

OTIMIZAÇÃO DE LAYOUT DE PARQUES EÓLICOS COM REPRESENTAÇÃO DAS DIREÇÕES DE VENTOS

FREDERICO F. PANOEIRO, VINÍCIUS A. CABRAL, IVO C. S. JUNIOR, LEONARDO W. OLIVEIRA

*Laboratório de Sistemas de Potência, Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora
Rua José Lourenço Kelmer, São Pedro, Juiz de Fora/MG – CEP: 36036-900*

*E-mails: frederico.panoeiro@engenharia.ufjf.br,
albuquerque.vinicius@engenharia.ufjf.br, ivo.junior@ufjf.edu.br,
leonardo.willer@ufjf.edu.br*

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 Artificial Immune Systems. 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 farms, optimum layout, wind direction, probabilities, artificial immune system.

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 Sistemas Imunológicos Artificiais. 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 literatura é usado para avaliar a metodologia proposta com a representação de diferentes cenários de direção de ventos.

Palavras-chave— parques eólicos, otimização de layout, direção de ventos, probabilidades, sistema imunológico artificial.

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 et 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 metaheurísticas de otimização apresentam-se como opções para sua resolução, haja vista sua complexidade. Al-

goritmo genético e variações são utilizados em (Changshui et al., 2011) e (Gao et al., 2015), enquanto que em (Yang et al., 2016) e (Pookpant et al., 2012), opta-se pela utilização do método por enxame de partículas. A técnica denominada Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA) é proposta em (Gomes et al., 2017).

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, a técnica de otimização meta-heurística bioinspirada SIA proposta em (Gomes et al., 2017) é adaptada para acomodar a 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 Nomenclatura

Fob	Função objetivo;
$custo$	Custo total de investimento em função do número de unidades geradoras;
P_t	Potência total convertida de eólica para elétrica;
N	Número de unidades geradoras;
f_k	Função densidade de probabilidade de velocidade dos ventos;
P_i	Potência produzida em função da velocidade média do vento na turbina de cada aerogerador;
\bar{u}_i	Velocidade média do vento na turbina de cada aerogerador;
P_i^{\max}	Classe de potência do aerogerador i ;
N^{\max}	Número máximo de aerogeradores;
u_{ij}	Velocidade de vento na turbina i afetada pelo enfraquecimento da energia cinética na turbina j a montante;
u_0	Velocidade média de ventos na região, obtida de funções de distribuição;
a	Fator de indução axial;
x_{ij}	Distância entre os aerogeradores i e j ;
r_i	Raio do rotor do aerogerador i ;
D_r	Diâmetro do rotor do aerogerador;
α	Constante de arraste;
C_T	Coefficiente de empuxo no rotor do aerogerador;
z	Altura do centro do rotor;
z_0	Rugosidade do terreno;

Nab	Número de anticorpos do algoritmo SIA;
L	Número de atributos de cada anticorpo do SIA;
$N_c(i)$	Número de clones do anticorpo selecionado i ;
$round$	Operador de arredondamento;
$rand$	Operador para sortear um número aleatório entre $[0,1]$;
$f^*(i)$	Afinidade do anticorpo i normalizada;
\bar{f}	Afinidade máxima da população do SIA;
Δ	Desvio padrão das afinidades da população SIA;
$p(i)$	Probabilidade de mutação do anticorpo clonado i do SIA;
H	Parâmetro de controle de mutação do SIA;
D	Número de anticorpos do SIA gerados por edição de receptores;
g^*	Número de iterações sem melhoria de solução do SIA para a convergência;
β	Parâmetro do SIA que controla a clonagem;
b	Número de atributos modificados na mutação.

2.2 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).

$$\min Fob = \frac{custo}{P_t} \quad (1)$$

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

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.

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°. A potência da unidade geradora i em função de sua velocidade média \bar{u}_i , é obtida pela equação (2) (Pookpant et al., 2012).

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

2.3 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).

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

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. Este, está associado ao fator de indução axial obtido pelas relações de Beltz, conforme a equação (5) (Pookpunt et al., 2012).

$$C_T = 4a(1-a) \quad (5)$$

A constante de arraste, 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).

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

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).

$$\left(1 - \frac{\bar{u}_i}{u_0} \right)^2 = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left(1 - \frac{u_{ij}}{u_0} \right)^2 \quad (7)$$

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

É importante ressaltar que o número máximo de aerogeradores varia de acordo 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.

$$N \leq N^{\max} \quad (9)$$

3 Metodologia

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).

No presente trabalho de layout de parque eólico, utiliza-se o algoritmo sistema imunológico artificial, 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 Figura 1 apresenta o fluxograma do algoritmo sistema imunológico artificial, cujos passos são descritas na sequência.

(1) Produção de anticorpos P*: É gerada uma população inicial com N_{ab} indivíduos ou anticorpos, representada por uma matriz de dimensão ($N_{ab} \times L$), em que L é o número de atributos de um anticorpo, que corresponde ao número máximo de posições para aerogeradores que configuram o layout do parque eólico. 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. Após esta inicialização, a população P recebe P*;

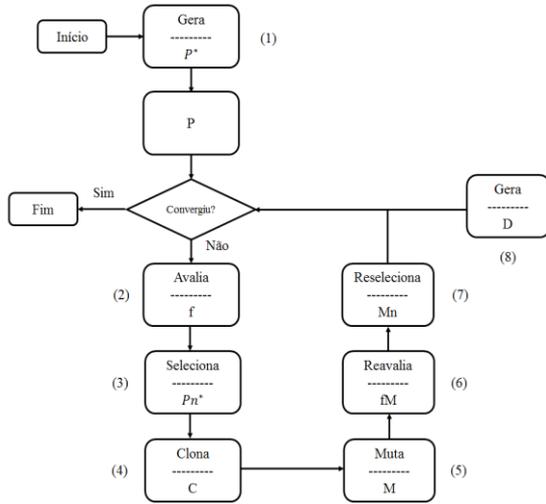


Figura 1. Fluxograma do algoritmo SIA (SETA et al., 2013).

(2) Análise da afinidade “ f ” dos anticorpos de P : A afinidade consiste no valor inverso da função objetivo (1), que deve ser minimizada;

(3) Seleção para clonagem Pn^* : São selecionados os n anticorpos de P com maior afinidade, em que n é um parâmetro do método;

(4) Clonagem dos anticorpos C : Para o processo de clonagem, normalizam-se as afinidades dos anticorpos de Pn , equação (10), e calcula-se o número de clones para cada anticorpo conforme equação (11).

$$f^*(i) = \frac{1}{\sqrt{1 + e^{-\frac{f(i) - \bar{f}}{\delta}}}} \quad (10)$$

$$N_c(i) = \text{round}\left(\beta \cdot \frac{f^*(i)}{i}\right) \quad (11)$$

(5) Hipermutação somática dos anticorpos de C : É calculada a probabilidade de mutação pela equação (12) e sorteado um número aleatório entre $[0,1]$ para cada anticorpo do conjunto C . Se $\text{rand}(i) < p(i)$, o anticorpo i é clonado, caso contrário não. Estes novos anticorpos formam o conjunto solução M .

$$p(i) = e^{-h \cdot f^*(i)} \quad (12)$$

(6) Reavaliação de afinidade fM dos anticorpos de M : Calcula-se a função objetivo e afinidades dos anticorpos de M , conforme passo (2).

(7) Seleção dos anticorpos de M : Os n melhores anticorpos M com maior afinidade são selecionados, formando o conjunto solução Mn , cujo objetivo é substituir os anticorpos com menor afinidade de P .

(8) Edição de receptores D : São gerados d novos anticorpos formando o conjunto D , conforme passo (1), para substituição dos anticorpos de menor afinidade de P , independente da afinidade de D . O critério de convergência utilizado é a estagnação da melhor solução, ou seja, após g gerações, caso a função obje-

tivo da melhor solução candidata encontrada não apresentar variação, o processo é finalizado.

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 (Pookpant et al., 2012), em que o terreno para o empreendimento do parque eólico tem as dimensões de 2000 x 2000 m², 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, o fator de indução axial a é obtido pela equação (5) a partir do coeficiente de empuxo CT . Como se trata de uma equação de segundo grau, a raiz correspondente ao valor de 0,6732 não é válida, pois retorna um valor negativo na função objetivo da equação (1) (Gomes et al., 2017). A Tabela 2 apresenta os parâmetros do algoritmo SIA. Quatro estudos de casos são realizados considerando-se diferentes direções de vento. A metodologia de otimização foi implementada em Matlab®.

3.1 Caso (a)

No caso (a), a velocidade média de ventos no terreno é $u_0 = 12$ m/s, na direção $k = 0^\circ$, 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 SIA após 10 simulações.

Tabela 1. Parâmetros do parque eólico.

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

Tabela 2. Parâmetros do SIA.

Nab	N	d	β	h	g^*	b
$20N^{máx}$	20% Nab	5% Nab	20	1	25~30	1

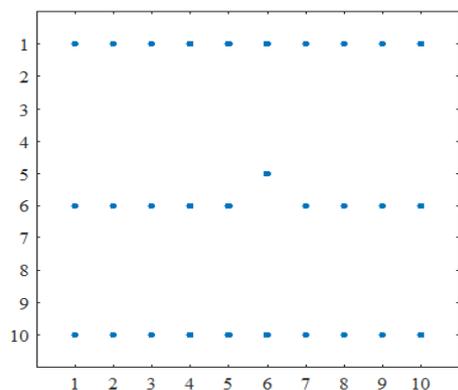


Figura 2. Configuração dos aerogeradores no caso (a).

Da Figura 2, 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 $u_1 = 12$ m/s e potência de $0,3 \times 123 = 518,4$ kW, conforme equação (2), observando o intervalo $2,3 < u_1 \leq 12,8$ m/s.

Portanto, todos os aerogeradores localizados na primeira linha operam com o vento livre de 12 m/s, totalizando uma potência despachada de $10 \times 518,4 = 5184$ kW. É interessante ressaltar que os aerogeradores localizados na coluna '1' não impactam nos aerogeradores das demais colunas, ou seja, este caso (a) só leva em consideração o impacto do wake effect de aerogeradores de uma mesma coluna. A Figura 3 apresenta a curva do processo de convergência do algoritmo SIA neste caso.

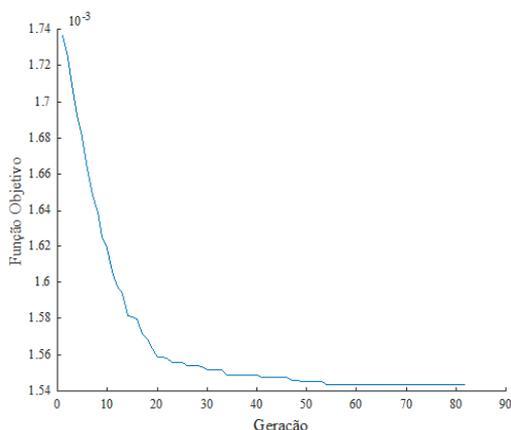


Figura 3. Curva do processo de convergência do SIA no caso (a).

Da Figura 3, o número de gerações do SIA obtido pelo critério de estagnação foi '83', sendo a melhor solução encontrada na geração '53'. A Tabela 3 apresenta o número de aerogeradores, custos e potência total do parque eólico obtido pelo SIA, comparados com os resultados da literatura para este caso.

Tabela 3. Resultados obtidos e da literatura no Caso (a).

	(Mosseti et al., 1994)	(Pookpant et al., 2012)	SIA
Número de aerogeradores	26	30	30
Custo (\$)	20	22.1	22.1
Potência Total P_t (kW)	12,352	14,310	14,309
F_{ob}	0,00162	0,001544	0,001544

A configuração ótima encontrada por (Pookpant et al., 2012), dentre outros trabalhos da literatura, difere-se da encontrada pelo SIA somente em uma posição. Enquanto os primeiros determinam um aerogerador na posição (6,6), o SIA ocupa a posição (5,6), conforme Figura 2.

3.2 Caso (b)

No Caso (b), a velocidade média de ventos no terreno é $u_0 = 12$ m/s, na direção $k = 45^\circ$, que corresponde ao sentido de Noroeste para Sudeste e a probabilidade de densidade nesta direção é $f_k = 1$. A Figura 4 apresenta a melhor configuração determinada pelo algoritmo SIA após 10 simulações neste caso. Os aerogeradores localizados nas posições (10,2), (2,10) 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 45° , 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 2, com a mesma potência elétrica, uma vez que a velocidade média dos ventos é a mesmas. A Figura 5 e a Tabela 4 apresentam a curva do processo de convergência e os resultados obtidos pelo algoritmo SIA neste caso, respectivamente. A Tabela 4 apresenta o número de aerogeradores, custos e potência total do parque eólico obtidos pelo SIA adaptado conforme metodologia proposta. A última linha da tabela, "Geração ótima" refere-se ao número da iteração do SIA em que a solução ótima é encontrada.

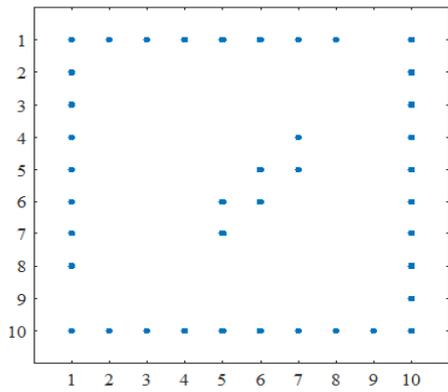


Figura 4. Configuração dos aerogeradores no Caso (b).

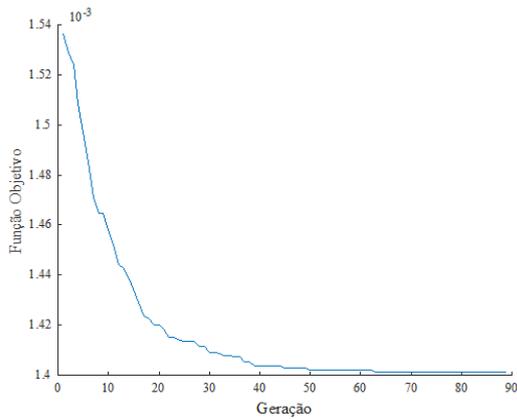


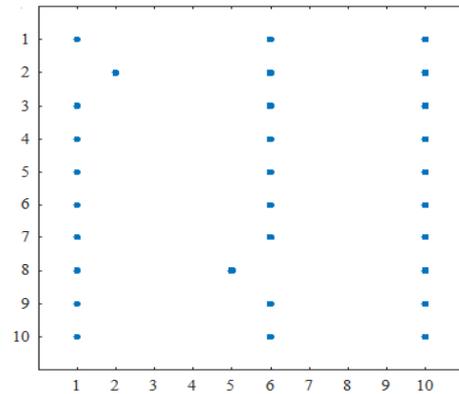
Figura 5. Curva do processo de convergência do SIA no Caso (b).

Tabela 4. Resultados obtidos pelo SIA no Caso (b).

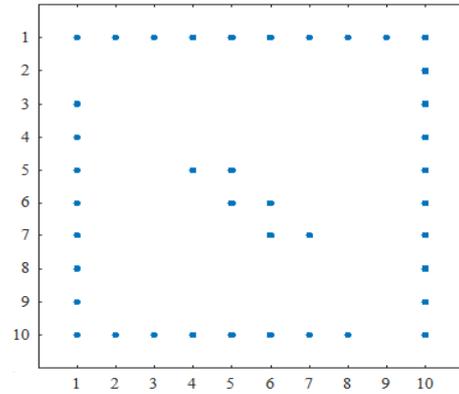
	SIA
Número de aerogeradores	40
Custo (\$)	27,49
Potência total P_t (kW)	19,6203
F_{ob}	0,0014011
Geração ótima	62

3.3 Caso (c)

No Caso (c), as mesmas velocidade média (u_0) e probabilidade de densidade de vento (f_k) dos Casos (a) e (b) são consideradas, porém, com alterações nas direções: Oeste - Leste (90°) e Nordeste - Sudoeste (315°). A probabilidade em cada direção considerada é dada por $f_k = 1$. A Figura 6 apresenta as melhores configurações determinadas pelo algoritmo SIA para estas direções.



(a)



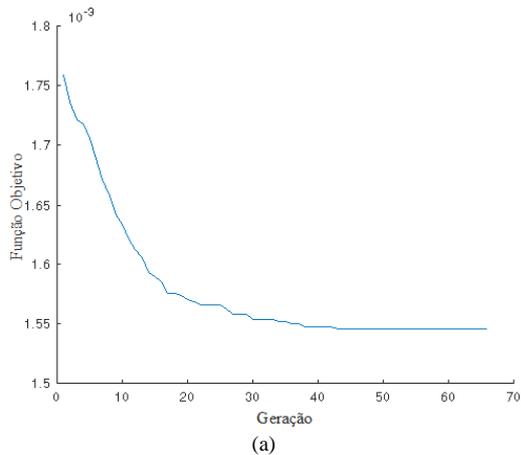
(b)

Figura 6. Configuração dos aerogeradores (a) Oeste para Leste (90°) e (b) Nordeste para Sudeste (315°).

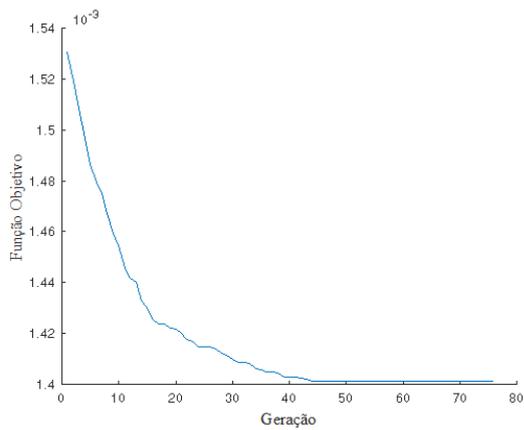
Da Figuras 6(a) e 6(b), observa-se que a disposição dos aerogeradores no terreno muda com a direção dos ventos, assim como verificado nos Casos (a) e (b), a fim de maximizar a potência extraída com custo mínimo. A Figura 7 e a Tabela 5 apresentam as curvas do processo de convergência e os resultados do algoritmo SIA, respectivamente.

3.4 Caso (d)

No caso (d), são considerados diversos sentidos de incidência de ventos (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° e 315°), ponderados com densidades iguais à $1/8$, $f_k = 0,125$, e velocidade média de $u_0 = 12$ m/s. A Figura 8 apresenta a melhor configuração determinada pelo algoritmo SIA, 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.



(a)



(b)

Figura 7. Curva do processo de convergência do SIA nos sentidos (a) Oeste para Leste (90°) e (b) Nordeste para Sudeste (315°).

Tabela 5. Resultados obtidos pelo SIA nos sentidos Oeste para Leste (90°) e Nordeste para Sudeste (315°).

	Oeste-Leste	Nordeste-Sudeste
Número de aerogeradores	30	40
Custo (\$)	22,01	27,49
Potência total P_i (kW)	14,2902	19,6203
Fob	0,0015457	0,0014011
Geração ótima	44	45

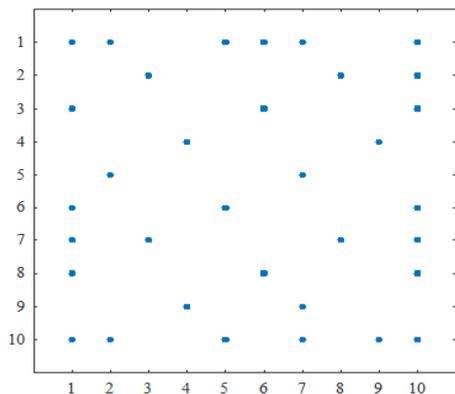
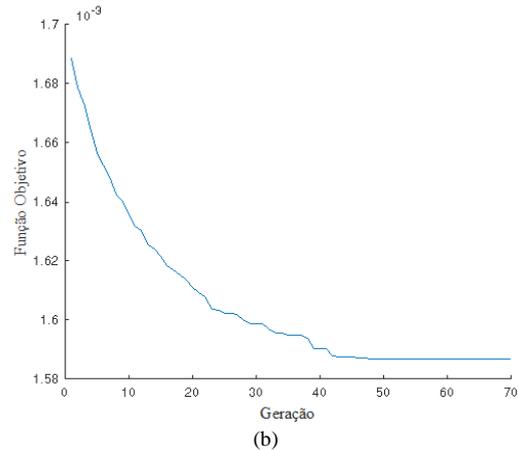


Figura 8. Configuração dos aerogeradores no Caso (d).

Tabela 6. Potência despachada em cada direção.

Direção (graus)	Potência Despachada (kW)
0°	13,93198
45°	16,23714
90°	14,25234
135°	16,54152
180°	13,93992
225°	16,22964
270°	14,25372
315°	16,54192



(b)

Figura 9. Curva do processo de convergência do SIA no Caso (d).

Tabela 7. Resultados obtidos pelo SIA no Caso (d).

	Total
Número de aerogeradores	34
Custo (\$)	24,1830
Potência total ponderada (kW)	15,24102
Fob	0,0015867
Geração ótima	47

Portanto, analisando parcialmente as direções de ventos para a configuração do parque eólico da Figura 8, nota-se que nas direções de 45°, 135°, 225° e 315°, o weak effect é menor, de acordo com os dados de potência despachada da Tabela 6. A Figura 9 e Tabela 7 apresentam a curva do processo de convergência e os resultados obtidos pelo algoritmo SIA no Caso (d), respectivamente.

5 Conclusão

O presente trabalho apresentou uma metodologia de otimização para o planejamento de parques eólicos baseada em sistemas imunológicos artificiais, 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 (a)-(d), 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.

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 e CNPq.

Referências Bibliográficas

- EPE, (2017). Planejamento Decenal de Expansão de Energia 2026. Ministério de Minas e Energia – MME.
- Han, X., Guo, J., Wang, P., & Jia, Y. (2011, July). 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, 21 de fevereiro de 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.
- 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.
- Pookpant, S. and Ongsakul, W., 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. 2013.
- Mosetti, G., Poloni, C. and Diviacco, B., Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 1994;51(1):105-16.
- Jensen, NO., Katic, I. and Hojstrup, C., A simple model for cluster efficiency. *European Wind Energy Association Conference and Exhibition*; 1986. 407-410.
- Gomes, L. L., Oliveira, L. W., Silva Jr, I. C. and Passos Filho, J. A., Optimization of Wind Farms Layout Through Artificial Immune System. *Latin – American Congress on Electricity Generation and Transmission, GLACTEE*, vol. 12, 2017.
- Seta, F. S., 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, 2013.
- Serapião, A. B. S., Fundamentos de Otimização por Inteligência de Enxames: Uma Visão Geral. *Revista Controle & Automação*, vol. 20, n. 3, 2009.