidos em distâncias variáveis entre 1,7 e 7,4 diâmetros do rotor a jusante da turbina eólica. O estudo concluiu que não foi possível estabelecer nenhum dos modelos como tendo desempenho individualmente superior em relação às medições.

Outros trabalhos lidos na literatura possuem o objetivo de comparação dos modelos com parques reais já instalados, avaliando qual modelo de esteira calcula uma potência mais próxima da obtida pelo parque real, e esses diferentes estudos concluem diferentes modelos de *wake effect* como os mais próximos do real. Dessa forma, a proposta desse artigo é apresentar o impacto que diferentes modelagens podem ter na determinação do melhor *layout* de um parque eólico *offshore*, a partir da diferença das perdas de potência calculadas por cada método. Os modelos podem ser comparados quando ao otimismo, prevendo-se maiores ou menores perdas ainda que tenham *layouts* semelhantes.

3. MODELAGEM

Nesse artigo, os modelos de esteira de Jensen [Jensen (1983)] e de Frandsen [Frandsen (2006)] foram comparados. O modelo de Jensen é o modelo mais utilizado na literatura e muito utilizado em diversos *softwares* comerciais e o modelo de Frandsen foi escolhido para esse estudo por ser o mais atual dentre os mais modelados.

O modelo desenvolvido por Jensen foi proposto em 1983, mas com o passar dos anos foram desenvolvidas outras derivações desse modelo, como por exemplo o Jensen-Gaussiano e Jensen-2D [Gao (2016)]. De acordo com este modelo, a esteira gerada por uma turbina eólica se expande linearmente e o déficit de velocidade depende apenas da distância a jusante da turbina.

Define-se o raio da esteira pela Equação 1.

$$r_w = r_d + kX \quad (1)$$

Onde r_d é definido como o raio da esteira após a turbina, k é a constante de decaimento da esteira; e X é a distância a jusante da turbina. O déficit de velocidade V_{def} é calculado em cada ponto do campo pela Equação 2, onde C_t é o coeficiente de confiança da turbina eólica.

$$V_{def} = \frac{1 - \sqrt{1 - C_t}}{\left(1 + \frac{kX}{r_d}\right)^2} \quad (2)$$

O raio da esteira após a turbina, r_d , pode ser obtido a partir da Equação 3, no qual D_0 é o diâmetro da turbina.

$$r_d = \frac{D_0}{2} \sqrt{\frac{1 - a_{ind}}{1 - 2a_{ind}}} \quad a_{ind} = \frac{1 - \sqrt{1 - C_t}}{2} \quad (3)$$

O autor Frandsen em 2006 também assume uma distribuição de velocidade do vento constante na direção radial, porém ele aplica a teoria do momento assumindo auto-similaridade. Ele difere do anterior porque considera que a expansão do diâmetro da esteira é na forma de raiz quadrada ($k = 2$) ou solução de Schlichting ($k = 3$) [YANG (2020)]. Nesse modelo, o déficit de velocidade do vento e o raio de expansão da esteira são expressos pela Equação 4 e Equação 5, respectivamente.

$$V_{def} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - 2 \frac{A_0}{A_w} C_t} \right) \quad (4)$$

$$r_w = \frac{1}{2} D_0 (\beta^{k/2} + \alpha s)^{1/k} \quad (5)$$

No qual A_0 é a área de varredura do rotor da turbina eólica a montante, A_w é a área expandida da esteira e α é o fator de decaimento da esteira do modelo de Frandsen. As outras variáveis utilizadas nas equações estão definidos na Equação 6 e na Equação 7.

$$\beta = \frac{1 + \sqrt{1 - C_t}}{2\sqrt{1 - C_t}} \quad (6)$$

$$\alpha = \beta^{k/2} [(1 + 2k_f s)^k - 1] s^{-1} \quad s = \frac{X}{D_0} \quad (7)$$

Assim, a velocidade do vento corrigida para efeitos de esteira é exibida na Equação 8.

$$V_c = V(1 - V_{def}) \quad (8)$$

A Figura 1 exibe a diferença do efeito através das duas modelagens propostas. Percebe-se que o modelo desenvolvido por Frandsen inicia-se com uma maior abertura do que o de Jensen e, com o crescimento da esteira, este vai aumentando seu diâmetro.

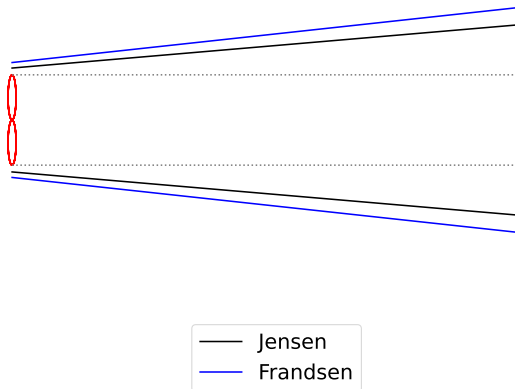


Figura 1. Efeito esteira gerado pelas duas modelagens analisadas.

4. OTIMIZAÇÃO

A metodologia de otimização desse artigo é baseada na comparação de diferentes modelos de otimização testados

pelo autor em Cabral (2020), em que foi comprovado que, para o problema de otimização do *layout* de um parque eólico *offshore*, o modelo desenvolvido pelo autor denominado *Bat Algorithm* Modificado foi superior computacionalmente quando comparado a outros modelos de otimização.

O BA é uma técnica de otimização bio-inspirada no comportamento de morcegos baseado em sua capacidade de ecolocalização, desenvolvida por Xin-She Yang [Yang (2010)]. Os morcegos utilizam emissões e recepções de ondas ultrassônicas para reconhecer presas, evitar obstáculos e detectar predadores, de forma que a distância é determinada calculando-se o tempo de retorno da onda refletida. Seguindo a abordagem proposta por Xin-She Yang, o repositório "SBSE_2023", no GitHub da autora [Mendonça (2023)], apresenta um fluxograma que descreve o funcionamento do algoritmo de ecolocalização, com todas as equações utilizadas.

O *Bat Algorithm* Modificado, algoritmo proposto nesse artigo, apresenta três modificações do BA original. A primeira refere-se à condição de ocorrer a busca local, a segunda refere-se ao aumento da taxa de emissão do pulso e a terceira refere-se à natureza das variáveis da resolução do algoritmo. Considerando o problema proposto, tais modificações permitem que boas soluções não sejam descartadas se a amplitude ainda estiver alta, ou seja, caso esteja na etapa da busca global. Além disso, permitem que a taxa de emissão de pulso e da redução da amplitude, que são as taxas que determinam se o algoritmo está na busca mais global ou local, sejam afetadas pelo número de estagnações do morcego, diferente do algoritmo original, em que essas são afetadas pela evolução das iterações. O autor em Cabral (2020) apresenta detalhes sobre as modificações propostas.

A função objetivo (FOB) deste estudo é a maximização da potência média extraída do parque e para a realização de seu cálculo é considerado todos os possíveis ângulos de incidência com suas respectivas velocidade média e probabilidade de ocorrência. A Equação 9 exibe a formulação matemática da FOB. Pode-se notar que o numerador da equação é uma forma de penalização para a alocação de mais de um aerogerador no mesmo bit. N_{dir} é o número de direções que serão consideradas, ρ_{dir}^d e θ^d são a probabilidade e o ângulo de incidência, respectivamente, da d -ésima direção. E v_n^d é a velocidade resultante incidente na turbina de índice n na direção d .

$$FOB = \frac{100000 \cdot n_{repetidos} + 1}{\sum_{d=1}^{N_{dir}} \rho_{dir}^d \sum_{n=1}^{N_T} P(v_n^d)} \quad (9)$$

5. ESTUDO DE CASOS

Para a comparação dos modelos de esteira, foram propostos três estudos de caso *offshore* no nordeste do Brasil com o objetivo de alocar 30 aerogeradores no parque. Os dados de vento das regiões analisadas foram obtidos pelo Global Wind Atlas (2021). A turbina considerada é a turbina Haliade-X da GE que possui 12 MW de potência nominal, 107 metros de raio da hélice e 220 metros de diâmetro do rotor. O parque considerado foi definido como sendo de 100 bits (10 x 10) sendo cada bit 5 vezes o diâmetro do rotor da

turbina, resultando em uma área disponível para o parque de 121km². Os dados do otimizador considerado em todos os casos foram de 50 execuções com 100 morcegos, 150 iterações máximas e com 50 o limite de estagnação.

5.1 Estudo de Caso 1

A localização desse primeiro estudo é cerca de 50 km da costa do estado do Rio Grande do Norte, onde há uma velocidade média de 9,4m/s de ventos e a rosa da velocidade e frequência desses ventos está apresentada na Figura 2. Para a direção de 30° há uma frequência de ocorrência de 3%, para a direção de 60° há uma frequência de 17%, para a direção 90° a frequência é de 20%, para a direção de 120° há a maior frequência de ocorrência de 49% e para a direção de 150° há a frequência de 11%.

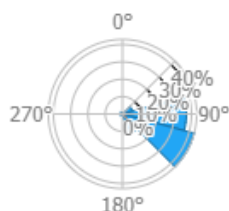


Figura 2. Rosa dos ventos do parque em estudo - Rio Grande do Norte.

Os resultados do primeiro caso para os modelos de esteira considerados estão apresentados na Tabela 1. A Tabela 2 apresenta a potência despachada pelo parque através de cada uma das cinco direções do vento existentes na região.

	Modelo de	
	Jensen	Frandsen
Tempo (min.)	5,71	5,3
Potência Gerada (MW)	324,18	344,88

Tabela 1. Análise dos resultados - Caso 1.

Direção	Modelo de Jensen Potência (MW)	Modelo de Frandsen Potência (MW)
30°	9,61	10,16
60°	54,50	57,60
90°	52,78	64,25
120°	169,28	173,83
150°	38,00	39,02

Tabela 2. Potência despachada em cada direção - Caso 1.

O layout gerado pelo modelo de Jensen é apresentado na Figura 3 e o gerado através do outro modelo analisado é apresentado na Figura 4.

Pode-se perceber que, nesse caso, como há 5 direções de vento, sendo a direção de 120° a de maior predominância, o layout para os dois modelos ficaram com predominância de fileiras para a mesma direção mas com quatro alocações diferentes. O modelo de Jensen considerou uma perda de 9,9% da potência devido ao efeito esteira, enquanto o modelo de Frandsen que é mais otimista, obteve uma perda de apenas 4,2% e o tempo computacional de ambos os métodos foram parecidos. E a parcela de potência resultante de cada direção do vento é proporcional a frequência de ocorrência do vento na direção analisada.

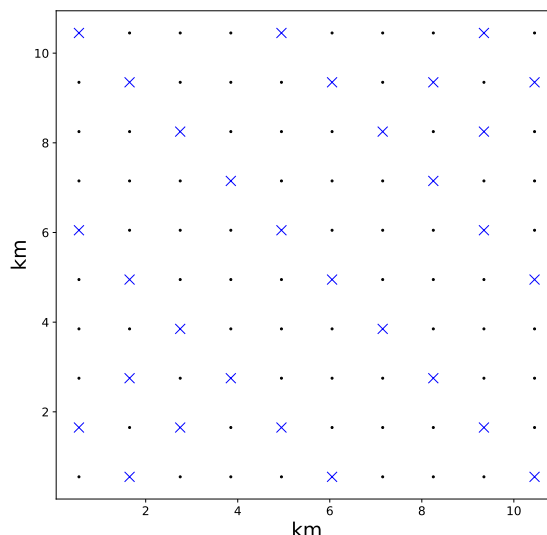


Figura 3. Layout otimizado pelo modelo de Jensen - Caso 1.

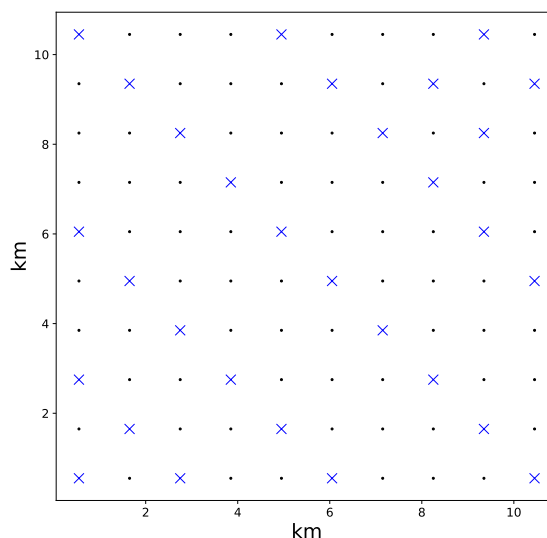


Figura 4. Layout otimizado pelo modelo de Frandsen - Caso 1.

5.2 Estudo de Caso 2

Para o segundo estudo de caso, analisa-se outra região do Brasil que está a 50 km do arquipélago de Fernando de Noronha, no qual tem-se a rosa dos ventos apresentada na Figura 5. Essa região possui na direção de ventos de 60° uma frequência de 1%, na direção de 90° uma frequência de 12%, na direção de 120° uma frequência de 68% e na direção de 150° uma frequência de 19% e uma velocidade média de 7,29 m/s.

Os resultados do segundo caso analisado para os modelos de esteira considerados estão apresentados na Tabela 3 e a Tabela 4 apresenta a potência despachada pelo parque pelas diferentes direções dos ventos.

Para essa região, o layout gerado pelo modelo de Jensen foi o mesmo gerado pelo modelo de Frandsen, apresentado na Figura 6.

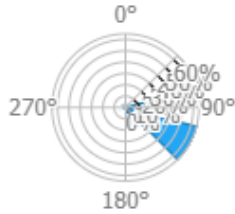


Figura 5. Rosa dos ventos do parque em estudo - Fernando de Noronha.

	Modelo de	
	Jensen	Frandsen
Tempo (min.)	5,77	5,85
Potência Gerada (MW)	335,43	348,75

Tabela 3. Análise dos resultados - Caso 2.

Direção	Modelo de Jensen Potência (MW)	Modelo de Frandsen Potência (MW)
60°	3,20	3,43
90°	31,67	38,37
120°	234,92	239,91
150°	65,64	67,03

Tabela 4. Potência despachada em cada direção - Caso 2.

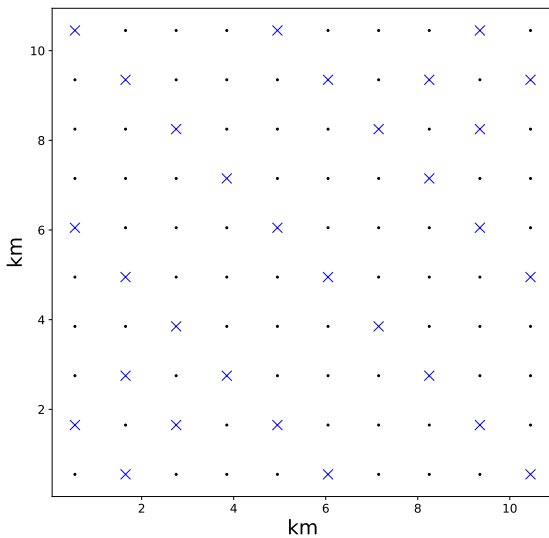


Figura 6. Layout otimizado pelo modelo de Jensen e Frandsen - Caso 2.

Interessante analisar esse caso que como o vento dessa região só acontece em quatro direções sendo uma delas com 68% de ocorrência, o processo de otimização obteve o mesmo layout nos dois casos, esse fato valida esse layout através dessa corroboração. Porém, como um modelo é mais otimista que o outro, tiveram potências geradas pelo parque diferentes. O modelo de Jensen considerou 6,82% de perdas e o modelo de Frandsen considerou apenas 3,12% com o mesmo layout. Outra análise que pode ser feita é que o layout desse Caso 2 foi igual ao obtido pelo modelo de Jensen no Caso 1, isso é justificado pois nos dois casos a maior parcela dos ventos é da direção de 120°, porém, como há velocidades médias e probabilidades diferentes, as potências obtidas são diferentes.

5.3 Estudo de Caso 3

Para o terceiro estudo de caso, analisa-se outra região do Brasil que está cerca de 50 km da capital São Luís do estado de Maranhão, no qual tem-se a rosa dos ventos apresentada na Figura 7. Essa região possui na direção de ventos de 0° uma frequência de 2%, na direção de 30° uma frequência de 16%, na direção de 60° uma frequência de 59%, na direção de 90° uma frequência de 22% e na direção de 120° uma frequência de 1%, e sua velocidade média é de 6,65 m/s.

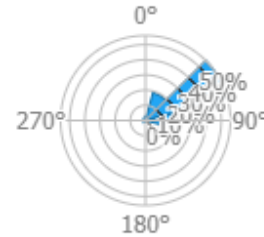


Figura 7. Rosa dos ventos do parque em estudo - Maranhão.

No terceiro caso, os resultados obtidos para os modelos de esteira considerados estão apresentados na Tabela 5 e a Tabela 6 apresenta a potência despachada pelo parque pelas cinco diferentes direções dos ventos dessa região.

	Modelo de	
	Jensen	Frandsen
Tempo (min.)	5,57	5,39
Potência Gerada (MW)	325,65	346,56

Tabela 5. Análise dos resultados - Caso 3.

Direção	Modelo de Jensen Potência (MW)	Modelo de Frandsen Potência (MW)
0°	5,28	6,42
30°	55,27	56,76
60°	203,83	209,31
90°	58,06	70,67
120°	3,20	3,38

Tabela 6. Potência despachada em cada direção - Caso 3.

O layout gerado pelo modelo de Jensen é apresentado na Figura 8 e o gerado através do modelo de Frandsen é apresentado na Figura 9.

Para esse terceiro caso, ambos os modelos apresentaram layouts de forma ordenada e bem semelhantes, porém com quatro alocações diferentes, assim como no Caso 1. O modelo de Jensen apresentou 9,54% de perda devido ao efeito esteira e o segundo modelo analisado considerou 3,73%. Os tempos computacionais de ambos continuaram sendo próximos e a potência despachada por cada direção com fração próxima da frequência de ocorrência do vento naquela direção. Pode-se analisar que o layout obtido nesse caso foi parecido com o do Caso 3 porém com uma rotação, isso é devido a maior frequência dos ventos ocorrer na direção de 60°, enquanto do Caso 1 era na direção de 120°.

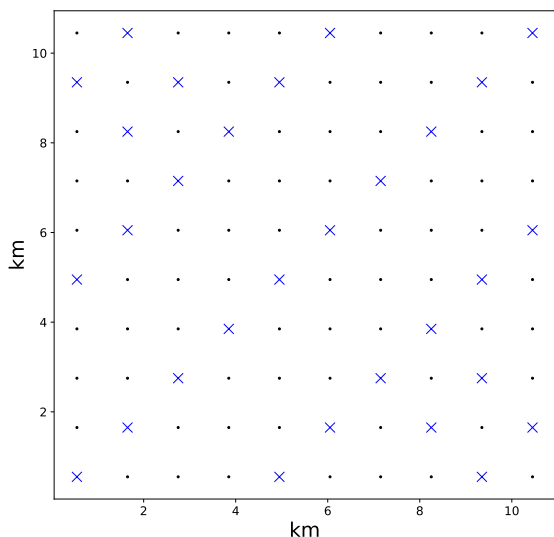


Figura 8. *Layout* otimizado pelo modelo de Jensen - Caso 3.

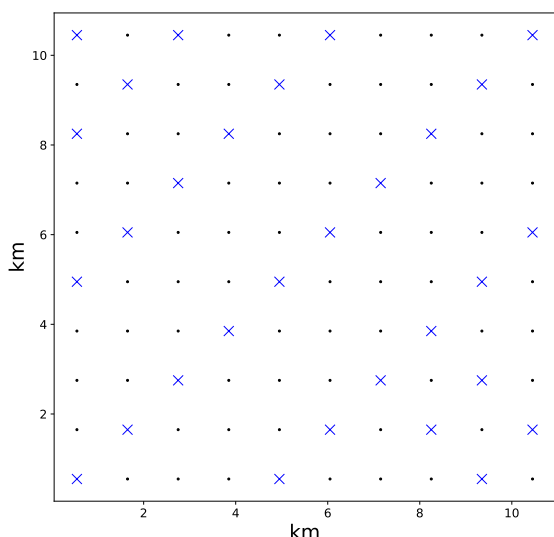


Figura 9. *Layout* otimizado pelo modelo de Frandsen - Caso 3.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma metodologia de otimização para o planejamento de parques eólicos *offshore* através da utilização da meta-heurística *Bat Algorithm*, com algumas modificações em seu processo de busca. A definição do *layout* de um parque deve ser bastante estudada para maximizar a potência da usina e, para isso, é necessário considerar o efeito da esteira ocorrido.

Esse estudo mostrou que para três diferentes regiões do Brasil e analisando duas modelagens de *wake effect*, a otimização resultou em *layouts* parecidos para cada situação estudada. O tempo computacional dos dois modelos foi bem próximo, e quanto a potência do parque, o modelo de Jensen apresentou ser mais pessimista enquanto o modelo de Frandsen foi mais otimista quanto a geração de energia, e isso justifica a importância de se estudar diferentes modelagens para, assim, o planejamento do empreendimento ter melhores previsões e propostas.

A contribuição principal desse artigo é a análise do impacto no planejamento de um parque eólico *offshore* ao considerar diferentes modelagens do efeito esteira, parques estes que estão em constante crescimento no mundo e são muito promissores no Brasil. Para uma maior comparação entre os modelos, tem-se como proposta de trabalhos futuros a investigação de outras modelagens do *wake effect*, como o modelado por Larsen e o Jensen-Gaussiano, e em parques com maiores dimensões. Além disso, tem-se a proposta da otimização do *layout* juntamente do sistema coletor da usina.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora (PPEE) e a Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa (PROPP) da Universidade Federal de Juiz de Fora pelo apoio no desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- Atlas, G.W. (2021). Global wind atlas. url:<https://globalwindatlas.info/en>.
- Barthelmie, R.J.e.a. (2006). Comparison of wake model simulations with offshore wind turbine wake profiles measured by sodar. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 23, 888–901.
- Cabral, V.A. (2020). *Otimização de layout e sistema coletor de parques eólicos offshore*. Master's thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.
- Cortez, R.I.e.J.R.D. (2020). Analysis of the wake effect in the distribution of wind turbines. *IEEE Latin America Transactions*, 18, 668–676.
- EPE (2022). Balanço energético nacional 2022. url:<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>.
- Frandsen, S.e.B.R. (2006). Analytical modelling of wind speed deficit in large offshore wind farms. *Wind Energy*.
- Gao, X.e.a. (2020). Comparisons of the accuracy of different wake models in wind farm layout optimization. *Energy Exploration Exploitation*, 38, 1725–1741.
- Gao, X., Y.H.e.L.L. (2016). Optimization of wind turbine layout position in a wind farm using a newly-developed two-dimensional wake model. *Appl. Energy*.
- Jensen, N.O. (1983). A note on wind generator interaction. *Risø National Laboratory*.
- Mendonça, A. (2023). Github: Adriana-Oliveir - repositório SBSE_2023. url:https://github.com/Adriana-Oliveir/SBSE_2023.
- YANG, K. (2020). Determining an appropriate parameter of analytical wake models for energy capture and layout optimization on wind farms. *energies*. *Energies*.
- Yang, X.S. (2010). A new metaheuristic bat-inspired algorithm. in: Nature inspired cooperative strategies for optimization. *NICSO*, 65–74.