

Otimização de Layout e Sistema Coletor de Parques Eólicos Offshore

Vinícius Albuquerque Cabral

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Juiz de Fora

Campus Universitário, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, Juiz de Fora - MG

albuquerque.vinicius@engenharia.ufjf.br

Dissertação de Mestrado

Defesa: agosto de 2020

Orientador: Ivo Chaves da Silva Junior

Coorientador: Leonardo Willer de Oliveira

RESUMO

Este trabalho tem como foco a otimização de parques eólicos *offshore* durante a etapa de planejamento. O objetivo deste estudo é a definição ótima da localização das turbinas eólicas visando à maximização da extração de potência, considerando o *wake effect*, e, após a definição da localização dos aerogeradores, são definidas também as conexões entre esses e a subestação coletora do parque, com a finalidade de reduzir perdas elétricas e custos com cabamentos. Para a resolução de ambos os problemas foram utilizadas as técnicas de inteligência computacional: *Bat Algorithm*, *Grey Wolf Optimizer* e *Particle Swarm Optimization*. Algumas alterações foram realizadas no método baseado em morcegos de forma a aprimorar seu processo de busca e todas as técnicas são comparadas com relação à capacidade de resolução dos problemas propostos. O *Bat Algorithm* apresentou o melhor desempenho na resolução de ambos os problemas após aplicar as modificações propostas.

PALAVRAS CHAVE. Energia Eólica, Otimização, Sistema Coletor.

Tópicos: PO na Área de Energia, Petróleo e Gás, Metaheurísticas.

ABSTRACT

The objective of this work is the optimization of offshore wind farms during the planning stage. The first objective is the optimal definition of the location of wind turbines aiming at maximizing the power extraction, considering the wake effect. The second objective is to define the connections between these turbines and the wind farm's collecting substation, in order to reduce electrical losses and cabling costs. To solve both problems, computational intelligence techniques are used: *Bat Algorithm*, *Sine-Cosine Algorithm*, *Gray Wolf Optimizer* and *Particle Swarm Optimization*. Some changes were made to the bat-based method to improve its search process and all techniques are compared in terms of their ability to solve the proposed problems. *Bat Algorithm* showed the best performance in solving both problems after applying the proposed modifications.

KEYWORDS. Collector System, Optimization, Wind Energy.

Paper topics: OR on Energy, Oil and Gas, Metaheuristics

1. Introdução

A energia eólica vem apresentando um considerável aumento ao longo dos últimos anos. Em 2019, um aumento de 54,2 e 6,1 GW de capacidade instalada foi observado para empreendimentos eólicos *onshore* e *offshore*, respectivamente, de acordo com o Global Wind Energy Council (GWEC) [GWEC 2019]. No Brasil, em 2019, foi atingida uma capacidade instalada de 15,4 GW, ocupando a terceira posição no continente americano, sendo inferior apenas aos Estados Unidos e ao Canadá. No mundo, o Brasil ocupa a 8ª posição em relação à capacidade instalada [IRENA 2019]. Esses dados demonstram que a fonte eólica vem se tornando cada vez mais atrativas a investimentos, principalmente devido ao desenvolvimento de novas tecnologias.

Parques eólicos *offshore* possuem uma estrutura que é composta pelos aerogeradores, localizados no oceano, que extraem potência elétrica a partir da energia dos ventos incidentes. A potência extraída é enviada às subestações coletoras, localizadas próximas às turbinas, através do sistema coletor composto por cabos submarinos. Dessas SE, toda a energia extraída é enviada ao continente através de um sistema de transmissão do parque, até que seja conectado ao sistema elétrico.

Em relação aos parques *offshore*, os parques *onshore* apresentam uma vantagem considerável que é a possibilidade de serem construídos próximos aos pontos de conexão, reduzindo custos com quantidade de cabos e exigindo tecnologias mais simples do que a subterrânea. No entanto, a atratividade de empreendimentos *offshore* está associada a maior capacidade de aproveitamento das energias dos ventos, maior uniformidade do relevo, ausência de obstáculos que atenuam o aproveitamento além de reduzir problemas relacionados à poluição sonora e visual.

2. Revisão Bibliográfica

Quando analisado em um longo período de observação, o Fator de Capacidade (FC) de um parque eólico é sempre inferior a 1, uma vez que o vento possui uma característica intermitente. Ou seja, o parque não é capaz de gerar toda sua capacidade por aspectos naturais. Isso evidencia a importância de buscar extrair o máximo possível da energia dos ventos, o que está diretamente relacionado ao posicionamento de turbinas eólicas e as interferências observadas ao longo do parque a cada interação da turbina com o vento.

Na literatura, diversos estudos têm como finalidade a modelagem matemática dessa interação, de forma a prever a velocidade do vento resultante após uma interação com uma turbina. O modelo analítico de Jensen é o modelo mais utilizado, devido a sua proximidade da realidade e da facilidade de ser implementado computacionalmente, sendo aplicado tanto em artigos acadêmicos, quanto em *softwares* comerciais [Sá 2015], [Pereira 2016].

A maximização da potência extraída, ou do fator de capacidade, e a minimização dos custos e do *wake effect* são os principais objetivos de estudos de otimização visando à definição do posicionamento das turbinas ao longo de um parque eólico. Os autores em [Sun 2019] consideraram diferentes tipos de turbinas visando à maximização da potência extraída. Já em [Yang 2019], a região do parque foi dividida em pequenas regiões, denominadas bits, no interior dos quais podem ou não serem alocados aerogeradores com o objetivo de maximizar a energia extraída.

As metaheurísticas se destacam por serem as técnicas mais utilizadas para a resolução do problema de otimização do *layout*, sendo o algoritmo genético (AG) a técnica mais aplicada, [Wang 2017], [Shakoor 2015], [Mittal 2020], [Sun 2019], [Ju 2019], [Wang 2019].

Já em [Hou 2016], a técnica de Enxame de Partículas (PSO) foi aplicada, considerando restrições espaciais. A técnica apresentou uma boa eficácia na alocação das turbinas, mas não considerou nos estudos a próxima etapa, referente às conexões das turbinas, podendo alocar turbinas em posições que inviabilizem a conexão, devido à presença da restrições.

O PSO também foi escolhido em [Pookpant 2013], uma vez que apresentou desempenho superior ao AG. O objetivo foi a minimização do custo do investimento, e a maximização da produção de energia. O modelo de Jensen foi aplicado para a modelagem do comportamento dos ventos no *wake effect* e foi utilizada uma distribuição de densidade de probabilidades não uniforme para o ângulo de incidência, que possui impactos consideráveis na dinâmica do problema.

A determinação das conexões da rede interna do parque também é um fator que deve ser considerado na etapa de planejamento do parque e é um problema que também é abordado neste estudo. Os principais objetivos da resolução desse problema consistem na minimização do custo e das perdas, na maximização da confiabilidade e da potência extraída.

Em algumas pesquisas, o cálculo das perdas elétricas é feito através de técnicas simples, como fluxos de potência lineares a partir de simplificações nos modelos dos cabos [Fischetti 2018], [Dutta 2011]. Em outras, métodos mais complexos como o algoritmo de Newton Raphson para a resolução de fluxo de potência não linear são aplicados [Jin 2019]. As perdas calculadas podem ser deduzidas da potência ou energia do parque, ou podem ser ponderadas por critérios econômicos.

Com relação às técnicas empregadas para a resolução desse problema, são aplicadas tanto metaheurísticas, com destaque também para o AG, quanto métodos clássicos de otimização. O AG e o PSO foram as técnicas utilizadas em [Pillai 2017] com a finalidade de otimizar o *layout* e o sistema coletor, embora não tenha sido considerada a conexão com a subestação coletora. O AG foi aplicado em [Wu 2020] para a otimização *layout*, enquanto o *Greedy Algorithm* foi aplicado para a otimização do sistema coletor, com a finalidade de maximizar a receita líquida, dependente da produção de energia e das perdas e dos custos associados à instalação do parque.

3. Objetivos e Contribuições

O estudo apresentado tem como principal objetivo a aplicação de um algoritmo de ecolocalização de morcegos adaptado para a otimização do *layout* e do sistema coletor de parques eólicos *offshore*.

Com relação às contribuições, o trabalho possui uma ampla revisão bibliográfica dos trabalhos mais recentes nessa linha de pesquisa. Também possui uma demonstração física completa e detalhada da formulação do modelo matemático do efeito de enfraquecimento dos ventos (*wake effect*).

A comparação entre diferentes técnicas recentes de inteligência computacional (*Grey Wolf Optimizer* – GWO – e PSO) e as técnicas de ecolocalização de morcegos (BAT) original e adaptada (BAT-mod), bem como as respectivas modificações implementadas, buscando maior eficiência em relação ao tempo computacional e ao processo de busca, também são destaques de contribuições deste trabalho.

Por fim, destacam-se os resultados de simulações de casos tutoriais, bem como as análises desenvolvidas, como contribuições para o trabalho, uma vez que aborda diversos aspectos inerentes ao problema de forma didática e detalhada.

No desenvolvimento do presente estudo, foram elaborados os seguintes trabalhos:

1. Frederico F. Panoeiro; Vinicius A. Cabral; Ivo C. S. Junior; Leonardo W. Oliveira. Otimização de Layout de Parques Eólicos com Representação das Direções de Ventos. XXII Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2018), 2018, João Pessoa, PB.
2. Frederico F. Panoeiro; Vinicius A. Cabral; Ivo C. S. Junior; Leonardo W. Oliveira. Otimização de Layout de Parque Eólico via Ecolocalização Binária. 50o Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2018), 2018, Rio de Janeiro.

3. Frederick T. Marliere; Vinicius A. Cabral; Gustavo Rebello; Frederico F. Panoeiro; Leonardo W. Oliveira; Ivo C. S. Junior. Otimização de Rede Coletora Interna de Parques Eólicos Offshore - Perspectivas e Funções de Mérito. 14o Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2019), 2019, Ouro Preto, MG.
4. Vinicius A. Cabral; Gustavo Rebello; Frederico F. Panoeiro; Ivo C. S. Junior; Leonardo W. Oliveira. Offshore Wind Farm Optimization via Computacional Intelligence. LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2019, Limeira. Prêmio de 3o melhor artigo escrito e apresentado em inglês.
5. Gustavo Rebello; Frederico F. Panoeiro; Vinicius A. Cabral; Frederick T. Marliere; Ivo C. S. Junior; Leonardo W. Oliveira. Capacity Factor Optimization of an Offshore Wind Farm via Computational Intelligence. XIII LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2019.
6. Vinicius A. Cabral; Frederick T. Marliere; Frederico F. Panoeiro; Gustavo Rebello; Leonardo W. Oliveira; Ivo C. S. Junior. Wind Farm Collector System Optimization via Modified Bat Inspired Algorithm. XIII LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2019.
7. Frederico F. Panoeiro; Gustavo Rebello; Vinicius A. Cabral; Ivo C. S. Junior; Francisco C. R. Coelho, Edmarcio A. Belati. Novel Exploration Coefficient Update for the Grey Wolf Optimizer. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, v. 5, p. 1-9, 2020.
8. Frederico F. Panoeiro; Gustavo Rebello; Vinicius A. Cabral; Camile A. Moraes; Ivo C. S. Junior; Leonardo W. Oliveira; Bruno H. Dias. Application of Recent Metaheuristic Techniques for Optimizing Power Generation Plants with Wind Energy. Springer Tracts in Nature-Inspired Computing. 1ed.: Springer, Singapore, 2020, p. 319-343.

4. Formulação dos Problemas

A localização de cada turbina no parque é um aspecto que deve ser analisado durante a etapa de planejamento do parque, uma vez que uma pode interferir em outra que esteja localizada à jusante em relação ao vento incidente, prejudicando o aproveitamento total do parque.

Para que o problema seja modelado de forma discreta, a região do parque é dividida em *bits* retangulares idênticos, em cujos centros pode ou não ser alocado um aerogerador. A formulação do problema consiste em definir, para cada *bit*, um valor numérico inteiro. Assim a variável de decisão do problema possui dimensão igual à quantidade de turbinas do parque e os valores de cada dimensão da variável seleciona um *bit* para instalar um aerogerador.

As expressões (1), (2) e (3) mostram a formulação matemática simplificada do problema, em que N_{dir} é o número de direções de vento incidente que serão consideradas, ρ_{dir}^d e θ^d são a probabilidade e o ângulo de incidência, respectivamente, da d -ésima direção. Além disso, v_n^d é a velocidade resultante incidente na turbina de índice n na direção d . $P(v_n^d)$ é a curva de potência da turbina selecionada e os parâmetros δ_n^d , A_{in} e A_T são influenciados pela variável de decisão e obtidos a partir da análise matemática do *wake effect*, descritos detalhadamente em [Cabral, 2020]. Assim, o objetivo é a minimização do inverso da potência média extraída pelo parque (média da potência extraída ponderada pela probabilidade de ocorrência).

$$\text{Min} \frac{Pen_L}{\sum_{d=1}^{N_{dir}} \rho_{dir}^d \sum_{n=1}^{N_T} P(v_n^d)} \quad (1)$$

s.a.

$$v_n^d = u_0^d (1 - \delta_n^d) \quad \forall n, d \quad (2)$$

$$\delta_n^d = \sum_{i=1}^{N_T} \frac{A_{in}(\theta^d)}{A_T} \left(1 - \frac{u_{in}(\theta^d)}{u_0^d} \right)^2 \quad \forall i, d \quad (3)$$

Como restrição do problema, dois aerogeradores não podem ser alocados simultaneamente em um mesmo *bit*. Caso essa restrição seja violada, uma penalidade Pen_L será aplicada na função, como demonstra a Equação (4), em que n_{repet} é a quantidade de turbinas em uma mesma posição.

$$Pen_L = 100.000 n_{repet} + 1 \quad (4)$$

Após a definição da posição de cada turbina, isto é, após definido o *layout* do parque, um outro aspecto que deve ser considerado é a configuração do sistema coletor, composto pelas conexões entre os aerogeradores e as subestações coletoras, uma vez que os cabos submarinos apresentam custos mais elevados, além de provocarem perdas elétricas por efeito Joule.

A variável de decisão do problema de otimização do roteamento também foi formulada de forma discreta de forma que a dimensão seja igual à quantidade de aerogeradores. O valor assumido para cada dimensão é referente à conexão do respectivo aerogerador e está relacionado à proximidade deste com o ponto ao qual está conectado.

Para otimizar o sistema coletor, serão consideradas três funções de mérito que visam à minimização das perdas, dos custos com cabos e dos custos totais (perdas + aquisição de cabos), apresentadas nas Expressões (5), (6) e (7), respectivamente.

$$FOB_1 = PerdasCC_{MW} \cdot Pen_C \quad (5)$$

$$FOB_2 = C_{ini} \cdot A \cdot Pen_C \quad (6)$$

$$FOB_3 = (C_{ini} \cdot A + C_{Perdas}) \cdot Pen_C \quad (7)$$

em que $PerdasCC_{MW}$ são as perdas do sistema calculadas através de um fluxo de potência simplificado, C_{ini} é o custo associado à aquisição de cabos submarinos, A é uma constante que ajusta o valor de C_{ini} a uma base mensal e C_{Perdas} é o custo associado às perdas elétricas calculadas a partir de um fluxo de potência não-linear, solucionado através do método de Newton-Raphson.

Pen_C é a penalidade aplicada às funções e seu valor é definido em função da violação das seguintes restrições impostas ao problema: não pode haver aerogeradores desconectados (n_{desc}); cruzamento de cabos (n_{cruz}), aerogeradores conectados a cabos sobrecarregados (n_{sub}) e aerogeradores próximos de conexões (n_{prox}). A Expressão (8) mostra a definição de Pen_C .

$$Pen_C = n_{desc} \cdot 10^{20} + n_{sub} \cdot 10^{10} + n_{cruz} \cdot 10^8 + n_{prox} \cdot 10^8 \quad (8)$$

5. Metodologias

As técnicas de otimização BAT, PSO e GWO foram as escolhidas para serem investigadas no presente estudo, pois foram as que apresentaram melhor desempenho na resolução de ambos os problemas, além de possuírem maior flexibilidade em suas implementações. Essas

técnicas são comparadas entre si na resolução de ambos os problemas e com uma técnica baseada no BAT após modificações (BAT-mod).

A técnica baseada na ecolocalização de morcegos (BAT) é um algoritmo de otimização inspirado no comportamento de morcegos e proposto em [Yang 2010]. A identificação das presas, obstáculos e predadores pelos morcegos é feita através de ondas ultrassônicas e de processos de reflexão. Diante desse comportamento biológico, o BAT é desenvolvido de forma a modelar esse comportamento computacionalmente e ser aplicado para a resolução de problemas que envolve processos de busca.

Através de dois parâmetros relacionados à emissão de pulsos dos morcegos, são definidos os critérios para ocorrerem as etapas de busca local e global durante o processo iterativo. Neste trabalho, são propostas duas modificações relacionadas à ocorrência dessas duas etapas que contribuem para o aprimoramento do processo de busca. Essas modificações, bem como a descrição detalhada do algoritmo original estão disponíveis em [Cabral, 2020].

O PSO, Otimização por Enxame de Partículas, é um algoritmo desenvolvido em [Kennedy e Eberhart 1995] cujas estratégias são baseadas no aprendizado de voo de pássaros e em cardumes de peixes. Os parâmetros desse algoritmo são os coeficientes de aprendizado c_1 e c_2 e que influenciam diretamente na caracterização da busca entre local e global. O GWO é um algoritmo desenvolvido em [Mirjalili 2014], que é baseado em comportamentos de sobrevivência de uma alcateia de lobos cinzentos. O único parâmetro a ser definido nesse método é o coeficiente de exploração a_{exp} , definido inicialmente por 2 e apresenta um comportamento decrescente com o decorrer das iterações controlando a ocorrência da busca local e global.

6. Resultados e Discussões

Para avaliar as técnicas de otimização na resolução de ambos os problemas descritos, foram desenvolvidas 3 simulações: caso tutorial norte-sul; caso tutorial múltiplas direções e um estudo de caso de um possível parque eólico localizado na região Nordeste do Brasil.

No sistema tutorial, é considerada uma região retangular, dividida em 100 *bits*, para a instalação do parque. Os resultados obtidos para o vento incidente na direção norte-sul demonstraram que os aerogeradores ficam enfileirados, garantindo a mesma distância entre as turbinas, característica essa de acordo com resultados já encontrados na literatura. Das técnicas investigadas, apenas o PSO não foi capaz de atingir a melhor solução obtida pelas demais e o BAT-mod foi a ferramenta que apresentou maior média, mediana e menor desvio em 50 simulações.

O segundo caso aplicado ao sistema tutorial considerou um vento incidente em 12 direções diferentes, estas discretizadas de 30 em 30°, com velocidade média de 11,4 m/s (velocidade nominal da turbina selecionada). Os resultados demonstram que o *layout* obtido apresenta simetria, uma vez que todas as direções possuíam a mesma probabilidade de ocorrência. O BAT-mod novamente foi a técnica que apresentou melhor desempenho na resolução desse problema.

A partir do melhor *layout* obtido neste segundo caso, a otimização do sistema coletor foi aplicada, considerando as três funções de mérito descritas. Os cabos utilizados foram obtidos a partir de um catálogo de fabricantes cujos dados são apresentados em [Nexans, 2020]. Na etapa de minimização das perdas, o BAT-mod foi a técnica que apresentou melhor desempenho, embora a menor perda obtida foi de 1,455 MW obtida pelo PSO. Já na minimização dos custos com cabos, o BAT-mod também apresentou melhor desempenho, embora o GWO tenha atingido a melhor e pior soluções dentre todas as simulações. Na minimização dos custos totais, a simetria observada na localização das turbinas foi observada também no sistema coletor e os resultados demonstraram um aumento nas perdas, em relação ao primeiro caso, e um aumento nos custos com cabos, em relação ao segundo, mas atingindo um custo total inferior aos obtidos nos outros casos. Com relação aos métodos de otimização, apenas o BAT não foi capaz de atingir a melhor solução encontrada pela demais técnicas.

No estudo de caso do Nordeste, região selecionada devido ao potencial de geração, foram considerados dados de vento reais obtidos a partir de 674 pontos do produto ERA5 [Copernicus 2020] com dados de velocidade média, frequência, parâmetros da distribuição de Weibull para cada um dos 12 setores de direção de incidência. A melhor solução obtida para o *layout* do parque foi encontrada pelo BAT-mod, que também apresentou melhor desempenho no processo de busca, e foi utilizada para a resolução do problema de otimização do roteamento. O sistema coletor obtido para as 60 turbinas do parque é composto por 88 km de cabos, 3,3 MW de perdas elétricas, equivalente a 1,1% da capacidade instalada. O PSO apresentou o melhor desempenho na resolução desse problema, mas bem próximo do desempenho do BAT-mod, que obteve a melhor solução.

7. Conclusões

Os resultados demonstraram que as estratégias de refinamento desenvolvidas foram suficientes para que soluções adequadas às restrições dos problemas sejam obtidas pelas técnicas investigadas. Além disso, os resultados também provaram que as modificações propostas para o BAT aprimoraram sua eficiência na resolução de ambos os problemas em relação ao algoritmo em sua versão original.

Também é possível verificar que a aplicação das técnicas de otimização para a resolução do problema do *layout* conseguiu reduzir em 10,66 % as perdas de geração devido ao *wake effect*. Já no problema de otimização do roteamento, as simulações demonstraram que foram obtidas configurações que minimizam consideravelmente as perdas e os custos totais, tornando a ferramenta desenvolvida uma excelente alternativa para a resolução dos problemas apresentados.

7. Referências Bibliográficas

Cabral, V. A. (2020). Otimização de Layout e Sistema Coletor de Parques Eólicos *Offshore*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG. Disponível em <https://www2.ufjf.br/ppee/producao-bibliografica/dissertacoes/>

Copernicus Climate Change Service (2020). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS).

Dutta, S., Overbye, T. J. (2011) A clustering based wind farm collector system cable layout design. In: 2011 IEEE Power and Energy Conference at Illinois. IEEE. p. 1-6.

Fischetti, M.; Pisinger, D. (2018). Optimizing wind farm cable routing considering power losses. European Journal of Operational Research, v. 270, n. 3, p. 917-930.

GWEC. Global Wind Energy Council (2019). Global Wind Report. Disponível em: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf>. Acessado em: 08/06/2020

Hou, P. et al (2016). Optimization of offshore wind farm layout in restricted zones. Energy, v. 113, p. 487-496.

IRENA. International Renewable Energy Agency (2019). Country Rankings. Disponível em: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>. Acessado em: 08/06/2020

- Jin, R. et al (2019). Cable routing optimization for offshore wind power plants via wind scenarios considering power loss cost model. *Applied Energy*, v. 254, p. 113719.
- Ju, X., Liu, F. (2019). Wind farm layout optimization using self-informed genetic algorithm with information guided exploitation. *Applied Energy*, v. 248, p. 429-445.
- Kennedy, J., Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*. IEEE. p. 1942-1948.
- Mittal, P.; Mitra, K., (2020). In search of flexible and robust wind farm layouts considering wind state uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, v. 248, p. 119195.
- Nexans (2020). Submarine Power Cables. Disponível em: https://www.nexans.uz/Germany/2013/SubmPowCables\FINAL_10jun13_engl.pdf. Acesso em 13/08/2020
- Pereira, M. V. R. (2016). 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.
- Pillai, A. C. et al (2017). Application of an offshore wind farm layout optimization methodology at Middelgrunden wind farm. *Ocean Engineering*, v. 139, p. 287-297.
- Pookpunt, S., Ongsakul, W. (2013). Optimal placement of wind turbines within wind farm using binary particle swarm optimization with time-varying acceleration coefficients. *Renewable energy*, v. 55, p. 266-276.
- Sá, F. I. P. et al (2015). Efeito da esteira de aerogeradores sobre a produção do parque eólico de Beberibe.
- Shakoor, R. et al (2015). The modelling of wind farm layout optimization for the reduction of wake losses. *Indian Journal of Science and Technology*, v. 8, n. 17, p. 69817.
- Sun, H., Yang, H.; Gao, X. (2019). Investigation into spacing restriction and layout optimization of wind farm with multiple types of wind turbines. *Energy*, v. 168, p. 637-650.
- Wang, L. et al (2017). A computationally-efficient layout optimization method for real wind farms considering altitude variations. *Energy*, v. 132, p. 147-159.
- Wang, L. et al (2019). Optimizing wind farm layout by addressing energy-variance trade-off: A single-objective optimization approach. *Energy*, v. 189, p. 116149.
- Wu, Y. et al (2020). A design methodology for wind farm layout considering cable routing and economic benefit based on genetic algorithm and GeoSteiner. *Renewable Energy*, v. 146, p. 687-698.
- Yang, K. et al. (2019). Wind farm layout optimization for wake effect uniformity. *Energy*, v. 183, p. 983-995.
- Yang, X. (2010). A new metaheuristic bat-inspired algorithm. In: *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)*. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 65-74.