

Utilização da Meta-Heurística Whale Optimization Algorithm (WOA) na Otimização da Localização de Aerogeradores em Parques Eólicos

Daniel M. Guadalupe * Cristiane G. Tarôco * Wesley Peres *

** Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL), Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), São João del Rei, MG, Brasil
(e-mails: danielmaiaa7@gmail.com, cgtaroco@ufs.j.edu.br, wesley.peres@ufs.j.edu.br).*

Abstract: The efficiency of a wind farm is strongly influenced by the number and positioning of the wind turbines, due to the wake effect. For this reason, designing an optimized layout is essential to provide the highest possible energy generation at the lowest cost. However, it is impractical to enumerate and test all possible configurations during the design of real wind farms due to the high computational cost involved. Therefore, this study proposes the application of the metaheuristic technique Binary Whale Optimization Algorithm (BWOA) to optimize the layout of wind farms, considering four different wind direction scenarios and the wake effect. The results obtained were compared with results from other case studies in the literature, demonstrating that the BWOA is a competitive and effective approach for real wind farm layout optimization problems.

Resumo: A eficiência de um parque eólico é fortemente influenciada pela quantidade e pela posição dos aerogeradores, devido ao efeito esteira. Por essa razão, projetar um layout otimizado é essencial para proporcionar a maior geração de energia possível a um menor custo. No entanto, é inviável enumerar e testar todas as configurações possíveis durante o projeto de parques eólicos reais devido ao alto custo computacional envolvido. Sendo assim, o presente estudo propõe a aplicação da técnica meta-heurística Binary Whale Optimization Algorithm (BWOA) para otimizar o layout de parques eólicos, considerando quatro cenários diferentes de direção do vento e o efeito esteira. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados de outros estudos de caso da literatura, demonstrando que o BWOA é uma abordagem competitiva e eficaz para problemas reais de otimização de layout de parques eólicos.

Keywords: Optimization; Wind farm; BWOA; Renewable energy; Wake effect.

Palavras-chaves: Otimização; Parques eólicos; BWOA; Energia renovável; Efeito esteira.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, os impactos causados pelas mudanças climáticas têm impulsionado uma transformação global em busca de fontes de energia sustentáveis. A geração eólica desempenha um papel crucial nesse processo, oferecendo uma alternativa sustentável e de baixo custo às fontes de energia convencionais. No Brasil, em especial, a geração de energia eólica se destaca e já corresponde a 15,2% de toda a matriz elétrica brasileira (ABEEólica, 2023). O investimento em geração eólica no país é impulsionado pela abundância de ventos na região Nordeste e por políticas governamentais de incentivo, como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa).

Nesse contexto, o projeto de parques eólicos otimizados é fundamental para maximizar a eficiência e a viabilidade econômica dessa fonte energética. A disposição dos aerogeradores influencia diretamente tanto a produção de energia quanto a redução de custos. Isso ocorre devido ao efeito es-

teira: ao passar por uma turbina, o vento perde velocidade e adquire turbulência, o que pode prejudicar o desempenho e a durabilidade das turbinas. Assim, é essencial planejar a localização dos aerogeradores de maneira estratégica, a fim de otimizar a geração de energia e reduzir o custo.

Uma abordagem possível para definir o melhor layout seria elencar e avaliar todas as opções possíveis para o parque em estudo. No entanto, considerando as dimensões de um parque eólico real, essa análise se torna inviável devido ao alto custo computacional envolvido. Nesse contexto, técnicas meta-heurísticas, como o Enxame de Partículas (PSO) e o Algoritmo Genético (GA), se destacam por oferecer soluções mais eficientes e práticas, empregando mecanismos bioinspirados para explorar o espaço de busca e melhorar suas soluções iterativamente. Os estudos desenvolvidos por Pookpant and Ongsakul (2013), Panoeiro et al. (2018a), Panoeiro et al. (2018b) e Ribeiro et al. (2022) utilizam técnicas dessa classe para realizar a otimização do layout de parques eólicos.

Nesse cenário, o presente estudo propõe a aplicação da meta-heurística Whale Optimization Algorithm (WOA) para solucionar o problema em questão. O WOA tem sido amplamente utilizado para resolver problemas de otimização em áreas como seleção de características, agrupamento, previsão, estimativa de parâmetros e otimização global (Nadimi-Shahraki et al., 2021). No entanto, apesar de sua versatilidade, o WOA ainda apresenta algumas limitações, como convergência prematura e baixa precisão (Sun et al., 2018). Dessa forma, o objetivo do presente estudo é avaliar a aptidão do WOA para otimizar o layout de um parque eólico com dimensões reais, por meio da comparação dos resultados obtidos com outros estudos de caso presentes na literatura.

2. MODELOS UTILIZADOS

Nesta seção, são apresentados os modelos utilizados no presente estudo para a avaliação da função objetivo, a descrição do efeito esteira e a representação computacional do problema.

2.1 Função Objetivo

A avaliação da qualidade de um layout de parque eólico é realizada por meio de uma função objetivo. Neste estudo, a função objetivo utilizada é a função proposta por Mosetti et al. (1994), disposta na Equação (1). Essa função consiste em uma razão entre o custo de operação da usina e a potência eólica convertida em elétrica por ela.

$$\min F_{ob} = \frac{\text{custo}}{P_t} \quad (1)$$

De acordo com o modelo proposto por Mosetti et al. (1994), o custo anual adimensional de uma única turbina é igual a 1, ao passo que uma redução máxima de 1/3 pode ser obtida para cada turbina caso um número grande de turbinas seja instalado. Dessa forma, o custo anual adimensional de um parque eólico é definido pela Equação (2), na qual N_t representa o número total de aerogeradores:

$$\text{custo} = N_t \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} e^{-0.00174 \cdot N_t} \right) \quad (2)$$

A potência total convertida pelo parque projetado pode ser calculada como o somatório das potências convertidas por cada aerogerador ponderado por uma função densidade de probabilidade de velocidade de ocorrência de ventos (f_k) nas direções de 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°. Dessa forma, a função objetivo pode ser reescrita conforme Equação (3):

$$\min F_{ob} = \frac{N_t \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} e^{-0.00174 \cdot N_t} \right)}{\sum_{k=0}^{360} \sum_{i=1}^{N_t} f_k \cdot P_i(\bar{u}_i)} \quad (3)$$

Na equação acima, \bar{u}_i representa a velocidade média de incidência do vento, f_k representa a função densidade de probabilidade de velocidade de ocorrência de ventos e P_i representa a potência convertida por cada aerogerador. Essa potência é calculada em função da velocidade de incidência do vento, de acordo com a Equação (4) (Pookpunt and Ongsakul (2013)).

$$P_i(u_i) = \begin{cases} 0 & \text{se } \bar{u}_i \leq 2,3 \text{ m/s,} \\ 0,3 \cdot \bar{u}_i^3 & \text{se } 2,3 \text{ m/s} < \bar{u}_i \leq 12,8 \text{ m/s,} \\ 630 & \text{se } 12,8 \text{ m/s} \leq \bar{u}_i \leq 18 \text{ m/s,} \\ 0 & \text{se } \bar{u}_i > 18 \text{ m/s.} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 Efeito esteira

A velocidade do vento é uma variável muito importante para o projeto de parques eólicos, pois a potência gerada por um aerogerador depende diretamente dessa grandeza. Para velocidades do vento entre 2,3m/s e 12,8m/s, a potência convertida varia com o cubo da velocidade do vento (Pookpunt and Ongsakul, 2013). Sendo assim, é importante que os aerogeradores operem com a maior velocidade de vento possível até que o limiar de segurança seja alcançado.

Um dos fatores que podem comprometer essa velocidade é o efeito esteira (*wake effect*), que ocorre quando o vento, ao passar por um aerogerador, perde velocidade e ganha turbulência. Esse efeito impede a disposição sequencial de turbinas em um terreno, pois a redução da velocidade e o aumento da turbulência prejudicam a eficiência total do parque eólico. O modelo de efeito esteira proposto por Katić et al. (1986) oferece uma descrição simplificada e eficaz de como uma turbina eólica influencia o fluxo de vento em uma região do espaço. De acordo com o modelo, a região de enfraquecimento atrás de uma turbina tem um diâmetro inicial igual ao da turbina e se expande linearmente com a distância, formando um cone. A Figura 1 ilustra esse efeito.

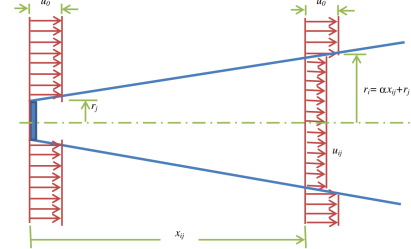


Figura 1. Esteira produzida por uma turbina eólica. Fonte: Pookpunt and Ongsakul (2013).

A velocidade do vento em uma turbina eólica que está sob o efeito da esteira de uma outra turbina é modelada de acordo com a Equação (5) (Pookpunt and Ongsakul, 2013).

$$u_{ij} = u_0 \left[1 - \frac{2a}{\left(1 + \alpha \cdot \frac{x_{ij}}{r_i} \right)^2} \right] \quad (5)$$

Na equação acima, u_0 é a velocidade média do vento livre, a constante a é o fator de indução axial, x_{ij} é a distância da turbina à montante para a turbina à jusante, r_i é o raio do rotor da turbina à jusante e α corresponde à constante de arraste. O valor da variável r_i está relacionado ao raio da turbina à montante r_j e ao fator de indução axial. Essa relação se dá conforme a equação (6) (Pookpunt and Ongsakul, 2013).

$$r_i = r_j \sqrt{\frac{1-a}{1-2a}} \quad (6)$$

A partir do fator de indução axial, é possível calcular o coeficiente de empuxo (C_T). O cálculo se dá pela equação (7) (Pookpunt and Ongsakul (2013)).

$$C_T = 4 \cdot a \cdot (1 - a) \quad (7)$$

A constante de arraste é definida como a taxa de expansão da esteira e está relacionada à altura do rotor (z) e à rugosidade do solo (z_0) (Pookpunt and Ongsakul (2013)).

$$\alpha = \frac{0.5}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (8)$$

É válido destacar que o efeito esteira é cumulativo: uma turbina localizada à jusante de N outras turbinas estará sujeita a múltiplas esteiras combinadas. Nessa situação, a velocidade média do vento na turbina pode ser calculada utilizando a equação (9) (Pookpunt and Ongsakul, 2013).

$$u_i = u_0 \left[1 - \sqrt{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left(1 - \frac{u_{ij}}{u_0} \right)^2} \right] \quad (9)$$

2.3 Modelo do terreno e parâmetros utilizados

O terreno utilizado para as simulações possui dimensões de 2000m x 2000m e foi subdividido em 100 células quadradas com 200m de lado, com turbinas localizadas nas posições centrais dessas células. Dessa forma, a menor distância entre duas turbinas é 200m, o que corresponde a cinco vezes o diâmetro do rotor.

Assim, o parque eólico é representado computacionalmente por uma matriz binária 10x10, na qual o valor 1 em uma determinada posição da matriz indica a presença de turbinas eólicas e o valor 0 indica a ausência de turbinas. Os demais parâmetros do modelo do parque eólico foram extraídos do estudo de Mosetti et al. (1994) para garantir a consistência na comparação dos resultados. Esses parâmetros estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados no estudo

Parâmetro	Valor
Altura do rotor (z)	60m
Diâmetro do rotor (D_r)	40m
Coeficiente de empuxo (C_T)	0,8800
Fator de indução axial (a)	0,3268
Rugosidade do solo (Z_0)	0,3000

As demais variáveis do problema, apresentadas na Subseção 2.2, são calculadas a partir dos parâmetros listados na Tabela 1.

3. WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM (WOA)

O Whale Optimization Algorithm (WOA) foi a técnica escolhida para otimizar o layout do parque eólico em questão. Essa meta-heurística é inspirada no comportamento de caça das baleias jubarte, que se alimentam principalmente de krill e peixes pequenos próximos à superfície do oceano. Para maximizar a captura de presas, as baleias caçam em grupo, utilizando uma estratégia chamada 'rede de bolhas'. Após localizar um cardume, o grupo mergulha cerca de 12 metros, se move em direção a ele e organiza

um cerco, criando um caminho em forma de 9 ao redor dos peixes. Enquanto percorrem esse caminho, liberam bolhas de ar que aprisionam as presas e, ao mesmo tempo, encolhem o cerco. Por fim, as baleias atacam o cardume e filtram o alimento, devolvendo a água ao oceano.

Os movimentos de exploração, encolhimento de cerco e aproveitamento foram modelados e aplicados na criação de um algoritmo de otimização populacional por Mirjalili and Lewis (2016). Em um problema de otimização, as baleias representam os agentes de busca, correspondendo a um conjunto de possíveis soluções. Na primeira iteração do algoritmo, essas soluções são geradas aleatoriamente e, ao longo das iterações, são modificadas de forma inteligente para minimizar o valor da função objetivo. As subseções 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 detalham esse modelo utilizando o trabalho de Mirjalili and Lewis (2016) como referência.

3.1 Modelagem matemática do movimento de cercar a presa

O primeiro movimento modelado para atualizar a posição dos agentes de busca é o de cercar a presa. A presa representa a melhor solução possível no espaço de busca. Como essa solução ótima não é conhecida inicialmente, o WOA assume que a melhor solução atual é a presa ou está próxima a ela. Dessa forma, os demais agentes de busca se movem em direção ao melhor agente encontrado até o momento. Esse comportamento é representado pelas seguintes equações:

$$D = |C \cdot X^*(t) - X(t)| \quad (10)$$

$$X(t+1) = X^*(t) - A \cdot D \quad (11)$$

$$A = 2 \cdot a \cdot r_2 - a \quad (12)$$

$$C = 2 \cdot r_1 \quad (13)$$

onde:

- t é a iteração atual.
- D é o vetor com as distâncias das baleias para a presa.
- $X^*(t)$ é a posição da melhor solução encontrada até o momento (esta posição deve ser atualizada a cada iteração).
- $X(t)$ é o vetor com as posições atuais das baleias.
- C é um vetor de coeficientes com r_1 sendo um vetor de valores aleatórios entre 0 e 1.
- A é um vetor de coeficientes com a diminuindo linearmente de 2 até 0 e r_2 sendo um vetor de valores aleatórios entre 0 e 1.

3.2 Ataque por rede de bolhas (fase de aproveitamento)

Dois modelos distintos são utilizados para descrever o ataque por rede de bolhas:

- *Mecanismo de encolhimento de cerco*: O encolhimento do cerco é realizado por meio da diminuição do coeficiente a . O vetor de coeficientes A está diretamente relacionado a a e, portanto, também diminui. A , portanto, é um valor aleatório no intervalo $[-a, a]$, onde a diminui de 2 para 0 ao longo das iterações. A nova posição de um agente de busca pode ser definida em qualquer lugar entre a posição original do agente e a posição do melhor agente atual definindo valores aleatórios para A em $[-1, 1]$, (Mirjalili and Lewis, 2016). O vetor a pode ser calculado utilizando

a Equação (14), onde t_{max} é o número máximo de iterações.

$$a = 2 - 2 \cdot \frac{t}{t_{max}} \quad (14)$$

- *Atualização da posição em espiral:* A atualização da posição das baleias em espiral pode ser simulada pela Equação (15), proposta por Mirjalili and Lewis (2016):

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}^*(t) + \mathbf{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) \quad (15)$$

Na equação acima, \mathbf{D}' indica a distância real entre a i -ésima baleia e a presa, b é uma constante que define a forma da espiral logarítmica e l é um número aleatório contido no intervalo $[-1,1]$. O vetor \mathbf{D}' é calculado da seguinte forma:

$$\mathbf{D}' = |\mathbf{X}^*(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (16)$$

Os dois mecanismos descritos acima ocorrem simultaneamente durante o cerco das baleias. Para modelar esse comportamento, é assumido que há uma probabilidade de 50% de que uma baleia escolha um mecanismo ou outro durante o processo de otimização. A equação (17) representa esse processo decisório, onde p é um número aleatório contido no intervalo $[0,1]$.

$$\mathbf{X}(t+1) = \begin{cases} \mathbf{X}^*(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D}, & \text{se } p < 0.5 \\ \mathbf{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \mathbf{X}^*(t), & \text{se } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (17)$$

3.3 Exploração do espaço de busca

A fase de exploração ou busca global consiste na identificação de novas regiões potenciais no espaço de busca. No WOA, a exploração do espaço de busca é realizada por meio do movimento forçado das baleias em direção a um agente de busca escolhido aleatoriamente. Além disso, o vetor \mathbf{A} é utilizado com valores maiores que 1 ou menores que -1 a fim de forçar o agente de busca a se mover para longe da baleia de referência ($\mathbf{X}(t)$) (Mirjalili and Lewis, 2016). A inserção dessa variabilidade no processo possibilita a exploração global do espaço de busca. As funções matemáticas que modelam esse processo são apresentadas nas equações (18) e (19), onde $\mathbf{X}_{rand}(t)$ é uma baleia aleatória escolhida a partir da população atual.

$$\mathbf{D} = |\mathbf{C} \cdot \mathbf{X}_{rand}(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (18)$$

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}_{rand}(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D} \quad (19)$$

3.4 Operação do algoritmo

O algoritmo do WOA inicia a resolução do problema de otimização com um conjunto de soluções geradas de forma aleatória. A cada iteração, os agentes de busca atualizam suas posições, ora em direção a um agente de busca escolhido aleatoriamente, ora em direção à melhor solução obtida até o momento. Esse processo continua até que um critério de término seja satisfeito.

4. BINARY WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM (BWOA)

O algoritmo original do WOA é destinado a problemas de otimização com variáveis contínuas. No entanto, a otimiza-

ção do layout de um parque eólico envolve variáveis discretas, pois as células do terreno podem assumir apenas dois valores: 0 (sem turbina) ou 1 (com turbina). Para adaptar o WOA a esse tipo de problema, é necessário usar uma versão binária do algoritmo. A versão binária selecionada para este estudo é o Binary Whale Optimization Algorithm (BWOA), proposto por Kumar and Kumar (2020).

4.1 Função de transferência

No BWOA, a atualização da posição dos agentes de busca ocorre por meio da comutação dos valores contidos nas células que representam o terreno. Essa comutação deve ocorrer seguindo uma probabilidade ditada pelo movimento helicoidal das baleias. É necessário, portanto, utilizar uma função de transferência que converta o movimento de caça das baleias em valores probabilísticos e faça com que os agentes percorram o espaço de busca binário (Kumar and Kumar, 2020). No modelo desenvolvido para o BWOA, Kumar and Kumar (2020) propõe a utilização da função de transferência disposta na Equação (20):

$$C_{step} = \frac{1}{1 + e^{-10 \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{D} - 0.5)}} \quad (20)$$

No entanto, verificou-se empiricamente que a utilização dessa função de transferência gerava soluções significativamente distantes da ótima, devido a um aumento inesperado no valor da função objetivo após cerca de 80% das iterações. Para solucionar esse problema, foram testadas algumas funções de transferência alternativas, incluindo uma adaptação da função original, na qual o vetor \mathbf{A} foi removido do argumento da função sigmóide. A função resultante, utilizada neste estudo, é apresentada na Equação (21):

$$C_{step} = \frac{1}{1 + e^{-10 \cdot (\mathbf{D} - 0.5)}} \quad (21)$$

4.2 Operação do algoritmo

A operação do algoritmo BWOA é quase idêntica à operação do WOA, se diferindo apenas na atualização da posição dos agentes de busca. Assim, a cada iteração o vetor \mathbf{D} é calculado e, em seguida, é aplicado à função de transferência C_{step} . Posteriormente, utiliza-se a Equação (22) para atualizar as posições dos agentes de busca. Nessa equação, r representa um número aleatório no intervalo $[0,1]$.

$$\mathbf{X}(t+1) = \begin{cases} \text{complemento de } \mathbf{X}(t), & \text{se } r < C_{step} \\ \mathbf{X}(t), & \text{se } r \geq C_{step} \end{cases} \quad (22)$$

É importante ressaltar que, devido à modelagem matricial do problema de otimização do layout de parques eólicos, o processo de atualização das posições deve ser realizado individualmente para cada elemento da matriz.

5. RESULTADOS

O BWOA foi aplicado ao problema de otimização de layout de parques eólicos em quatro cenários de direção do vento.

A otimização foi conduzida por uma população de 1500 agentes e, para cada cenário, foram realizadas 10 simulações independentes. A melhor solução de cada conjunto foi selecionada. Os resultados foram comparados com estudos que utilizaram outras técnicas meta-heurísticas, com o objetivo de avaliar o desempenho do algoritmo.

5.1 Caso A:

No caso A, é empregada uma velocidade média do vento livre de 12 m/s na direção $k = 0^\circ$, ou seja, no sentido de norte para sul. Nesta etapa, é considerado que há ventos apenas nesta direção, ou seja, $f_k = 1$. Após 120 iterações, a configuração ótima calculada pelo algoritmo para o caso A é exibida na Figura 2.

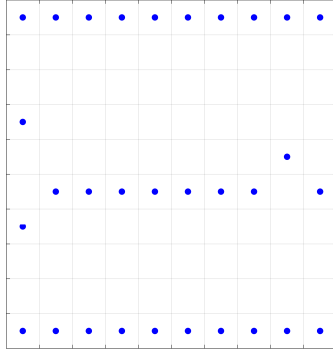


Figura 2. Configuração ótima calculada para o cenário A.

Observa-se que o layout foi projetado buscando minimizar o efeito esteira, mantendo a maior distância vertical possível entre os aerogeradores. A fim de avaliar o desempenho do algoritmo para este cenário, os resultados foram comparados com outros estudos de caso da literatura. Na Tabela 2, estão dipostos os resultados obtidos utilizando o Algoritmo Genético (AG) (Mosetti et al., 1994), o Algoritmo Binário de Otimização por Enxame de Partículas (BPSO) (Pookpant and Ongsakul, 2013), o Algoritmo Sistema Imunológico Artificial (SIA) (Panoeiro et al., 2018a), o Algoritmo Binário de Otimização por Morcegos (BBA) (Panoeiro et al., 2018b) e os resultados obtidos utilizando o BWOA proposto neste trabalho.

Tabela 2. Comparação de resultados - Caso A

Algoritmo usado	Número de geradores	Custo (\$)	Potência Total (kW)	Valor da FOB
AG	26	20.0	12,352	0.001620
BPSO	30	22.1	14,310	0.001544
SIA	30	22.1	14,309	0.001544
BBA	30	22.1	14,310	0.001544
BWOA	31	22.6	14,631	0.001545

A comparação dos resultados evidencia que a solução encontrada pelo BWOA não corresponde à solução ótima para este problema. No entanto, o valor da função objetivo obtido é bastante satisfatório e se mostra comparável aos resultados obtidos pelos demais autores.

5.2 Caso B:

No caso B, a velocidade do vento livre é mantida em 12 m/s e a direção de incidência do vento é alterada para

$k = 45^\circ$ (noroeste para sudeste). Neste caso é considerado $f_k = 1$. O resultado final obtido pelo algoritmo é mostrado na Figura 3.

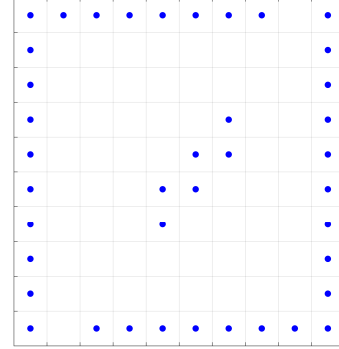


Figura 3. Configuração ótima calculada para o cenário B.

Como o vento incide de forma diagonal, há uma tendência de o algoritmo alocar os aerogeradores nas bordas do terreno. Dessa forma, maximiza-se o número de turbinas expostas ao vento livre, garantindo uma geração de energia otimizada. Em contraste, as turbinas localizadas nas bordas inferior e direita enfrentam a maior redução na geração de energia, pois algumas estão sob a esteira de dois geradores, enquanto outras estão muito próximas das turbinas que recebem vento livre. Na Tabela 3, os resultados obtidos foram comparados com dois outros estudos de caso:

Tabela 3. Comparação de resultados - Caso B

Algoritmo usado	Número de geradores	Custo (\$)	Potência Total (kW)	Valor da FOB
SIA	40	27,49	19,6203	0,0014011
BBA	40	27,49	19,6203	0,0014011
BWOA	40	27,49	19,6203	0,0014011

A partir da comparação, é notável que o BWOA apresentou um desempenho satisfatório, alcançando o mesmo resultado que as demais abordagens.

5.3 Caso C:

No caso C, a velocidade do vento é mantida em 12 m/s, mas as direção de incidência é alterada para $k = 90^\circ$ (oeste para leste). A função densidade de probabilidade de velocidade dos ventos considerada nessa direção foi $f_k = 1$. A Figura 4 apresenta o resultado obtido para o cenário analisado.

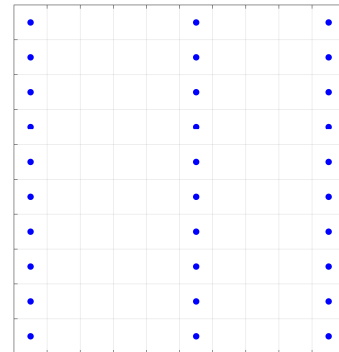


Figura 4. Configuração ótima calculada para o cenário C

A análise do layout gerado indica que o algoritmo se adaptou bem à mudança de direção do vento, alocando os aerogeradores de forma a reduzir ao máximo o efeito esteira. Os resultados obtidos pelo BWOA e os resultados obtidos por Panoeiro et al. (2018a) utilizando o algoritmo SIA para o cenário analisado estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4. Comparação de resultados - Caso C

Algoritmo usado	Número de geradores	Custo (\$)	Potência Total (kW)	Valor da FOB
SIA	30	22,01	14,2902	0,0015470
BWOA	30	22,09	14,3117	0,0015434

A comparação dos resultados mostra que o BWOA apresentou um desempenho excelente, alcançando o valor mais baixo na função objetivo para a direção de 90°.

5.4 Caso D:

No caso D, a velocidade média do vento livre é mantida em 12 m/s. Foram considerados ventos nas direções 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225° e 270°, todas com a mesma probabilidade de ocorrência ($f_k = 0,125$). A Figura 5 apresenta o resultado obtido pelo BWOA para esse cenário.

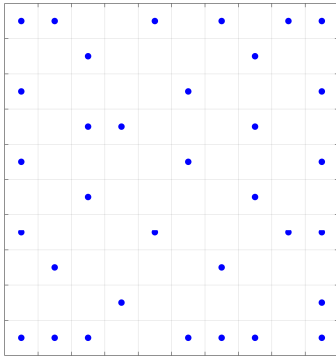


Figura 5. Configuração ótima calculada para o cenário D.

Na Figura 5, é possível observar que os aerogeradores são alocados sem um padrão muito claro. Como os ventos incidem em todas as direções neste cenário, as turbinas estão sujeitas ao efeito esteira de múltiplos geradores, o que torna complexa a tarefa de alocá-las com eficiência. Os resultados foram comparados com dois outros estudos de caso, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Comparação de resultados - Caso D

Algoritmo usado	Número de geradores	Custo (\$)	Potência Total (kW)	Valor da FOB
SIA	34	24,18	15,2410	0,0015867
BBA	35	24,72	15,5737	0,0015871
BWOA	34	24,18	15,2323	0,0015876

Os resultados obtidos evidenciam que o desempenho do BWOA no caso D foi ligeiramente inferior ao dos demais algoritmos utilizados na comparação. No entanto, o resultado obtido é muito próximo do valor ótimo encontrado pelos demais algoritmos.

6. CONCLUSÃO

O BWOA foi aplicado ao problema de otimização do layout de parques eólicos e comparado com outros estudos de caso com o objetivo de avaliar a sua aptidão para trabalhar com esta classe de problemas. Os resultados mostraram que o algoritmo teve um desempenho consistente. Além disso, a simplicidade de sua formulação e a baixa quantidade de parâmetros conferem ao BWOA uma vantagem sobre algoritmos mais complexos. Portanto, o BWOA provou ser uma alternativa promissora para a otimização de layouts de parques eólicos, combinando eficácia e facilidade de aplicação.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ).

REFERÊNCIAS

- ABEEólica (2023). Boletim Anual 2023. URL https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2024/07/424_ABEEOLICA_BOLETIM-ANUAL-2024_DIGITAL_PT_V3.pdf. Acessado em: 19/09/2024.
- Katić, I., Højstrup, J., and Jensen, N.O. (1986). A simple model for cluster efficiency. In *European Wind Energy Association Conference and Exhibition*, 407–410. Rome, Italy.
- Kumar, V. and Kumar, D. (2020). Binary whale optimization algorithm and its application to unit commitment problem. *Neural Computing and Applications*, 32(10), 2095–2123.
- Mirjalili, S. and Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51–67.
- Mosetti, G., Poloni, C., and Diviacco, B. (1994). Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 51(1).
- Nadimi-Shahraki, M.H., Taghian, S., Mirjalili, S., Abualigah, L., Abd Elaziz, M., and Oliva, D. (2021). Ewoa-opf: Effective whale optimization algorithm to solve optimal power flow problem. *Electronics*, 10(23), 2975. doi: 10.3390/electronics10232975.
- Panoeiro, F.F., Cabral, V.A., Junior, I.C.S., and Oliveira, L.W. (2018a). Otimização de layout de parques eólicos com representação da direção dos ventos. In *XXII Congresso Brasileiro de Automática*. João Pessoa, Paraíba.
- Panoeiro, F.F., Cabral, V.A., Junior, I.C.S., and Oliveira, L.W. (2018b). Otimização de layout de parques eólicos via ecolocalização binária. In *Anais do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro.
- Pookpunt, S. and Ongsakul, W. (2013). Optimal placement of wind turbines within wind farm using binary particle swarm optimization with time-varying acceleration coefficients. *Renewable Energy*, 55, 266–276.
- Ribeiro, A.E.S., Tarôco, C.G., and Peres, W. (2022). Otimização da localização de aerogeradores em parques eólicos utilizando gwo (grey wolf optimizer). In *XXIV Congresso Brasileiro de Automática*. Fortaleza, Ceará.
- Sun, Y., Wang, X., Chen, Y., and Liu, Z. (2018). A modified whale optimization algorithm for large-scale global optimization problems. *Expert Systems with Applications*, 114, 563–577. doi:10.1016/j.eswa.2018.08.027.