São José dos Campos - SP
LV SBPO
LV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
São José dos Campos, SP - 6 a 9 de novembro de 2023

COMPARAÇÃO DE DOIS MODELOS DE *WAKE EFFECT* ATRAVÉS DA OTIMIZAÇÃO DO *LAYOUT* DE UM PARQUE EÓLICO *OFFSHORE*

Adriana Oliveira de Mendonça
Universidade Federal de Juiz de Fora
Campus Universitário, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, Juiz de Fora - MG
adriana.mendonca@engenharia.ufjf.br

Thaís Cruz de Oliveira, Vinícius Alburquerque Cabral, Ivo Chaves da Silva Junior
Universidade Federal de Juiz de Fora
Campus Universitário, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, Juiz de Fora - MG
thais.cruz@engenharia.ufjf.br,
albuquerque.vinicius@engenharia.ufjf.br, ivo.junior@ufjf.br

RESUMO

O presente trabalho aborda a comparação entre dois modelos de *wake effect*, através da otimização do *layout* de um parque eólico *offshore*. Esse é um problema de natureza discreta, não linear e cuja dimensão relaciona-se, diretamente, à estrutura física do parque. Diante das modelagens de *wake effect* de Jensen e de Frandsen, objetiva-se aplicar a técnica de inteligência computacional denominada de *Bat Algorithm*, com determinadas modificações, a fim de avaliar o *layout* do parque eólico. Para tanto, a otimização consiste na definição do posicionamento dos aerogeradores, para obter uma configuração física que extraia o máximo de potência, considerando as reduções impostas pelo *wake effect*. Pode-se validar, de maneira satisfatória, a utilização de ambos os modelos de *wake effect* para o problema proposto. Como traços principais, o estudo aborda a melhor escolha do modelo de *wake effect* para projetos de um parque eólico e uma estimativa da geração desse parque.

PALAVRAS CHAVE. ***Wake Effect*, *Bat Algorithm*, Jensen, Frandsen.**

ABSTRACT

The present work approaches the comparison between two models of wake effect, through the optimization of the layout of an offshore wind farm. This is a discreet, non-linear problem whose dimension is directly related to the physical structure of the park. In view of Jensen's and Frandsen's wake effect modeling, the objective is to apply the computational intelligence technique called Bat Algorithm, with certain modifications, in order to evaluate the layout of the wind farm. For that, the optimization consists of defining the positioning of the wind turbines, to obtain a physical configuration that extracts the maximum power, considering the reductions imposed by the wake effect. The use of both wake effect models for the proposed problem can be satisfactorily validated. As main features, the study addresses the best choice of wake effect model for wind farm projects and an estimate of the generation of this park.

KEYWORDS. Wake Effect, Bat Algorithm, Jensen, Frandsen.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175189
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175189

1. Introdução

A necessidade de garantir uma segurança energética para os próximos anos, somada à preocupação mundial com as mudanças climáticas e as questões ambientais, impõe certa exigência de alterações na matriz energética mundial. Tais alterações são enfatizadas pela integração de fontes de energia alternativas e renováveis, principalmente em países desenvolvidos. Os dados do REN21 [1] reforçam essa premissa, apontando para uma redução da utilização de fontes de combustíveis fósseis de 68% para 62% e de fontes de energia nuclear de 12% para 10%, enquanto as energias solar e eólica apresentam um aumento significativo, 2% para 10%, do ano de 2011 para o ano de 2021. Mesmo sendo indiscutíveis as diferenças entre a matriz energética mundial e a matriz energética nacional, no cenário brasileiro os recursos renováveis vêm sendo ainda mais utilizados, especialmente devido à considerável disponibilidade desses recursos[2]. Esse fato fica evidente na distribuição da matriz energética brasileira, atualmente composta por 12,5% de energia eólica, 8,7% de biomassa e 3,9% de energia fotovoltaica [3].

Dentre as fontes renováveis e alternativas em expansão, destaca-se a energia eólica. Essa indústria apresentou um crescimento global significativo nos últimos anos, marcado principalmente pelos últimos três anos (2020, 2021, 2022), sendo esses os melhores quando se refere à capacidade adicionada mundialmente [4] [5]. Estima-se ainda, segundo [5], que neste ano tal capacidade adicionada globalmente exceda 100GW pela primeira vez. No âmbito nacional, conta-se atualmente com uma capacidade instalada de 24,13GW, contabilizando um total de 869 parques eólicos. As previsões apontam para uma capacidade instalada de 44,78GW no Brasil, até 2028 [3].

Quanto à estrutura de um parque eólico, este pode ser um empreendimento *onshore*, quando localizado sobre a terra, ou *offshore*, quando localizado no mar. Visando balancear vantagens e desvantagens, é notável o principal problema quanto às instalações *offshore*, uma vez que sua estrutura deve se adequar ao ambiente aquático e à distância do ponto de conexão, logo aumentando sua complexidade e, consequentemente, os custos. No entanto, a escolha dessa estrutura reduz, de maneira considerável, a poluição sonora e visual, que afeta as populações próximas às usinas eólicas *onshore*. Além disso, apesar do maior investimento inicial, um dos maiores atrativos para a construção de estruturas *offshore* é a elevada capacidade de aproveitamento dos ventos no oceano associada à ausência de obstáculos, resultando em uma maior extração de potência. Dado esse cenário, o número de parques *offshore* vêm aumentando globalmente e com previsões de viabilização de projetos para operação desses no Brasil.

Diante do contexto mencionado, o foco do presente estudo é analisar e comparar dois modelos de *Wake Effect*, quanto aos critérios de otimização do *layout* de um parque eólico. O modelo de Jensen(1986) é o mais antigo e amplamente difundido na literatura quando comparado ao modelo de Frandsen(2006), que é consideralvemente 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.

O presente artigo está dividido em seis capítulos, sendo nesta Seção 1 uma contextualização quanto aos cenários mundial e nacional do tema em estudo. Na Seção 2, apresenta-se as principais revisões bibliográficas que contribuíram para o estudo. Na Seção 3, tem-se a modelagem do *Wake Effect*, através dos modelos de Jensen e de Frandsen. Em seguida, está descrito, na Seção 4, o modelo de otimização implementado, o *Bat Algorithm* Modificado. Na Seção 5, demonstra-se os estudos e análises de casos e, por fim, na Seção 6 são expostas as conclusões obtidas com o estudo.

2. Referências Bibliográficas

Apesar do tema em estudo ser bastante difundido na literatura, ele se apresenta mais de forma comparativa dos modelos quanto à validação de um parque já existente, e não de analisar o

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175189
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175189

impacto que diferentes modelagens do *wake effect* trazem para o problema de otimização do *layout*, como proposto nesse artigo. E essa comparação dos modelos quanto ao parque acaba dependendo de diversos fatores, como o parque ser *onshore* ou *offshore*, direção e velocidade dos ventos da região, tamanho do parque, distância entre os aerogerador, dentre diversos outros fatores.

O artigo [6] faz a avaliação de três modelos do *wake effect*, sendo eles Jensen, Larsen e Fuga, sobre dois sistemas eólicos *offshores* existentes, Horns Rev (costa oeste da Dinamarca - 80 aerogeradores) e Lillgrund (costa sudoeste da Suécia - 48 aerogeradores). Os resultados comprovam a robustez dos modelos para fornecer previsões precisas de potência quando as simulações são calculadas em setores de direção do vento de 30°, com uma margem de erro de 1,5 %. No entanto, todos os modelos subestimam a produção de energia de uma fileira de turbina eólica usando setores estreitos de 3° ou 5° e foi concluído que essa discrepância é causada pela incerteza da direção do vento que não é modelada nas simulações.

No estudo [7] 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 subestimado, 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 artigo [8] traz uma comparação dos três modelos de *wake effect* mais comuns, sendo eles *Eddy viscosity*, Larsen, Jensen e Frandsen, em uma usina em operação *onshore* denominada Sungsan (extremo sul da Coreia - 10 aerogeradores). Os resultados demonstram que o modelo de Jensen é o melhor modelo para prever o déficit de velocidade sob uma condição específica de velocidade do vento, e os modelos de viscosidade turbulenta e Larsen são relativamente precisos para prever a largura da esteira e seu perfil. Porém, o autor conclui que é necesário um estudo cauteloso para a avaliação do fenômeno, pois a precisão da previsão dos modelos de esteira varia com a condição de distância do aerogerador à jusante.

No artigo [9], foram realizadas comparações dos modelos: Jensen, Ainslie, Larsen, Frandsen e Gaussiano com a previsão da produção de energia com base em dados de parque eólicos reais. Os dados considerados cobriram os 12 meses de 2016 em incrementos de 10 minutos, sendo que 9 meses foram utilizados para o treino do modelo e os outros 3 meses usados para a validação proposta. A direção do vento foi descrita partindo de Norte e indo no sentido horário. O artigo ainda diz que o ideal seria mesclar os modelos de esteiras existentes e que para isso existem quatro métodos: Superposição Linear; Superposição quadrática; Superposição dentro da abordagem de meandro dinâmico; Abordagem de superposição da esteira de Larsen. Depois do estudo pela literatura, Liviero estuda um modelo empírico baseado nos dados, e cria-se um conjunto de equações na tentativa de prever a potência de saída de uma única turbina usando apenas a velocidade e a direção do vento como entradas, e assim, todas as propostas de modelos e estudos são comparadas. Como conclusão, destaque o modelo espírico e julgou-se o modelo físico como o pior principalmente pelo tempo gasto para formulá-lo. Sendo assim, é finalizado com a afirmação de que a melhor abordagem para este tipo de estudo é a estatística, pois há diversos fenômenos físicos que devem ser considerados nos modelos.

O artigo [10] traz uma comparação da intensidade da turbulência em cada direção do

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175189
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175189

parque eólico considerando quatro tipos de modelos do *wake effect*, sendo eles: Jensen, Frandsen, Larsen e Jensen-Gaussiano. Os resultados calculados pelos modelos foram analisados em relação ao déficit de potência e produção de energia do parque eólico, em comparação com dados reais coletados de um parque eólico *onshore* (Gasiri - Coréia do Sul). Os resultados do estudo mostraram que os modelos Jensen e Jensen-Gaussiano concordaram mais com a distribuição do déficit de potência das turbinas eólicas do que quando os mesmos parâmetros gerais recomendados foram aplicados em todas as direções. Quando comparados quanto a produção de energia, a diferença máxima entre os modelos de esteira foi de aproximadamente 3%.

3. Modelagem do *Wake Effect*

Segundo Ritter [11] os modelos de esteira podem ser separados em dois grupos, sendo eles os explícitos (modelos cinéticos) e os implícitos (modelos de campo). Alguns modelos explícitos existentes seriam: Jensen (1983), Larsen (1988) e Frandsen (2006). Alguns modelos implícitos seriam: Eddy-Viscosity (1988) e Fuga (2011). Os modelos mais difundidos na literatura são os de Jensen, Larsen e Frandsen.

Nesse artigo, os modelos de esteira de Jensen [12] e de Frandsen [13] foram comparados. O modelo de Jensen é o modelo mais utilizado na literatura e muito utilizado em diversos *softwares* comerciais como o WAsP, o *Garrad Hassan* (GH), o *WindFarmer* e o *WindPRO* [14], [15]. Dentre outros modelos investigados na literatura, como Larsen (1988), Ainslie (1988), Ishihara (2004), o modelo de Frandsen (2006) foi escolhido para esse estudo por ser 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 [16] e Jensen-2D [17]. 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.

$$r_w = r_d + kX \tag{1}$$

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.

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

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.

$$r_d = \frac{D_0}{2}\sqrt{\frac{1 - a_{ind}}{1 - 2a_{ind}}} \qquad\qquad a_{ind} = \frac{1 - \sqrt{1 - C_t}}{2} \tag{3}$$

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) [10]. Nesse modelo, o déficit de velocidade do vento e o raio de expansão da esteira são expressos pela Equação 4 e pela Equação 5, respectivamente.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175189
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175189

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

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

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, na Equação 7 e na Equação 8.

$$\beta = \frac{1 + \sqrt{1 - C_t}}{2\sqrt{1 - C_t}} \tag{6}$$

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

$$s = \frac{X}{D_0} \tag{8}$$

Assim, a velocidade do vento corrigida para efeitos de esteira é exibida na Equação 9.

$$V_c = V(1 - V_{def}) \tag{9}$$

4. Metodologia da Otimização

A metodologia desse artigo é baseada na comparação de diferentes modelos de otimização testados pelo autor em [18], 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 aos modelos *Bat Algoritm* [19], *Grey Wolf Optimizer* [20] e *Particle Swarm Optimization* [21].

O *Bat Algorithm* (BA) é uma técnica de otimização bio-inspirada no comportamento de morcegos, com resultados probabilísticos, desenvolvida por Xin-She Yang em 2010. O algoritmo basea-se na capacidade de ecolocalização dos morcegos, que utilizam um tipo de sonar para detecção de presas e determinação da posição de obstáculos, por meio da emissão de ondas ultrassônicas. Esse modelo tem ampla utilização e é muito difundido na literatura.

O modelo *Bat Algorithm* Modificado tem três modificações do BA desenvolvido por Yang, sendo a primeira quanto à condição de ocorrer a busca local, a segunda quanto ao aumento da taxa de emissão do pulso e a terceira quanto à natureza das variáveis da resolução do algoritmo. Essas modificações foram realizadas para o problema proposto e permitem que boas soluções não sejam descartadas se a amplitude ainda estiver alta, isso significa se estiver na etapa da busca global. E determina-se ainda que a taxa de emissão de pulso e da redução da amplitude, que são as taxas que determinam se o algoritmo está na busca global ou local, sejam afetadas pelo número de estagnações do morcego e não com a evolução das iterações, como é feito no algoritmo original. O pseudocódigo do BA está apresentado na Figura 1.

Sendo assim, é necessário inserir como parâmetros de entrada do algoritmo o tamanho da região considerada, a quantidade de aerogeradores que devem ser alocados, a velocidade, a frequência e a direção dos ventos da região, a distância entre os aerogeradores e os diversos parâmetros do aerogerador considerado. Quanto à região do parque, o algoritmo inicialmente define a quantidade de bits possíveis para a alocação dos aerogeradores, de forma que a quantidade de

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175189
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175189

Algoritmo 1 *Bat Algorithm - BAT*

Inicializar Parâmetros n, α, λ
Inicializar Morcegos: (X_i, com $i = 1, 2, ...N_{\text{morcegos}}$)
Avaliar Morcegos: $fun(X_i)$
Atualizar Melhor morcego: (X_*^t)
Enquanto o critério de parada não for atendido, **faça**:
  Loop 1:n
   $fr_i = fr_{\min} + (fr_{\max} - fr_{\min})\beta \quad \beta \in [0, 1]$
   $V_i^{t+1} = V_i^t + (X_i^t - X_*^t)fr_i$
   $X_i^{t+1} = V_i^{t+1} + X_i^t$
   Se $\xi_1 > r_i$, $\xi_1 \in [0, 1]$, **faça**:
    $X_{i-temp}^{t+1} = X_*^t + \epsilon média(A_i^t), \quad \epsilon \in [-1, 1]$
   Fim Se
   Verificar violações e **Avaliar** morcego: $fun(X_i^{t+1})$
   Se $\xi_2 < A_i^t$ e $fun(X_{i-temp}^{t+1}) \leq fun(X_i^t)$, **faça**:
   $r_i^{t+1} = r_i^0(1 - e^{-\lambda t})$
   $A_i^{t+1} = \alpha A_i^t$
   $X_i^{t+1} = X_{i-temp}^t$
   Fim Se
  Fim Loop
fim Enquanto
Retornar X_*^t

Figura 1: Pseudo-código do *Bat Algorithm*.

aerogeradores seja inserida dentre os bits e o resultado do melhor *layout* define uma solução binária dentre os bits.

A função objetivo (FOB) deste estudo é da 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 10 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.

$$FOB = \frac{100000.n_{repetidos} + 1}{\sum_{d=1}^{N_{dir}} \rho_{dir}^d \sum_{n=1}^{N_T} P(v_n^d)} \tag{10}$$

$$v_n^d = u_0^d(1 - \delta_n^d), \forall n, d \qquad \delta_n^d = \sum_{i=1}^{N_T} \frac{A_{in}\theta^d}{A_T} \left(1 - \frac{u_{in}\theta^d}{u_0^d}\right)^2, \forall i, d \tag{11}$$

5. Estudo de Casos

Para a comparação dos modelos de esteira, foram propostos dois estudos de casos. Para análises, optou-se por extrair os dados da região *offshore* no estado do Rio Grande do Norte do Brasil (-4.665511°, -36.86992°), apresentada na Figura 2, onde há alta velocidade média de ventos e a rosa da velocidade e frequência desses ventos está apresentada na Figura 3. Os dados de vento considerados dessa região foram obtidos pelo site Global Wind Atlas [22], que informa todos os

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175189
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175189

dados necessários para a realização dos estudos. A turbina fictícia considerada no estudo possui 10 MW de potência nominal, 40 metros de raio da hélice e 100 metros de diâmetro do rotor.

O primeiro estudo de caso é fictício considerando apenas ventos em 12 direções (com intervalos de 30°) com mesma probabilidade, a fim de validar a metodologia, e, no segundo estudo, de caso são considerados os dados de vento reais da região analisada. Foram considerados 100 bits (10 x 10) sendo cada bit de 5 vezes o diâmetro do rotor da turbina, e deseja-se implementar um parque eólico com 40 turbinas.



Figura 2: Localização do parque em estudo.

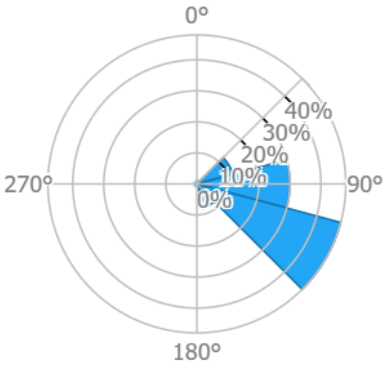


Figura 3: Rosa da velocidade e frequência dos ventos da localização em estudo.

5.1. Estudo de Caso 1

Os dados considerados para cada simulação do algoritmo, a geração do parque eólico desenvolvido e os tempos obtidos para a otimização, considerando-se cada uma das modelagens do *Wake Effect*, estão apresentados na Tabela 1. É válido ressaltar que, para todas as análises, foi considerada uma velocidade incidente no parque de 11,4 m/s.

	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4
Execuções	5	10	50	100
População	20	50	100	250
Iterações Máx.	50	100	150	300
Estagnação Máx.	10	50	50	50
Tempo Jensen (min.)	1,05	2,16	7,78	15,61
Tempo Frandsen (min.)	1,05	1,6	7,73	15,52
Potência Gerada Jensen (MW)	314,69	314,69	314,69	314,69
Potência Gerada Frandsen (MW)	372,71	374,40	374,40	374,40

Tabela 1: Análise dos resultados - Caso fictício.

Por meio das quatro análises propostas, conclui-se que à medida em que aumenta-se os parâmetros da otimização (população, número de iterações e número de estagnações), são obtidos *layouts* que geram maiores potências, de tal forma a garantir a obtenção do máximo global de geração do parque. Porém, é evidente, comparando-se as análises, que há um limite de potência gerada, em que um aumento nos parâmetros de otimização não causa mais efeitos sobre a solução obtida para o problema, apenas aumenta o tempo de implementação do algoritmo. Além disso, nota-se o comportamento satisfatório do algoritmo na solução do problema proposto, tendo em vista que, mesmo para valores significativamente baixos dos parâmetros de otimização, o mesmo

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175189
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175189

apresenta valores consideravelmente altos para a potência gerada pelo parque, logo garantindo uma resposta bem próxima à otimalidade global.

Dado o objetivo principal do trabalho que é a definição do melhor *layout*, as Figuras 4 e 5, apresentam os melhores *layouts* obtidos pelo algoritmo de otimização (BAT Modificado), considerando os modelos de Jensen e de Frandsen, respectivamente, para um vento incidente em 12 direções com frequências de ocorrência iguais.

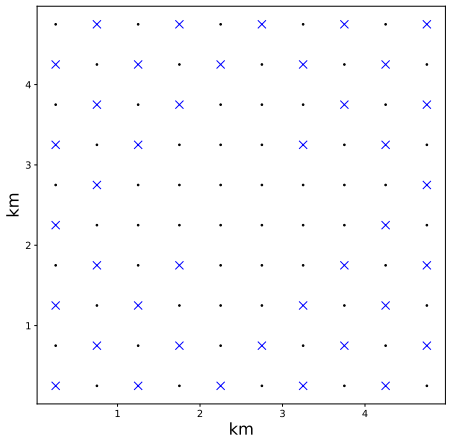


Figura 4: *Layout* gerado - Modelagem de Jensen: Caso fictício

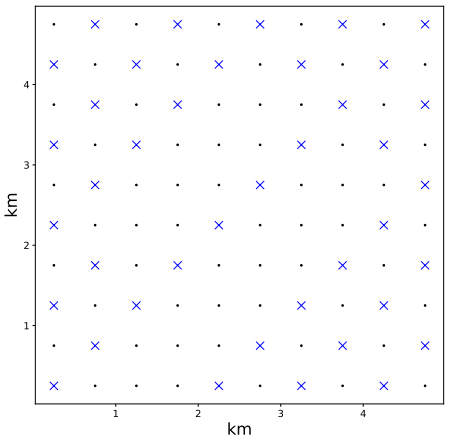


Figura 5: *Layout* gerado - Modelagem de Frandsen: Caso fictício

Uma análise simplificada dos dados obtidos permite validar ambos os modelos de *wake effect* para o caso de ventos fictícios, tendo em vista que a localização ótima resultante do processo de otimização foi bem semelhante, mantendo-se a mesma estrutura do parque eólico, apesar da localização das turbinas não serem exatamente iguais. Porém, observa-se que o modelo de esteira de Jensen foi mais pessimista quanto a produção de potência do parque. Isso ocorre devido aos valores superiores do seu cálculo de modelagem do *Wake Effect* quando comparado ao outro modelo analisado nesse estudo. As distribuições das gerações obtidas pelo algoritmo em suas execuções estão apresentadas nas Figuras 6 e 7, para os modelos de Jensen e de Frandsen, respectivamente.

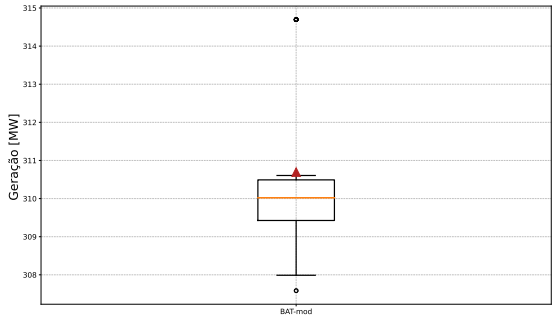


Figura 6: Distribuição da geração obtida - Modelagem de Jensen: Caso fictício

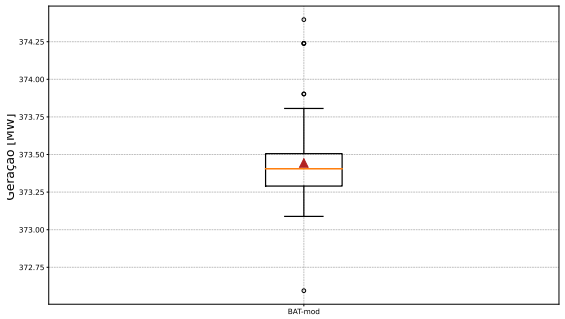


Figura 7: Distribuição da geração obtida - Modelagem de Frandsen: Caso fictício

Com base nos dados da análise 3 e a fim de avaliar o comportamento da convergência do algoritmo, é apresentada a curva de convergência do BAT Modificado, para cada modelagem do efeito esteira, nas Figuras 8 e 9. Em ambas as modelagens, a trajetória de convergência do BAT é satisfatória, valindo seu processo de busca pela região de solução, já que consegue se aproximar rapidamente da solução ótima.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175189
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175189

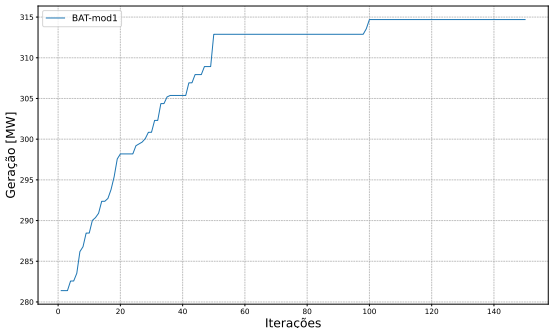


Figura 8: Curva de convergência do algoritmo - Modelagem de Jensen: Caso fictício

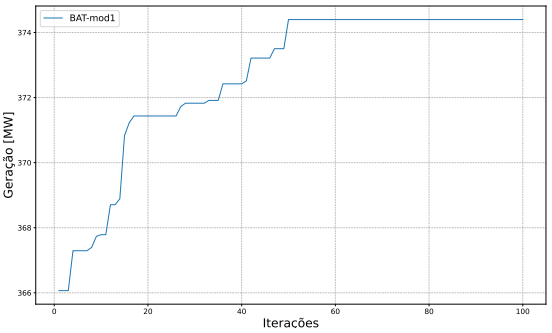


Figura 9: Curva de convergência do algoritmo - Modelagem de Frandsen: Caso fictício

5.2. Estudo de Caso 2

O Estudo de Caso 2 mapea uma região no nordeste brasileiro, conforme descrito acima, com dados de vento obtidos pela Tabela 2.

Velocidade [m/s]	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4
Ângulo [°]	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Frequência [%]	0	3	17	20	49	11	0	0	0	0	0	0

Tabela 2: Dados de vento considerados

Considerando a região real de incidência dos ventos, são apresentados na Tabela 3 os dados considerados para cada simulação do algoritmo, a geração do parque eólico desenvolvido e os tempos obtidos para a otimização, considerando-se as modelagens do *Wake Effect*.

	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4
Execuções	5	10	50	100
População	20	50	100	250
Iterações Máx.	50	100	150	300
Estagnação Máx.	10	50	50	50
Tempo Jensen (min.)	0,9	1,52	8,04	16,75
Tempo Frandsen (min.)	0,79	1,65	8,23	15,81
Potência Gerada Jensen (MW)	329,84	330,46	332,52	332,52
Potência Gerada Frandsen (MW)	380,17	380,96	381,16	381,16

Tabela 3: Análise dos resultados - Dados de ventos reais.

Conforme esperado, a análise dos dados da otimização se mostra semelhante ao caso anterior, um aumento nos parâmetros de otimização permite um processo de busca mais refinado do algoritmo de forma a obter o *layout* com minimização do *wake effect* e maximização da potência gerada. Além disso, observa-se novamente o limite dos parâmetros, de tal forma que, um aumento nesses, causa apenas um aumento no tempo de execução.

As Figuras 10 e 11 mostram os melhores *layouts* obtidos pelo algoritmo de otimização (BAT Modificado), para os modelos de Jensen e de Frandsen, respectivamente, considerando um vento da região nordeste com dados listados na Tabela 3.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175189
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175189

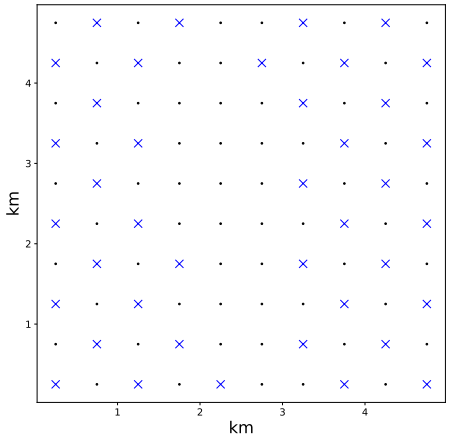


Figura 10: *Layout* gerado - Modelagem de Jensen: Caso Real

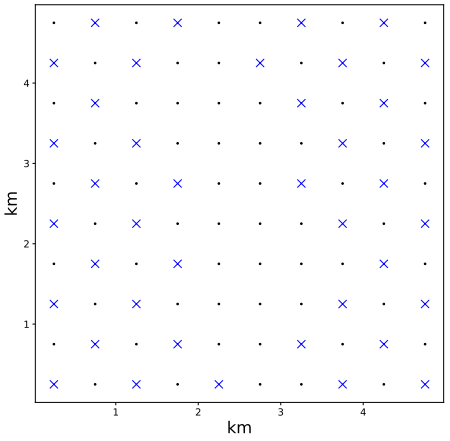


Figura 11: *Layout* gerado - Modelagem de Frandsen: Caso Real

Em consonância com o primeiro estudo de caso, tem-se novamente estruturas semelhantes de parque eólico para ambas as modelagens do *wake effect*. Além disso, o modelo de Frandsen ainda prevê maior geração do que o modelo de Jensen, mesmo com a localização ótima encontrada em ambos. Para a análise com dados de vento reais, os *boxplots* das gerações obtidas pelo algoritmo em suas execuções estão apresentadas nas Figuras 12 e 13, para os modelos de Jensen e de Frandsen, respectivamente. Além disso, as curvas de convergência do BAT Modificado são bem semelhantes às mostradas para o estudo de caso 1 quando avalia-se a trajetória percorrida pelo algoritmo, portanto comprova-se a eficiência do mecanismo de busca.

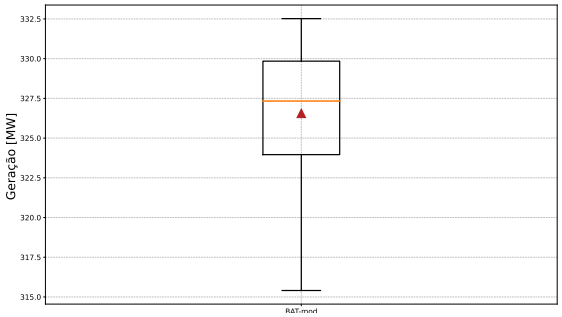


Figura 12: Distribuição da geração obtida - Modelagem de Jensen: Caso Real

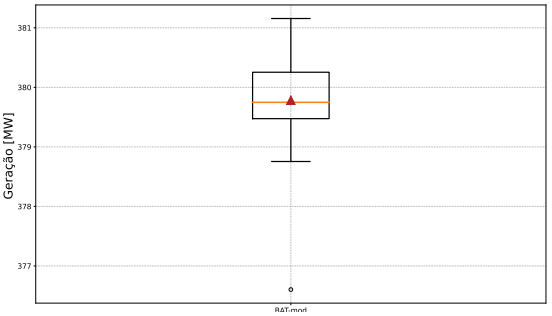


Figura 13: Distribuição da geração obtida - Modelagem de Frandsen: Caso Real

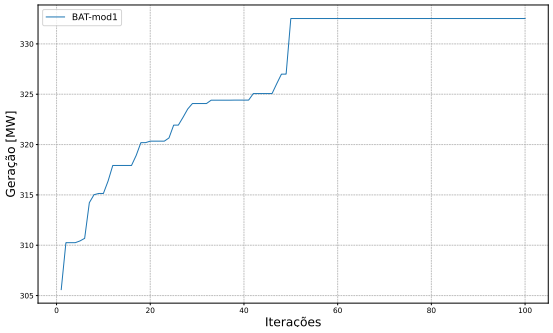


Figura 14: Curva de convergência do algoritmo - Modelagem de Jensen: Caso Real

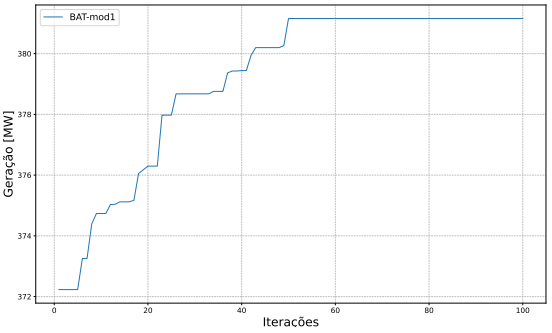


Figura 15: Curva de convergência do algoritmo - Modelagem de Frandsen: Caso Real

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175189
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175189

6. Conclusão

O presente trabalho teve por objetivo comparar duas modelagens de *wake effect*, o modelo de Jensen e o modelo de Frandsen, além de analisar o comportamento de uma técnica de otimização, o BAT (*Bat Algorithm*), quando varia-se os seus parâmetros, desejando-se obter o melhor *layout* do parque eólico, ou seja, aquele que permite a maior geração de potência, sem exigir grande esforço computacional.

Diante dos resultados obtidos, ao analisarmos a variação dos dados de otimização, têm-se valores ideais encontrados para esses, de tal forma a condicionar a obtenção da maior geração com o menor esforço computacional. Em ambos os estudos feitos, esses valores são apresentados na análise 3 com um número total de 50 execuções, uma população de 100 morcegos e um número de 150 iterações. Valores significativamente menores do que esses podem reduzir a geração do parque, enquanto valores maiores, garantem a mesma geração, mas exigem maior esforço computacional.

Além disso, o desempenho do BAT Modificado é comprovado, garantindo-se a otimalidade das soluções encontradas. A performance satisfatória do algoritmo relaciona-se à necessidade de poucas iterações para se ter um aumento significativo no valor da geração.

Em relação às modelagens do *wake effect*, conclui-se que ambos apresentaram desempenho parecido, quanto a otimalidade da localização das turbinas eólicas. Porém, calculando-se a redução na potência gerada, a partir dos modelos de esteira, nota-se maior otimismo da modelo de Frandsen, tendo em vista a previsão de maior geração através desse modelo. Ressalta-se que este estudo limitou-se à análise de apenas dois modelos do *wake effect*, dando segurança quanto ao posicionamento ótimo dos aerogedores, porém indicando uma previsão incerta da potência gerada pelo parque, tendo em vista os diferentes valores de redução calculados pelos modelos.

Como proposta de trabalhos futuros tem-se: (i) a utilização de outras metodologias para a resolução do problema proposto, como *Branch and Bound* ou demais técnicas metaheurísticas de otimização; (ii) a análise de outros métodos de modelagem do *wake effect*, a fim de obter, de maneira mais precisa, a potência gerada para o parque eólico a partir da localização das turbinas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora (PPEE) pelo suporte no desenvolvimento do presente trabalho.

Referências

[1] REN21. The Renewables 2022 Global Status Report in 150 words. 2022. Disponível em: https://www.ren21.net/the-renewables-2022-global-status-report-in-150-words/.

[2] Empresa de Pesquisa Energética. Matriz Energética e Elétrica. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica.

[3] ABEEolica, Associação Brasileira de Energia Eólica. Energia Eólica - Os bons ventos do Brasil. Disponível em: https://abeeolica.org.br/.

[4] GWEC. Global Wind Report. Global Wind Energy Council, 2022. 2022. Disponível em: https://gwec.net/global-wind-report-2022.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175189
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175189

[5] GWEC. Global Wind Report. Global Wind Energy Council, 2023. 2023. Disponível em: https://gwec.net/global-wind-report-2023.

[6] GAUMOND, M. et al. Benchmarking of wind turbine wake models in large offshore wind farms. In: Proceedings of the science of making torque from wind conference. 2012.

[7] GAO, Xiaoxia et al. Comparisons of the accuracy of different wake models in wind farm layout optimization. Energy Exploration & Exploitation, v. 38, n. 5, p. 1725-1741, 2020.

[8] JEON, Sanghyeon; KIM, Bumsuk; HUH, Jongchul. Comparison and verification of wake models in an onshore wind farm considering single wake condition of the 2 MW wind turbine. Energy, v. 93, p. 1769-1777, 2015.

[9] LIVIERO, Davide. Empirical modelling of flow through a wind farm for comparison with wake model. Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa, Portugal. 2017.

[10] YANG, Kyoungboo. Determining an Appropriate Parameter of Analytical Wake Models for Energy Capture and Layout Optimization on Wind Farms. Energies, v. 13, n. 3, p. 739, 2020.

[11] RITTER, M., PIERALLI, S., & ODENING, M. (2017). Neighborhood effects in wind farm performance: a regression approach. Energies.

[12] JENSEN, Niels Otto. A note on wind generator interaction. Risø National Laboratory, 1983.

[13] Frandsen, S.; Barthelmie, R.; Pryor, S.; Rathmann, O.; Larsen, S. Analytical Modelling of Wind Speed Deficit in Large Offshore Wind Farms. Wind Energy 2006, 9, 39–53

[14] SÁ, Franciene Izis Pacheco de et al. Efeito da esteira de aerogeradores sobre a produção do parque eólico de Beberibe. 2015.

[15] PEREIRA, Maurício Vieira da Rocha. Impacto da altura de aerogeradores sobre a velocidade do vento, energia, efeito de esteira e intensidade de turbulência: Estudos de caso em três projetos eólicos localizados no Brasil. 2016.

[16] Gao, X.; Yang, H.; Lu, L. Optimization of wind turbine layout position in a wind farm using a newly-developed two-dimensional wake model. Appl. Energy 2016, 174, 192–200.

[17] Gao, X.; Yang, H.; Lu, L. Optimization of wind turbine layout position in a wind farm using a newly-developed two-dimensional wake model. Appl. Energy 2016, 174, 192–200.

[18] CABRAL, Vinícius Albuquerque. Otimização de layout e sistema coletor de parques eólicos offshore, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2020.

[19] YANG, Xin-She. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. In: Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010). Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. p. 65-74

[20] MIRJALILI, Seyedali; MIRJALILI, Seyed Mohammad; LEWIS, Andrew. Grey wolf optimizer. Advances in engineering software, v. 69, p. 46-61, 2014

[21] KENNEDY, James; EBERHART, Russell. Particle swarm optimization. In: Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. IEEE, 1995. p. 1942-1948

[22] Global Wind Atlas - Global Solar Atlas. Disponível em: https://globalwindatlas.info/en.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175189
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175189