

O ESTADO DA ARTE DA DISPOSIÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS

Milton de Oliveira Pinto¹

1 Diretor de Energia Eólica

CERNE (Centro de Estratégias em Recursos Naturais & Energia)

Rua Raimundo Chaves N°2182, Natal/RN, 59064-390, Tel. (84) 2010 0340-Brasil

milton@cerne.org.br

RESUMO

As fontes de energia renováveis têm atraído muita atenção nos últimos anos, caracterizadas pela sua não dependência de combustíveis fósseis aliada a uma simpatia popular para com o meio ambiente. Neste ambiente, a energia eólica desempenha um importante papel entre as fontes de energia renováveis, com expressiva expansão em todo mundo. Um dos principais problemas na concepção e construção de um parque eólico, a fim de maximizar a sua produção de energia e eficiência, é a quantidade ideal de turbinas eólicas a serem instaladas. Os parques eólicos modernos, com suas turbinas de eixo horizontal, demandam significativos recursos de terra para separar cada turbina eólica da esteira da turbina adjacente. A esteira de uma turbina eólica é a área de interferência aerodinâmica daquela. Este estudo tem o objetivo de identificar brevemente várias metodologias diferentes no cálculo da esteira de uma turbina eólica, propostas na literatura técnica internacional, para a estimativa do número ideal de turbinas eólicas a serem instaladas, mostrando o atual estado da arte para o projeto otimizado de um parque eólico.

Palavras-chave: *Ex: Planejamento energético, esteira de uma turbina eólica, eficiência energética.*

1 INTRODUÇÃO

O principal desafio das fontes de energia renováveis (como o vento, por exemplo) é que suas fontes são mais difusas do que os combustíveis fósseis. Como consequência, as atuais tecnologias de energias renováveis necessitam de substanciais recursos de terra, a fim de extrair um relevante montante de energia. A limitação no uso da terra, no caso da energia eólica, merece especial atenção.

A otimização do projeto de um parque eólico tem sido fruto de diversas pesquisas nos últimos 14 anos. Minimizar o custo da produção energética é o principal objetivo em um projeto eólico. Fatores econômicos ditam o número e o tamanho das turbinas em um parque eólico. Somente após ter determinado as propriedades gerais do empreendimento é que o projetista buscará então maximizar a produção energética do parque, sendo feita através do uso de softwares, que levam em consideração fatores topográficos e meteorológicos do site, assim como também os efeitos de esteira.

Quando uma turbina eólica extrai energia do vento, uma região de turbulência denominada de esteira aparece atrás desta turbina. Se outra turbina opera dentro da região desta esteira, a potência de saída (da turbina afetada pela esteira) é reduzida, se comparada à potência da turbina que opera em primeiro plano, frontalmente para o vento livre e fora da ação da esteira.

Esta restrição aerodinâmica limita a quantidade de energia eólica que pode ser extraída de uma dada parte do parque. A ineficiência resultante do parque é compensada através do uso de turbinas eólicas mais altas, visando alcançar melhores recursos eólicos, de ventos em altitudes mais elevadas; Entretanto, tal solução envolve maiores custos de engenharia, além do impacto ambiental inerente com o uso de grandes estruturas na paisagem do local. Devido a interferência aerodinâmica das esteiras em um parque eólico, suas turbinas devem ser devidamente afastadas uma das outras. Esta exigência, somado as melhores condições de vento, levou inclusive a busca de novos locais de instalações das turbinas eólicas, como nos mares e oceanos (offshore).

O número ideal de turbinas eólicas depende de vários fatores distintos, entre eles temos: a) a morfologia do terreno, b) a área do parque eólico, c) o tamanho da turbina eólica, d) a velocidade e direção do vento e c) o custo de instalação total de turbinas eólicas. Para manter 90% do desempenho de uma turbina eólica isolada inserida num parque eólico, cada turbina deve manter distância lateral de 3 a 5 vezes o tamanho do diâmetro do seu rotor e distancia frontal/traseira de 6 a 10 vezes o mesmo diâmetro [1]. O efeito da esteira em um parque eólico é algo que assume um papel importante na produção de energia do parque, daí a grande relevância do seu entendimento.

2 O USO DA TERRA

O papel potencial e diferencial das fontes de energia renovável, como a energia eólica, é oferecer inúmeras vantagens frente às fontes de energia convencionais não renováveis, no quesito segurança e saúde. Este papel das renováveis está aumentando cada vez mais. Mesmo assim, alguns críticos entendem que as fontes de energia renováveis exigem grandes porções de terra, quando em comparação às opções das fontes

convencionais de produção de energia [2]. No caso eólico, percebe-se aí a importância do uso ótimo da terra, devendo levar em conta as esteiras envolvidas na busca da máxima eficiência do parque.

2.1 A Área Usada e a Geração de Energia

A área de terra necessária para a instalação de um parque eólico varia de acordo com o espaçamento entre as turbinas e sua configuração final. Normalmente, somente cerca de 3% da área total do parque eólico fica inutilizada para a agricultura e pastagem. Isto corresponde em torno de 10 hectares de um parque que tenha uma área de 300 hectares e 20 turbinas eólicas. Dependendo da disponibilidade dos recursos e do terreno, as turbinas eólicas usam somente entre 1 a 10% da área do parque [3]. A área de terra necessária para a geração de 1 GWh de eletricidade a partir das turbinas eólicas é geralmente maior do que a necessária para o equivalente num ciclo solar de geração.

2.2 O Uso da Terra e as Fontes de Energia

A área de terra coberta pelas usinas nucleares é aquela que sofre as maiores e praticamente irreversíveis transformações. No caso das hidrelétricas, a área necessária para geração de energia também varia de acordo com as condições do local. Há basicamente duas situações: a) quando a hidrelétrica é projetada para possuir um reservatório e b) quando a hidrelétrica não possui um reservatório, sendo neste caso chamada “a fio d’água”, não mantendo um estoque de água em um reservatório previamente construído, aproveitando o fluxo natural, sendo por assim dizer um tanto “refém” dos ânimos da natureza. No relacionado à área ocupada, as hídricas a fio d’água ocupam menor espaço e geram menor impacto ambiental, em contrapartida, a sua geração também será em um nível menor do que as hidrelétricas com reservatórios definidos.

Por unidade de energia produzida, a área do solo ocupada pelas fontes de energia renováveis, como eólica e fotovoltaica, permanece inalterada ao longo dos anos de seu uso. Um destaque da ocupação de terra através de fontes renováveis é a correlação entre área (m^2) e tempo (ano), onde, por exemplo, a ocupação de $1 m^2$ de terra por 10 anos produzirá a mesma quantidade de eletricidade proporcionada pela ocupação de $10 m^2$ de terra por 1 ano [2].

Em [4] foi mostrado um estudo que avaliou o potencial eólico tecnológico mundial, sob uma abordagem física & geográfica, levando em conta a conservação de energia. Tal estudo mostrou que temos cerca de 1 TW de energia para o limite máximo do futuro potencial elétrico da energia eólica, sendo que este valor é considerado muito menor do que as estimativas anteriores, como também ainda é considerado abaixo dos potenciais econômicos e concebíveis publicados para a metade deste século. Há cenários com 1 TW para o

ano de 2050, projetados pelo Greenpeace, citando estudos de diversos autores com potenciais sustentáveis de 15 TW. Deste modo, se faz necessário uma devida atenção à otimização do uso da terra.

3 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE POTÊNCIA DE UMA TURBINA EÓLICA

O coeficiente de potência de uma turbina eólica é definido como uma fração da energia cinética incidente do vento, que passa através da área varrida pelo rotor da turbina, sendo convertida em energia elétrica. O coeficiente de potência C_p é dado em termos da potência elétrica gerada P , da densidade do ar ρ (estimado em $1,2928 \text{ kg/m}^3$), da área varrida pelo rotor A e pela velocidade do vento V , dado pela equação [1]:

$$C_p = \frac{P}{(1/2)\rho AV^3} \quad (1)$$

A disposição ótima das turbinas eólicas em um parque maximizará a eficiência total de extração de energia deste parque. As características de uma turbina eólica que estão relacionadas à otimização do layout de um parque são afetadas por vários critérios, que incluem: a) Velocidade de partida, b) Velocidade de corte, c) Velocidade nominal, d) Potência Nominal, e) Curva de Potência, f) Coeficiente de Empuxo, g) Diâmetro do rotor e h) Altura do cubo da turbina. Quando a velocidade do vento é maior do que a velocidade de partida, as pás das turbinas começam a girar, iniciando a geração de energia. É importante frisar que a potência de saída aumenta com o cubo da velocidade do vento, até que esta velocidade alcance a velocidade nominal, ponto no qual o sistema de controle da turbina modifica a inclinação das pás, de modo que a energia produzida permanece constante na potência nominal. Quando a velocidade do vento atinge a velocidade de corte, a turbina eólica é então desligada, a fim de evitar danos à sua estrutura [2].

Embora as turbinas eólicas de hoje sejam projetadas para uma ampla faixa de velocidades do vento, elas possuem um limite máximo e mínimo para tal velocidade, normalmente entre 2,5 e 25 m/s, sendo projetadas para fornecer a potência máxima em uma dada faixa particular de velocidades. Isto significa que durante muitas horas do ano, a turbina não produz energia que na realidade existe [4].

4 ESTEIRA DE UMA TURBINA EÓLICA

A esteira de uma turbina eólica de eixo horizontal é uma região tridimensional de fluxo turbulento caracterizada por um decréscimo na energia cinética e uma complexa estrutura helicoidal [5]. Modelar uma esteira de uma turbina eólica não é algo trivial, pois estamos nos dando com questões complexas, como a turbulência atmosférica. Modelos de esteiras têm sido desenvolvidos a fim de prever toda a dinâmica do

fluxo, possuindo efeitos decisivos no desempenho de um parque eólico, assim como também na vida útil deste.

Boa parte dos modelos de esteiras é baseada no princípio da conservação da massa e momento, onde os mais simples desconsideram partes das equações diferenciais de Navier-Stokes (que descrevem o escoamento dos fluídos), assumindo que a esteira seja homogênea. Modelos avançados levam em conta as equações de Navier-Stokes como um todo, envolvendo aqui uma Dinâmica dos Fluidos Computacional. Há modelos com uma abordagem mais simples, como a expansão linear de Jensen e modelos mais sofisticados, como o da viscosidade turbulenta de Ainslie [6]. Numerosos estudos têm sido apresentados sobre as esteiras de turbinas eólicas. A maioria dos estudos se concentram na região próxima à esteira ou na região afastada [7].

É importante perceber, entretanto, que nem toda turbulência que afeta uma turbina eólica é proveniente do efeito esteira. Há também a turbulência “natural” da camada limite atmosférica. Destas duas turbulências, temos a intensidade de turbulência na esteira da turbina, dada por:

$$I_{esteira} = (I_0^2 + I_+^2)^{1/2} \quad (2)$$

Onde I_0 é a intensidade de turbulência do fluxo no ambiente, I_+ é a intensidade de turbulência que foi adicionada ao sistema [8].

4.1 Análise dos Modelos Usados no Cálculo das Esteiras

Foi apresentado em [9] um modelo de simulação baseado na superposição de esteira e algoritmo genéticos. Em [10] foi proposto um número exato de turbinas eólicas em um parque eólico para a sua localização. Melhorando os resultados encontrados de [10], foi demonstrado em [11] um caminho para explorar o potencial eólico de um site, ao reduzir a terra exigida para a mesma produção energética. Algoritmos genéticos também foram usados em [12] com o objetivo de alcançar a ótima localização das turbinas eólicas, em um estudo onde a capacidade de produção foi maximizada, enquanto que o número de turbinas eólicas instaladas e a área ocupada por cada parque eólico foi limitada em comparação ao trabalho de [9]. Descrito em [13] e também visando obter a ótima localização das turbinas eólicas, há um método estatístico & matemático (chamado de método de simulação de Monte Carlo), onde a otimização é feita pela média da produção máxima de energia e critérios mínimos do custo de instalação. Um modelo de otimização combinatória foi mostrado em [14], também encontrando bons resultados, baseado no custo de investimento do parque eólico e a relação de potência total em função da quantidade e tipo das turbinas

eólicas que são usadas. Diversos outros estudos baseados em redes neurais vêm sendo apresentados na literatura científica, como alguns que usam algoritmos evolutivos, por exemplo, que mostram uma aceitável exatidão quando comparados com as metodologias anteriores.

Estudos investigando os efeitos da topologia do site, a separação das turbinas e o perímetro de afastamento foram realizados em [15], observando que um parque eólico projetado para maximizar a produção de energia por unidade de área pode ser diferente de um parque projetado para maximizar o seu ganho econômico.

Recentemente, experimentos apresentados em [16] foram conduzidos em uma turbina de 2 MW, fazendo uso de um Sodar (“Sound Detection and Ranging”) para medidas do perfil da velocidade do vento “upstream”, e um Lidar (“Light Detection and Ranging”) para medir o perfil da velocidade do vento na esteira. O modelo é usado para encontrar a relação entre a velocidade do vento e a restaruração da esteira envolvida no processo. Também recentemente, na busca por um melhor desempenho de um parque eólico, um estudo mostrado em [17] propõe um método de redirecionamento da esteira, por meio de: a) Desalinhamento na direção da turbina em primeiro plano, mudando seu ângulo de orientação para intencionalmente desviar a esteira da turbina subsequente e b) Mudança do ângulo de inclinação do rotor da turbina em primeiro plano.

4.2 O Modelo de Esteira de Jensen

Há diferentes modelos matemáticos que visam otimizar a disposição das turbinas em um parque eólico. A maioria dos estudos relacionados a este fenômeno de turbulência usam, para a otimização do layout do parque eólico, o modelo proposto por N.O. Jensen [18]. Baseado no modelo de Jensen, a potência que uma turbina eólica produz está relacionada com a velocidade do vento na posição de instalação. O modelo é mostrado esquematicamente na Figura 1, onde temos a velocidade reduzida do vento u , após passar pela Turbina A e incidindo na turbina B, sendo calculado de acordo com a seguinte equação:

$$u = u_0 \left[1 - \frac{2f}{\left(1 + a \left(\frac{x}{r_1}\right)^2\right)} \right] \quad (3)$$

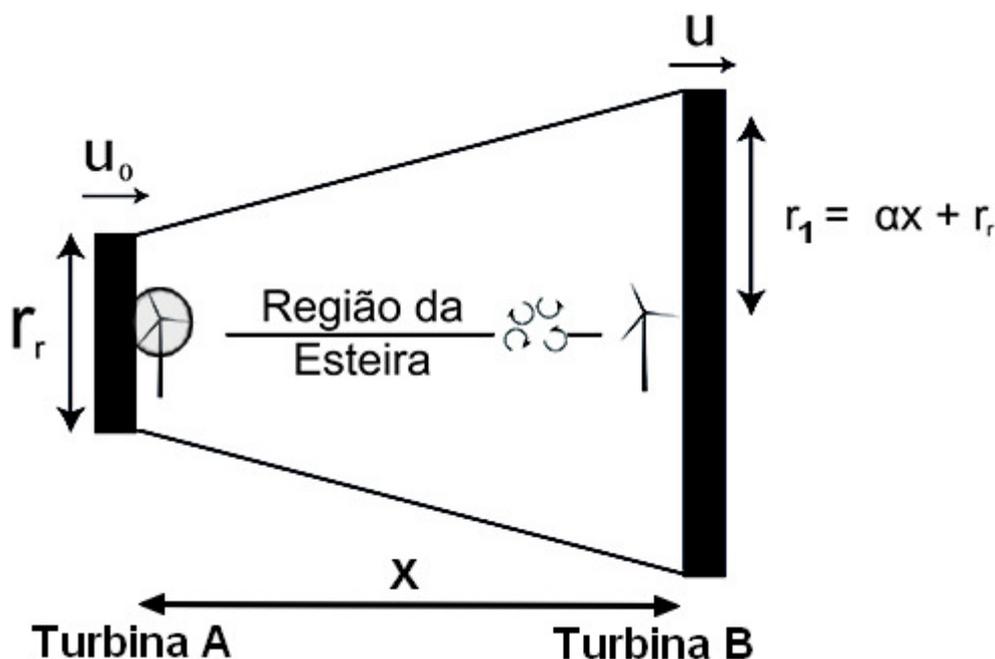


Figura 1 - Esquema da esteira de uma turbina eólica no modelo de Jensen

Fonte: Autor

Portanto, a equação (3) indica o decaimento da velocidade do vento após sua passagem pelo rotor da turbina. Onde u_0 é a velocidade média do vento, f é o fator de indução axial, x é a distância a jusante da turbina (logo atrás desta), r_1 é o raio do rotor a jusante (raio da esteira na turbina afetada) e a é uma constante de arrastamento. r_1 e C_T (o coeficiente de empuxo da turbina) estão relacionados com o raio do rotor r_r e o fator de indução axial f (também chamado de constante de decaimento da esteira), nas equações:

$$r_1 = r_r \sqrt{\frac{1-f}{1-2f}} \quad (4)$$

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

C_T pode ser fornecido pela fabricante da turbina, sendo característico desta. A constante de arrastamento a , também chamada de constante de perda, indica o ângulo de abertura da sombra, dado empiricamente por:

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

Onde z é a altura dada na altura do cubo da turbina eólica e z_0 é o coeficiente de rugosidade do terreno no local da turbina [19]. A Tabela 1 mostra alguns valores de rugosidade de acordo com o tipo do terreno.

Tabela 1 Classificação da Rugosidade da superfície de alguns terrenos (20).

Tipo do Terreno	Comprimento de Rugosidade z_0 (m)
água (lagos e mares), areia suave ou neve	0,0001-0,001
grama, fazenda com algumas construções ou árvores	0,01-0,3
fazendas em terrenos mais abertos	0,05- 0,10
arbustos, árvores, subúrbios e pequenas cidades	0,20-0,40

Assumindo que o déficit de energia cinética de um conjunto de esteiras afetadas seja igual à soma dos déficits energéticos, a velocidade resultante à jusante de N turbinas eólicas pode ser calculada usando a seguinte equação (21):

$$\left(1 - \frac{u}{u_0}\right)^2 = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{u_i}{u_0}\right)^2 \quad (7)$$

4. CONCLUSÃO

Nas últimas décadas, a modelagem da esteira de turbinas eólicas tem sido uma questão importante no planejamento técnico que visa uma maximização da produção de energia de um parque eólico. Apesar do esforço e dos progressos já alcançados por vários pesquisadores ao redor do mundo, na possibilidade de generalizar os modelos de turbulência usados para prever o comportamento da esteira sob diferentes condições, uma solução geral ainda não foi encontrada.

REFERÊNCIAS

- [1] Dabiri, J.O. *Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays*. Journal of Renewable and Sustainable Energy 3, 043104 (2011).
- [2] Fthenakis, V., Kim, H.C. *Land use and electricity generation: A life-cycle analysis*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1465–1474.
- [3] BTE Wind. *Harvesting The Wind - How energy can be the farmer's new cash crop*. Retrieved may 20, 2014 From the World Wide Web:
http://www.biothermenergy.com/sites/all/themes/bowtie/images/BTE_harvestingthewind.pdf
- [4] Castro, C., Mediavilla, M., Miguel, L. J., Frechoso, F., *Global wind power potential: Physical and technological limits*. Energy Policy 39 (2011) 6677–6682.

- [5] Lignarolo, L.; Ragni, D.; Krishnaswami, C.; Chen, Q.; Ferriera, C.; Brussel, G. (2014). *Experimental analysis of the wake of a horizontal-axis wind –turbine model*. Renewable Energy xxx (2014) 1-16.
- [6] Son, E., Lee, S., Hwang, B., Lee, S. *Characteristics of turbine spacing in a wind farm using an optimal design process*. Renewable Energy 65 (2014) 245-249.
- [7] Chia-Ren Chu, Pei-Hung Chiang. *Turbulence effects on the wake flow and power production of a horizontal-axis wind turbine*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics - Volume 124, January 2014, Pages 82–89.
- [8] Chamorro, L.P., Porte-Agel, F., 2009. *A wind-tunnel investigation of wind-turbine wakes: boundary-layer turbulence effects*. Bound.-Layer Meteorol. 132,129 – 149.
- [9] Mosetti, G., Poloni, C., Diviacco B., *Optimization of wind turbine positioning in large wind farms by means of a genetic algorithm*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 51 (1) (1994) 105–116.
- [10] Patel, M.R. 1999. *Wind and power solar systems*. Boca Raton: CRC Press.
- [11] Ammara, C. Leclerc, C. Masson. *A viscous three-dimensional differential/actuator-disk method for the aerodynamic analysis of wind farms*. ASME Journal of Solar Energy Engineering 124 (4) (2002) 345–356.
- [12] Grady, S.A. , Hussaini, M.Y. , Abdullah,M.M. *Placement of wind turbines using genetic algorithms*, Renewable Energy 30 (12) (2005) 259–270.
- [13] Marmidis, G., Lazarou, S., Pyrgioti, E. *Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo simulation*. Renewable Energy 33 (2008)1455–1460.
- [14] Mustakerov, I., Borissova, D. *Wind turbines type and number choice using combinatorial optimization*. Renewable Energy 35 (2010) 1887–1894).
- [15] Christie, D. , Bradley, M. *Optimising land use for wind farm*. Energy for Sustainable Development 16 (2012) 471 –475.
- [16] Abdelsalam, A.M., Boopathi, K., S. Gomathinayagam, S., Kumar,K.H.S.S., Ramalingam, V. *Experimental and numerical studies on the wake behavior of a horizontal axis wind turbine*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics - Volume 128, May 2014, Pages 54–65.

- [17] Paul A . Fleming et al. *Evaluating techniques for redirecting turbine wakes using SOWFA*. Renewable Energy xxx (2014)1-8.
- [18] Jensen, N.O. *A note on wind generator interaction*. Technical Report. Risø National Laboratory; 1983.
- [19] González,J. S., Payán, M. B., Santos, J. M. R.,Longatt, F. G. *A review and recent developments in the optimal wind-turbine micro-siting problem*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 30 (2014) 133 – 144.
- [20] Troen, I;Petersen, E.L. *European Wind Atlas*. Riso Nacional Laboratory.Riso Publication:Denmark, 1989.
- [21] Ekonomou, L., Lazarou, S., Vita, V.*Estimation of wind turbines optimal number and produced power in a wind farm using an artificial neural network model*. Simulation Modelling Practice and Theory 21 (2012).

BIOGRAFIA

Milton de Oliveira Pinto – Nasceu em Osasco/SP. É graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2003) e especialista em Energia Eólica pela mesma instituição (2012), atualmente é aluno do mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, tendo energia eólica como área de estudo.

Ele é autor de dois livros: *Fundamentos de Energia Eólica* (2012) e *Energia Elétrica – Geração, Transmissão e Sistemas Interligados* (2013), ambos publicados pela Editora LTC Grupo Gen. É interessado no estudo das energias renováveis.

Esp. Pinto é diretor de Energia Eólica do CERNE (Centro de Estratégias em Recursos Naturais & Energia), com sede em Natal/RN, atuando como pesquisador e analista do setor elétrico nacional. É também consultor técnico da CRN – Energia Local (Consultoria em Energias Renováveis), analista técnico do SEERN (Sindicato das Empresas do Setor Energético do Rio Grande do Norte), assim como palestrante convidado em diversas instituições.