OTIMIZAÇÃO DE LAYOUT DE PARQUE EÓLICO VIA ECOLOCALIZAÇÃO BINÁRIA

Frederico F. Panoeiro
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Brazil
frederico.panoeiro@engenharia.ufjf.br

Vinícius A. Cabral
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Brazil
albuquerque.vinicius@engenharia.ufjf.br

Ivo C. da S. Junior
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Brasil
ivo.junior@ufjf.edu.br

Leonardo W. Oliveira
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Brasil
leonardo.willer@engenharia.ufjf.br

RESUMO

O problema de otimização de layout de parques eólicos consiste na determinação de sua configuração ótima sob os pontos de vista de maximização da potência convertida e minimização dos custos relacionados ao empreendimento. O presente trabalho propõe avaliar o efeito de regimes de ventos, através de diferentes cenários associados com direções distintas e suas probabilidades, no problema de otimização de layout via uma técnica de otimização metaheurística denominada Algoritmo de Morcegos Binário. A metodologia proposta considera o efeito de enfraquecimento de ventos para determinar o número e a localização de aerogeradores em um parque eólico *offshore*. Um estudo de caso da literature é usado para avaliar a metodologia proposta com a representação de diferentes cenários de direção de ventos.

PALAVRAS CHAVE. Parques Eólicos, Otimização de Layout, Algoritmo de Morcegos Binário.

Tópico: EN - PO na área de energia / MH - Metaheurísticas

ABSTRACT

The problem of optimization of wind farms consists on determining their optimal configuration under the point of view of maximum converted power and minimum costs related to the project. The present paper proposes an evaluation of the impact of the wind behavior to the layout optimization problem, by including different scenarios inherent to distinct directions and their probabilities, through the optimization technique known as Binary Bat Algorithm. The proposed model considers the weak effect to determine the number and location of wind generators in an offshore farm. A case study from the literature is used to assess the proposed approach with the representation of different wind direction scenarios.

KEYWORDS. Wind Farm, Optimum Layout, Binary Bat Algorithm.

Paper topics: EN - OR in energy area / MH - Metaheuristics

https://proceedings.science/p/85330?lang=pt-br

1. Introdução

Atualmente, o cenário energético brasileiro ainda é constituído, principalmente, de usinas hidráulicas e térmicas. Entretanto, devido a auxílios como o PROINFA – Programa de Incentivos às Fontes Alternativas – (BRASIL, 2002) e o desenvolvimento de novas tecnologias, tem-se verificado uma crescente inserção de fontes renováveis de energia como a fotovoltaica e a eólica. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica, a capacidade instalada de usinas eólicas no país atingiu 13 GW e a energia convertida já abastece o país em 10% do consumo total (ABEEólica, 2018). Além disso, de acordo com o Plano Decenal da Expansão 2026, espera-se uma capacidade instalada de 28 GW até o final do período de previsão (EPE, 2017).

Do ponto de vista da confiabilidade de geração, a localização dos aerogeradores em uma planta eólica é um fator de alta relevância, uma vez que impacta na potência extraída e na energia convertida, ambas associadas aos regimes intermitentes de ventos. O processo de transformação da energia cinética dos ventos em energia elétrica não é ideal. Além dos ventos perderem parte de sua energia cinética ao interagir com a turbina eólica, turbulências podem ser geradas. Caso uma turbina esteja localizada diretamente à jusante de outra, além de ter seu potencial de conversão reduzido, a turbulência citada pode tornar-se uma carga mecânica, aumentando esforços nas estruturas de sustentação de aerogeradores. Esse efeito é denominado efeito esteira ou de enfraquecimento, do inglês wake effect, e diversos estudos têm sido propostos a fim de modelá-lo, pois é um fator importante a ser considerado no processo de otimização de layout (Han et al., 2011), (Jensen et al., 1986).

A intermitência dos ventos é um segundo fator a ser considerado, uma vez que impacta no montante de energia que pode ser extraído. Os dois principais aspectos relacionados aos ventos a se considerar são sua velocidade e direção de incidência (Kusiak and Song, 2010), (Gonzales et al., 2010). Diversas funções de mérito podem ser utilizadas para a otimização de layout de parques eólicos como, por exemplo, (Gao et al., 2015), (Wu et al., 2014), (Kusiak and Song, 2010) e (Changshui et al., 2011) (Mosseti el al., 1994):

- Maximização da conversão de potência;
- Maximização da receita líquida;
- Maximização da produção de energia; e/ou
- Minimização do custo por potência extraída.

Técnicas de programação matemática são utilizadas como em (Pérez et al., 2013) para a otimização de layout de parques eólicos. Devido à natureza combinatória deste processo decisório, que envolve variáveis contínuas e discretas, técnicas meta-heurísticas de otimização apresentam-se como opções para sua resolução, haja vista sua complexidade. Algoritmo genético e variações são utilizados em (Changshui el al., 2011) e (Gao et al., 2015), enquanto que em (Yang et al., 2016) e (Pookpunt et al., 2012), opta-se pela utilização do método por enxame de partículas e (Gomes et al., 2017) pelo algoritmo sistema imunólogico artificial.

Seguindo esta linha de pesquisa, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento aleatório de regimes de ventos no processo de otimização de layout de um parque eólico offshore. Para tanto, propõe a aplicação da meta-heurística Algoritmo de Morcegos Binário (BBA - *Binary Bat Algorithm*) (Mirjalili et al., 2014) no problema de layout de parque eólico com representação de diferentes direções de ventos com suas respectivas probabilidades. As funções de mérito consideradas referem-se à maximização de aproveitamento da energia dos ventos e a minimização de custos do empreendimento eólico, considerando o efeito de esteira. Portanto, o propósito é avaliar o impacto de uma representação mais realista e adequada de regimes de ventos nas decisões ótimas quanto ao número e à localização de aerogeradores em um parque eólico. Um estudo de caso envolvendo dados de um parque da literatura é realizado incluindo-se diferentes direções de vento com probabilidades de ocorrência.

2. Formulação do problema

2.1 Função objetivo

A função objetivo do problema de otimização de layout de parque eólico utilizada no presente trabalho tem por objetivo a maximização da potência eólica convertida em elétrica e a minimização do custo, conforme a equação (1), proposta por (Mosseti et al., 1994).

$$\min Fob = \frac{custo}{P_t} = \frac{N\left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3}e^{-0{,}00174N^2}\right)}{\sum_{k=0}^{360^0}\sum_{i=1}^{N} f_k P_i \overline{u_i}} \quad (1)$$

Segundo (Mosseti et al., 1994), o custo normalizado anual de cada turbina adicional inclui 2/3 de custo fixo e 1/3 de custo variável, que é reduzido pelo termo exponencial associado ao número de turbinas *N*. No entanto, a potência despachada pelo parque eólico, representada pelo denominador da equação (1), é o somatório das potências de cada unidade geradora ponderada pela função densidade de probabilidade de ventos f_k, onde *k* representa a variação do vento na faixa entre 0 a 360^0.

A potência da unidade geradora *i* em função de sua velocidade média $\overline{u_i}$, é obtida pela equação (2) (Pookpunt et al., 2012).

$$P_i(u_i) = \begin{cases} 0 & para \quad \overline{u_i} \leq 2{,}3\ m/s \\ 0{,}3\overline{u_i}^3 & para \quad 2{,}3 < \overline{u_i} \leq 12{,}8\ m/s \\ 630 & para \quad 12{,}8 \leq \overline{u_i} \leq 18\ m/s \\ 0 & para \quad \overline{u_i} > 18\ m/s \end{cases} \quad (2)$$

2.2 Restrições

As restrições associadas ao problema de otimização de layout de parques eólicos utilizam o modelo proposto por (Jensen et al., 1986), onde é considerado o weak effect. Este é o efeito que a turbina à montante *j* provoca em uma turbina à jusante *i*, ou seja, a potência de saída à jusante é reduzida, devido a variação na velocidade média do vento causada pela à montante, em comparação com à montante que opera com vento livre (Pookpunt et al., 2012).

A velocidade do vento da turbina eólica à jusante, com relação a variação causada pela à montante, é formulada pela equação (3) (Pookpunt et al., 2012).

$$u_{ij} = u_0\left[1 - \left(\frac{2a}{\left[1 + \alpha\left(\frac{x_{ij}}{r_i}\right)\right]^2}\right)\right] \quad (3)$$

Onde, *a* é o fator de indução axial obtido pelas relações de Beltz, x_{ij} é a distância entre as turbinas e u_0 é a velocidade média incidente no parque eólico.

O raio efetivo do rotor à jusante r_i está relacionado ao raio do rotor à montante r_j, conforme a equação (4) (Pookpunt et al., 2012).

$$r_i = r_j\sqrt{\frac{(1-a)}{1-2a}} \quad (4)$$

O coeficiente de empuxo C_T, corresponde ao empuxo ou força axial aplicada pelo vento no rotor de uma turbina eólica e a força do vento que atinge diretamente no plano do rotor, está associado ao fator de indução axial, conforme a equação (5) (Pookpunt et al., 2012).

$$C_T = 4a(1-a) \tag{5}$$

A constante de arraste α, dada pela equação (6), está relacionada ao enfraquecimento da velocidade da turbina à jusante, onde *z* é a altura do centro do rotor e z_0 é a rugosidade da superfície onde a turbina eólica se encontra (Pookpunt et al., 2012).

$$\alpha = \frac{0{,}5}{ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \tag{6}$$

No caso de múltiplas interferências, ou seja, quando a turbina eólica à jusante sofre efeito de um ou mais à montante, a velocidade resultante da turbina à jusante *i* é obtida pelo somatório dos enfraquecimentos de energia cinética causados pelas turbinas à montante *j*, conforme as equações (7) e (8) (Pookpunt et al., 2012).

$$\left(1-\frac{\overline{u_\iota}}{u_0}\right)^2 = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N}\left(1-\frac{u_{ij}}{u_0}\right)^2 \tag{7}$$

$$u_i = u_0\left[1-\sqrt{\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N}\left(1-\frac{u_{ij}}{u_0}\right)^2}\right] \tag{8}$$

O número máximo de aerogeradores varia com as dimensões do parque eólico, ou seja, associa-se a dimensão à uma matriz, onde cada posição é um ponto candidato a alocação do aerogerador.

$$N \leq N^{máx} \tag{9}$$

3. Metodologia Proposta

Algoritmos baseados em metaheurísticas são utilizados para resolver problemas de busca e otimização em que modelos tradicionais não são capazes de obter soluções. Esses algoritmos são baseados em duas abordagens evolutivas, a saber, algoritmos evolutivos e algoritmos de enxames (Serapião, 2009).

Dentre os algoritmos de enxames, destaca-se o Bat Algorithm (BA) desenvolvido por (Mirjalili et al., 2014). É um algoritmo baseado na capacidade dos morcegos de emitir ultrassons de forma a localizar obstáculos e possíveis presas/alimentos. Esse mecanismo de se localizar através de ultrassons é denominado ecolocalização e é um recurso utilizado, principalmente, por morcegos e outros animais noturnos. Os morcegos, ao emitir essas ondas ultrassônicas, são capazes de identificar distâncias pelo tempo de retorno da onda a partir do eco. Uma vez determinada a localização de uma presa, a amplitude e a taxa de emissão são aumentadas de forma a evitar que essa presa escape (Arêdes et al., 2014).

O BA, assim como as demais técnicas populacionais, são amplamente utilizados em resolução de problemas não-convexos, isto é, que apresentam máximos e mínimos locais. Nesses algoritmos, a convergência a um ponto ótimo, não garante a otimalidade global da solução, isto é, embora a resposta seja um ótimo, não é possível garantir que a solução atingida seja um ótimo

https://proceedings.science/p/85330?lang=pt-br

global. Além disso, as soluções obtidas por esses algoritmos são, em geral, muito dependentes das condições iniciais (Arêdes et al., 2014).

Algoritmo 1 – Pseudocódigo Bat Algorithm
1 : Inicializa os parâmetros: $\boldsymbol{\eta, \alpha, \lambda}$
2 : Inicialização dos morcegos $\boldsymbol{X_i^t}$
3 : Avaliação dos morcegos $\boldsymbol{F_{ob}(X_i^t)}$
4 : Atualização do melhor morcego $\boldsymbol{X_*^t}$
5 : Enquanto o não atingir o critério de parada faça:
6 : Loop 1:$\boldsymbol{\eta}$
7 : $\boldsymbol{Fr_i = Fr_{min} + (Fr_{max} - Fr_{min})\beta, \quad \beta \in [0,1]}$
8 : $\boldsymbol{v_i^{t+1} = v_i^t + (X_i^t - X_*^t)Fr_i}$
9 : $\boldsymbol{X_{temp} = v_i^{t+1} + X_i^t}$
10: Se rand < $\boldsymbol{r_i}$, rand ∈ [0,1], $\boldsymbol{então\ faça}$:
11: $\boldsymbol{X_{temp} = X_*^t + \varepsilon \cdot média(A), \varepsilon \in [-1,1]}$
12: Fim Se
13: Realizar Pertubação em uma dimensão de $\boldsymbol{X_{temp}}$
14: Se rand < $\boldsymbol{A_i}$ & $\boldsymbol{F_{ob}(X_{temp}) \leq F_{ob}(X_i), rand \in [0,1], então\ faça}$:
15: $\boldsymbol{X_i^t = X_{temp}}$
16: $\boldsymbol{r_i^{t+1} = 1 - exp(-\lambda t)}$
17: $\boldsymbol{A_i^{t+1} = \alpha A_i^t}$
18: Fim Se
19: Atualiza o melhor morcego $\boldsymbol{X_*^t}$
20: Fim Loop
21: Fim Enquanto

Inicialmente, são inicializados os η morcegos e os seguintes parâmetros: taxa de pulso inicial r_i, amplitude do ultrassom A_i e posição X_i aleatória. Em seguida, cada morcego é avaliado de acordo com a função objetivo, ou seja, cada morcego, que apresenta todas as variáveis do problema, é associado a um valor numérico. A partir da avaliação de cada morcego, é selecionado aquele que apresenta a melhor solução X_*^t.

Após o processo de inicialização e seleção do melhor morcego, inicia-se o processo iterativo de busca onde-se atualiza os valores da frequência e da velocidade de cada morcego, conforme linhas 7 e 8, respectivamente, e a posição temporária de cada morcego X_{temp} na linha 9.

Na linha 10, inicia-se o processo de otimização local, onde uma variável aleatória é utilizada para atualizar a posição temporária do morcego e definitiva, na linhas 11. Caso a condição 14 seja aceita, a nova posição do morcego será atualizada de acordo com a posição temporária (linha 15), atualização do pulso inicial (linha 16) e da amplitude do ultrassom (linha 17). Ressalta-se, que à medida em que aumenta o tempo de busca, há um aumento no valor do pulso com tendência ao valor unitário. Nesse algoritmo o critério de parada utilizado foi o número de iterações.

No entanto, o presente trabalho de layout de parque eólico, utiliza-se o algoritmo de morcegos binário – BBA, conforme dito anteriormente, cujo objetivo é encontrar um conjunto solução que indique as posições dos aerogeradores viáveis de acordo com as restrições de projeto indicadas anteriormente. A posição X_i é uma matriz de dimensão (η x N_{bit}), em que N_{bit} é o número de bits de um morcego, ao qual corresponde o número máximo de posições para aerogeradores que configuram o layout de parque eólico, ou seja, em uma dimensão de terreno 10x10 o número maximo de bits é 100. Nesta codificação, cada solução candidata é representada por uma linha da matriz e envolve atributos representativos de cada posição, em que ‘0’ indica ausência e ‘1’ presença de aerogerador na respectiva posição.

Como trata-se de um problema de natureza binária, a atualização (linha 9) é realizada com base nas velocidades dos morcegos, conforme o proposto por (Mirjalili et al., 2014), aplicando a função de transferência arctangente e a regra de atualização da posição, conforme as equações (10) e (11), respectivamente.

$$V\left(v_i^k(t)\right) = \left|\frac{2}{\pi} arctan\left(\frac{\pi}{2} v_i^k(t)\right)\right| \tag{10}$$

$$X_i^k(t+1) = \begin{cases} \left(X_i^k(t)\right)^{-1} & Se\ rand < V\left(v_i^k(t+1)\right) \\ X_i^k(t) & rand \geq V\left(v_i^k(t+1)\right) \end{cases} \tag{11}$$

Onde, $X_i^k(t)$ e $v_i^k(t)$ indica a posição e velocidade do i-ésimo morcego na iteração t na k-ésima dimensão e $\left(X_i^k(t)\right)^{-1}$ é o complemento de $X_i^k(t)$ (comutação do bit em 0 para 1 ou vice versa).

4. Resultados

Esta seção apresenta os resultados da metodologia proposta para otimização de layout de parques eólicos considerando variabilidade de direção de ventos. Para tanto, utiliza-se os dados de um estudo de caso presente na literatura (Pookpunt et al., 2012), em que o terreno para o empreendimento do parque eólico tem as dimensões de 2000 x 2000 m^2, em que cada célula quadrada candidata à instalação de um aerogerador tem lado de 200 m, ou seja, cinco vezes o diâmetro do rotor (5D). Isto corresponde a uma matriz (10 x 10), totalizando 100 células como possíveis candidatas para alocação de aerogeradores em seus pontos centrais. A Tabela 1 apresenta os parâmetros referentes ao parque eólico considerado.

Na Tabela 1, encontra-se os parâmetros do parque eólico, em que o fator de indução axial a é obtido pela equação (5) do coeficiente de empuxo C_T, cuja ordem é de segundo grau . De acordo com (Gomes et al., 2017), a raiz correspondente ao valor de 0,6732 não é válida, pois retorna um valor negativo na função objetivo da equação (1). A Tabela 2 apresenta os parâmetros do algoritmo BBA. Quatro estudos de casos são realizados considerando-se diferentes direções de vento. A metodologia de otimização foi implementada em Matlab®.

Tabela 1 – Parâmetros do parque eólico.

Altura do rotor (z)	60 m
Diâmetro do rotor (D_r)	40 m
Coeficiente de empuxo (C_T)	0,88
Fator de indução axial (a)	0,3268
Rugosidade do solo (z_0)	0,30

Tabela 2 – Parâmetros do BBA.

Número de morcegos (η)	40 x $N^{máx}$
Número de Iterações(N_{iter})	120

4.1 Caso (I)

No Caso (I), a velocidade média de ventos no terreno é u_0 = 12 m/s, na direção k = 0º, que corresponde ao sentido de norte para sul, ou seja, de cima para baixo na Figura 2. A probabilidade de densidade de ventos é f_k = 1, que indica que 100% dos ventos incidentes nesta direção, não havendo variação, neste caso. A Figura 2 apresenta a melhor configuração determinada pelo algoritmo BBA após 10 simulações e a curva do processo de convergência no Caso (I).

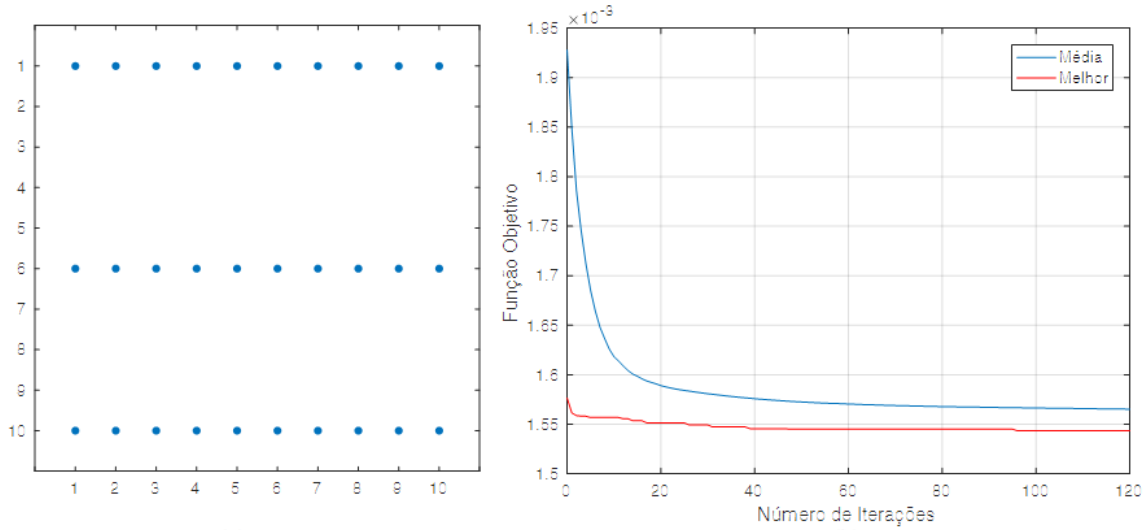


Figura 1 – (a) Configuração dos aerogeradores e (b) Curva do processo de convergência no Caso (I).

Da Figura 1 (a), analisando a primeira coluna, observa-se que o aerogerador localizado na posição (10,1) é impactado pelo wake effect dos aerogeradores à montante, localizados nas posições (1,1) e (6,1), ou seja, há múltiplas interferências que resultam em uma velocidade calculada conforme equação (8). No entanto, o aerogerador localizado na posição (6,1) é impactado somente pelo da posição (1,1). No caso do aerogerador (1,1), não há impacto no mesmo, que opera, portanto, com vento livre de velocidade u1 = 12 m/s e potência de 0,3 x 123 = 518,4 kW, conforme equação (2), observando o intervalo $2{,}3 < u1 \leq 12{,}8$ m/s. Portanto, todos os aerogeradores localizados na primeira linha operam com o vento livre de 12 m/s, totalizando uma potência despachada de 10x518,4 = 5184 kW. É interessante ressaltar que os aerogeradores localizados na coluna '1' não impactam nos aerogeradores das demais colunas, ou seja, só leva em consideração o impacto do wake effect de aerogeradores de uma mesma coluna. Da Figura 1 (b), observa-se a convergência do algoritmo BBA, conforme observa-se as curvas da melhor resposta e a média dos morcegos em cada iteração. A solução ótima foi obtida na iteração 96.

A Tabela 3 apresenta o número de aerogeradores, custos e potência total do parque eólico obtido pelo BBA, comparados com os resultados da literatura para este caso.

Tabela 3 – Resultado obtido e da literatura no Caso (I).

	(Mosseti et al., 1994)	(Pookpunt et al., 2012)	BBA
Número de aerogeradores	26	30	30
Custo ($)	20	22.1	22.1
Potência Total P_t (kW)	12,352	14,310	14,310
Fob	0,00162	0,001544	0,001544

Observando os dados da Tabela 3, o algoritmo BBA encontrou a mesma solução ótima que o método enxame de particulas desenvolvido por (Pookpunt et al., 2012), onde o número de aerogeradores dispotos no terreno estabeleceu-se em 30 ocorrendo um custo maior, porém despachando maior potência elétrica. Logo, a função objetivo determinada foi melhor comparado com o algoritmo genético de (Mosseti et al., 1994).

4.2 Caso (II)

No Caso (II), a velocidade média de ventos no terreno é u_0 = 12 m/s, na direção k = 45º, que corresponde ao sentido de Noroeste para Sudeste e a probabilidade de densidade nesta direção é f_k = 1. A Figura 2 apresenta a melhor configuração determinada pelo algoritmo BBA após 10 simulações neste caso e sua curva do processo de convergência no Caso (II).

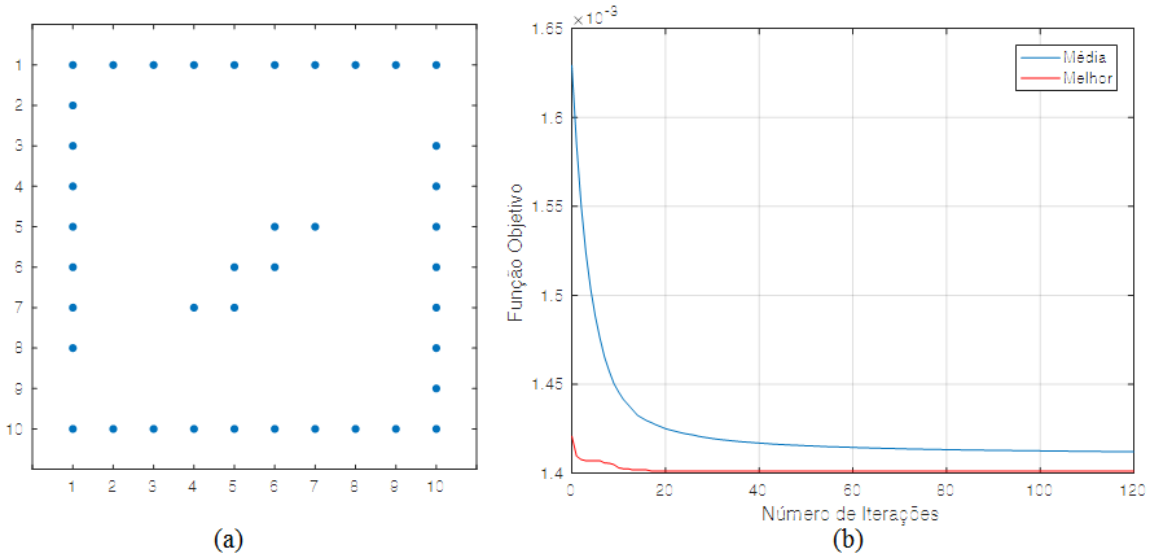


Figura 2 – (a) Configuração dos aerogeradores e (b) Curva do processo de convergência no Caso (II).

Da Figura 2 (a), nota-se que o aerogeradore localizado nas posições (10,2) e todos da linha e coluna '1', operam com vento livre, não sendo impactados pelo wake effect. Portanto, cada unidade fornece uma potência de 518,4 kW, conforme explicado anteriormente. No entanto, dado o vento na direção 45º, ou seja, no sentido da diagonal principal e suas adjacências (diagonais acima e abaixo da principal), os outros geradores se localizam à jusante, sendo impactados. Observa-se que na diagonal principal, composta de 10 posições, ocorre a mesma configuração das posições dos aerogeradores correspondente à coluna 1 da Figura 1 (a), com a mesma potência elétrica, uma vez que a velocidade média dos ventos é a mesmas.

A Tabela 4 apresenta o número de aerogeradores, custos e potência total do parque eólico obtidos pelo BBA. A última linha da tabela, "Geração ótima" refere-se ao número da iteração do BBA em que a solução ótima é encontrada.

Tabela 4 – Resultados obtidos pelo BBA no Caso (II).

Número de aerogeradores	40
Custo ($)	27,49
Potência total P_t (kW)	19,6203
Fob	0,0014011
Geração ótima	18

4.3 Caso (III)

No caso (3), são considerados diversos sentidos de incidência de ventos (0º, 45º, 90º, 135º, 180º, 225º, 270º e 315º), ponderados com densidades iguais à 1/8, f_k = 0,125, e velocidade média de u_0 = 12 m/s. A Figura 3 apresenta a melhor configuração determinada pelo algoritmo BBA após 10 simulações, em que se pode notar que os aerogeradores são dispostos no terreno de forma

disseminada, com objetivo de minimizar o impacto do wake effect para as possíveis direções de ventos e a curva de convergência do algoritmo BBA no caso (III).

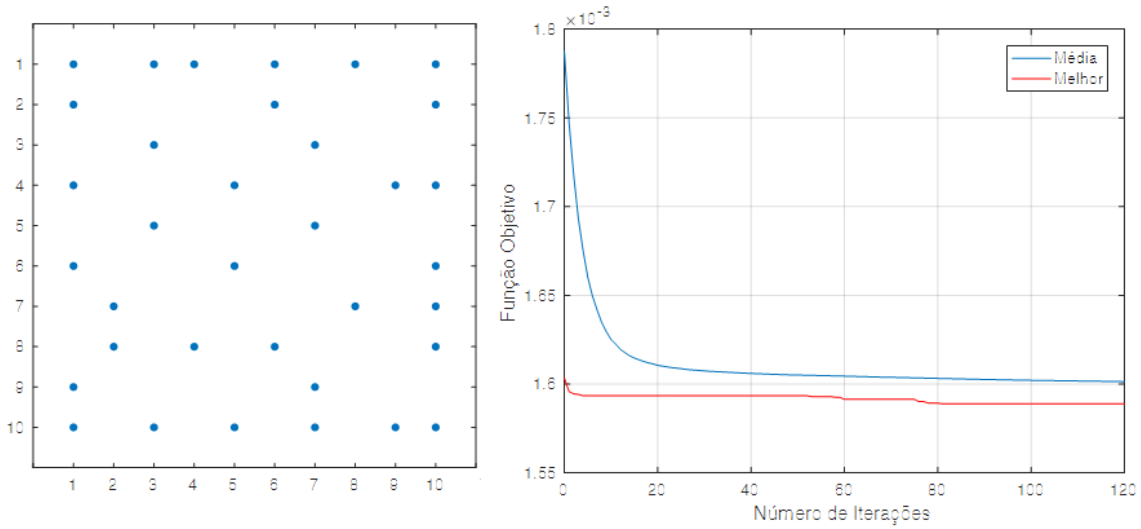


Figura 3 – (a) Configuração dos aerogeradores e (b) Curva do processo de convergência no Caso (III).

Tabela 5 – Resultados obtidos pelo BBA no Caso (II).

Número de aerogeradores	35
Custo ($)	24,7177
Potência total ponderada (kW)	15,5737
Fob	0,00158714
Geração ótima	79

Portanto, analisando parcialmente as direções de ventos para a configuração do parque eólico da Figura 3 (a), nota-se que nas direções de 45º, 135º, 225º e 315º, o weak effect é menor, de acordo com os dados de potência despachada da Tabela 6.

Tabela 6 – Potência despachada em cada direção

Direção (graus)	Potência Despachada (kW)
0º	13,7333
45º	16,7553
90º	14,6679
135º	17,1259
180º	13,7670
225º	16,7660
270º	14,6413
315º	17,1329

4.4 Análise do Algoritmo BBA

Conforme dito anteriormente, em cada caso foram realizados 10 simulações e apresentado a melhor resposta entre essas. No entanto, a função objetiva encontrada em cada simulação, em seu respectivo caso, estão próximas à um intervalo, conforme os gráficos apresentados na Figura 4,

que informa sobre a assimétria da distribuição, onde (a) foram simétricos, (b) positivamente e (c) negativamente assimétricos, pois a mediana encontra-se próxima dos quartis 1 e 3, respectivamente.

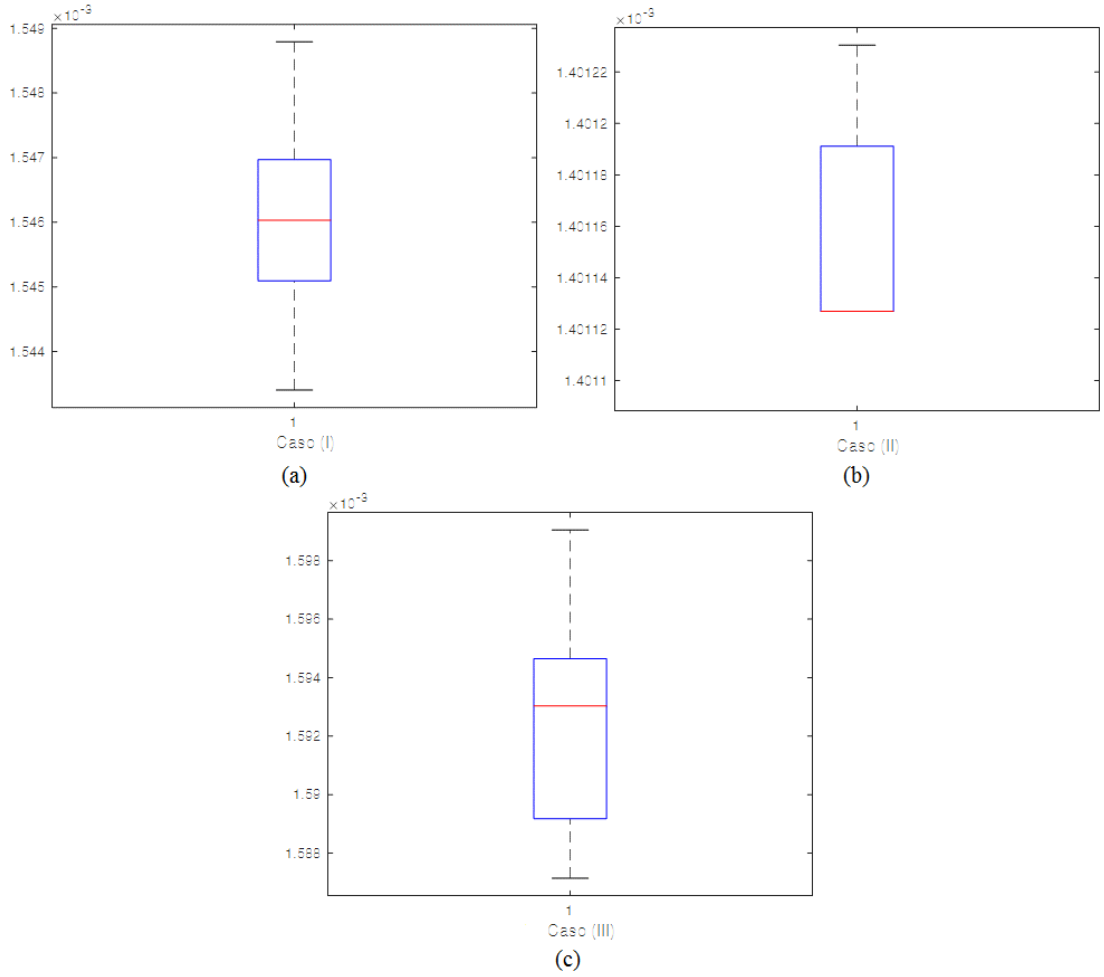


Figura 4 – Distribuição das melhores soluções em 10 simulações (a) Caso (I), (b) Caso (II) e (c) Caso (III).

5. Conclusões

O presente trabalho apresentou uma metodologia de otimização para o planejamento de parques eólicos baseada em algoritmos de morcegos binário, com a inclusão da representação de regimes intermitentes de ventos no problema, através de diferentes direções de escoamento. O objetivo é avaliar o impacto da representação de aleatoriedade de ventos no número e na localização de aerogeradores em um terreno pré-definido, visando maximizar a potência convertida com o mínimo custo possível do empreendimento, considerando ainda o efeito de esteira. De acordo com os resultados dos casos (I), (II) e (III), o número e a localização de aerogeradores é diretamente impactado pelo weak effect para diferentes cenários de incidência de ventos. Portanto, o custo do empreendimento e a potência extraída variam conforme o cenário em estudo, justificando a inclusão da representação proposta e a acomodação realizada no algoritmo de otimização para esta modelagem. Como proposta de estudos futuros serão investigadas novas funções de mérito e restrições relevantes para o problema de otimização de layout de parques eólicos. O algoritmo BBA apresentou-se efetivo para resolução de problemas dessa natureza, no

entanto, o caso (III) por apresentar uma complexidade de análises de direções é necessário uma abrangência maior de estudo.

6. Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido dentro do projeto "Estudo de Metodologias para Conexão de Usinas Eólicas Offshore de Grande e Pequeno Porte e Aspectos Elétricos e Energéticos" PD-0553- 0045/2016 no âmbito do programa de P&D do sistema elétrico regulado pela ANEEL. O presente trabalho também contou com apoio financeiro da Capes- Brasil, FAPEMIG, INERGE, PPEE - UFJF e CNPq.

Referências

EPE, (2017). Planejamento Decenal de Expansão de Energia 2026. Ministério de Minas e Energia – MME.

Han, X., Guo, J., Wang, P., & Jia, Y. (2011). Adequacy study of wind farms considering reliability and wake effect of WTGs. In Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE (pp. 1-7). IEEE.

Kusiak, A., & Song, Z. (2010). Design of wind farm layout for maximum wind energy capture. Renewable energy, 35(3), 685-694.

Brasil (2002). Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Web page. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm. Acesso em: 28/02/2018.

ABEEólica (2018). "Brasil chega a 13 GW de capacidade instalada de energia eólica". Web page: http://www.abeeolica.org.br/noticias/brasil-hega-a-13-gw-de-capacidade-instalada-de-energia eolica/ . Acesso em: 28/02/2018.

González, J. S., Rodriguez, A. G. G., Mora, J. C., Santos, J. R., & Payan, M. B. (2010). Optimization of wind farm turbines layout using an evolutive algorithm. Renewable energy.

Gao, X., Yang, H., Lin, L., & Koo, P. (2015). Wind turbine layout optimization using multi-population genetic algorithm and a case study in Hong Kong offshore. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 139.

Wu, Y. K., Lee, C. Y., Chen, C. R., Hsu, K. W., & Tseng, H. T. (2014). Optimization of the wind turbine layout and transmission system planning for a large-scale offshore wind farm by AI technology. IEEE Transactions on Industry Applications.

Changshui, Z., Guangdong, H and Jun, W (2011). A fast algorithm based on the submodular property for optimization of wind turbine positioning. Renewable Energy, v. 36, n. 11, p. 2951-2958, 2011.

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., Yang, X.-S. (2014). Binary Bat Algorithm. Neural Comput & Applic (2014), 25, 663-681.

Arêdes, C., Silva Junior, I. C., Mendonça, I. M., Dias, B. H., Oliveira, L. W. (2014) Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Energia via Ecolocalização (2014), Congresso Brasileiro de Automática, XX, 1754-1760.

Yang, H., Xie, K., Tai, H. M., & Chai, Y. (2016). Wind farm layout optimization and its application to power system reliability analysis. IEEE Transactions on Power Systems.

Pérez, B., Mínguez, R., & Guanche, R. (2013). Offshore wind farm layout optimization using mathematical programming techniques. Renewable Energy, 53, 389-399.

Pookpunt, S. and Onghsakul, W. (2013.). Optimal placement of wind turbines within wind farm using binary particle swarm optimization with time-varying acceleration coefficients, Renewable Energy, vol. 55, pp. 266-276, Jul.

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):105-16.

Jensen, NO., Katic, I. and Hojstrup, C. (1986). A simple model for cluster efficiency. European Wind Energy Association Conference and Exhibition;. 407-410.

Gomes, L. L., Oliveira, L. W., Silva Jr, I. C. and Passos Filho, J. A. (2017). Optimization of Wind Farms Layout Through Artificial Immune System. Latin – American Congress on Electricity Generation and Transmission, GLACTEE, vol. 12.

Seta, F. S. (2013). Reconfiguração Ótima de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Representação das Incertezas da Carga através de Fluxo de Potência Probabilístico, Graduation monograph, Dept. Energia Elétrica, Univ. Federal de Juiz de Fora, UFJF.

Serapião, A. B. S. (2009). Fundamentos de Otimização por Inteligência de Enxames: Uma Visão Geral. Revista Controle & Automação, vol. 20, n. 3.