



OTIMIZAÇÃO DA POSIÇÃO DE AEROGERADORES EM PARQUE EÓLICO

José R C. Silva¹

jricardocs@hotmail.com

Marcus V G. Morais¹

mumorais@gmail.com

Maura A M. Shzu¹

maurashzu@gmail.com

Suzana M. Avila¹

suzana.avila@gmail.com

¹ Universidade de Brasília

¹ Gama, Distrito Federal, Brasil

Resumo. A interação fluido-estrutura nos aerogeradores forma o chamado efeito esteira., ou seja, o vento a sotavento de uma turbina começa a escoar de forma desordenada no tempo e no espaço, resultando em uma perda de velocidade. Esta perda afeta a produção de energia nas turbinas eólica posteriores e dependendo do layout proposto pode impactar significativamente a eficiência de um parque eólico. O posicionamento geométrico das turbinas, a rugosidade do terreno e a constante absoluta de cada modelo constituem os parâmetros mais significativos nas perdas do conjunto. O presente trabalho pretende maximizar a produção de energia buscando uma configuração ótima da posição das turbinas num parque eólico. Isto será feito através da modelagem do efeito esteira proposto por Werle, foi utilizado o algoritmo CPMW (Cálculo de Produção da Modelagem de Esteira de Werle) implementado no software MATLAB, para o cálculo de produção total de energia. A otimização foi conduzida por um algoritmo genético disponível no software modeFRONTIER. O otimizador foi integrado com o MATLAB, tendo como objetivo maximizar a produção total do parque.

Palavras-chave: Otimização; Efeito esteira; Parque eólico; Aerogerador, Eficiência.

1 INTRODUÇÃO

O vento proveniente do movimento das massas de ar, com origem em vários fenômenos, principalmente a rotação do planeta e o aquecimento não uniforme pela radiação solar, têm sido bastante aproveitado pela humanidade. Nos primórdios, o vento basicamente era aproveitado para moagem de grãos e em grande escala pelas embarcações à vela. Com o desenvolvimento tecnológico e novas descobertas passou a ser utilizado no bombeamento de água, e atualmente, tem destaque na geração de energia elétrica (Wenzel., 2010).

A energia eólica pode ser uma alternativa para diversos níveis de demanda. Em pequenas localidades, distantes da rede de transmissão, podem ser instaladas pequenas centrais ou pequenos parques para suprir a localidade, tendo o caráter social de universalização do atendimento. Já as centrais de porte grande ou grandes parques podem contribuir de maneira significativa para atender uma grande fatia do Sistema Interligado Nacional (SIN) com importantes ganhos.

Tendo em vista a limitação da capacidade de produção de um único aerogerador, a velocidade do vento, o custo de construção e instalação de aerogeradores gigantesco, a energia disponível no vento, é utilizada com a instalação de uma grande quantidade de aerogeradores, formando os chamados parques eólicos. Sendo de extrema importância o cálculo da disposição dos aerogeradores para obter uma maior produção energética e reduzir os custos de instalação, operação e manutenção (Moskalenko et al., 2010).

Mosetti et al. 1994, apresentou uma abordagem para a otimização de parques eólicos, visando à distribuição de energia eólica, e um layout foi otimizado, a fim de extrair o máximo de energia, com custos mínimos de instalação. A otimização foi realizada pela associação de um parque eólico, com um modelo de simulação baseado em superposição de esteira, com um código de pesquisa genético.

Grady et al. 2005, apresentou uma abordagem utilizando algoritmo genético, empregada para obter o melhor posicionamento de turbinas eólicas, visando maximizar a capacidade de produção, limitando o número de turbinas instaladas e a área do terreno ocupada por um parque eólico. O algoritmo de otimização determinou o tamanho da população, o número de subpopulações, e o número máximo de gerações para evolução. Os resultados demonstraram que esse tipo de algoritmo pode com precisão prever configurações ideais de parques eólicos.

Marmidis et al. 2007, propôs uma metodologia para o melhor posicionamento e disposição dos aerogeradores em um parque eólico, com a utilização de um método estatístico e matemático chamado de "método de simulação Monte Carlo". A otimização é feita pela média de produção máxima de energia e critérios mínimos de instalação, os resultados do estudo comprovam que este método pode dar uma nova abordagem para as ferramentas utilizadas nesta área.

Farias et al. 2013, realizaram um estudo do processo de planejamento de um parque eólico, verificando o melhor aproveitamento da área disponível. Mostraram que um aumento no número de aerogeradores conduz à redução das distâncias entre cada turbina eólica, ocasionando uma queda significativa na produção global do parque devido ao efeito esteira. Foi implementado um algoritmo de otimização de layout de parques eólicos, onde, para as condições de vento, as características e quantidade dos aerogeradores determinam-se a melhor posição de cada aerogerador, maximizando assim a eficiência de produção do parque eólico.

Como se observa o tema tem bastante relevância, para economicidade na geração de energia, muitos estudos dever ser realizados e muitos obstáculos devem ainda ser superados, antes que essa tecnologia atinja um patamar ótimo.

Entre estes obstáculos supracitados estão: redução do custo de construção de um parque eólico e a sua manutenção; diminuição das perdas geradas pelo efeito esteira; aumento da produção do parque com um baixo custo de geração de energia para competir no mercado com outras fontes energéticas; maior conhecimento acadêmico e técnico, maior receptividade da tecnologia de geração e a busca de novos investimentos na implantação de parques eólicos.

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo e contribuir no que envolve as perdas geradas pelo efeito esteira na geração de energia. Propondo uma metodologia de otimização para a configuração de layout, com a utilização do modelo de esteira proposto por Werle, para aumentar a eficiência e a produção de um parque eólico.

2 MODELAGEM DO EFEITO ESTEIRA – MODELO DE WERLE

Atualmente a grande maioria dos parques eólicos utiliza às turbinas eólicas de eixo horizontal, nos parques as distancias longitudinal e lateral das turbinas tem uma forte influência na eficiência de geração de energia do parque eólico em virtude da esteira gerada pelas turbinas.

O posicionamento das turbinas muito perto uma da outra reduz substancialmente à produção das turbinas a sotavento, causado pela perda de velocidade do vento que cria uma esteira de vento com menos força e turbulento. Se o posicionamento de uma turbina for muito distante da outra isso implica na diminuição no número de turbinas do parque eólico, o que tem um impacto expressivo na produção do parque. Colocando-os demasiadamente afastados reduz o número de turbinas e, conseqüentemente, a quantidade de energia extraída.

O ideal para a disposição das turbinas eólicas seria a mais afastada possível para tornar desprezível o efeito de esteira e aumentar a produção de energia. No entanto, existem outros fatores como o custo do terreno e o custo para as ligações à rede elétrica o que sugere uma disposição das turbinas ser a mais próxima possível para diminuir os custos, sendo necessário encontrar um consenso.

O custo da energia é influenciado pelo efeito esteira. Os estudos mostram, que mesmo com as distâncias grandes de separação longitudinais e laterais de sete diâmetros, só é possível extrair cerca de 65% em nível de potência. (Wenzel., 2010)

Na avaliação da influência de uma turbina eólica sobre as demais instaladas em um parque eólico são desenvolvidos modelos matemáticos de esteira normalmente utilizados como base em sistemas computacionais, capazes de calcular as perdas devidas à sobreposição de esteiras na geração de energia total de um parque eólico (Moskalengo et al., 2010).

As turbinas eólicas extraem energia do vento para produzir eletricidade: contudo, o vento à sotavento apresentará menor quantidade de energia disponível se comparado com o vento à barlavento. Como consequência, o vento a sotavento da turbina terá velocidade reduzida e escoamento turbulento, constituindo a chamada esteira da turbina. Conforme o escoamento do vento vai se distanciando da turbina, essa esteira começa a se dissipar e gradualmente retoma a condição do escoamento inicial. Se uma esteira intercepta a área varrida de uma turbina a sotavento, esta turbina é dita “sombreada” pela turbina que provocou a esteira.

Os dois principais efeitos de uma esteira são a redução da velocidade do vento que por sua vez reduz a produção energética do parque eólico e o aumento da turbulência do vento, aumentando potencialmente o carregamento dinâmico nas turbinas a sotavento.

É importante considerar o efeito esteira no design de parques eólicos, no sentido de maximizar a energia produzida e o tempo de vida dos equipamentos, diversos modelos numéricos, de complexidade variável, têm sido desenvolvidos para descrever o efeito esteira.

A modelagem exata da distribuição da velocidade do vento dentro de um parque eólico é muito complicada e necessita vários parâmetros de difícil estimação.

A escolha do modelo mais adequado depende de alguns fatores como: o tempo computacional desejado, a precisão da previsão esperada e os parâmetros disponíveis para modelagem do vento. Considerando esses fatores, optou-se pelo modelo de Werle para ser desenvolvido o algoritmo.

J. Werle Michael construiu um modelo analítico para descrever o comportamento do vento em esteiras de turbinas eólicas (Werle., 2008). O modelo foi dividido três elementos essenciais a Fig. (1) ilustra: a esteira próxima, a intermediária e a distante. Algumas hipóteses foram consideradas tais como:

- O modelo é essencialmente invíscido (O fluxo de um fluido que se presume não ter viscosidade) na região do fluxo da esteira próxima;
- A metodologia para estimar o comprimento da sequência intermediária é baseado na solução da camada de cisalhamento turbulenta mistura de Prandtl, e
- Uma esteira distante onde o modelo baseado na análise esteira assimétrico clássico Prandtl / Swain.

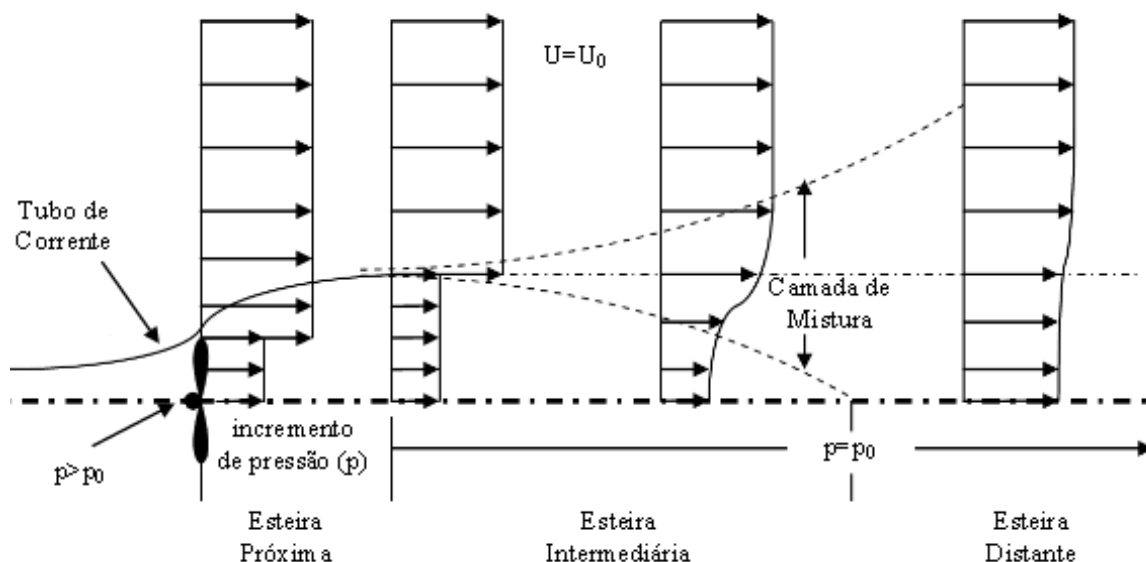


Figura 1. Perfil das três regiões da esteira de Werle. (Wenzel., 2010; Werle., 2008)

As características principais da região da esteira próxima Fig. (2) relevantes para fins de corrente são:

Na frente da turbina a pressão do vento aumenta à medida que o tubo de corrente cresce até o diâmetro da turbina, então tem uma queda abruptamente através da turbina e,

posteriormente, tem um crescimento constante na região da esteira próxima até se igualar ao valor da corrente livre, p_a .

No interior do tubo a velocidade diminui à medida que se aproxima da turbina, mantendo-se constante em toda a turbina e depois diminui ainda mais até atingir o valor da corrente livre.

A largura da esteira próxima da turbina cresce até um diâmetro fixo, tal como a pressão se aproxima de p_a e a velocidade diminui para satisfazer a massa e conservação da quantidade de movimento.

Esta região é dominada por processos invíscido e é da ordem do diâmetro do rotor D_p .

Como representado abaixo para um HAWT (turbinas eólicas de eixo horizontal), a esteira próxima será considerada a ser regida pela pressão invíscido de forças com a camada de mistura turbulenta que inicia na turbina.

A velocidade pode ser calculada pela solução exata da Lei de Biot Savart aplicada à espiral de vorticidade no campo da esteira e a velocidade central invíscido (que não têm viscosidade) adimensional, u_i . Em qualquer lugar dentro do tubo de fluxo pode ser calculado pela Eq. (1):

$$u_i = 1 + c \left[1 + \frac{2X}{\sqrt{1 + 4X^2}} \right] \quad (1)$$

onde c está relacionada com a circulação total induzida pela turbina eólica e pela Eq. (2):

$$X = \frac{x}{D_p} \quad (2)$$

Para fins atuais, c pode ser determinada comparando à velocidade de saída prevista no infinito a sotavento, Eq. (3):

$$c = \left(\frac{1 - u_0}{2} \right) \quad (3)$$

Logo a Eq. (4) mostra a velocidade de saída:

$$u_i = 1 + \frac{1 - u_0}{2} \left[1 + \frac{2X}{\sqrt{1 + 4X^2}} \right] \quad (4)$$

Que pode ser relacionado com o coeficiente de empuxo pela Eq. (5):

$$u_0 = \sqrt{1 - C_T} \quad (5)$$

Com isto, o diâmetro do tubo D_i pode ser calculado a partir das conservações da massa pela Eq. (6):

$$\frac{D_i}{D_p} = \sqrt{\frac{1 - U}{2u_i}} \quad (6)$$

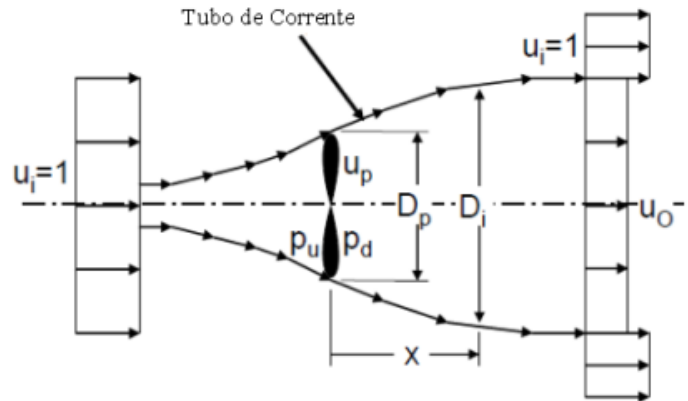


Figura 2. Perfil da esteira próxima. (Wenzel., 2010)

O coeficiente de potência pode ser determinado a partir de qualquer uma das seguintes relações Eq. (7):

$$C_p \equiv \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A_p V_a^3} = \frac{u_0 A_p (p_u - p_d)}{\frac{1}{2}\rho A_p V_a^3} = \frac{1}{2}(1 + u_0)(1 + u_0^2) \quad (7)$$

Coeficiente de impulso Eq. (8):

$$C_T \equiv \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A_p V_a^2} = \frac{A_p(p_u - p_d)}{\frac{1}{2}\rho A_p V_a^2} = (1 + u_0^2) \quad (8)$$

O Coeficiente de potencia em função do Coeficiente impulso pode ser inscrito Eq. (9) e (10):

$$u_0 = \sqrt{1 - C_T} \quad (9)$$

$$C_p = \frac{1}{2} C_T [1 + \sqrt{1 - C_T}] \quad (10)$$

A partir das equações acima é possível fornecer os valores resultantes da velocidade da linha central u_i e a taxa de crescimento da esteira, $\frac{D_i}{D_p}$ para uma gama completa de C_t até o atingir o limite $C_t = 1$.

O valor de $C_t = 8/9$ corresponde à obtenção da máxima potência de saída, isto é, o limite de Betz $C_f = 16/27$. Duas observações importantes e úteis podem ser feitas aqui:

1. A barlavento de uma turbina de eixo horizontal, a velocidade da linha central e no tubo de corrente atinge níveis assintóticos de comprimento de um a dois diâmetros, independentemente do nível de empuxo, especialmente para $C_t < 8/9$.
2. O comportamento do vento a sotavento de uma turbina de eixo horizontal, a velocidade da linha central do tubo de corrente demora mais para atingir o seu nível assintótico. Para $C_t < 8/9$ (nível máximo de potência) que efetivamente atinge os seus valores limite em X igual a dois diâmetros, enquanto para $C_t > \frac{8}{9}$, X aumentando até quatro diâmetros ou valores maiores.

As características principais da região da esteira intermediária, mostrada na Fig. (3), são:

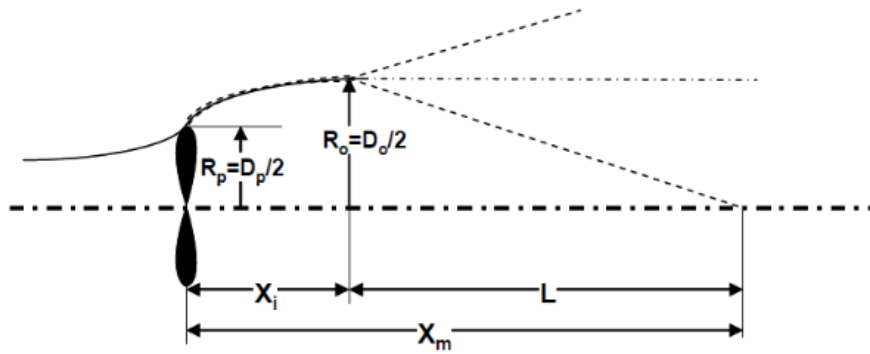


Figura 3. Estrutura da esteira intermediária (Wenzel., 2010)

- A pressão é constante e igual a p_0 ;
- A velocidade da linha central mantém-se constante com o aumento na camada externa devido ao grande gradiente radial da velocidade axial;
- A propagação inicial lateral da camada de mistura pode ser aproximada utilizando uma solução de auto-similar de Prandtl para a mistura turbulenta.
- O comprimento desta região é calculado, sendo superior a dois diâmetros de comprimento, e terminar quando a camada de mistura atinge a linha central e inicia uma mudança na velocidade da linha central como descrito na Fig. (3).
- Não há uma solução similar disponível para esta região devido à sua natureza assimétrica e diâmetro finito.

Primeiramente estabelece-se X_0 e finalmente as três regiões das esteiras juntas, a região intermediária se inicia num ponto próximo X_i e termina em X_m . Referindo-nos à Fig.(3), próximo de X_i a espessura da camada de cisalhamento é pequena em comparação com a distância radial, $R_i = \frac{D_i}{2} = \frac{D_0}{2}$, e os resultados de Prandtl aplicados prevendo uma taxa de crescimento linear para a largura da camada de cisalhamento.

Sendo utilizado de forma a estimar X_m , dada pela Eq. (11):

$$X_m = X_i + K_m \frac{D_0}{D_p} \frac{1 + u_0}{1 - u_0} \quad (11)$$

O valor de K_m é encontrado a partir de dados experimentais.

As características principais da esteira distante são:

- A pressão mantém-se constante e igual a p_0 ;
- A velocidade da linha central inicia com um aumento constante na direção do fluxo de valor livre V_0 , devido à mistura turbulenta.
- A propagação lateral da região de mistura foi trabalhada por Prandtl e Swain por ser governado por potências fracionárias de distância axial e o coeficiente de pressão da turbina eólica;
- Na utilização da solução Prandtl e Swain utilizam-se duas constantes empíricas: uma K constante absoluta que é aplicável em todos os pontos assimétrica da esteira, sendo calculada a partir de experiências, a outra é uma constante arbitrária representando a origem da esteira distante, que é determinada a partir do comportamento da esteira próxima e esteira intermediária;

Até o momento, a maioria das publicações para o modelo de esteira de Werle não têm empregado os detalhes da estrutura em três fases da turbina. Os estudos mantêm-se centrado principalmente na esteira distante (Werle., 2008).

A esteira distante tem seu crescimento D_v , Como determinado por Swain pela Eq. (12) a seguir:

$$\frac{D_v}{D_p} = K(C_t X)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

Atendendo a velocidade adimensional na linha central da esteira distante, u_v , pela Eq. (13) seguinte.

$$u_v = 1 - \frac{\left(\frac{C_t^{\frac{1}{2}}}{X}\right)^{\frac{2}{3}}}{2K^2} \quad (13)$$

A constante K está relacionada com comprimento de mistura turbulenta de Prandtl e foi designado por Swain como "universal", isto é, que deve ser determinada experimentalmente e irá ser a mesma para todos os organismos assimétricos, gerando um empuxo numa corrente uniforme, enquanto a hipótese de comprimento de mistura turbulenta é válida.

Segundo Werle (2008), o valor de K é determinado a partir de um compêndio de mais de 104 pontos de dados, abrangendo o modelo de rotores de turbinas eólicas testados em túneis de vento, com a utilização de turbinas eólicas em tamanho real, localizado em parques eólicos, dentro e fora da costa, e simuladora de turbinas eólicas e disco poroso, testado em um túnel de vento.

Estes resultados foram analisados para avaliar valores de K pela Eq. (14) seguinte.

$$K = \frac{\frac{D_v}{D_p}}{(C_t X)^{\frac{1}{3}}} = \frac{\left(\frac{C_t^{\frac{1}{2}}}{X}\right)^{\frac{1}{3}}}{(2[1 - u_v])^{\frac{1}{2}}} \quad (14)$$

Com isso em mãos, seguindo a sugestão de Swain, pode-se escrever a forma mais geral assintótica do modelo de esteira distante, introduzindo a origem virtual, X_0 , de modo que u_v é dado pela Eq. (15) e D_v pela Eq. (16).

$$u_v = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{C_t^{\frac{1}{2}}}{X - X_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (15)$$

$$\frac{D_v}{D_p} = [C_t(X - X_0)]^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

O valor de X_0 , é a localização da origem virtual da região esteira distante da turbina eólica, tem de ser determinado através acoplamento das esteiras utilizando o modelo de esteira composta.

2.1 Modelo para dois aerogeradores

Para comparar e avaliar da qualidade do modelo Werle em relação ao modelo de Jensen utilizado por Farias et al (2013), foi implementado um código primário no software MATLAB, para calcular a produção energética.

O código foi implementado para dois aerogeradores: sendo o primeiro aerogerador fixo no ponto (0,0); o outro móvel com liberdade de movimento a uma distancia como ilustra a Fig. (4).

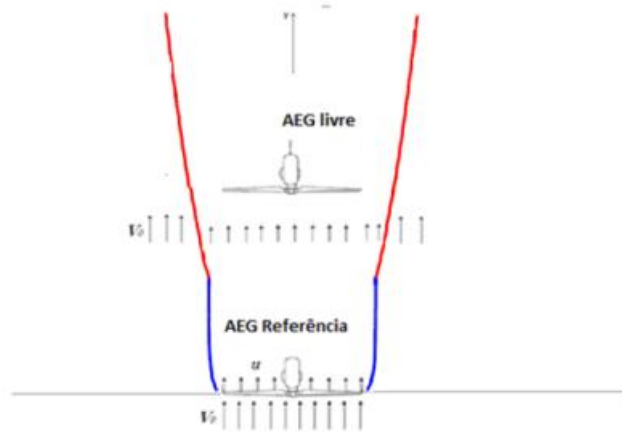


Figura 4. Esquema de posicionamento dos aerogeradores para o modelo de Werle.

2.2 Modelo para múltiplas esteiras

O modelo anterior representa apenas a esteira de um aerogerador. No entanto, no posicionamento de aerogeradores em um parque eólico todas as turbinas a barlavento terão esteiras que irão gerar sombras parciais e totais nas turbinas à sotavento que consequentemente influencia numa queda de produtividade do parque (Farias et al., 2013). A Fig. (5) ilustra o efeito das múltiplas esteiras.

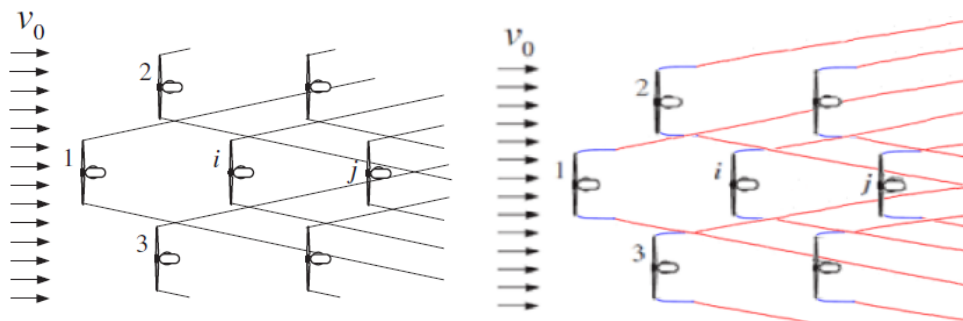


Figura 5. Múltiplas esteiras em parque eólico (adptado González-Longatt, 2012)

É possível verificar na figura acima a influência do posicionamento das turbinas num parque eólico. Na turbina j a velocidade do vento que a atinge sofreu perdas devido a existência das turbinas a barlavento, ou seja, todos os aerogeradores posicionados a barlavento influenciam na produção dela. (Farias et al., 2013).

Para obtenção de um resultado satisfatório para um parque eólico com diversas turbinas, os efeitos que cada esteira gerada pelas turbinas deve ser considerada em uma única esteira. Contudo, a influência das esteiras no aerogerador deve ser analisada individualmente para obtenção da área sombreada. A Fig. (6) ilustra, o sombreado é a mensuração do grau de sobreposição entre a área da seção circular da esteira e a área da turbina que sofre com a ação dessa esteira. (Couto et al., 2013).

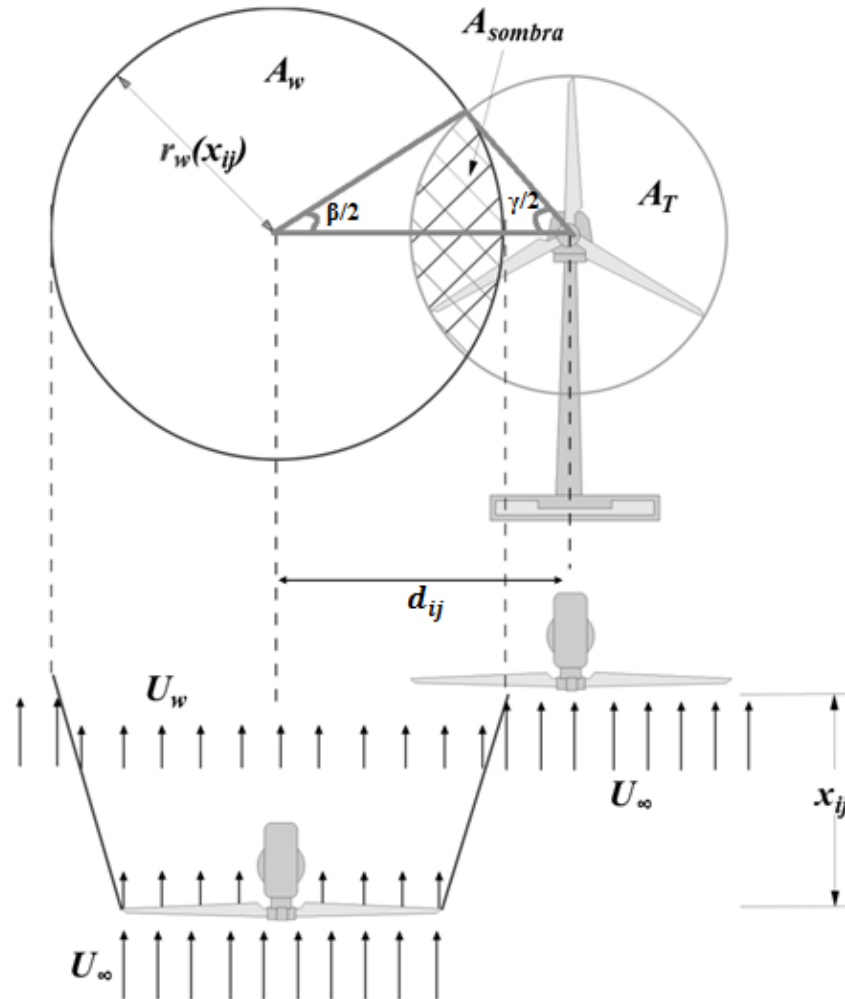


Figura 6. Sobreposição de esteira e área de sombra em um aerogerador (Adaptado de: Eisenmann., 2013).

Para a turbina que está em sombreado completo a velocidade de entrada será igual à velocidade da esteira que a sombreada. No caso do não sombreado a velocidade de entrada será igual a velocidade de vento disponível no ambiente.

Para aerogeradores de mesmo tamanho, ou seja, que possuem áreas varridas pelas hélices de mesmo diâmetro, a área sombreada pela turbina é demonstrada pelas relações trigonométricas básicas Eq. (17), (18) e (19).

$$A_{Sombra} = r^2(\alpha - (\text{sen}\alpha\cos\alpha)) + r_w^2(\gamma - (\text{sen}\gamma\cos\gamma)) \quad (17)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{r^2 + d_{ij}^2 - r_{w_{ij}}^2}{2d_{ij}r} \right) \quad (18)$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{r_{w_{ij}}^2 + d_{ij}^2 - r^2}{2d_{ij}r_{w_{ij}}} \right) \quad (19)$$

Sendo,

- ✓ A_{Sombra} é a área da sombra gerada pela turbina a barlavento;
- ✓ γ é o ângulo formado do centro da circunferência correspondente à área varrida e os pontos de intersecção entre a circunferência a barlavento e a circunferência correspondente a esteira;
- ✓ α é o ângulo formado do centro da circunferência correspondente a esteira até os pontos de intersecção entre as circunferência e a circunferência correspondente a área varrida pelo aerogerador.

Existem diversas maneiras para quantificar combinação do efeito esteiras numa determinada turbina. Sendo necessário o calculo do grau de sobreposição de uma ou múltiplas esteiras sobre o aerogerador a sotavento. Foram desenvolvidos vários métodos para determinação da velocidade do vento incidente na turbina afetada, uma forma mais simples de quantificar este efeito é utilizar a expressão da Eq. (20) e (21): (Eisenmann., 2013)

- ✓ sendo u_j a velocidade vento calculada na turbina j , u_{ij} é a velocidade do vento na

$$u_j = u_{ij}\alpha_{sombra} + U_{\infty}(1 - \alpha_{sombra}) \quad (20)$$

$$\alpha_{sombra} = \frac{A_{sombra}}{A_T} \quad (21)$$

- ✓ turbina j levando em consideração o efeito da turbina i , e a somatória os produtos dos déficits de velocidade as i turbinas a barlavento da turbina j .
- ✓ Em seguida a Eq. (22), o efeito no déficit da velocidade devido à combinação de esteiras é calculado por meio de um dos métodos acima citados.

$$v_j = v_{jo} - \sqrt{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \varphi_k (v_{w_k}(x_{k_j}) - v_{jo})^2} \quad (22)$$

Sendo,

- ✓ v_j = é o valor da velocidade resultante do vento na turbina j ;
- ✓ $v_{w_k}(x_{k_j})$ = (sendo a turbina k a que provoca a sombra);
- ✓ x_{k_j} = é a distância entre a turbina j e a turbina k ;
- ✓ v_{jo} = é o vento incidente não perturbado na turbina j ;

$$\checkmark \varphi_k = \frac{A_{sombra_{jk}}}{A_j} = \text{é o rácio da parte da área da sombra provocada pela turbina } k$$

na turbina j ;

$$\checkmark n = \text{é o número total de turbinas existentes no parque eólico.}$$

3 RESULTADOS

Para iniciar a otimização é realizado um teste de otimização no software modeFRONTIER. Onde foram consideradas duas turbinas a título de validação. Buscando posições ótimas para dois aerogeradores, usando uma função objetivo que representa a produção total do parque. Utilizou-se o algoritmo genético, para maximizar a produção energética. Obtiveram-se configurações, no qual não se percebeu a presença de sombreamento, chegando, assim, a uma produção máxima.

O processo de otimização foi desenvolvido utilizando-se o código CPMW no software MATLAB, integrado com o modeFRONTIER. Na otimização foram escolhidos a produção e o layout como parâmetros de trabalhos, utilizando 26, 30 e 32 turbinas. Foi conduzido um estudo comparativo com os resultados dos trabalhos de (Farias et al., 2013), (Marmidis., 2007), (Grady et al., 2005) e (Mosetti et al., 1994).

No gráfico da Fig. (7) tem-se uma otimização realizada no software modeFRONTIER, com a utilização dos seguintes parâmetros: diâmetro do rotor de 40 m, dimensões do parque composto por um terreno de 2000 metros de largura por 2000 metros de comprimento, numa matriz de posição 4X4, com 16 possibilidades de ocupação, sendo possível encontrar 2^{16} possibilidades diferentes de configurações de posicionamento, um $C_t = 0,88$ constante e uma constante absoluta de $K = 3$, para o modelo de esteira de Werle.

Foram gerados os resultados de eficiência em função da quantidade de testes realizados. No eixo das abscissas tem-se a eficiência e no eixo das ordenadas a quantidade de testes realizados. Dessa forma, foram obtidas diversas soluções ótimas. A primeira solução ótima, no qual a produção obteve uma produção de 100% no teste foi na posição 22 do gráfico da Fig. (7).

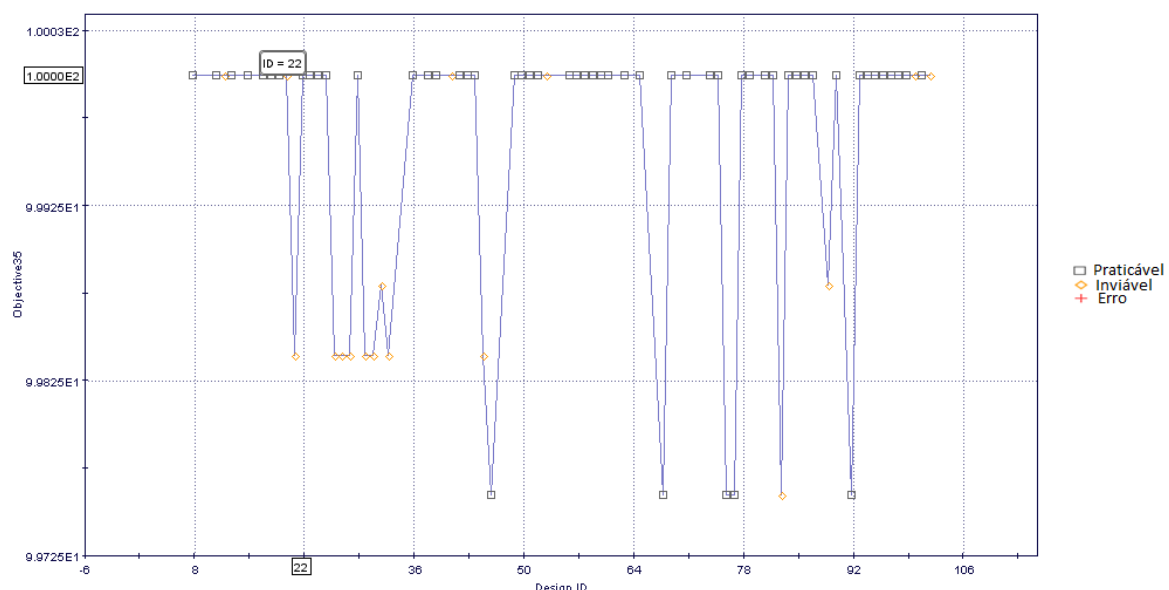


Figura 7. Simulação do CPMW com dois aerogeradores no software modeFRONTIER.

Na Fig. (8), visualiza-se algumas das posições ótimas encontradas no pós-processamento da otimização. O resultado do posicionamento dos aerogeradores se deu, de forma a não existir o sombreamento entre eles chegando assim a uma produção máxima Fig. (8).

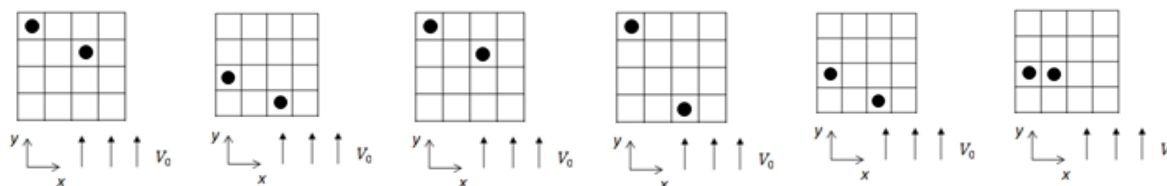


Figura 8. Posições ótimas de dois aerogeradores calculadas no software modefrontier.

Na Fig. (9), tem-se os resultados da simulação de otimização realizada com a utilização do código CPMW, implementado. Utilizou-se o software MATLAB integrado com o software modeFRONTIER, para realizar uma otimização de 26 turbinas eólicas. Buscou-se maximizar a produção total do parque em função da eficiência. Para realizar as simulações foram utilizados os mesmos parâmetros adotados por (Farias et al., 2013), no qual foi possível obter uma produção total 12522 kW, e uma Eficiência 92.6172%.

Para realizar comparativo foram utilizados resultados de layout dos trabalhos de (Farias et al., 2013) e (Mosetti et al., 1994). Nas simulações foram utilizadas as configurações de posicionamento ótimas propostas nos trabalhos dos autores. As posições foram implementadas no software MATLAB com a utilização do CPMW para o cálculo dos valores de eficiência e produção total. Os valores encontrados para (Mosetti et al., 1994) foi de uma produção total de 12586 kW, e uma eficiência 93.0887%. Para (Farias et al., 2013), uma produção total de 12453 kW, e uma eficiência de 92.1107%. Estes valores são muito próximos do encontrado no presente trabalho.

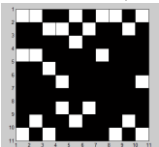
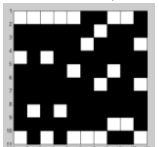
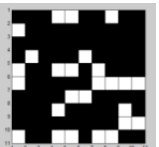
26 TURBINAS		
(Mosetti et al., 1994)	(Farias et al., 2013)	CPMW
		
Produção Total 12586 kW	Produção Total 12453 kW	Produção Total 12522 kW
Eficiência 93.0887%	Eficiência 92.1107%	Eficiência 92.6172%

Figura 9. Comparativo entre produção total e eficiência para otimização com 26 turbinas.

A otimização realizada para 30 turbinas, com a metodologia proposta, tem-se o valor de produção total de energia 12522 kW, e Eficiência 92.6172% como consta, na Fig. (10), a simulação realizada para 30 turbinas eólicas, buscou maximizar a produção total do parque em função da eficiência.

No comparativo foram utilizados resultados de layout proposto nos trabalhos de (Farias et al., 2013) e (Grady et al., 2005). As posições foram configuradas no software MATLAB com a utilização do CPMW para o cálculo dos valores de eficiência e produção total. Os valores encontrados para (Grady et al., 2005) produção total 12586 kW, e uma Eficiência 93.0887%. de (Farias et al., 2013) produção total 12453 kW, e uma Eficiência 92.6172%, valores próximo dos publicados de produção e eficiência para a otimização realizada.

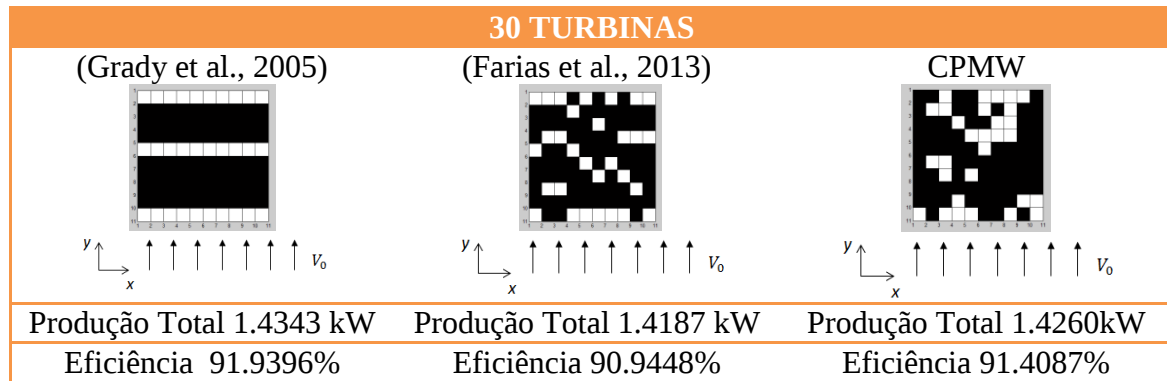


Figura 10. Comparativo entre produção total e eficiência para otimização com 30 turbinas.

No comparativo com a utilização de 32 turbinas, foram utilizados resultados de layout dos trabalhos de (Farias et al., 2013) e (Marmidis., 2007). O layout proposto foi calculado no software MATLAB com o código CPMW, obtendo-se os valores de produção total de energia de 15060 kW, e uma eficiência 90.5031%, com o layout de (Marmidis., 2007). Para o layout de (Farias et al., 2013), a produção total 1.4495 kW, e uma Eficiência 87.1116%, valores próximos do encontrado de produção e eficiência para a otimização realizada, na Fig. (11).

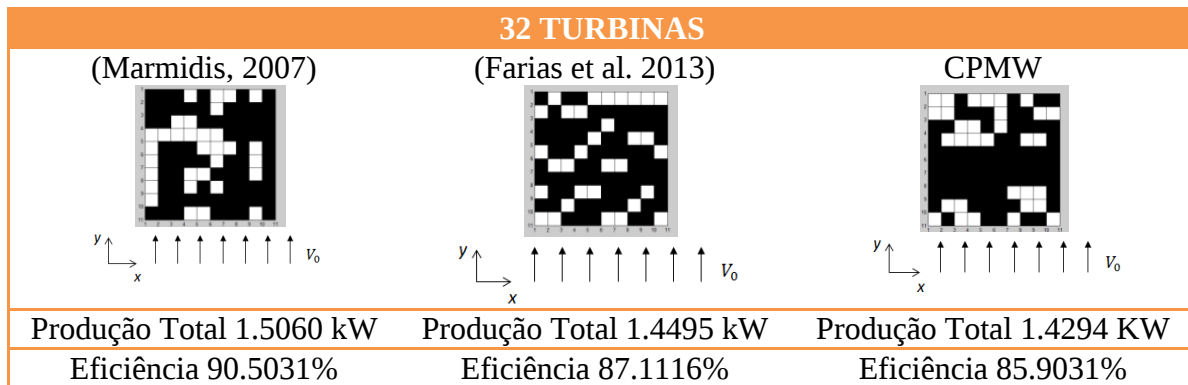


Figura 11. Comparativo entre produção total e eficiência para otimização com 32 turbinas.

4 CONCLUSÃO

No código CPMW implementado no software MATLAB, foi considerado o diâmetro da esteira do aerogerador de referência e as diversas posições ocupadas pelo aerogerador livre com a finalidade de realizar a análise do sombreamento no aerogerador onde foram plotadas todas as possibilidades de um não sombreamento, um sombreamento parcial ou completo.

A implementação do código CPMW no software MATLAB permitiu o cálculo de produção energética para dois aerogeradores, sua comparação, e avaliação da qualidade do modelo Werle em relação ao de Jensen, sendo verificado que ambos realizam uma boa simulação do efeito esteira.

O teste do código CPMW para dois aerogeradores, com um fixo e outro móvel, com a utilização de uma distância fixa, possibilitou um comparativo de cálculo de produção energética considerando o efeito esteira. No modelo de Jensen os parâmetros utilizados foram a altura do cubo e a rugosidade do terreno; no modelo de Werle, a constante absoluta.

No código implementado no MATLAB foi considerando o diâmetro da esteira do aerogerador de referência e as diversas posições ocupadas pelo aerogerador livre analisando o

sombreamento no aerogerador com as possibilidades de ocorrer um não sombreamento, um sombreamento parcial ou completo.

O teste de otimização no software modeFRONTIER, considerando duas turbinas correspondeu à expectativa do estudo, ou seja, a visualização de algumas posições ótimas para dois aerogeradores, com a utilização da função objetivo (produção total do parque) e do algoritmo genético, foi escolhida a maximização desse parâmetro. A otimização realizada permitiu posicionar os aerogeradores de forma a não existir o sombreamento entre eles chegando assim a uma produção máxima.

No comparativo de layout, produção total e eficiência para 26 turbinas eólicas, os resultados da simulação de otimização realizada com a utilização do código CPMW, implementado utilizando o software MATLAB integrado com o software modeFRONTIER, buscando maximizar a produção total do parque em função da eficiência, os resultados foram satisfatórios, quando comparados com os da literatura.

A otimização com 30 turbinas eólicas, o comparativo de layout, produção total e eficiência, foi satisfatória, no comparativo com os resultados de layout proposto na literatura.

O comparativo de layout, produção total e eficiência para otimização com 32 turbinas eólicas. Foram satisfatórios em relação aos trabalhos consultados na literatura.

Os resultados encontrados na otimização com a utilização do código CPMW para o cálculo de produção e eficiência de um parque eólico foram comparados com os dois modelos de esteiras utilizando 26, 30 e 32 turbinas. Na validação do comparativo foram utilizados os resultados de layout dos trabalhos de (Farias et al., 2013), (Marmidis., 2007), (Grady et al., 2005) e (Mosetti et al., 1994).

Nos testes realizados a respeito do efeito esteira foi verificado que a utilização do código no software MATLAB integrado com o software ModeFRONTIER é uma boa alternativa para estimar o layout e a produção de energia em um parque eólico. Os resultados encontrados serviram para a validação da metodologia adotada a partir de um comparativo com os fornecidos por outros trabalhos já validados.

O estudo mostrou que a otimização gera um ganho expressivo de produtividade de energia, além da importância e a complexidade da configuração da posição de aerogeradores em um parque eólico. No projeto de aerogeradores e layout de parques eólicos, é imprescindível o estudo e análise do comportamento do vento e a sua modelagem matemática, para ser realizado um melhor planejamento, visando uma maior extração da energia disponível e minimização dos gastos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro. (MCTI/CNPq Nº 74/2013).

REFERÊNCIAS

Couto, T, G. Farias, B. Diniz, A, C, G.C. Morais, M, V, G. de “*Optimization of Wind Farm Layout Using Genetic Algorithm*”. Orlando, Florida, USA, 2013. *10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*.

Eisenmann, G. G. “ *Um Modelo Matemático De Otimização Para Geração De Energia Elétrica A Partir De Correntes Hidrodinâmicas*”, Rio de Janeiro 2013.

Farias, B. E ,Couto,T,G. “*Posicionamento de aerogeradores em parque eólico utilizando Algoritmo Genético*”, Brasília 2013.

Grady, S. A.; Hussaini, M. Y.; Abdullah, M.M., “*Placement of Wind Turbines Using Genetic Algorithms.*” Em: *Renewable Energy* 30, 2005

Marmidis. G, Lazarou. S, Pyrgioti. E, “*Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo simulation.*”, University of Patras, Patras, Greece, 2007.

Moskalengo, N., Rudion, K., Orths, A., “*Study of Wake Effects for Offshore Wind Farm Planning*” 2010.

Mosetti, G.; Poloni, C.; Diviacco, B., Optimization of Wind Turbine Positioning in Large Windfarms by Means of a Genetic Algorithm. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 51, 1994.

Werle, M.J, 2008. “*A New Abalytical Model for Wind Turbine Wakes*”, Flodesign, Inc., EUA.

Wenzel, G,M. “*Análise Numérica da Esteira de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal*”, Porto Alegre, 2010.