

UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO DO COIOTE (COA – COYOTE OPTIMIZATION ALGORITHM) PARA OTIMIZAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DE AEROGERADORES EM PARQUES EÓLICOS

XXVII SIC

Aluno: David Sales Barbosa¹
Orientador: Prof^a. Dr^a. Cristiane Geralda Tarôco¹

¹Departamento de Engenharia Elétrica - DEPEL
Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ

2021

Sumário

- 1 Introdução
 - Energia Eólica no Brasil
 - Sobre a otimização da localização dos aerogeradores em parques eólicos
 - Abordagem utilizada para resolução do problema de otimização
- 2 Modelagem do Problema
 - Função Objetivo
 - Restrições - Wake Effect
- 3 Metodologia
 - COA - Coyote Optimization Algorithm
- 4 Resultados
 - Dados utilizados para o Parque Eólico e COA
 - Caso A
 - Caso B
 - Caso C
 - Caso D
- 5 Conclusão

Sumário

- 1 Introdução
 - Energia Eólica no Brasil
 - Sobre a otimização da localização dos aerogeradores em parques eólicos
 - Abordagem utilizada para resolução do problema de otimização
- 2 Modelagem do Problema
 - Função Objetivo
 - Restrições - Wake Effect
- 3 Metodologia
 - COA - Coyote Optimization Algorithm
- 4 Resultados
 - Dados utilizados para o Parque Eólico e COA
 - Caso A
 - Caso B
 - Caso C
 - Caso D
- 5 Conclusão

- O país finalizou o ano de 2020 com 686 usinas e 17,75 GW de potência eólica instalada (aumento de 14,89 % em relação a dezembro/2019) [1]
- Tem participação em 10,13 % da matriz elétrica brasileira [1].
- A capacidade instalada até maio de 2021 já superou 1 GW [2].

Sumário

1 Introdução

- Energia Eólica no Brasil
- Sobre a otimização da localização dos aerogeradores em parques eólicos
- Abordagem utilizada para resolução do problema de otimização

2 Modelagem do Problema

- Função Objetivo
- Restrições - Wake Effect

3 Metodologia

- COA - Coyote Optimization Algorithm

4 Resultados

- Dados utilizados para o Parque Eólico e COA
- Caso A
- Caso B
- Caso C
- Caso D

5 Conclusão

Por que estudar otimização da localização dos aerogeradores?

- Confiabilidade na geração de energia elétrica (impacta na potência extraída e energia convertida).
- Processo de transformação da energia cinética em energia elétrica não é ideal (há perdas na interação entre o vento e turbina eólica).
- Possibilidade de geração de turbulências, gerando o **wake effect** (efeito esteira). [3]
- Outros fatores importantes a serem considerados são a intermitência dos ventos, sua velocidade e direções de incidência. [3]

Sumário

1 Introdução

- Energia Eólica no Brasil
- Sobre a otimização da localização dos aerogeradores em parques eólicos
- **Abordagem utilizada para resolução do problema de otimização**

2 Modelagem do Problema

- Função Objetivo
- Restrições - Wake Effect

3 Metodologia

- COA - Coyote Optimization Algorithm

4 Resultados

- Dados utilizados para o Parque Eólico e COA
- Caso A
- Caso B
- Caso C
- Caso D

5 Conclusão

Abordagem utilizada para resolução do problema de otimização

- Considerando-se a natureza combinatória do processo de otimização do *layout* de parques eólicos, o uso de técnicas metaheurísticas de otimização se apresentam como boa opção para sua resolução. [3]
- Utilizou-se o algoritmo de otimização do coiote (COA - Coyote Optimization Algorithm), uma metaheurística baseada no comportamento dos coiotes. [4]
 - O algoritmo considera a organização social dos coiotes e sua adaptação ao meio ambiente.
- Nesse trabalho, visa-se a maximização da potência eólica convertida em elétrica e a minimização dos custos, considerando-se o efeito esteira.

Sumário

- 1 Introdução
 - Energia Eólica no Brasil
 - Sobre a otimização da localização dos aerogeradores em parques eólicos
 - Abordagem utilizada para resolução do problema de otimização
- 2 Modelagem do Problema
 - Função Objetivo
 - Restrições - Wake Effect
- 3 Metodologia
 - COA - Coyote Optimization Algorithm
- 4 Resultados
 - Dados utilizados para o Parque Eólico e COA
 - Caso A
 - Caso B
 - Caso C
 - Caso D
- 5 Conclusão

Função Objetivo

É definida pela equação 1 [5]

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

Sendo Fob a função objetivo e P_t a potência total convertida de eólica para elétrica.

O custo é definido por:

$$custo = N \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} e^{-0,00174N^2} \right) \quad (2)$$

Sendo N o número de unidades geradoras. O custo normalizado anual de cada turbina adicional inclui $\frac{2}{3}$ de custo fixo e $\frac{1}{3}$ de custo variável, que é reduzido pelo termo exponencial, isto é, o custo variável decai ao passo que se aumenta o número de unidades geradoras.

A potência total é definida por:

$$P_t = \sum_{k=0}^{360^\circ} \sum_{i=1}^N f_k P_i(u_i) \quad (3)$$

Que é o somatório das potências de cada unidade geradora ponderada pela função densidade de probabilidade de ventos f_k , onde k representa a variação da direção do vento, entre 0° e 360° .

A potência da unidade geradora i em função da sua velocidade média u_i é obtida pela equação 4:

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

Sumário

- 1 Introdução
 - Energia Eólica no Brasil
 - Sobre a otimização da localização dos aerogeradores em parques eólicos
 - Abordagem utilizada para resolução do problema de otimização
- 2 Modelagem do Problema
 - Função Objetivo
 - Restrições - Wake Effect
- 3 Metodologia
 - COA - Coyote Optimization Algorithm
- 4 Resultados
 - Dados utilizados para o Parque Eólico e COA
 - Caso A
 - Caso B
 - Caso C
 - Caso D
- 5 Conclusão

Wake Effect (Efeito Esteira)

Efeito Esteira: é o efeito que uma turbina à montante provoca em uma turbina à jusante ao reduzir a potência de saída, devido a variação causada na velocidade média do vento pela turbina à montante [3] [6].

A velocidade da turbina à jusante i , dado que essa está sob o *wake effect* de uma turbina à montante j é dada pela equação 5 [6]:

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

Onde u_0 é a velocidade média dos ventos na região, a é o fator de indução axial; α é a constante de arraste; x_{ij} é a distância entre os aerogeradores i e j e r_i é o raio do rotor do aerogerador à jusante i .

Wake Effect (Efeito Esteira)

No caso em que uma turbina à jusante i sofre interferência de mais de uma turbina à montante j , isto é, múltiplas interferências, a velocidade resultante da turbina i é obtida pelo somatório das reduções de energia cinética causados pelas turbinas à montante j , conforme 6 e 7 [6].

$$\left(1 - \frac{u_i}{u_0}\right)^2 = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left(1 - \frac{u_{ij}}{u_0}\right)^2 \quad (6)$$

$$u_i = u_0 \left[1 - \sqrt{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left(1 - \frac{u_{ij}}{u_0}\right)^2} \right] \quad (7)$$

Sumário

- 1 Introdução
 - Energia Eólica no Brasil
 - Sobre a otimização da localização dos aerogeradores em parques eólicos
 - Abordagem utilizada para resolução do problema de otimização
- 2 Modelagem do Problema
 - Função Objetivo
 - Restrições - Wake Effect
- 3 Metodologia
 - COA - Coyote Optimization Algorithm
- 4 Resultados
 - Dados utilizados para o Parque Eólico e COA
 - Caso A
 - Caso B
 - Caso C
 - Caso D
- 5 Conclusão

COA - Coyote Optimization Algorithm

O algoritmo de otimização do coiote (COA) é uma metaheurística do grupo inteligência de enxames (*swarms intelligence*), que se baseia na estrutura social dos coiotes da espécie *canis latrans*.

O algoritmo completo do COA está apresentado no Algoritmo 1 (adaptado de [4]):

Algoritmo 1: COA

```
1 Define-se o número de coiotes  $N_c$  e de grupos  $N_p$ 
2 Inicia-se a população e calcula-se a função objetivo de cada indivíduo
3 while iteracao < iteracao_maxima do
4   for cada grupo do
5     Determina-se o alfa
6     Determina-se a tendência cultural
7     for cada coiote do grupo do
8       Calcula-se o novo coiote
9       Calcula-se sua nova função objetivo
10      Determina-se se o novo coiote substituirá o antigo
11    end
12    Ciclo de vida (nascimento e morte)
13  end
14  Transição entre os grupos
15  Atualiza-se o contador de iterações
16 end
17 Escolhe-se o melhor coiote
```

Sumário

- 1 Introdução
 - Energia Eólica no Brasil
 - Sobre a otimização da localização dos aerogeradores em parques eólicos
 - Abordagem utilizada para resolução do problema de otimização
- 2 Modelagem do Problema
 - Função Objetivo
 - Restrições - Wake Effect
- 3 Metodologia
 - COA - Coyote Optimization Algorithm
- 4 Resultados
 - Dados utilizados para o Parque Eólico e COA
 - Caso A
 - Caso B
 - Caso C
 - Caso D
- 5 Conclusão

Dados utilizados para o Parque Eólico

- Terreno do parque eólico possui dimensões de 2000×2000 m
- Cada célula quadrada possível de se instalar um aerogerador tem o lado de 200 m (cinco vezes maior que o diâmetro do rotor do aerogerador adotado)
- Esses dados correspondem a uma matriz 10×10 , onde há 100 células possíveis para a alocação dos aerogeradores em seus pontos centrais.

Dados utilizados para o Parque Eólico e Aerogeradores

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 1: Parâmetros do parque eólico

Dados utilizados para o COA

Número de coiotes por grupo (N_c)	5
Número de grupos (N_p)	8
Número de iterações	100

Tabela 2: Parâmetros do COA

- Foram realizados quatro estudos de casos, considerando-se diferentes direções de vento para cada um. Em todos os casos, considerou-se a velocidade média dos ventos u_0 sendo de 12 m/s, adotou-se o número máximo de 40 aerogeradores e o critério de parada fixado em 100 iterações.
- A implementação foi feita em Python, utilizando-se as bibliotecas Numpy e Scipy.

Sumário

- 1 Introdução
 - Energia Eólica no Brasil
 - Sobre a otimização da localização dos aerogeradores em parques eólicos
 - Abordagem utilizada para resolução do problema de otimização
- 2 Modelagem do Problema
 - Função Objetivo
 - Restrições - Wake Effect
- 3 Metodologia
 - COA - Coyote Optimization Algorithm
- 4 Resultados
 - Dados utilizados para o Parque Eólico e COA
 - **Caso A**
 - Caso B
 - Caso C
 - Caso D
- 5 Conclusão

Caso A

- Considera-se que a direção do vento é de $k = 0^\circ$, de Norte para Sul (de cima para baixo), e única, portanto $f_k = 1$
- Obteve-se, assim, a seguinte matriz que representa a configuração do parque eólico:

$$\begin{bmatrix} 0. & 0. & 1. & 0. & 1. & 0. & 1. & 0. & 0. & 1. \\ 0. & 1. & 1. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. & 1. & 1. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. \\ 0. & 1. & 0. & 0. & 0. & 1. & 0. & 1. & 1. & 0. \\ 1. & 0. & 0. & 1. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 1. \\ 0. & 1. & 0. & 1. & 0. & 1. & 0. & 0. & 1. & 0. \\ 1. & 0. & 0. & 0. & 1. & 1. & 1. & 1. & 1. & 0. \\ 0. & 1. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. \\ 1. & 0. & 1. & 1. & 0. & 1. & 1. & 1. & 0. & 0. \\ 0. & 1. & 0. & 1. & 0. & 0. & 0. & 1. & 1. & 1. \end{bmatrix}$$

Figura 1: Matriz que representa a melhor configuração para o caso (A)

Caso A

- Os seguintes dados foram obtidos:

Número de aerogeradores	37
Custo (\$)	25,80577
Potência Total (W)	14590,51096
Valor da função objetivo	0,001768668

Tabela 3: Dados obtidos para o caso (A)

Sumário

- 1 Introdução
 - Energia Eólica no Brasil
 - Sobre a otimização da localização dos aerogeradores em parques eólicos
 - Abordagem utilizada para resolução do problema de otimização
- 2 Modelagem do Problema
 - Função Objetivo
 - Restrições - Wake Effect
- 3 Metodologia
 - COA - Coyote Optimization Algorithm
- 4 Resultados
 - Dados utilizados para o Parque Eólico e COA
 - Caso A
 - **Caso B**
 - Caso C
 - Caso D
- 5 Conclusão

Caso B

- Considera-se que a direção do vento é de $k = 45^\circ$, de Noroeste para Sudeste, e única, portanto $f_k = 1$
- Obteve-se, assim, a seguinte matriz que representa a configuração do parque eólico:

$$\begin{bmatrix} 0. & 1. & 0. & 0. & 1. & 0. & 0. & 1. & 0. & 1. \\ 0. & 1. & 1. & 0. & 1. & 0. & 1. & 1. & 1. & 0. \\ 0. & 1. & 0. & 0. & 1. & 0. & 0. & 0. & 0. & 1. \\ 1. & 1. & 0. & 0. & 1. & 0. & 0. & 1. & 0. & 1. \\ 1. & 0. & 0. & 0. & 1. & 0. & 0. & 0. & 1. & 0. \\ 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 1. & 0. & 1. & 1. \\ 0. & 0. & 0. & 0. & 1. & 1. & 0. & 0. & 1. & 1. \\ 0. & 0. & 0. & 1. & 0. & 0. & 0. & 1. & 0. & 1. \\ 0. & 0. & 0. & 0. & 1. & 1. & 0. & 0. & 0. & 1. \\ 0. & 0. & 1. & 1. & 1. & 0. & 0. & 1. & 0. & 0. \end{bmatrix}$$

Figura 2: Matriz que representa a melhor configuração para o caso (B)

- Os seguintes dados foram obtidos:

Número de aerogeradores	38
Custo (\$)	26,36009
Potência Total (W)	15824,13293
Valor da função objetivo	0,001665816

Tabela 4: Dados obtidos para o caso (B)

Sumário

- 1 Introdução
 - Energia Eólica no Brasil
 - Sobre a otimização da localização dos aerogeradores em parques eólicos
 - Abordagem utilizada para resolução do problema de otimização
- 2 Modelagem do Problema
 - Função Objetivo
 - Restrições - Wake Effect
- 3 Metodologia
 - COA - Coyote Optimization Algorithm
- 4 Resultados
 - Dados utilizados para o Parque Eólico e COA
 - Caso A
 - Caso B
 - **Caso C**
 - Caso D
- 5 Conclusão

Caso C

- Considera-se que a direção do vento é de $k = 90^\circ$, Oeste para Leste, e também de $k = 315^\circ$, Nordeste para Sudoeste. Para cada caso, considera-se $f_k = 1$.
- Obteve-se, assim, a seguinte matriz que representa a configuração do parque eólico para $k = 90^\circ$:

```
[[0. 1. 1. 0. 0. 0. 1. 0. 0. 1.]  
 [0. 1. 0. 1. 0. 1. 0. 0. 1. 0.]  
 [1. 0. 0. 0. 1. 1. 0. 0. 0. 1.]  
 [1. 1. 0. 0. 1. 0. 0. 0. 1. 0.]  
 [1. 0. 0. 1. 0. 0. 0. 0. 0. 1.]  
 [0. 0. 0. 0. 0. 1. 0. 1. 0. 0.]  
 [0. 1. 0. 1. 0. 0. 0. 1. 0. 0.]  
 [0. 1. 0. 1. 1. 0. 0. 0. 1. 0.]  
 [1. 0. 0. 1. 0. 0. 0. 0. 0. 1.]  
 [0. 1. 1. 0. 1. 1. 1. 0. 1. 0.]]
```

Figura 3: Matriz que representa a melhor configuração para o caso (C), com $k = 90^\circ$

- E para $k = 315^\circ$:

```
[[1. 0. 1. 1. 0. 0. 0. 1. 0. 0.]  
 [1. 0. 0. 1. 0. 1. 0. 1. 1. 0.]  
 [1. 1. 0. 0. 1. 0. 0. 0. 0. 1.]  
 [1. 0. 1. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.]  
 [0. 1. 1. 0. 0. 0. 1. 0. 0. 0.]  
 [0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 1. 0.]  
 [0. 1. 0. 0. 1. 0. 0. 0. 1. 0.]  
 [1. 1. 1. 0. 1. 0. 1. 1. 0. 1.]  
 [1. 1. 0. 1. 0. 0. 0. 0. 0. 1.]  
 [1. 1. 0. 1. 1. 0. 1. 1. 0. 1.]]
```

Figura 4: Matriz que representa a melhor configuração para o caso (C), com $k = 315^\circ$

- Os seguintes dados foram obtidos, considerando $k = 90^\circ$:

Número de aerogeradores	37
Custo (\$)	25,80577
Potência Total (W)	14761,88185
Valor da função objetivo	0,001748135

Tabela 5: Dados obtidos para o caso (C), com $k = 90^\circ$

- E $k = 315^\circ$:

Número de aerogeradores	40
Custo (\$)	27,49054
Potência Total (W)	16688,35799
Valor da função objetivo	0,001647288

Tabela 6: Dados obtidos para o caso (C), com $k = 315^\circ$

Sumário

- 1 Introdução
 - Energia Eólica no Brasil
 - Sobre a otimização da localização dos aerogeradores em parques eólicos
 - Abordagem utilizada para resolução do problema de otimização
- 2 Modelagem do Problema
 - Função Objetivo
 - Restrições - Wake Effect
- 3 Metodologia
 - COA - Coyote Optimization Algorithm
- 4 Resultados
 - Dados utilizados para o Parque Eólico e COA
 - Caso A
 - Caso B
 - Caso C
 - **Caso D**
- 5 Conclusão

Caso D

- Nesse caso, considera-se vários sentidos de incidência dos ventos (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315°), portanto, $f_k = \frac{1}{8}$.
- Obteve-se, assim, a seguinte matriz que representa a configuração do parque eólico:

```
[ [0. 0. 1. 0. 1. 1. 1. 0. 0. 1.]  
  [0. 0. 1. 1. 0. 0. 0. 0. 1. 0.]  
  [0. 0. 0. 0. 0. 1. 0. 0. 0. 0.]  
  [1. 1. 0. 1. 0. 0. 0. 0. 0. 1.]  
  [1. 1. 1. 0. 1. 1. 1. 0. 1. 1.]  
  [0. 0. 0. 0. 0. 0. 1. 0. 0. 0.]  
  [0. 1. 0. 1. 0. 0. 0. 0. 0. 1.]  
  [1. 0. 0. 1. 0. 0. 1. 1. 0. 0.]  
  [0. 0. 0. 1. 0. 1. 0. 0. 0. 0.]  
  [1. 0. 0. 1. 0. 0. 1. 1. 0. 1.] ]
```

Figura 5: Matriz que representa a melhor configuração para o caso (D)

- Os seguintes dados foram obtidos:

Número de aerogeradores	36
Custo (\$)	25,25843
Potência Total (W)	14562,36303
Valor da função objetivo	0,001734500

Tabela 7: Dados obtidos para o caso (D)

- Pode-se dizer que o COA apresentou eficiência satisfatória, retornando configurações dentro do esperado para todas as direções de vento.
- É perceptível que nos casos (B) e (C) (para $k = 315^\circ$) o coioete alfa encontrado foi melhor adaptado que nos demais casos, mas essa tendência é também vista em [3], onde se utiliza de outra metaheurística.
- Ademais, os resultados obtidos são compatíveis com o encontrado na literatura [3] para um estudo de caso semelhante ao utilizado nesse trabalho.

Referências Bibliográficas

- [1] ABEEólica. *Boletim Anual de Geração Eólica 2020*. Rel. técn. 2021, p. 20.
- [2] Assessoria Institucional da Diretoria - ANEEL. *Capacidade instalada em 2021 supera 1 gigawatt; eólicas são o destaque pelo quarto mês seguido*. 2021. URL:
http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVlZ6/content/capacidade-instalada-em-2021-supera-1-gigawatt-eolicas-sao-o-destaque-pelo-quarto-mes-seguido/656877?inheritRedirect=false&redirect=http:%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fsa (acesso em 24/08/2021).

Referências Bibliográficas

- [3] Frederico Ferreira Panoeiro, Vinícius Albuquerque Cabral, Ivo Chaves da Silva Junior e Leonardo Willer de Oliveira. “Otimização De Layout De Parques Eólicos Com Representação Das Direções De Ventos”. Em: *Proceedings XXII Congresso Brasileiro de Automática* (2018). DOI: 10.20906/cps/cba2018-0181.
- [4] Juliano Pierezan e Leandro Dos Santos Coelho. “Coyote Optimization Algorithm: A New Metaheuristic for Global Optimization Problems”. Em: *2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2018 - Proceedings* (2018). DOI: 10.1109/CEC.2018.8477769.
- [5] G. Mosetti, C. Poloni e B. Diviacco. “Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm”. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 51.1 (1994), pp. 105–116. ISSN: 01676105. DOI: 10.1016/0167-6105(94)90080-9.

- [6] Sittichoke Pookpunt e Weerakorn Ongsakul. “Optimal placement of wind turbines within wind farm using binary particle swarm optimization with time-varying acceleration coefficients”. *Em: Renewable Energy* 55 (2013), pp. 266–276. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2012.12.005.