



PROJETO DE GRADUAÇÃO

Posicionamento de aerogeradores em parque eólico utilizando Algoritmo Genético

Por,
Bruno Farias
Tales Gontyjo do Couto

Brasília, 20 de fevereiro de 2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Posicionamento de aerogeradores em parque eólico utilizando Algoritmo Genético

POR,

Bruno Farias
Tales Gontyjo do Couto

Relatório submetido como requisito para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Alberto Carlos Guimarães Castro Diniz, UnB/
ENM (Orientador)

Prof. Marcus Vinicius Girão de Moraes, UnB/ENM
(Co-orientador)

Prof. Dianne Magalhães Vianna, UnB/ ENM

Me. Wellington de Lemos Santos, ANEEL/SFG

Brasília, 20 de fevereiro de 2013

Agradecimentos

Agradecemos, em primeiro lugar, a Deus que nos deu sabedoria, força e paciência para superar todos os obstáculos que apareceram durante essa jornada.

À família que nos incentivou a enfrentar os desafios, deu apoio e acreditou em nosso trabalho.

Ao Eduardo Marques, engenheiro da GL Garrad Hassan, por nos ter cedido a licença para uso do software WindFarmer, imprescindível ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos da equipe de baja Piratas do Cerrado e colegas da Engenharia Mecânica pelos momentos de descontração, diversão e ajuda nos estudos e trabalhos, em especial Rodrigo Clemente, Lucas Vieira e Daniel Almeida.

Por fim, à Bárbara Nascimento e Raiani Oliveira pelo apoio nos momentos difíceis, por acreditar em nosso potencial e pelos momentos de descontração sempre dividindo uma cerveja gelada para comemorar os bons momentos.

Bruno Farias e Tales Gontyjo do Couto

RESUMO

Durante o processo de planejamento de um parque eólico, um aspecto importante a ser estudado é o melhor aproveitamento da área disponível. No entanto, 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*. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo de otimização de layout de parques eólicos, onde, dada uma condição de vento, as características e quantidade dos aerogeradores, esse algoritmo determina a melhor posição de cada aerogerador maximizando a eficiência do parque eólico. Inicialmente, são elucidados os conceitos referentes ao projeto de parques eólicos. Em seguida, são apresentados os principais modelos para descrição do efeito esteira e o desenvolvimento do algoritmo em MATLAB para cálculo da produção energética, considerando a interação entre esteiras e C_T (Coeficiente de empuxo) variável. Posteriormente, são explicados os principais métodos de otimização e demonstrado o algoritmo de otimização desenvolvido em modeFRONTIER. Por fim, são realizados testes e verificações com trabalhos anteriores e com o software comercial WindFarmer, e seus resultados expostos e avaliados.

Palavras-chave: parque eólico, efeito esteira, otimização, Algoritmo Genético, modeFRONTIER e WindFarmer.

ABSTRACT

During the planning process of a wind farm, an important aspect to be considered is the most efficient use of the available area. However, an increase on the number of wind turbines leads to a smaller distance between each turbine, by means of the *wake effect*. In light of the impact of the wake effect on a wind farm's capability of generating electric energy, this work presents the development of a layout optimization algorithm of wind farms, which, given the wind's condition, the characteristics and the number of wind turbines, determines the optimal position of each turbine, so that the wind farm's efficiency is maximized. Thereafter, this work presents the main wake effect models and the development of the production calculation MATLAB algorithm, considering the wake iteration and variable C_T (*thrust coefficient*). Then, the main optimization methods are explained and the optimization algorithm developed in modeFRONTIER is demonstrated. Lastly, tests and verifications are performed and its results are compared with the commercial software WindFarmer and previous studies.

Key-words: Wind farm, wake effect, optimization, Genetic Algorithm, modeFRONTIER and WindFarmer.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1 Efeito Esteira	3
1.2 Objetivo	4
2. Parques Eólicos – Estudos Preliminares	6
2.1 Localização de um parque eólico	6
2.2 Regime de ventos	7
2.3 Aerogerador	9
3. Modelagem do efeito esteira	12
3.1 Modelo de Ainslie	13
3.1.1 O software GL WindFarmer	14
3.2 Modelo de jensen	18
3.2.1 Modelo de Jensen para esteira simples	18
3.2.2 Modelo para múltiplas esteiras	20
3.3 Algoritmo de cálculo de produção energética (ACP)	22
3.3.1 Cálculo para dois aerogeradores	23
3.3.2 Cálculo para n aerogeradores	25
4. Métodos de otimização	30
4.1 Principais metodos de otimização	31
4.2 Algoritmos genéticos	31
4.2.1 ModeFRONTIER na otimização por Algoritmos Genéticos	34
4.2.2 Conceitos de Algoritmo Genético Aplicados a parques eólicos	37
4.3 Algoritmo genético para otimização de layout de parques eólicos	38
4.4 Testes e verificações do algoritmo	41
5. Resultados	45
5.1 Verificação para parque com n aerogeradores em disposição Já estudada	45
5.1.1 Verificação dos resultados obtidos no ACP	45
5.1.2 Influência do C_T no cálculo da produção energética	47
5.2 Produção energética para n aerogeradores em disposição otimizada	48
5.2.1 Otimização de layout aleatório e comparação com outros trabalhos	48
5.2.2 Otimização aleatória com parâmetros arbitrados	50
6. Conclusões e sugestões	53
6.1 Conclusões Gerais	53
6.2 Recomendações para estudos futuros	54
Bibliografia	55
Anexos	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Histórico e estimativa da produção anual de energia eólica no Brasil (Aneel, 2012).	2
Figura 2. Parque eólico em operação (Sppiblog, 2012)	3
Figura 3. Queda do fator de capacidade e eficiência de layout pelo aumento de aerogeradores	3
Figura 4. Comportamento da esteira formada pela turbina (Moskalenko et al., 2010)	4
Figura 5. Curva de distribuição de <i>Weibull</i> .	8
Figura 6. (a) Exemplo de distribuição de Weibull com "c" constante; (b) Exemplo de distribuição de Weibull com "k" constante.	8
Figura 7. Rosa dos Ventos	9
Figura 8. Disposição interna de aerogeradores modernos (a) ENERCON (enercon, 2012); (b) NORDEX (nordex-online, 2012).	10
Figura 9. Perfil da velocidade do vento no modelo de Ainslie (GL WindFarmer Theory Manual, 2012)	14
Figura 10. Espaço de trabalho do software WindFarmer	15
Figura 11. Janela de entrada de dados do aerogerador	16
Figura 12. Gráfico ilustrativo do progresso de otimização	16
Figura 13. Janela de resultados do software WindFarmer	17
Figura 14. Ilustração do método de otimização geométrico	18
Figura 15. Perfil de velocidade para o modelo de Jensen (Adaptado de: González-Longatt, 2012)	19
Figura 16. Múltiplas esteiras em parque eólico (González-Longatt, 2012)	20
Figura 17. Ilustração da sobreposição de uma sombra em um aerogerador (Adaptado de: González-Longatt, 2012)	21
Figura 18. Esquema de posicionamento dos aerogeradores	24
Figura 19. Influência da esteira na produção	25
Figura 20. Influência da esteira na produção para diferentes rugosidades (Z_0)	25
Figura 21. Interação entre esteiras em um parque eólico (Adaptado de: Sethi et al., 2011)	26
Figura 22. Esquema de identificação dos aerogeradores	27
Figura 23. Matriz das áreas sombreadas	27
Figura 24. Fluxograma do ACP	28
Figura 25. Influência de múltiplas esteiras na produção	28
Figura 26. Influência da interação entre esteiras na produção	29
Figura 27. Diagrama de processos de Algoritmos Genéticos (Adaptado de Weise, 2009)	33
Figura 28. Esquema de geração de indivíduos (Adaptado de: Grady et al., 2005)	34
Figura 29. Fluxograma básico de otimização em modeFRONTIER	35
Figura 30. Janela do histórico de otimização	37
Figura 31. Ilustração do processo de cruzamento (Adaptado de: Masetti et al., 1994)	37
Figura 32. Caso onde o indivíduo ótimo é encontrado antes da evolução	39
Figura 33. Fluxograma do ACOP	39
Figura 34. Fluxograma do ACOP em modeFRONTIER	40
Figura 35. Ilustração do primeiro teste	42
Figura 36. Ilustração do segundo teste	42
Figura 37. Ilustração do terceiro teste	43
Figura 38. Configuração proposta por Masetti et al. (1994) e Curva de Potência utilizada	46
Figura 39. Comparação do perfil de vento entre os modelos de Ainslie e Jensen	47
Figura 40. Influência do C_T na produção	48
Figura 41. Configurações obtidas pelos autores e ACOP	49
Figura 42. Influência da dimensão da matriz no processo de otimização	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Rugosidade para diferentes terrenos (GL WindFarmer Theory Manual, 2012)...	7
Tabela 2. Matriz decisão.....	41
Tabela 3. Operadores de reprodução.....	41
Tabela 4. Parâmetros de entrada.....	45
Tabela 5. Resultados da verificação do ACP.....	46
Tabela 6. Resultados da comparação entre C_T constante e variável.....	47
Tabela 7. Resultados da otimização para comparação com diferentes autores.....	50
Tabela 8. Resultados da otimização com dados atuais.....	51
Tabela 9. Comparação da otimização para diferentes dimensões de matrizes.....	51

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	[m ²]
A_0	área “varrida” pelo rotor	[m ²]
A_S	área sombreada pela turbina a barlavento	
C	Fator de escala	
C_T	Coeficiente de empuxo	
D	diâmetro do rotor	[m]
h	altura do rotor	[m]
k	Fator de forma	
P	Potência	[W]
R	raio da esteira uma distância x do aerogerador	[m]
r	coordenada da distância radial (a partir do centro da esteira)	[m]
r_0	raio do rotor do aerogerador	[m]
R_{ij}	raio da esteira provocado pelo aerogerador i no aerogerador j	[m]
t	tempo	[s]
U	Velocidade axial	[m/s]
\overline{uv}	correlação cruzada da tensão de Reynolds	
u	velocidade do vento à sotavento do aerogerador	[m/s]
v	Velocidade	[m/s]
V	Velocidade radial	[m/s]
v_0	velocidade do escoamento livre	[m/s]
v_1	velocidade do vento na esteira a uma distância x do aerogerador	[m/s]
V_j	velocidade resultante de entrada no aerogerador j	[m/s]
V_0	velocidade do escoamento livre	[m/s]
x	coordenada da distância axial (sotavento do aerogerador)	[m]
x_{ij}	fator que define a condição de sombreamento	
z_0	rugosidade do terreno	

Símbolos Gregos

α	Constante adimensional relacionada à expansão da esteira	
β	Ângulo de intersecção do rotor com a circunferência da esteira	[°]
θ	Ângulo de intersecção da circunferência da esteira com o rotor	[°]

Siglas

ACOP	Algoritmo de Cálculo e Otimização da Produção
ACP	Algoritmo de Cálculo da Produção
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico Sustentável
Eletrobrás	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
GWEC	Global Wind Energy Council
Proinfa	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
UHE	Usina Hidrelétrica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
CAE	Computer Aided Engineering
CAD	Computer Aided Design
MEF	Método de Elementos Finitos
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSM	Computational Solid Mechanics

1. INTRODUÇÃO

Depois de implementados com sucesso em outros países, planos de incentivos foram também adotados no Brasil em 2004, com o Proinfa (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas). Esse programa teve o intuito de fomentar a diversificação da matriz energética brasileira, através de incentivos como o rateio dos custos de geração da energia entre as classes de consumidores finais; garantia de compra, pela Eletrobrás, da energia produzida; e apoio do BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) no financiamento dos projetos (Ministério de Minas e Energia, 2012).

No período de vigência do Proinfa o governo brasileiro investiu R\$ 4 bilhões para incentivar a indústria nacional de equipamentos e o setor privado investiu R\$ 8 bilhões. Tal acontecimento, aliado a garantia de compra da energia elétrica proveniente das usinas eólicas, permitiu que o custo de implantação dos parques eólicos caísse, pois os fabricantes de aerogeradores começaram a instalar suas fábricas no Brasil, o que barateou o preço dos equipamentos (Renergy, 2011).

Mesmo com incentivos do governo, o avanço da energia eólica ainda enfrentou alguns desafios até se estabilizar no mercado. O preço por megawatt-hora (MWh) estabelecido no Brasil para o primeiro leilão para fornecimento de energia de reserva – proveniente principalmente de pequenas centrais hidrelétricas, usinas eólicas, termelétricas e de biomassa – era de R\$ 189, enquanto o teto definido na licitação para as usinas do Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira foi de R\$ 91 (UHE Jirau), em 2008, e R\$ 122 (UHE Santo Antônio) em 2007. Ao fim do leilão, o fornecimento de energia foi negociado a R\$ 71,4/MWh no caso de Jirau, e R\$ 78,9/MWh para a usina de Santo Antônio (ANEEL, 2013).

Já no leilão da Aneel, realizado em 27 de agosto de 2010, o preço da energia de origem eólica ficou em R\$ 130,8/MWh, tendo sido inferior ao da de biomassa e de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) (ANEEL, 2013).

No leilão de agosto de 2011, o preço da energia eólica atingiu um novo patamar, ainda mais baixo, R\$99,58/MWh, ficando até mais barato que a energia de termoelétricas a gás natural (ANEEL, 2013). Neste leilão foi vendido mais de 1.900MW, valor maior que o total de energia eólica instalado no país até o momento, assim, a produção de energia eólica no país vai mais que dobrar até 2014, ano de conclusão dos projetos vendidos no leilão. A figura 1 ilustra o comparativo do acréscimo da capacidade instalada entre três tipos diferentes de energia consideradas renováveis, o que mostra a consolidação da energia eólica como a fonte renovável mais vantajosa.

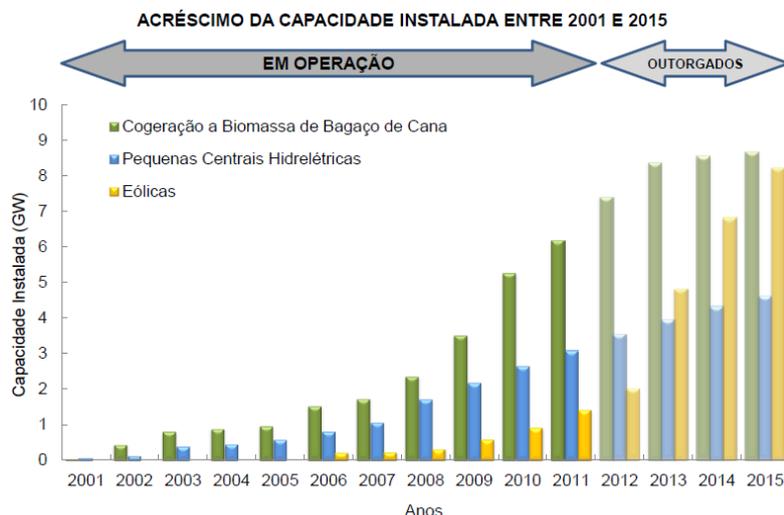


Figura 1. Histórico e estimativa da produção anual de energia eólica no Brasil (Aneel, 2012).

O potencial da energia eólica no Brasil é mais intenso de junho a dezembro, coincidindo com os meses de menor intensidade de chuvas. Isso coloca o vento como uma potencial fonte suplementar de energia gerada por hidrelétricas (ANEEL, 2013). Por esse e outros motivos, o Brasil tem focado na geração de energia eólica, fazendo parte de um movimento internacional para torná-la uma fonte importante de energia, diversificando a matriz energética. Como consequência, a energia eólica tem tido a maior taxa de expansão de todas as fontes renováveis de energia disponíveis, com um crescimento médio de 27% por ano desde 1990, segundo o *Global Wind Energy Council* (GWEC). A perspectiva é de que até 2014 deve ser atingido uma capacidade instalada de 7.000 megawatts (MW) (GWEC,2012).

Devido à relevância que esta fonte energética alternativa adquiriu nos últimos anos, e a sua perspectiva futura de desenvolvimento no Brasil, torna-se importante um estudo mais aprofundado dos fatores que influenciam a geração de energia eólica, especificamente o projeto de uma usina eólica.

O grande desafio encontrado pelos agentes geradores de energia elétrica é aliar uma grande capacidade de produção a menores custos de implantação. Nesse contexto, para a geração de energia elétrica através da fonte eólica, é necessário realizar estudos e avaliações dos fatores que podem influenciar o potencial de produção de uma usina eólica, como a tecnologia dos equipamentos a serem implantados, o potencial de produção local e a interação entre os equipamentos.

Devido à limitação na capacidade de produção de um único aerogerador, a energia disponível no vento é extraída em larga escala instalando-se uma grande quantidade de aerogeradores, formando os chamados parques eólicos. Essa disposição é utilizada para obter uma maior produção energética e reduzir os custos de instalação, operação e manutenção (Moskalenko et al., 2010). A figura 2 ilustra um parque eólico em operação.



Figura 2. Parque eólico em operação (Sppiblog, 2012)

Durante o processo de planejamento de um parque eólico, um aspecto importante a ser estudado é o melhor aproveitamento da área disponível. No entanto, um aumento no número de aerogeradores, além de aumentar o investimento inicial, conduz à redução das distâncias entre cada turbina eólica, podendo influenciar a produção energética global do parque eólico (Moskalenko et al., 2010). Isso se dá pelo chamado Efeito Esteira. A figura 3 ilustra a queda do fator de capacidade e da eficiência de layout devido ao aumento do número de aerogeradores .

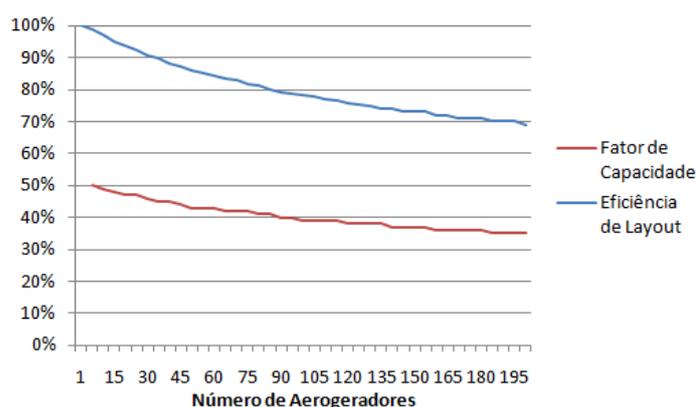


Figura 3. Queda do fator de capacidade e eficiência de layout pelo aumento de aerogeradores

1.1 EFEITO ESTEIRA

As turbinas eólicas extraem energia do vento, reduzindo sua velocidade e perturbando o escoamento na saída do rotor. Se as turbinas estiverem alinhadas na mesma direção do fluxo de ar, a turbina posterior receberá um vento com velocidade reduzida e em escoamento turbulento, reduzindo a sua eficiência de captação. A propagação desse fenômeno é o chamado Efeito Esteira e é um dos fatores mais impactantes na geração de energia elétrica por meio eólico (Moskalenko et al., 2010).

Tal fator é extremamente importante no planejamento de um parque eólico, pois pode influenciar significativamente o rendimento energético total. Negligenciá-lo pode levar a uma superestimação da

produção de energia. Além disso, esse efeito induz cargas de vento variáveis causando vibrações excessivas e possíveis falhas por fadiga.

A estrutura dessa esteira é rotativa e cônica, formada por vórtices anelares que se alargam e se dissipam com o aumento da distância, como pode ser visto na figura 4.

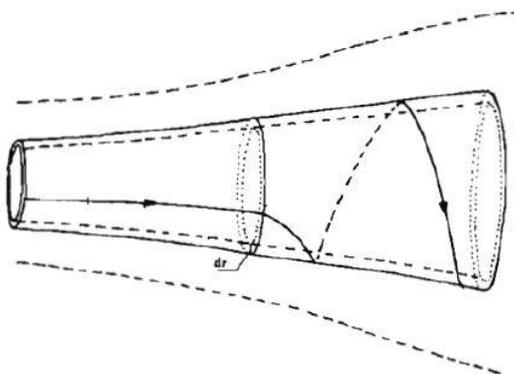


Figura 4. Comportamento da esteira formada pela turbina (Moskalenko et al., 2010)

1.2 OBJETIVO

Dada a expressividade do efeito esteira na capacidade de geração de energia elétrica em parques eólicos, este trabalho tem por objetivo desenvolver um algoritmo de otimização de *layout* de parques eólicos, que gere como resultado a melhor disposição dos aerogeradores em um espaço determinado. Ou seja, dada uma condição de vento e um espaço limitado, tal algoritmo deverá buscar a melhor posição e quantidade de aerogeradores levando em consideração a interferência entre eles.

Para isso, inicialmente será realizado um embasamento teórico sobre os principais modelos que descrevem o efeito esteira, para escolher o que melhor se adequa ao objetivo proposto, levando em consideração o custo computacional e complexidade da situação em questão. Em seguida, será desenvolvido o algoritmo base responsável por calcular o desempenho do layout de acordo com o modelo escolhido. Posteriormente, será apresentado um estudo sobre algoritmos de otimização e, em particular, algoritmos genéticos. Por fim, será gerado um Algoritmo Genético que, utilizando como ferramenta o algoritmo base, irá posicionar os aerogeradores da melhor forma possível. Concluídos os algoritmos, dados serão coletados e comparados com os resultados do software comercial disponível.

Organização do relatório

Esse trabalho está organizado em sete capítulos. O Capítulo 2 trás informações referentes ao projeto de projeto de parques eólicos abordando aspectos como a localização, regime de ventos e os aerogeradores a serem utilizados. O Capítulo 3 explica os principais modelos utilizados para a representação do efeito esteira, bem como o algoritmo desenvolvido para cálculo da produção energética de um parque eólico considerando o efeito esteira e suas interações. O Capítulo 4, por sua vez, apresenta os principais métodos de otimização dando enfoque aos Algoritmos Genéticos e,

posteriormente, é apresentado o algoritmo desenvolvido para otimização do layout de um parque eólico. O Capítulo 5 traz os resultados obtidos em testes e comparações com outros trabalhos e com software comercial utilizado. Finalizando, o Capítulo 6 apresenta as conclusões desse estudo e aponta sugestões para um eventual prosseguimento deste trabalho.

2. PARQUES EÓLICOS – ESTUDOS PRELIMINARES

Diversos fatores influenciam na escolha e desenvolvimento de tecnologias adotadas no projeto de aerogeradores e parques eólicos. Tais escolhas têm o intuito de solucionar os problemas inerentes ao comportamento do vento, a fim de garantir a qualidade da energia entregue a subestação coletora e aumentar a produtividade do parque eólico.

Atualmente, um desafio na geração de energia elétrica em um parque eólico é a definição da quantidade e disposição dos aerogeradores, visto que estes fatores estão diretamente relacionados ao efeito esteira.

Ao projetar um parque eólico três fatores devem ser previamente estudados – a localidade, regime de ventos e os aerogeradores – para que haja compatibilidade entre eles e, por conseguinte, maior eficiência energética.

2.1 LOCALIZAÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO

A escolha do local onde será inserido um parque eólico é de extrema importância, pois além dos fatores que influenciam a geração de energia, também devem ser levados em consideração fatores sociais e ambientais.

Para que o melhor local seja definido, são considerados os seguintes fatores (Pires, 2012):

- Dados meteorológicos: parâmetros como velocidade e direção do vento, pressão atmosférica, temperatura e higrometria influenciam diretamente o potencial de geração de uma turbina eólica e conseqüentemente do parque;
- Ponto de ligação: proximidade com alguma subestação do Sistema Integrado Nacional (SIN);
- Acesso: a infraestrutura local deve permitir que máquinas e equipamentos cheguem e possam operar com segurança;
- Orografia: a rugosidade e a presença de obstáculos definem diretamente o perfil de escoamento do vento no local e a intensidade de turbulência. A inclinação de taludes determinará a possibilidade de instalação do aerogerador. A rugosidade é classificada em classes que se diferenciam pelos valores do comprimento de rugosidade “ Z_0 ”[m], conforme ilustra a tabela 1.

- Urbanização local: o parque eólico não deve influenciar, social ou fisicamente, de forma negativa a população em suas proximidades;
- Impacto ambiental: o licenciamento ambiental só será concedido ao agente implantador se o empreendimento estiver de acordo com as exigências da legislação aplicável.

Classe	Z ₀ [m]	Descrição
0,0	0,0002	Superfície da água
0,5	0,0024	Terrenos completamente abertos com superfície lisa, tais como: Pistas de aeroportos, grama ceifada, etc.
1,0	0,03	Áreas rurais abertas, sem cercas, sem sebes, com edificações bastante espaçadas e colinas suaves.
1,5	0,055	Áreas rurais com algumas casas, com sebes de até 8[m] a uma distância de aproximadamente 1250[m].
2,0	0,1	Áreas rurais com algumas casas, com sebes de até 8[m] a uma distância de aproximadamente 500[m].
2,5	0,2	Áreas rurais com algumas casas, com arbustos ou sebes de até 8[m] a uma distância de aproximadamente 250[m].
3,0	0,4	Pequenas cidades, vilas, áreas rurais com muitas sebes, vegetação nativa, sebes muito altas, terreno muito acidentado e desigual.
3,5	0,8	Grandes cidades com prédios altos.
4,0	1,6	Cidades muito grandes com prédios muito altos.

Tabela 1. Rugosidade para diferentes terrenos (GL WindFarmer Theory Manual, 2012)

2.2 REGIME DE VENTOS

Para definir o melhor layout de um parque eólico e os aerogeradores a serem utilizados, é crucial conhecer o comportamento dos ventos. Isso se deve ao fato de que a escolha do aerogerador depende da velocidade de vento mais frequente e intensidade de turbulência; e o posicionamento dos aerogeradores está relacionado com as frequências de ocorrência de cada direção.

Os agentes de geração de energia eólica precisam tratar os dados coletados de maneira a gerar parâmetros que possam ser usados como ferramentas de projeto e estimativa da produção anual de energia elétrica naquele local.

A natureza do vento é claramente estocástica, e os dados coletados nas estações permitem um estudo estatístico, a fim de identificar parâmetros que possam classificar o regime de velocidades de ventos de uma região e estimar a produção de energia. Tais parâmetros são obtidos por curvas de distribuição estatística. Como ilustrado na figura 5.

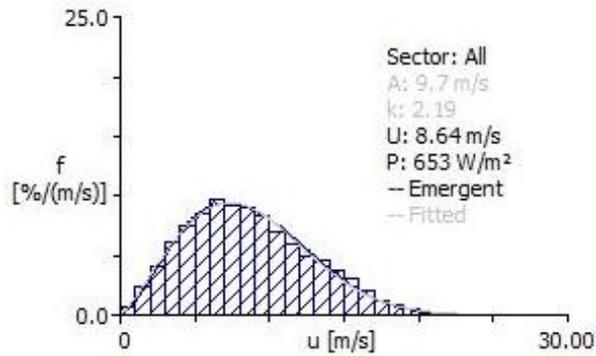


Figura 5. Curva de distribuição de *Weibull*.

A distribuição estatística mais utilizada para descrição dessa curva é a distribuição de *Weibull* (variação da distribuição normal), pois é o método com maior flexibilidade e aderência aos mais variados regimes de vento. Essa curva é definida pela função “ $p(v)$ ”, sendo “ v ” velocidade do vento, “ k ” o fator de forma e “ C ” fator de escala (Burton et. al., 2001).

$$p(v) = \frac{k}{C} \cdot \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k} \quad (2.1)$$

$$C = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.2)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N v_i \quad (2.3)$$

O fator de forma “ k ” indica o quão constante é o vento para aquela distribuição. Valores maiores de “ k ” indicam maior constância dos ventos, com menor ocorrência de valores extremos, como pode ser visto na figura 6.

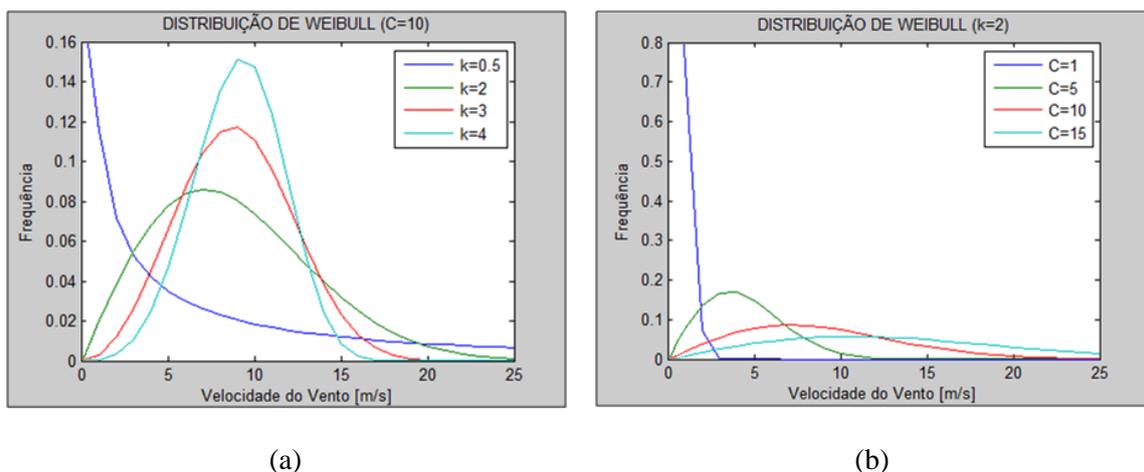


Figura 6. (a) Exemplo de distribuição de Weibull com “ c ” constante; (b) Exemplo de distribuição de Weibull com “ k ” constante.

Além da velocidade, outro parâmetro do vento que deve ser avaliado é a sua direção de incidência. A fim de facilitar seu entendimento e avaliação, esse parâmetro possui uma forma gráfica de representação: a Rosa dos Ventos.

A Rosa dos Ventos é uma forma de representação de frequência estatística da sua direção e velocidade. Essa representação pode ser feita de maneiras distintas. Na figura 7 o raio representará a frequência de ocorrência, a divisão de setores irá definir a direção, e a escala em preto e branco definirá a intensidade da velocidade.

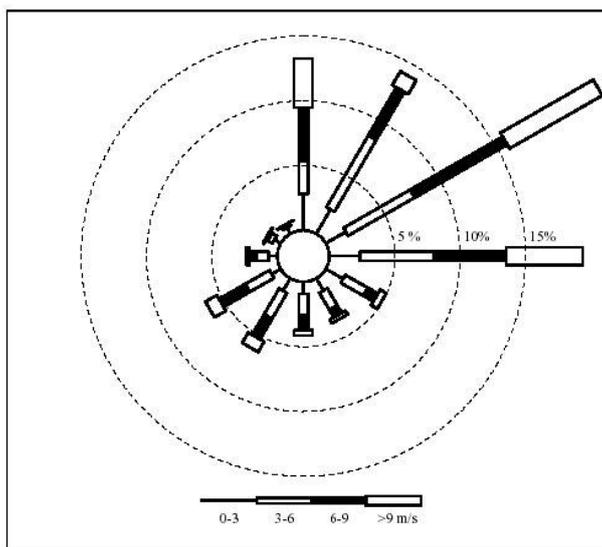


Figura 7. Rosa dos Ventos (Fonte: HK RE Net, 2013)

2.3 AEROGERADOR

Aerogeradores são máquinas responsáveis pela extração da energia dos ventos através de suas turbinas eólicas. Estas, por sua vez, têm a função de converter a energia cinética do vento em potência mecânica no eixo que, por conseguinte irá fornecer rotação suficiente ao sistema de geração de energia elétrica.

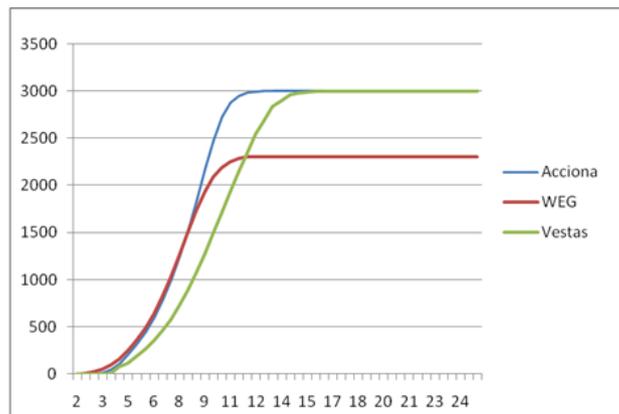
Atualmente, o modelo mais utilizado de aerogerador é o de eixo horizontal, torre tubular e rotor de três pás. Esse modelo possui duas variações principais, com caixa multiplicadora de velocidades e sem caixa multiplicadora de velocidades. Para os modelos que não possuem caixa multiplicadora, o gerador será do tipo síncrono com grande número de polos, devido a baixa rotação do rotor. Já para os modelos com caixa multiplicadora, o gerador será do tipo assíncrono com pequeno número de polos, em virtude da alta rotação na saída da caixa multiplicadora de velocidades.

A Figura 8 (a) e (b) permite visualizar a disposição dos principais componentes dos dois diferentes *designs* de aerogeradores mais utilizados.



(a)

(b)



(c)

Figura 8. Disposição interna de aerogeradores modernos (a) ENERCON (enercon, 2012); (b) NORDEX (nordex-online, 2012); (c) Curva de potência de aerogeradores.

- **Torre: (1)** tem como função sustentar a turbina e a nacelle na altura adequada sob qualquer regime de ventos e de operação. Na maioria dos casos são de formato cônico (proporção base/topo em torno de 1:0,6) tubular e produzidas em placas de aço soldadas ou concreto.
- **Nacelle: (2)** é o elemento responsável pela sustentação de praticamente todos os componentes de um aerogerador. Dessa forma deve resistir a todos os esforços mecânicos e absorver vibrações e por isso é fabricado em ferro fundido. Ela é integrada aos mancais de rolamento do eixo da turbina e também a base de fixação da caixa de engrenagens e do gerador. Além disso, estão fixados nela os motores de passo responsáveis por orientar a nacelle.
- **Sistema de Posicionamento da Nacelle: (3)** possibilita a rotação da nacelle visando um melhor aproveitamento do vento, já que é necessário que a turbina eólica encontre-se perpendicular à direção de incidência do vento.

- **Gerador: (4)** executa a conversão da energia mecânica em energia elétrica. Podem ser síncronos ou assíncronos. Os geradores síncronos devem ter um conversor de frequência associado.
- **Sistema de transmissão: (5)** tem o papel de acoplar o eixo da turbina ao gerador. Os aerogeradores modernos apresentam duas principais arquiteturas para este sistema: transmissão direta e transmissão por caixa multiplicadora de velocidade. O que definirá o sistema de transmissão será o modelo de gerador escolhido, podendo ser síncrono ou assíncrono.
- **Cubo da turbina: (6)** é responsável por conectar as pás ao eixo do rotor e, normalmente, é fabricado em ferro fundido. Em aerogeradores modernos, esse componente tem também a função de comportar o sistema de controle do ângulo de passo das pás, o qual permite que essas girem em torno de seu eixo longitudinal, que será explicado posteriormente. Para fins aerodinâmicos, o cubo é envolto por uma carcaça de formato que minimiza o arrasto sobre a estrutura.
- **Pás da turbina: (7)** são os componentes responsáveis por captar a energia cinética do vento e gerar um torque no eixo. Essas pás possuem perfil aerodinâmico com finalidade de melhor aproveitar a energia disponível com a menor emissão de ruídos. Atualmente, são fabricadas em material compósito, em grande maioria, feito em madeira, fibra de vidro (ou carbono) e resina epóxi.

Na escolha de um aerogerador um dos principais parâmetros a ser avaliado é a sua curva de potência, pois é através dela que se analisa a adequabilidade do modelo de aerogerador escolhido ao regime de ventos do local. A figura 8 (c) ilustra a curva de potência de três modelos diferentes de aerogeradores.

3. MODELAGEM DO EFEITO ESTEIRA

Turbinas eólicas extraem energia do vento para produzir eletricidade. Contudo, o vento à sotavento (vento após passar pela turbina) apresentará menor velocidade e um escoamento turbulento, diminuindo a quantidade de energia disponível se comparado com o vento à barlavento (vento antes de passar pela turbina). Tal fenômeno constitui 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 (González et al., 2010).

Se uma esteira intercepta a área varrida de uma turbina a sotavento, esta turbina é dita “sombreada” pela turbina que provocou a esteira. Dependendo do *layout* e da condição meteorológica em que se encontra um parque eólico, suas turbinas podem ser afetadas de forma diferente por turbinas vizinhas (Sethi et. al, 2011).

A configuração ótima para um parque eólico seria aquela em que todas as turbinas estivessem posicionadas em uma mesma fileira perpendicular ao escoamento do vento, recebendo um escoamento não perturbado. Contudo, variações sazonais no regime de ventos ocorrem, gerando oscilações na direção de incidência do vento. Nesse contexto, essa configuração será ótima em alguns períodos do ano e ruim em outros (Sethi et al, 2011).

Os dois principais efeitos de uma esteira são:

- Redução da velocidade do vento que por sua vez reduz a produção energética do parque eólico;
- 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. Para tal, é necessário que se faça uma modelagem adequada do efeito esteira, visando a obtenção de resultados confiáveis e úteis no projeto de parques eólicos.

Diversos modelos numéricos, de complexidade variável, têm sido desenvolvidos para descrever o efeito esteira e a distribuição da velocidade do vento. A modelagem exata do comportamento do vento dentro de um parque eólico é muito complicada e necessita vários parâmetros de difícil estimação (Koch et al., 2005).

Os principais modelos utilizados são: Modelo de Jensen, Modelo de Ainslie, Modelo de Lissaman e Modelo de Larsen.

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 (Koch et al., 2005). Considerando esses fatores, optou-se pelo modelo de Jensen como base para o algoritmo a ser desenvolvido. Também será apresentado o modelo de Ainslie visto que esse é o modelo adotado pelo software WindFarmer, usado como ferramenta de comparação neste trabalho.

3.1 MODELO DE AINSLIE

O modelo de Ainslie utiliza o cálculo Computacional de Dinâmica dos Fluidos (CFD) para descrever a perda de velocidade do vento. Por usar uma solução numérica das equações de Navier-Stokes para a camada limite, esse modelo considera a conservação de massa e da quantidade de movimento da esteira.

Para tal modelo são feitas algumas considerações como:

- A esteira é considerada axi-simétrica e completamente turbulenta;
- O escoamento possui velocidade circunferencial zero (desde que a vorticidade seja zero);
- O campo de escoamento será assumido permanente;
- Gradientes de pressão na fronteira da esteira serão negligenciados;
- Logo após a turbina, os gradientes de velocidade na direção radial serão muito maiores do que os gradientes na direção axial;
- Considera-se uma camada limite fina;
- Desconsidera-se os termos relacionados à viscosidade.

Dadas essas considerações, a equação de Navier-Stokes resulta na equação 3.1 (Ainslie, 1988).

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{-1}{r} \frac{\partial (r \bar{u} \bar{v})}{\partial r} \quad (3.1)$$

onde:

U é a velocidade axial;

V é a velocidade radial;

x é a coordenada da distância axial (sotavento do aerogerador);

r é a coordenada da distância radial (a partir do centro da esteira);

$\bar{u} \bar{v}$ é a correlação cruzada da tensão de Reynolds.

Usando esta equação é possível por meios computacionais se determinar a velocidade na entrada de uma turbina que está sendo influenciada por outra a barlavento.

A figura 9 ilustra o perfil de velocidade do vento para a esteira modelada segundo a equação 3.1.

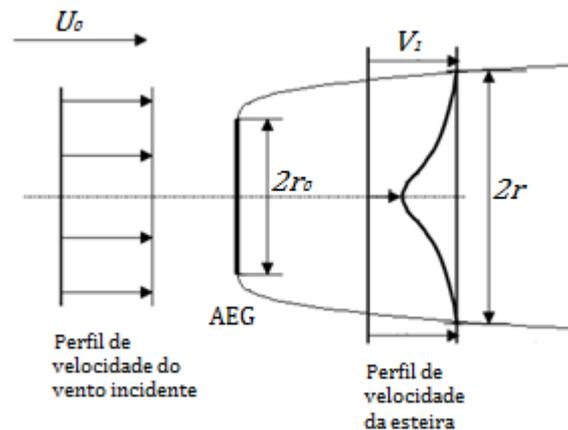


Figura 9. Perfil da velocidade do vento no modelo de Ainslie (GL WindFarmer Theory Manual, 2012)

Esse método é mais preciso no cálculo e modelagem da esteira, mas é mais trabalhoso, pois necessita de uma solução numérica (Moskalenko et al., 2011).

O modelo de Ainslie é utilizado por softwares de cálculo de produção energética, como o GL WindFarmer. Tal software será usado no presente trabalho como ferramenta de comparação e verificação dos resultados obtidos com o algoritmo desenvolvido. A seguir será feita uma descrição do software e serão apresentadas as principais funcionalidades do programa.

3.1.1 O software GL WindFarmer

O *software* WindFarmer foi desenvolvido pela GL Garrad Hassan para facilitar o design de parques eólicos, maximizando a potência gerada e minimizando o impacto ambiental. Por possuir modelos transparentes, validados e documentados, promove ao usuário um controle completo e grande precisão na extração dos dados de um parque eólico. (Garrad Hassan, 2012).

Com este software é possível fazer análises de capacidade de produção, eficiência de *layout*, de topografia, elétrica, análise de ruídos e sombreamento, planejamento de cabeamento e rodovias de acesso, entre outros. Devido à proposta deste trabalho, serão utilizadas apenas as funções de análise de capacidade de produção e eficiência de *layout*. A figura 10 ilustra o espaço de trabalho e os principais comandos do software.

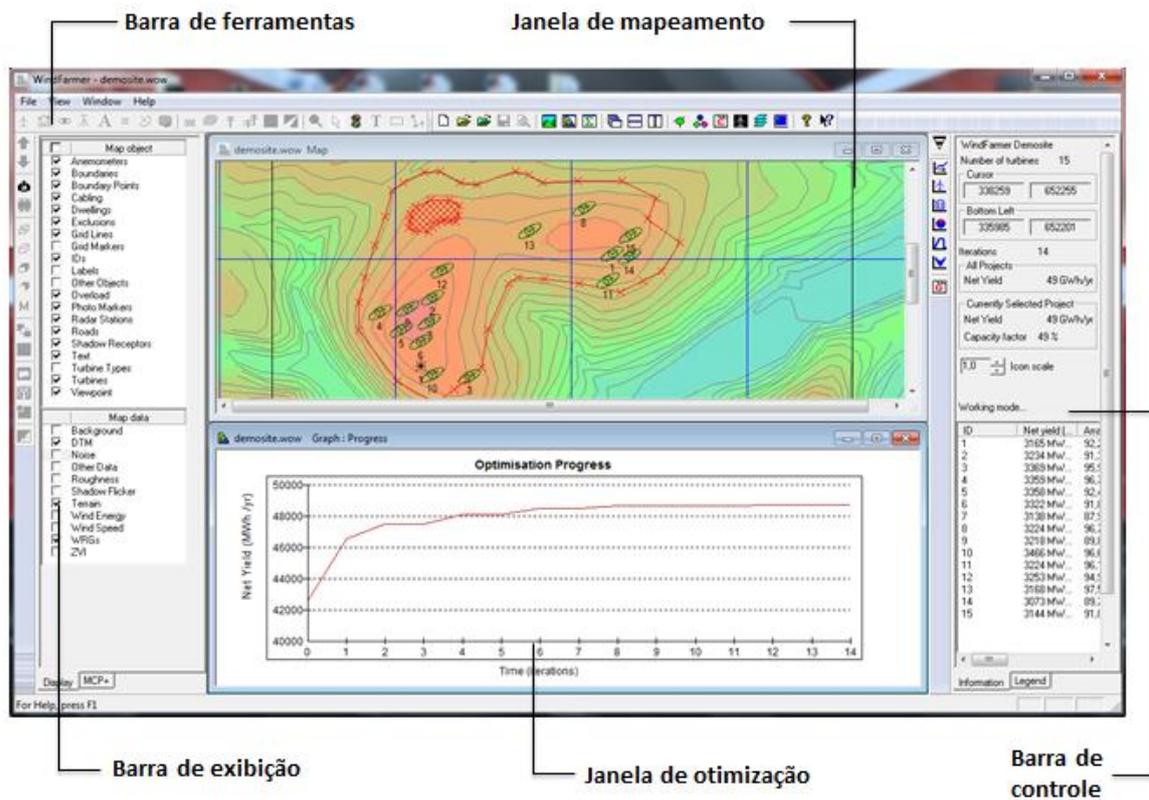


Figura 10. Espaço de trabalho do software WindFarmer

No intuito de gerar os dados para fins de comparação, algumas etapas básicas deverão ser obedecidas como:

- I. **Entrada de dados:** nessa etapa devem ser inseridos os dados de topografia, rugosidade, série de dados de velocidade e direção do vento, características técnicas, quantidade e posição das turbinas. A figura 11 ilustra a janela de entrada dos dados do aerogerador;

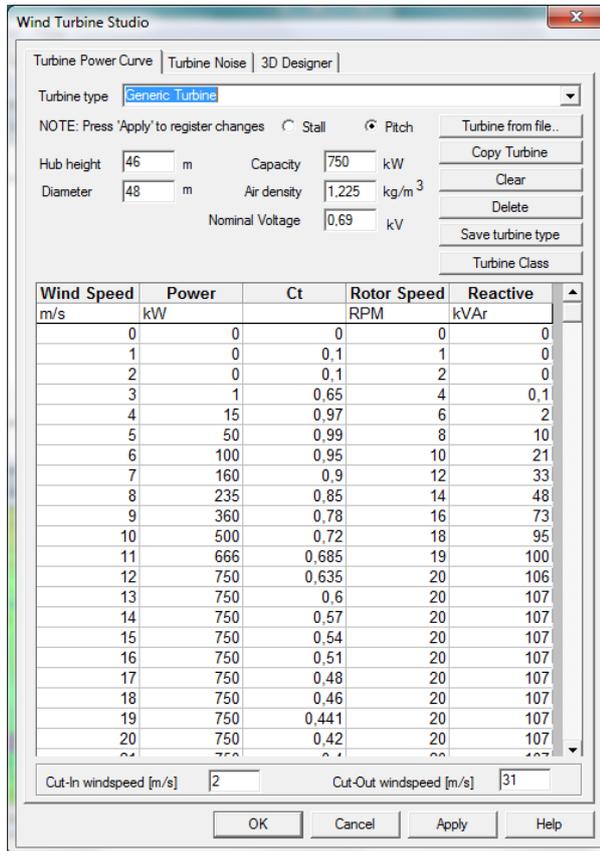


Figura 11. Janela de entrada de dados do aerogerador

- II. **Processamento dos dados e otimização:** nessa etapa o software irá avaliar se os dados de entrada estão compatíveis com a realidade, iniciar os cálculos e otimizar o posicionamento dos aerogeradores. Durante a otimização o software gera um gráfico ilustrativo da evolução do processo como é mostrado na figura 12.

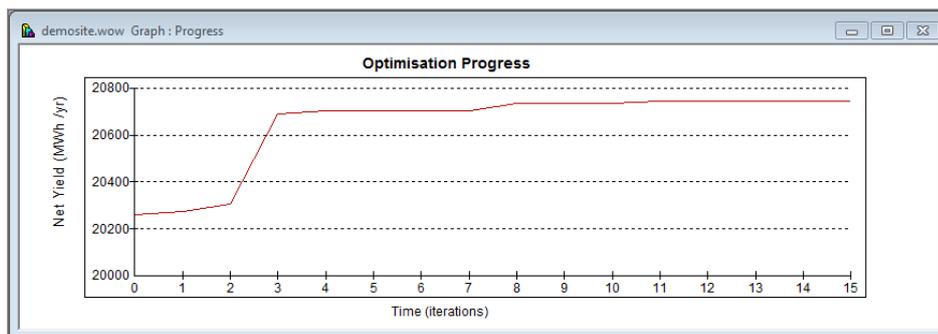


Figura 12. Gráfico ilustrativo do progresso de otimização

- III. **Resultados:** nessa etapa serão gerados os resultados desejados (Eficiências de layout, Fator de Capacidade, Geração anual de energia. A figura 13 ilustra a janela de resultados.

	A	B	C	D	E	F
1	WindFarmer version	v4.2.20.0				
2	C:\Users\Public\Documents\WindFarmer Demo 4.2.20.0\demodata\demosite.wow					
3	outubro 09, 2012					
4						
5	Energy Capture Summary for all active projects					
6	Ideal energy production	23,0	GWh/yr			
7	Topographic efficiency	98,42	%			
8	Array efficiency	97,56	%			
9	Electrical efficiency	98,00	%			
10	Availability	97,00	%			
11	Other Factors	100,00	%			
12	Icing and blade degradation	99,00	%			
13	Substation maintenance	100,00	%			
14	Utility downtime	100,00	%			
15	Power curve turbulence variation	100,00	%			
16	Hysteresis	100,00	%			
17	Sector Management	100,00	%			
18	Estimated annual net energy production	20,7	GWh/yr			
19	Estimated capacity factor	53	%			
20						
21						
22	Note: The turbulence intensity is only valid with the eddy viscosity wake method.					
23						

Figura 13. Janela de resultados do software WindFarmer

Levando em conta a proposta do presente trabalho, buscou-se estudar a metodologia utilizada no processo de otimização executado pelo software WindFarmer, já que seus resultados serão utilizados para comparação, a fim de avaliar o método de otimização e a modelagem do efeito esteira.

O processo de otimização utilizado por esse software é baseado em unidades geométricas que estão alinhadas com as duas principais direções de incidência do vento. Os dois eixos principais são determinados a partir da densidade de energia calculada para cada um dos setores de direção do vento. Esses cálculos são baseados no regime de ventos combinado com a curva de potência do aerogerador. Esses dois eixos apontarão para os setores com maior densidade de energia (Garrad Hassan, 2011).

O espaçamento relativo das turbinas ao longo dos eixos principais de uma unidade geométrica é determinado pelo peso de suas densidades de energia correspondentes, definindo a forma básica da unidade de simetria (Garrad Hassan, 2011). A figura 14 ilustra como funciona esse método, onde “x” representa os aerogeradores.

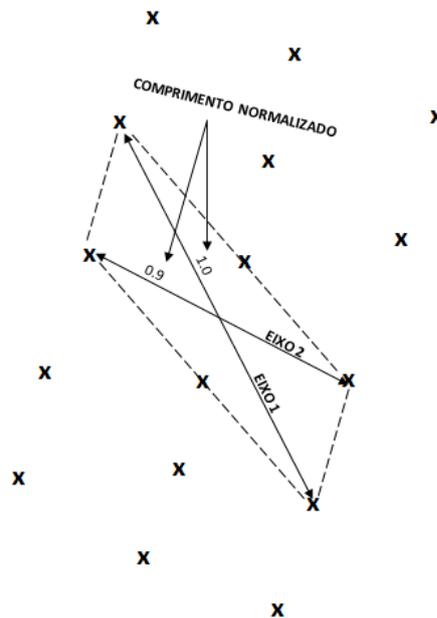


Figura 14. Ilustração do método de otimização geométrico

Esse tipo de otimização utiliza um algoritmo determinístico, onde um número de casos discretos são analisados e o layout com maior rendimento energético é selecionado (Garrad Hassan, 2011).

3.2 MODELO DE JENSEN

O modelo de Jensen (1983) representa de maneira simples o comportamento do vento a sotavento de um aerogerador. Esse modelo considera a esteira após o aerogerador como turbulenta e desconsidera as influências do desprendimento de vórtices, que somente é significativa na região imediatamente atrás do aerogerador. A velocidade da esteira é função da distância a sotavento do aerogerador e é assumido que a expansão do diâmetro da esteira é linear (Jensen, 1983). Dessa forma a esteira terá como formato um cone, simplificando os cálculos. Levando em consideração os parâmetros disponíveis, simplicidade, precisão nos resultados e o grande número de autores que já adotaram esse modelo em trabalhos recentes – Sethi et al. (2011); González-Longatt et al. (2011); Moskalenko et al. (2011); Anshul (2010) e Mosetti et al. (1994) – esse será o modelo utilizado no desenvolvimento do algoritmo de cálculo da produção energética proposto.

3.2.1 Modelo de Jensen para esteira simples

Por negligenciar o campo de escoamento logo atrás da turbina e tratar a esteira resultante como um escoamento turbulento o escoamento tenderá a recuperar sua condição inicial, resultando em um “espalhamento” da esteira, que pode ser considerado linear e proporcional à distância. Essa condição é ilustrada pela figura 15.

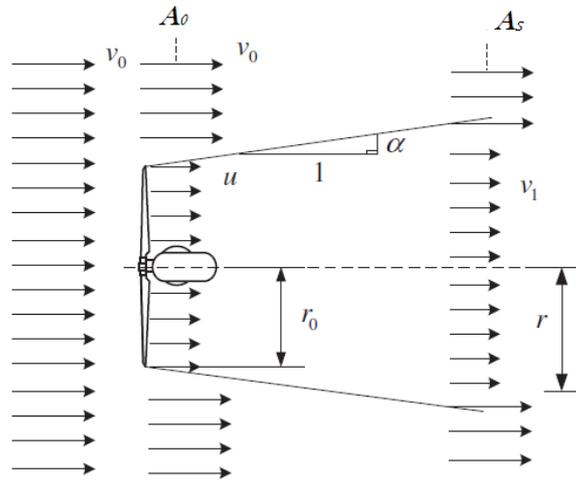


Figura 15. Perfil de velocidade para o modelo de Jensen (Adaptado de: González-Longatt, 2012)

Esse modelo é baseado na conservação da quantidade de movimento global na esteira e a partir disso é feito o equacionamento que descreve o seu comportamento.

Um balanço da quantidade de movimento resulta na equação (Jensen, 1983) :

$$\pi r_0^2 u + \pi(r^2 - r_0^2)v_0 = \pi r^2 v_1 \quad (3.2)$$

onde,

v_0 é a velocidade do escoamento livre;

u é a velocidade do vento à sotavento do aerogerador;

v_1 é a velocidade do vento na esteira a uma distância x do aerogerador;

r_0 é o raio do rotor do aerogerador;

r é o raio da esteira uma distância x do aerogerador.

Sabendo que a expansão da esteira é linear, o caminho descrito pelo vento que passou através do rotor do aerogerador é representado por um cone. O raio desse cone (esteira) é dado pela seguinte expressão (Jensen, 1983):

$$r = r_0 + \alpha x \quad (3.3)$$

A constante adimensional α diz o quão rápido a esteira irá expandir com a distância x . Essa constante pode assumir diferentes valores dependendo das características do terreno local e/ou das condições climáticas, e é dada por (Jensen, 1983):

$$\alpha = \frac{1}{2 \ln\left(\frac{h}{z_0}\right)} \quad (3.4)$$

onde:

h é a altura do eixo do rotor;

z_0 é a rugosidade do terreno.

A velocidade do vento na esteira a uma distancia x a sotavento do aerogerador é dada pela equação 3.5, obtida por Jensen (1983):

$$v_1 = v_0 + v_0(\sqrt{1 - C_T} - 1)\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad (3.5)$$

Onde C_T é o coeficiente de empuxo [adimensional], característico da turbina.

3.2.2 Modelo para múltiplas esteiras

O modelo abordado anteriormente representa a esteira para apenas um aerogerador. Contudo, em um parque eólico toda turbina a barlavento irá sombrear as turbinas à sotavento, provocando uma queda na produtividade do parque (Zhang, Wang, 2009). A figura 16 ilustra o efeito das múltiplas esteiras.

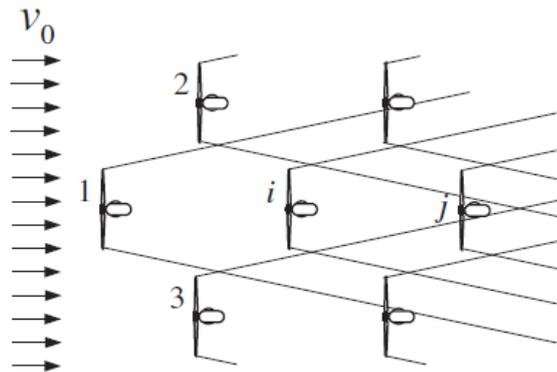


Figura 16. Múltiplas esteiras em parque eólico (González-Longatt, 2012)

Para o caso ilustrado na figura 15, a velocidade do vento na turbina j será afetada não apenas pela turbina que está diretamente a sua frente, a turbina i , mas também pelas outras turbinas a barlavento, como as turbinas 1, 2 e 3 (Zhang, Wang, 2009).

No sentido de obter um resultado usual para parques eólicos com muitas turbinas, os efeitos de várias esteiras individuais devem ser combinados em uma única esteira. No entanto, a influência de cada esteira no aerogerador deve ser analisada separadamente através do cálculo da área sombreada. Esse sombreamento é uma medida do grau de sobreposição entre a área da seção circular da esteira e a área da turbina que sofre a ação dessa esteira, como ilustra a figura 17 (González et al., 2010).

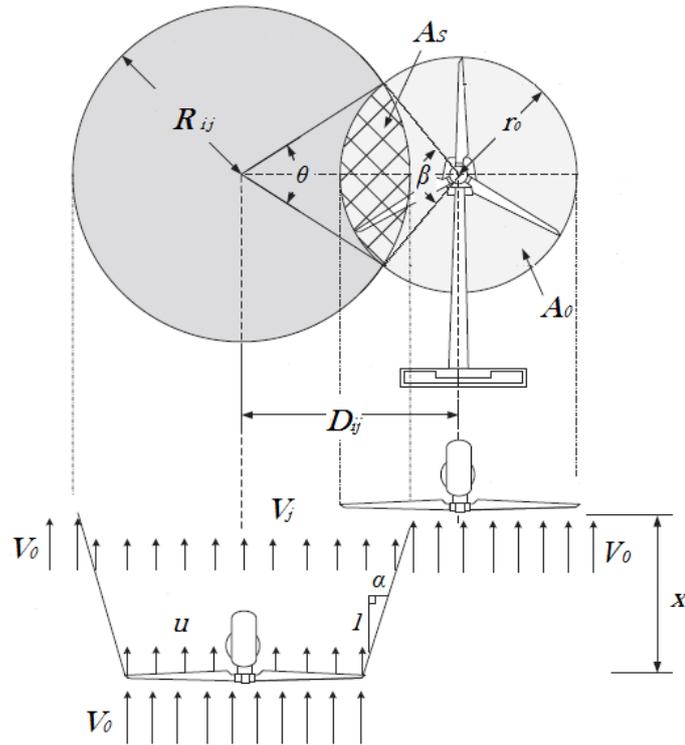


Figura 17. Ilustração da sobreposição de uma sombra em um aerogerador (Adaptado de: González-Longatt, 2012)

Existem três possibilidades de sombreamento: sombreamento completo, sombreamento parcial e não sombreado. Para uma turbina em sombreamento completo a velocidade de entrada será igual à velocidade da esteira que a sombreia. Para a situação de não sombreamento a velocidade de entrada será a velocidade de vento disponível no ambiente.

Se os aerogeradores possuírem rotores de mesmo diâmetro, então a área sombreada pela turbina pode ser calculada usando relações trigonométricas básicas que resultam nas equações a seguir.

$$A_S = r^2(\theta - (\text{sen}\theta\text{cos}\theta)) + R_{ij}^2(\beta - (\text{sen}\beta\text{cos}\beta)) \quad (3.6)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{r^2 + D_{ij}^2 - R_{ij}^2}{2D_{ij}r}\right) \quad (3.7)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{R_{ij}^2 + D_{ij}^2 - r^2}{2D_{ij}R_{ij}}\right) \quad (3.8)$$

Onde,

A_S é a área sombreada pela turbina a barlavento;

θ é o ângulo formado entre o centro da circunferência correspondente a esteira e os pontos de intersecção entre essa circunferência e a circunferência correspondente a área varrida pelo aerogerador;

β é o ângulo formado entre o centro da circunferência correspondente a área varrida e os pontos de intersecção entre essa circunferência e a circunferência correspondente a esteira.

A influência causada pela esteira na velocidade de entrada em um aerogerador é modelada de forma diferente quando se tem uma sobreposição de esteiras (Sethi et al., 2011). Para considerar esta influência, o modelo de Sethi (2011), insere uma ponderação (dependente da área sombreada e do diâmetro da esteira na posição do aerogerador sombreado) no modelo proposto por Jensen, como mostra a equação 3.9 (Sethi et al., 2011).

$$V_j = V_0 \left(1 - C_r \frac{D^2}{A_0} \left(\frac{x_{ij}}{2R_{ij}^2} \right) \right) \quad (3.9)$$

$$C_r = 1 - \sqrt{1 - C_T} \quad (3.10)$$

onde,

V_j é a velocidade resultante de entrada no aerogerador j ;

V_0 é a velocidade do escoamento livre;

D é o diâmetro do rotor;

A_0 é a área “varrida” pelo rotor;

R_{ij} é o raio da esteira provocado pelo aerogerador i no aerogerador j ;

C_T é o coeficiente de torque do aerogerador;

x_{ij} é um fator que depende da condição de sombreamento do aerogerador j , sendo igual a 1 quando completamente sombreado e igual a soma das áreas sombreadas quando parcialmente sombreado.

3.3 ALGORITMO DE CÁLCULO DE PRODUÇÃO ENERGÉTICA (ACP)

Para a definição do layout de um parque eólico é necessário avaliar parâmetros que apontem o rendimento da configuração proposta. Tais parâmetros podem ser:

- Produção de energia elétrica (kWh)
- Fator de capacidade (%)
- Eficiência de layout (%)

- Custo por unidade de energia produzida (R\$/kWh)

Para o presente trabalho, serão utilizados como base de avaliação a produção energética, o fator de capacidade e a eficiência de layout. Tais parâmetros foram escolhidos pois para que um agente de implantação tenha permissão para construir sua usina ele deve garantir uma produção mínima de energia, tornando esse parâmetro um dos principais critérios de avaliação (Lei 10.848, de 15 de março de 2004) e, além disso, para que seu empreendimento possua representatividade em um leilão, deve apresentar alto fator de capacidade.

Para cálculo deste parâmetro foi desenvolvido um código em MATLAB – Algoritmo de Cálculo de Produção Energética (ACP) – que considera o efeito esteira como principal influência na queda da produção de um parque eólico. Esse processo se deu em duas etapas: na primeira etapa foi desenvolvido um programa que calcula a produção energética para dois aerogeradores; na segunda etapa tal programa foi aprimorado de modo que calculasse a produção para um parque eólico com dois ou mais aerogeradores.

O desenvolvimento deste código é fundamental no prosseguimento deste trabalho, pois será a função objetivo do algoritmo de otimização. Ou seja, irá fornecer os parâmetros necessários para comparação e seleção dos melhores layouts.

3.3.1 Cálculo para dois aerogeradores

A fim de entender a física do problema e avaliar a qualidade do modelo escolhido comparando-o ao programa de referência WindFarmer, foi elaborado um código primário que, fundamentado no modelo de Jensen, pudesse calcular a produção energética e permitisse avaliar o impacto dos principais parâmetros no comportamento da esteira.

Esse código considera dois aerogeradores: um aerogerador de referência fixado no ponto (0,0); e outro com liberdade de posicionamento a sotavento do aerogerador de referência, como ilustra a figura 18.

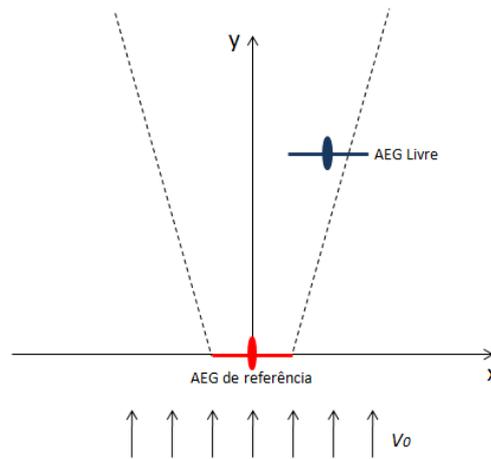


Figura 18. Esquema de posicionamento dos aerogeradores

Como parâmetros de entrada tem-se a velocidade do escoamento não perturbado a barlavento da turbina, o diâmetro do rotor dos aerogeradores, a altura do cubo, a rugosidade do terreno e a curva de potência com os valores do coeficiente de empuxo e potência do aerogerador para qualquer velocidade de vento dentro da faixa de operação.

Primeiramente são calculadas a velocidade e o diâmetro da esteira provocada pelo aerogerador de referência na posição do aerogerador livre. Em função do diâmetro da esteira e da posição do aerogerador livre, é avaliada a condição de sombreamento a que o aerogerador livre está submetido: sombreamento completo, parcial ou não sombreado. Em seguida, através da equação 3.6, é calculada a área sombreada pela esteira e com a equação 3.5 é possível obter uma velocidade equivalente de entrada no aerogerador livre.

Calculada a velocidade resultante, o programa irá buscar através de interpolação a potência referente a tal velocidade na curva de potência característica daquele modelo de aerogerador.

Após o processamento da rotina, alguns gráficos podem ser gerados no intuito de analisar o comportamento da esteira e sua influência na produção energética. A figura 19 ilustra a variação da produção em função da posição no eixo X. Conforme se desloca no eixo X (vide figura 18), o aerogerador livre sofre alteração na área sombreada e, conseqüentemente, na produção.

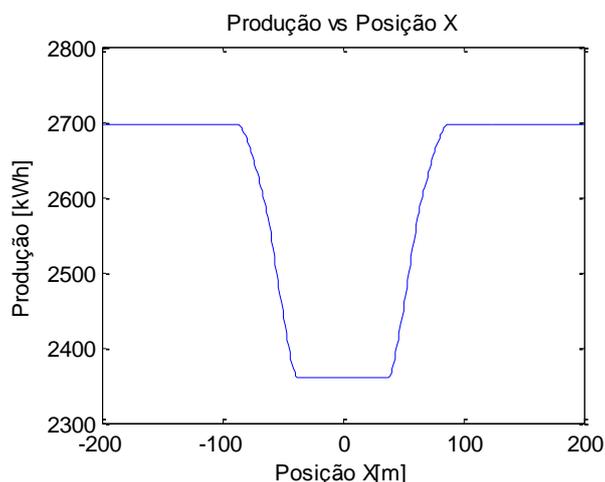


Figura 19. Influência da esteira na produção

Já a figura 20 ilustra o comportamento da produção energética do aerogerador a sotavento em função da variação da sua posição em Y (vide figura 18). Observando esse gráfico é possível perceber que quanto maior a distância entre os dois aerogeradores maior a produção energética, isso se dá pelo fato de que o vento perturbado tende a retornar à sua condição inicial. Infere-se também que, quanto maior a rugosidade (Z_0), mais rápido o escoamento retoma sua condição inicial.

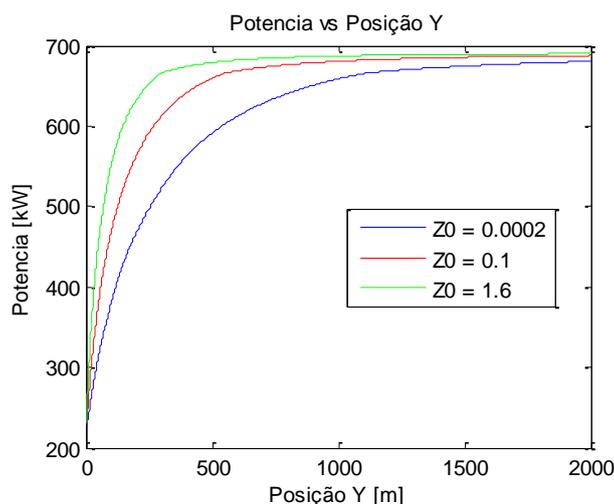


Figura 20. Influência da esteira na produção para diferentes rugosidades (Z_0)

3.3.2 Cálculo para n aerogeradores

Para o cálculo da produção energética para n aerogeradores foi criada uma rotina estruturada no código primário apresentado no item 3.3.1, e por isso possui os mesmos parâmetros de entrada e resultados gerados pelo código primário. No entanto, esse novo código, por possibilitar o cálculo para mais de dois aerogeradores, considera possíveis interações entre esteiras, como proposto por Anshul (2010), na busca por um resultado mais próximo de uma situação real. Ou seja, um aerogerador pode estar sendo influenciado por mais de uma esteira proveniente de aerogeradores a barlavento, além de

haver a possibilidade de sobreposição entre esteiras, como é o caso dos aerogeradores AEG9 a AEG15 ilustrados na figura 21.

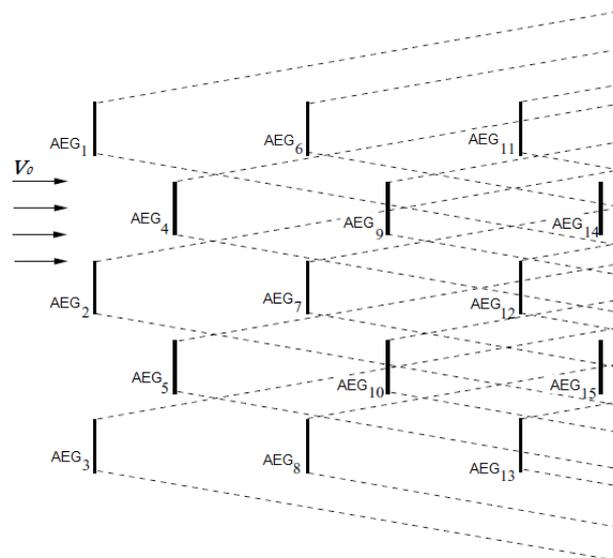


Figura 21. Interação entre esteiras em um parque eólico (Adaptado de: Sethi et al., 2011)

Algumas suposições de simplificação foram consideradas no desenvolvimento deste código. São elas:

- Todas as turbinas no parque eólico são iguais, ou seja, possuem a mesma altura de cubo, o mesmo diâmetro de rotor, o mesmo número de pás e a mesma curva de potência;
- O terreno de localização do parque eólico é perfeitamente plano, de rugosidade uniforme;
- Os aerogeradores estão dispostos em uma matriz;
- Resultado para um único valor de velocidade e direção.

Inicialmente o programa importa dois arquivos .txt, um com os limites dimensionais do parque, a velocidade do vento (V_0) e rugosidade do terreno (Z_0); e outro com os dados da turbina, como: altura do rotor (h), raio do rotor (r_0) e curva de potência. Em seguida, é gerada uma matriz posição n por m aleatória composta por “zeros” e “uns”, onde 0 significa um espaço sem aerogerador e 1 significa a presença de um aerogerador. Gerada essa matriz é possível definir as coordenadas de cada aerogerador, que foram numerados de forma crescente da primeira à última coluna e da primeira à última linha. Ou seja, o elemento a_{11} da matriz representa o aerogerador 1, o elemento a_{13} é o aerogerador 2 e assim sucessivamente, como ilustra a figura 22.

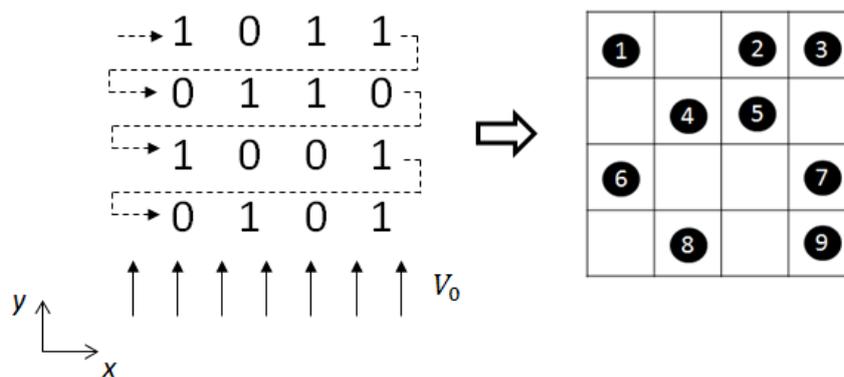


Figura 22. Esquema de identificação dos aerogeradores

Considerando o escoamento do vento no sentido positivo do eixo y , da figura 21, um aerogerador de numeração inferior (sotavento) nunca influenciará um aerogerador de numeração superior (barlavento), então a matriz AS_{ij} , cujos elementos representam a área sombreada pelo aerogerador j no aerogerador i , calculados pela equação 3.6, será uma matriz diagonal inferior.

Para a matriz AS_{ij} , a primeira coluna irá representar as influencias de todos os aerogeradores no aerogerador 1. A segunda coluna irá representar a influência de todos os aerogeradores no aerogerador 2 e assim por diante. Por exemplo, o elemento a_{41} da matriz ilustrada na figura 23 mostra o valor da área sombreada pelo aerogerador 4 no aerogerador 1.

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1312	0.1312	0	0	0	0	0	0	0
0	1.8096	0.1312	0	0	0	0	0	0
1.8096	0	0	0.1312	0	0	0	0	0
0	0.4913	1.8096	0	0.1312	0	0	0	0
0.9434	0.9434	0	1.8096	0.4913	0.1312	0	0	0
0	0.9434	1.8096	0	0.4913	0	1.8096	0	0

Figura 23. Matriz das áreas sombreadas

Calculadas as áreas de sombreadamento, é possível obter as velocidades equivalentes em cada aerogerador pela equação 3.9. Calculada a velocidade resultante, o programa irá buscar, através de interpolação a potência referente a tal velocidade na curva de potência característica daquele modelo de aerogerador. A produção total do parque será dada pela soma de todas as potências encontradas.

Com a produção total é possível obter dois parâmetros que demonstram o desempenho do parque: a eficiência e o fator de capacidade. A eficiência é dada pela divisão da potência total atingida considerando o efeito esteira pela potência total na condição em que todos os aerogeradores estão submetidos a escoamento livre. O fator de capacidade é dado pela divisão da potência total atingida considerando o efeito esteira pela potência total na condição em que todos os aerogeradores estão operando em potência nominal.

A figura 24 ilustra o fluxograma do algoritmo desenvolvido.

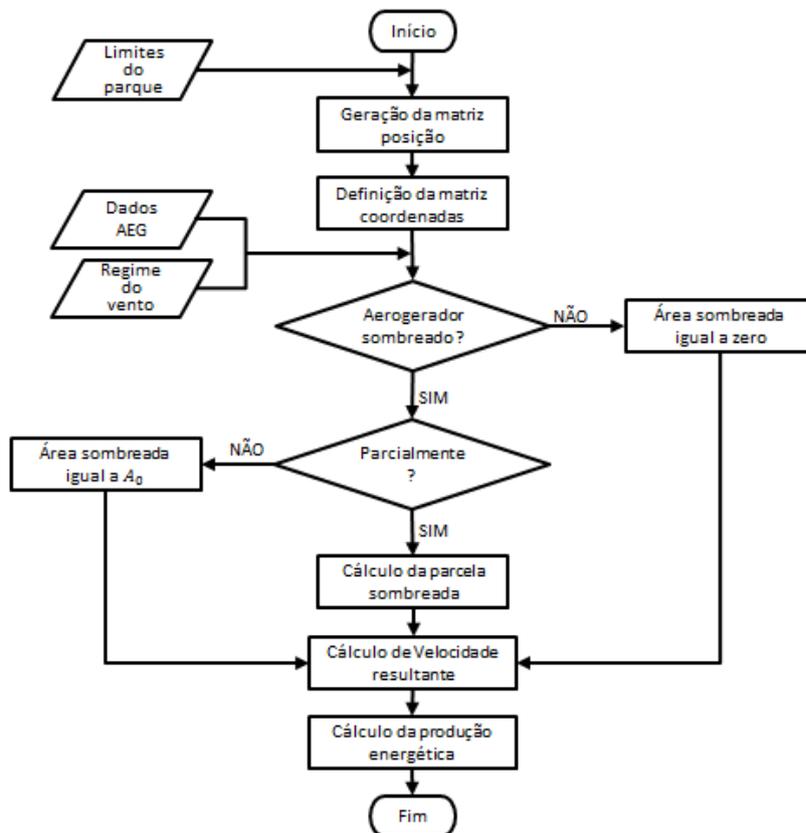


Figura 24. Fluxograma do ACP

Compilando o ACP, algumas situações podem ser simuladas. Para analisar o comportamento devido ao sombreamento de mais de uma esteira em um aerogerador e suas influências na produção energética, foram fixados dois aerogeradores alinhados longitudinalmente (*AEG de referência* e o *AEG 1*), e um aerogerador livre (*AEG 2*) foi posicionado a sotavento dos aerogeradores fixos, podendo se deslocar livremente no eixo X como pode ser visto na figura 25.

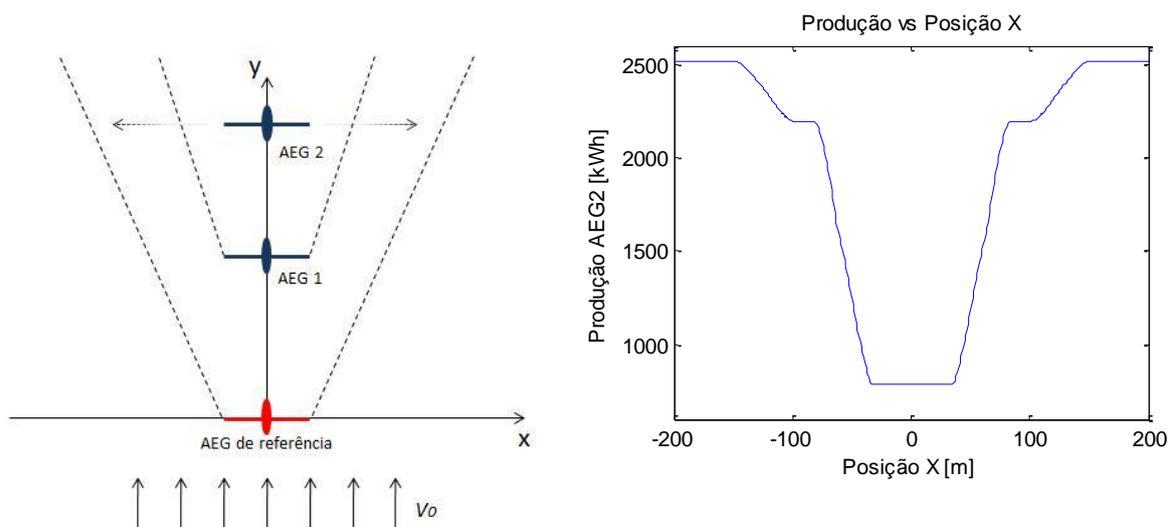


Figura 25. Influência de multiplas esteiras na produção

Na figura 25 também é ilustrado o gráfico que descreve a produção do *AEG 2* em função da sua posição no eixo X. Nota-se que quando parcialmente sombreado por apenas uma esteira há uma queda gradativa na produção. Quando completamente sombreado por apenas uma esteira, mantém sua produção até que passe a ser sombreado por mais uma esteira, que provocará uma queda abrupta. Na situação em que o *AEG 2* está completamente sombreado por duas esteiras, ele apresentará produção mínima.

Outra situação relevante a ser simulada é a influência da sobreposição entre esteiras na produção energética de um aerogerador. Para isso foram fixados dois aerogeradores de referência alinhados latitudinalmente, e um aerogerador livre (*AEG 1*) foi posicionado a sotavento dos aerogeradores fixos podendo se deslocar no eixo X como ilustra a figura 26.

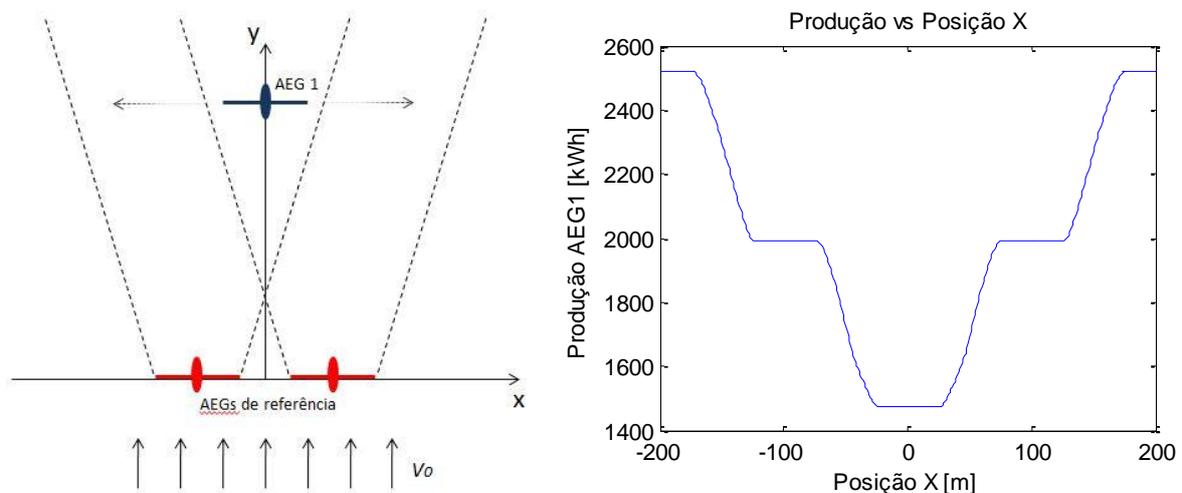


Figura 26. Influência da interação entre esteiras na produção

O gráfico ilustrado na figura 25 descreve a produção do *AEG 1* em função da sua posição no eixo X. Nota-se que quando parcialmente sombreado por apenas uma esteira há uma queda na produção. Quando completamente sombreado por apenas uma esteira, mantém sua produção até que passe a ser sombreado por mais uma esteira, que provocará uma nova queda. Na situação em que o *AEG 1* está completamente sombreado pela sobreposição de duas esteiras, ele apresentará produção mínima.

4. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Otimização é o ato de obter o melhor resultado sob determinadas circunstâncias. Em problemas de engenharia, decisões tecnológicas e administrativas devem ser tomadas em diversos estágios. A meta final de tais decisões é o de minimizar efeitos negativos ou maximizar os benefícios desejados. Sendo assim, os problemas de otimização são problemas de maximização ou minimização de uma função de uma ou mais variáveis em um determinado domínio, sendo que, geralmente, existe um conjunto de restrições nas variáveis (NPTEL, 2012).

Geralmente, os processos de otimização são feitos através de algoritmos computacionais, visando facilitar a execução dos cálculos e reduzir o tempo demandado. Para o entendimento dos problemas de otimização é necessário que se conheça algumas definições básicas, sendo elas (HOLTZ, 2005):

- Variáveis de projeto: São aquelas que se alteram durante o processo de otimização, podendo ser contínuas, inteiras ou discretas.
- Restrições: São funções de igualdade ou desigualdade sobre as variáveis de projeto que descrevem situações de projeto consideradas não desejáveis. De maneira a delimitar o domínio viável dentro do universo de soluções.
- Espaço de busca: É o conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis sobre as variáveis do projeto do problema a ser otimizado, sendo delimitado pelas funções de restrição.
- Função Objetivo: É a função de uma ou mais variáveis de projeto que é construída a partir dos parâmetros envolvidos no problema. Ela fornece uma medida da proximidade da solução em relação a um conjunto de parâmetros. A função objetivo pode ser dividida em simples ou multiobjetivo. A função será simples quando houver apenas um objetivo e será multiobjetivo quando houver vários objetivos a otimizar de uma só vez (Silva, 2010).
- Ponto Ótimo: É o ponto formado pelas variáveis de projeto que extremizam a função objetivo e satisfazem as restrições.
- Valor Ótimo: É o valor da função objetivo no ponto ótimo.
- Ótimo Local: É uma solução ótima dentro de um conjunto de soluções vizinhas, contudo pior do que o ótimo global.
- Ótimo Global: É a melhor solução possível para um problema.

4.1 PRINCIPAIS METODOS DE OTIMIZAÇÃO

Os algoritmos de otimização são divididos em dois principais grupos: determinísticos (baseados no cálculo diferencial) e aleatórios (probabilísticos).

A maioria dos métodos clássicos é baseada em algoritmos determinísticos. Os métodos determinísticos são baseados no cálculo de derivadas ou em aproximações desta, buscando informações do vetor gradiente, seja para encontrar o ponto onde ele se anula, ou para encontrar a sua direção (Saramago, Oliveira, 2005).

Diferentemente dos métodos determinísticos, os métodos aleatórios utilizam os resultados da função objetivo, podendo ela ser de difícil representação, descontínua, não diferenciável, multimodal (possui muitos pontos de mínimo e máximo). Estes métodos buscam o valor ótimo através de regras de probabilidade operando de maneira “aleatória orientada” (Saramago, Oliveira, 2005). Alguns dos principais métodos aleatórios são Algoritmos Genéticos, Métodos de ordem zero (métodos tradicionais), *Simulated Annealing* e Redes Neurais.

Para o presente trabalho foi escolhido o Algoritmo Genético por dois principais motivos: primeiro porque este é o método que avalia apenas o resultado da função objetivo, não se restringindo a apenas uma função matemática; segundo porque a forma como foi tratado o posicionamento dos aerogeradores dentro de um parque (matriz binária) permite a divisão dessa matriz em segmentos, sendo cada segmento um cromossomo.

A seguir é explicado detalhadamente o funcionamento do Algoritmo Genético e como este será aplicado para o posicionamento dos aerogeradores em um parque eólico.

4.2 ALGORITMOS GENÉTICOS

O problema da otimização do posicionamento de aerogeradores em um parque eólico é do tipo discreto e apresenta uma infinidade de soluções ótimas, o que de certa forma descarta a aplicabilidade de métodos de otimização baseados em gradientes locais (Mosetti et al., 1994). Supondo um parque descrito por uma matriz 10 x 10 onde cada elemento pode conter ou não um aerogerador como foi explicado anteriormente, é possível encontrar 2^{100} configurações diferentes, o que impossibilita o uso de computadores convencionais para análise do problema. Segundo Mosetti (1994), para esse caso, o Algoritmo Genético é uma boa ferramenta na busca pela melhor configuração.

Esse método é capaz de encontrar uma solução ótima para problemas de grande complexidade dispensando a necessidade de se avaliar cada solução individual (Grady et al., 2005). Segundo Grady (2005), diferentemente de processos baseados em cálculos diferenciais, os algoritmos genéticos não requerem a existência de derivada para a busca dos resultados. Segundo Lacerda e Carvalho (1999), algumas vantagens dos algoritmos genéticos são:

- Funcionam tanto com parâmetros contínuos como discretos ou uma combinação deles;
- Realizam buscas simultâneas em várias regiões do espaço de busca, pois trabalham com uma população e não com um único ponto;
- Utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- Não é necessário conhecimento matemático aprofundado do problema considerado;
- Otimizam um número grande de variáveis;
- Otimizam parâmetros de funções objetivos com superfícies complexas e complicadas, reduzindo a incidência de ótimos locais;
- Trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
- Fornecem uma lista de parâmetros ótimos e não uma simples solução;
- Trabalham com dados gerados experimentalmente e são tolerantes a ruídos e dados incompletos;
- São fáceis de serem implementados em computadores;
- São modulares e portáteis, no sentido que o mecanismo de evolução é separado da representação particular do problema considerado. Assim eles podem ser transferidos de um problema para outro;
- São flexíveis por trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes;

Algoritmos Genéticos são algoritmos de busca probabilística, que se baseiam na lógica da seleção natural. Tal algoritmo utiliza uma estrutura de dados semelhante a de um cromossomo para solução de problemas. Utilizando operações genéticas inspiradas na biologia evolutiva e na hereditariedade, como seleção, cruzamento e mutação, realizam uma busca direcionada ainda que majoritariamente aleatória. Os algoritmos genéticos não são uma pesquisa simplesmente randômica, pois se baseiam em dados obtidos de indivíduos de gerações anteriores para encontrar os indivíduos de “melhor aptidão” (Amaral, 2008).

Como no processo natural de reprodução, a informação genética contida em uma fita de cromossomo de dois indivíduos é usada para criar o código genético de um novo indivíduo. A evolução e adaptação da espécie são garantidas porque o melhor indivíduo possui a maior probabilidade de sobreviver e de se reproduzir (Mosetti et al., 1994).

Segundo Amaral (2008), os algoritmos genéticos operam em uma população de indivíduos, sendo que cada um deles representam uma possível solução, que está codificada em um cromossomo. Esse por sua vez é constituído por um conjunto de genes que serão responsáveis pela geração e/ou alteração de um resultado a ser avaliado. A aptidão de cada cromossomo é a medida de quão boa é a solução gerada a partir dos valores da função objetivo.

Os algoritmos genéticos tem seu funcionamento baseado em três principais processos:

1. Codificação e decodificação das variáveis do problema utilizando cromossomos;
2. Avaliação da aptidão de cada cromossomo;
3. Aplicação das operações genéticas para gerar a próxima geração de soluções.

A figura 27 apresenta um diagrama do funcionamento dos principais processos envolvidos em um processo de otimização por Algoritmo Genético.

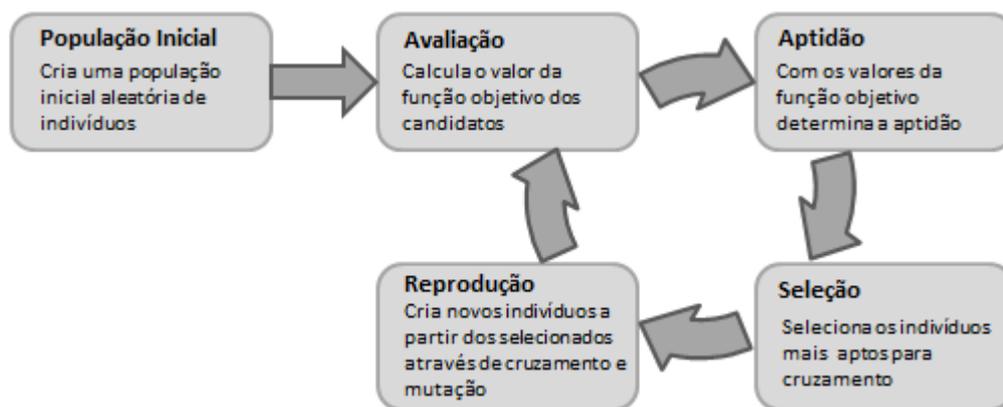


Figura 27. Diagrama de processos de Algoritmos Genéticos(Adaptado de Weise, 2009)

A função do processo de seleção é possibilitar que a informação contida nos bons cromossomos sobreviva na geração seguinte. Usualmente, a cada cromossomo da população é atribuída uma probabilidade de ser selecionado como cromossomo progenitor, baseado na aptidão desse cromossomo (Amaral, 2008). Caso o cromossomo não seja apto, o mesmo será descartado.

Os principais mecanismos de busca utilizados pelos Algoritmos Genéticos são o cruzamento e a mutação, pois eles permitem que a busca seja mais ampla explorando regiões desconhecidas nas populações iniciais. O operador cruzamento é aplicado a um par de cromossomos, chamados de **cromossomos pais**, que irão gerar dois novos cromossomos, os **cromossomos filhos**. Cada cromossomo pai tem sua fita cortada em uma posição qualquer de sua extensão, ficando dividida em duas partes. Segundo Amaral (2008), essas duas partes são chamadas de cabeça e calda e no processo de cruzamento as caldas são trocadas entre as duas fitas cromossômicas pais. O cruzamento, quando utilizado, é geralmente associado a uma taxa que irá determinar a probabilidade de sua ocorrência, essa é a chamada “taxa de cruzamento” e varia de 60% a 90%. Quando não acontece o cruzamento, os filhos terão as mesmas características dos pais preservando algumas soluções (Amaral, 2008).

Após a ocorrência do cruzamento será aplicado o operador mutação. Esse operador inverte os valores de alguns genes, ou seja, um gene 0 pode virar 1 ou um gene 1 pode virar 0. Esse operador é utilizado para aumentar a diversidade dos cromossomos em uma população, contudo ele pode alterar algumas informações contidas no indivíduo anterior que pudessem ser boas para a população. Por isso, assim como no cruzamento, deve ser associada uma taxa de mutação à otimização. Geralmente essa taxa é pequena (estando entre 0,1% e 5%) para que não atrapalhe a convergência. No entanto, ela deve ser suficiente para garantir a diversidade e evitar a convergência prematura da otimização (ótimo local). Para o caso de algoritmos genéticos onde os indivíduos são descritos por códigos binários os processos de cruzamento e mutação ocorrem conforme ilustrado na figura 28.

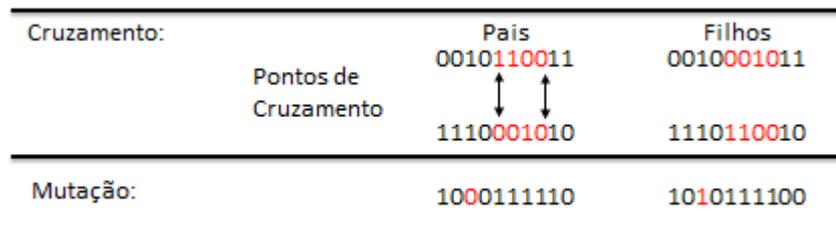


Figura 28. Esquema de geração de indivíduos (Adaptado de: Grady et al., 2005)

A execução das três etapas supracitadas confere ao Algoritmo Genético a capacidade de evitar a busca por casos que resultem em mínimos ou máximos locais, o que conseqüentemente amplia a variedade de soluções. Este ciclo de processos é repetido até que a solução atinja indivíduos suficientemente próximos do ótimo de acordo com o objetivo proposto (Oberg et al., 2012).

Existem diversos recursos computacionais disponíveis que podem ser usados como ferramentas de otimização. Muitos deles possuem o Algoritmo Genético como um dos principais métodos de otimização. A exemplo podemos citar o MATLAB, modeFRONTIER, MAPLE, Mathematica, Nexus, entre outros. Para o presente trabalho iremos utilizar o software modeFRONTIER pela facilidade de programação, fácil integração com outros softwares e pelas inúmeras possibilidades de tratamento, análise e visualização de dados.

4.2.1 ModeFRONTIER na otimização por Algoritmos Genéticos

O software modeFRONTIER é uma ferramenta de otimização multidisciplinar multiobjetivo, de integração entre processos e também pós-processamento. Esse software permite a interação entre diversas ferramentas de CAE (*Computer Aided Engineering*) e CAD (*Computer Aided Design*).

A respeito de integração, quanto mais precisa for uma análise maior será a complexidade do processo de desenvolvimento de um projeto. O modeFRONTIER permite a organização de uma ampla gama de ferramentas e um fácil gerenciamento do processo de desenvolvimento do produto.

Executar uma ferramenta de análise dentro do modeFRONTIER é simples. Sua interface genérica permite o uso de praticamente qualquer ferramenta. O modeFRONTIER funciona com um grande

número de softwares CAE, que vão desde programas CAD a CSM (*Computational Solid Mechanics*) e CFD. Alguns exemplos de softwares que podem ser integrados são: Excel, MATLAB, SolidWorks e ANSYS.

Para o caso da otimização, o modeFRONTIER permite ao usuário identificar o conjunto de melhores soluções possíveis que permitem chegar ao resultado final. Considerando os objetivos e as restrições definidas pelo usuário, o modeFRONTIER ajuda a lidar com diversas fontes de complexidade provenientes de projetos de engenharia com preocupações multidisciplinares. Sua ampla seleção de algoritmos inovadores, desenvolvidos para atender às necessidades da engenharia, habilita o usuário a delinear a estratégia adequada de otimização dependendo dos limites do espaço de solução e dos requisitos de cada problema envolvido.

Uma vez que os dados foram obtidos, seja pela otimização ou importação de dados, o usuário pode recorrer aos recursos de pós-processamento do modeFRONTIER para analisar os resultados. O software oferece um *toolbox*, que permite ao usuário realizar análises estatísticas e visualização de dados.

Basicamente esse software opera com diagramas de blocos organizados em fluxos de trabalho, como ilustra a figura 29.

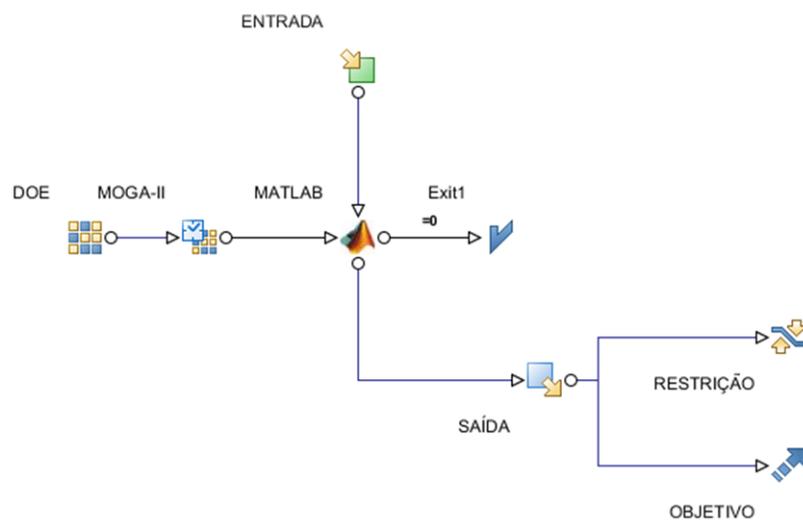


Figura 29. Fluxograma básico de otimização em modeFRONTIER

Um modelo de otimização possui dois fluxos principais, o fluxo de processos e o fluxo de dados. O fluxo de processos, mostrado na figura 28 na horizontal com sentido da esquerda para a direita, é utilizado para definir a estratégia de otimização. Já o fluxo de dados, mostrado na figura 28 na vertical com sentido de cima para baixo, é utilizado para introdução das variáveis de projeto, cálculo de resultados, verificação de restrições e avaliação da função objetivo.

O processo de otimização inicia-se com o *Design of Experiments* (DOE). A partir do que é definido como variável de entrada é gerada uma população inicial para que o Algoritmo Genético possa estimar a aptidão desses indivíduos e “aprender” o que são indivíduos bons e ruins. É possível que se escolha o método de criação da população inicial dependendo da necessidade e da estratégia de otimização. Os métodos mais utilizados nesse trabalho são: *DOE Sequence*, onde os indivíduos da população são informados pelo usuário de acordo com sua experiência; *Random* (aleatório), onde os indivíduos da população são criados aleatoriamente.

Uma vez criada a população inicial no DOE o processo de otimização prossegue com o *Scheduler*. Nessa etapa serão definidos os parâmetros de otimização, sendo o método de otimização o principal. O modeFRONTIER possui uma grande variedade de métodos de otimização. Ele contém tanto métodos clássicos quanto métodos heurísticos para otimização simples ou multiobjetivo. Os métodos metaheurísticos possuem a habilidade de solucionar problemas de difícil otimização pelo melhor caminho possível (Esteco, 2012). Essa classe de métodos inclui entre outros: *Simulated Annealing*, Algoritmos Genéticos, Estratégias Evolucionárias. Os Algoritmos Genéticos disponíveis no software são o *Multiobjective Genetic Algorithm II* (MOGA-II), o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II), o *Adaptive Range Multiobjective Genetic Algorithm* (ARMOGA) e o *Multiobjective Particle Swarm Optimization* (MOPSO).

O método MOGA-II usa um sistema inteligente e elitista de busca multiobjetivo para convergência rápida. Sua eficiência é ditada por seus operadores de reprodução: cruzamento simples, mutação e seleção. O NSGA-II, assim como o MOGA-II, é uma ferramenta de busca elitista multiobjetivo, contudo possibilita o uso de variáveis contínuas. O ARMOGA é um método que possibilita o ajuste da região de busca de acordo com as estatísticas dos dados obtidos, o que ajuda a minimizar o número de iterações. O método MOPSO é inspirado no comportamento dos pássaros em migração, onde cada solução é um “pássaro” em busca de espaço guiando os demais “pássaros” pelo espaço de busca.

Durante o processo de otimização é possível acompanhar a evolução do processo através do campo *Design Space* (Espaço de Experimentos). Nesse campo podemos visualizar as populações geradas na janela *Design Table* e, concomitantemente, o desempenho dos indivíduos dessas populações no gráfico gerado na janela *History*, figura 30.

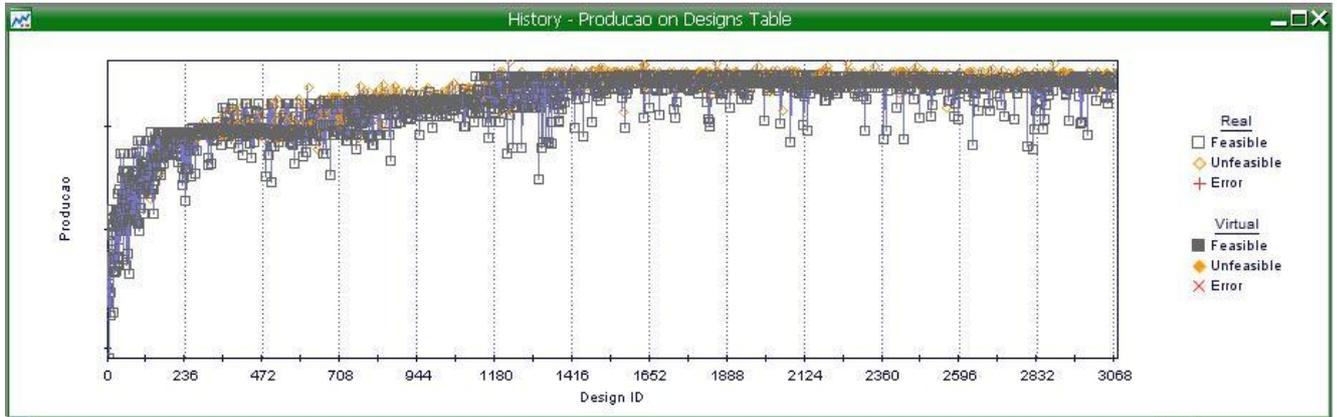


Figura 30. Janela do histórico de otimização

Ainda no campo *Design Space*, na etapa de pós-processamento, é possível visualizar os dados gerados na forma de gráficos e tabelas e também organizá-los para facilitar a busca pelo melhor indivíduo.

4.2.2 Conceitos de Algoritmo Genético Aplicados a parques eólicos

Para o presente trabalho, o objetivo fundamental da otimização é encontrar o melhor *layout* de parque eólico para um terreno dado, ou seja, a configuração que apresente a maior produção com uma boa eficiência. Dessa forma, a função objetivo do Algoritmo Genético utilizado será o cálculo da produção energética através do ACP.

Como explicado no item 3.3.2, o terreno em questão foi representado em forma matricial, onde cada elemento pode conter ou não um aerogerador. Dessa maneira, a fita cromossômica pode ser facilmente identificada, onde o gene 1 representa a presença de um aerogerador e o gene 0 a ausência.

Suponhamos um terreno dividido em 10 células. Sua representação em número binário estará entre A=0000000000 e B=1111111111. Enquanto o cruzamento entre dois pais será responsável pela troca de trechos cromossômicos, a mutação irá modificar uma célula. A figura 31 ilustra o cruzamento e mutação de dois pais gerando dois filhos.

Pai = 0010110011
Mãe = 1110001010
Filho 1 = 0010001011
Filho 2 = 1110110010

Figura 31. Ilustração do processo de cruzamento (Adaptado de: Mosetti et al., 1994)

Nesse exemplo, os pontos de cruzamento estão entre o terceiro e o sétimo genes. A aptidão de cada indivíduo gerado será definida pela função objetivo.

4.3 ALGORITMO GENÉTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE LAYOUT DE PARQUES EÓLICOS

O código ACP é acoplado à ferramenta de otimização por Algoritmo Genético/modeFRONTIER. O ACP é usado como função objetivo dentro do modeFRONTIER, gerando os resultados necessários para avaliação dos indivíduos criados.

Basicamente, o processo de otimização está dividido em três etapas: o Pré-processamento (ou Inicialização), o Processamento (ou Solução) (Algoritmo Genético) e o Pós-processamento.

Na primeira etapa, são especificados os parâmetros de otimização como:

- Número de variáveis de entrada: para o problema proposto, a única variável de entrada será a matriz posição;
- Tamanho da população inicial: é o número total de soluções que serão geradas aleatoriamente para a primeira geração;
- Restrições: a fim de evitar avaliações de indivíduos inviáveis, são impostas restrições como produção ou eficiência mínimas;
- Critérios de otimização: os critérios de otimização incluem o número máximo de iterações (chamadas gerações), as probabilidades de cruzamento, seleção e mutação e o método de otimização.

Na segunda etapa, partindo de uma população inicial dada, a aptidão de cada indivíduo será avaliada através da função objetivo, o ACP e, através dos melhores indivíduos, a próxima geração será concebida. Essa nova população é obtida através de cruzamento e mutação entre os indivíduos de maior aptidão em regiões aleatórias. Ambas as operações irão ocorrer com certa probabilidade: de 0,6 a 0,9 para o cruzamento e de 0,01 a 0,05 para a mutação (Lacerda e Carvalho, 1999). O cruzamento tem uma maior probabilidade de ocorrer, pois ele é o maior responsável pela “evolução local” da população, enquanto a mutação raramente ocorre, uma vez que é responsável pela introdução aleatória de novas características na população, prevenindo a convergência prematura da otimização a ótimos locais (Mosetti et al., 1994).

Pode-se notar que esse método de otimização procura pela melhor população e não diretamente pelo melhor indivíduo. Portanto, a melhor solução poderá ser encontrada em estágios anteriores da evolução. Contudo, com o aumento da aptidão da população, o indivíduo mais apto provavelmente fará parte da população mais desenvolvida (Mosetti et al., 1994). Tal caso pode ser visto na figura 32.

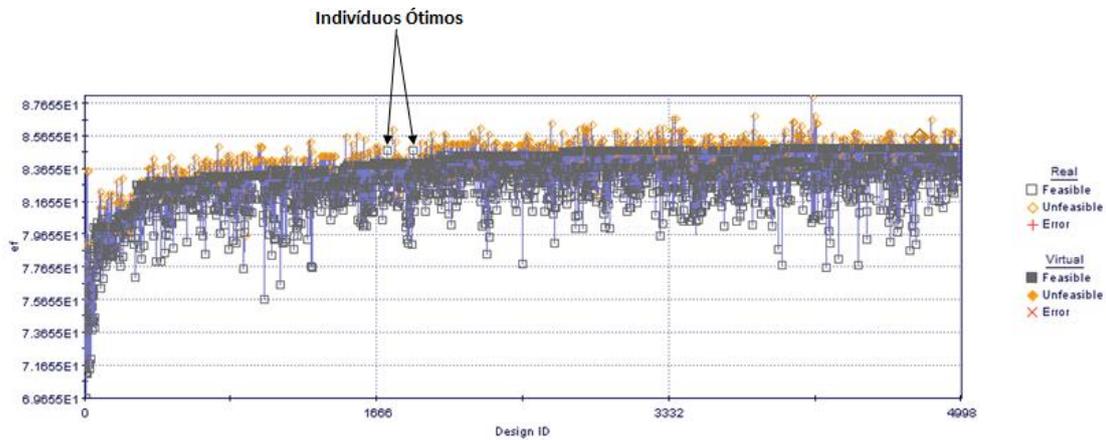


Figura 32. Caso onde o indivíduo ótimo é encontrado antes da evolução

Por fim, na etapa de pós-processamento, quando os cálculos computacionais são finalizados, os resultados são exportados em um relatório gerado pelo modeFRONTIER. Esse relatório fornece a matriz posição otimizada que será introduzida no ACP para posterior análise de resultados.

A partir dessas considerações o fluxograma abaixo, figura 33, descreve detalhadamente todo o processo de otimização por Algoritmo Genético, que acontece no algoritmo de otimização desenvolvido.

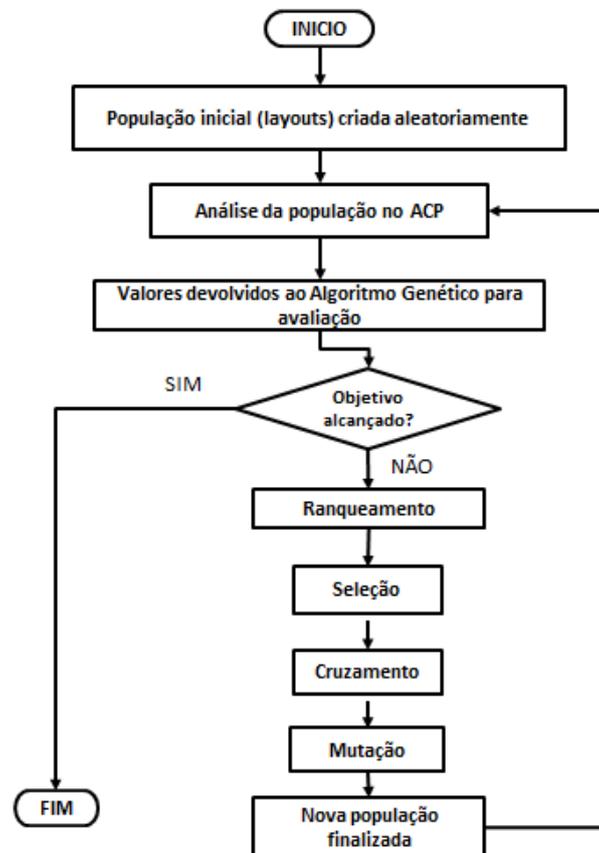


Figura 33. Fluxograma do ACOP

Para o presente trabalho foi desenvolvido o Algoritmo de Cálculo e Otimização da Produção (ACOP), que integrado ao ACP, é capaz de encontrar o melhor layout de aerogeradores dentro de um parque eólico de espaço delimitado.

Inicialmente foram definidas as variáveis de entrada, sendo cada uma delas uma linha da matriz posição que descreve o layout do parque a ser avaliado. A matriz gerada será um indivíduo e seus elementos serão os genes que juntos formarão o seu código genético. Definidas as variáveis, uma população será gerada aleatoriamente pelo DOE.

Em seguida, o desempenho de cada indivíduo dessa população é calculado pelo ACP, fornecendo os parâmetros de saída necessários para avaliação da aptidão desses indivíduos. Para os indivíduos que satisfizeram as restrições impostas para os valores mínimos de eficiência e produção, segue o processo de otimização onde a próxima etapa será a aplicação dos operadores de reprodução, visando à maximização da eficiência e da produção. Uma nova população será gerada e passará pelos mesmos processos que a população inicial até que se atinja o objetivo definido. A figura 34 ilustra o ACOP.

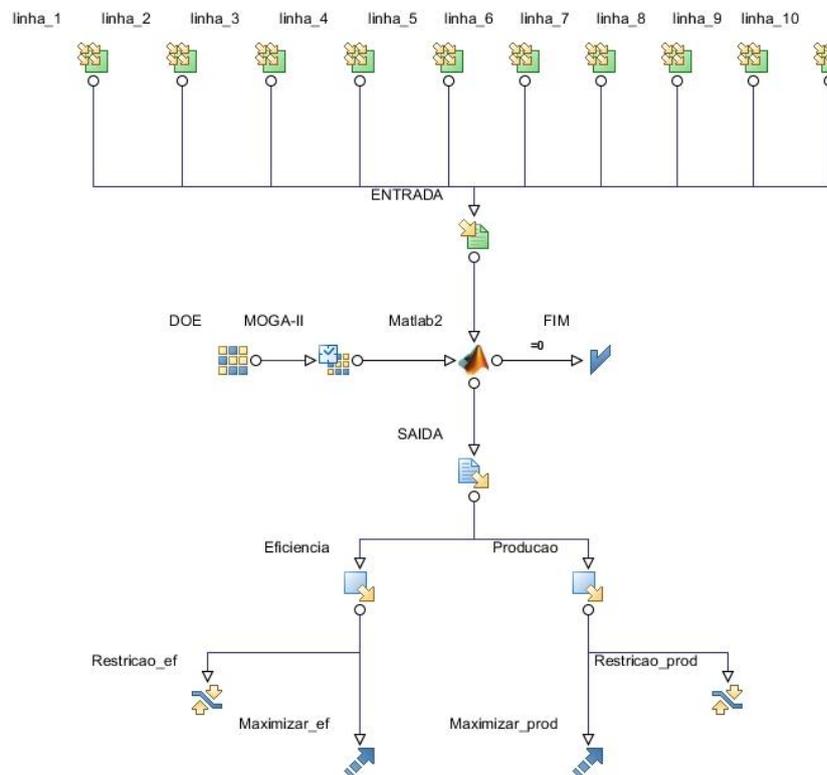


Figura 34. Fluxograma do ACOP em modeFRONTIER

A fim de escolher os parâmetros que melhor se adequavam ao caso estudado, foram realizados testes com os principais métodos de otimização disponíveis no modeFRONTIER. Os critérios utilizados para avaliação foram: variedade dos operadores de reprodução, adequabilidade dos resultados encontrados e facilidade de convergência. Para auxiliar a escolha do melhor método foi utilizada uma matriz decisão, como ilustra a tabela 2.

Critério	Peso	Método			
		NSGA-II	MOGA-II	ARMOGA	MOPSO
Facilidade de convergência	3	5	4	4	1
Adequabilidade dos resultados	4	3	5	2	3
Variedade de operadores de evolução	2	5	4	3	1
Total		37	40	26	17
Classificação		2°	1°	3°	4°

Tabela 2. Matriz decisão.

Como é possível perceber pela tabela 2, o método que melhor se adequa ao caso estudado é o MOGA-II.

Após selecionado o método foi feita a calibração deste através da escolha dos melhores taxas dos operadores de reprodução. Para isto foram feitos testes com várias configurações diferentes desses operadores sempre para uma mesma condição. Os melhores valores encontrados são listados na tabela 3.

Operador de reprodução	Taxa
Cruzamento:	0,8
Mutação:	0,01
Seleção:	0,07

Tabela 3. Operadores de reprodução.

4.4 TESTES E VERIFICAÇÕES DO ALGORITMO

Alguns testes básicos e verificações foram feitos para avaliar a confiabilidade dos resultados fornecidos pelo ACOP. Esses testes consistem em situações simples onde já se sabe o resultado esperado. Para este propósito três testes foram executados visando o julgamento de três parâmetros fundamentais, sendo eles posição, eficiência e produção.

O primeiro teste teve como objetivo avaliar a capacidade do programa de utilizar a função objetivo desenvolvida no MATLAB, o ACP, como ferramenta para otimização do problema proposto, que para esse caso é apenas a maximização da produção total. Para isso foi gerada uma matriz 10 por 10 onde a presença ou não de aerogerador em cada célula seria determinada pelo programa de otimização. Dessa

forma, o resultado esperado era uma matriz com aerogeradores em todas as células, que foi exatamente a configuração obtida pelo ACOP após o processo de otimização. A figura 35 ilustra o processo realizado no primeiro teste.

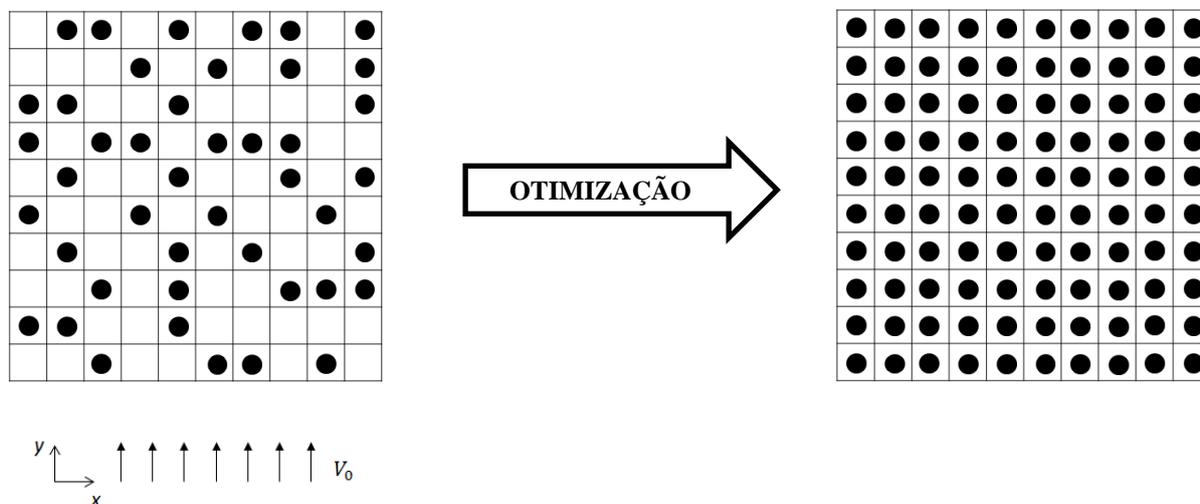


Figura 35. Ilustração do primeiro teste

Assim como para o primeiro teste, o segundo teste teve como objetivo avaliar a capacidade do programa de utilizar o ACOP como ferramenta para otimização do problema proposto. No entanto, para esse caso a intenção foi maximizar apenas a eficiência, dada pela divisão da produção total do parque calculada considerando a influência do efeito esteira pela produção total do parque considerando que todos os aerogeradores recebem escoamento livre. Utilizando a mesma organização matricial do primeiro teste, o programa não convergiu a uma única configuração, mas chegou a vários resultados ótimos, ou seja, com eficiência máxima em diferentes configurações, sendo algumas delas demonstradas na figura 36.

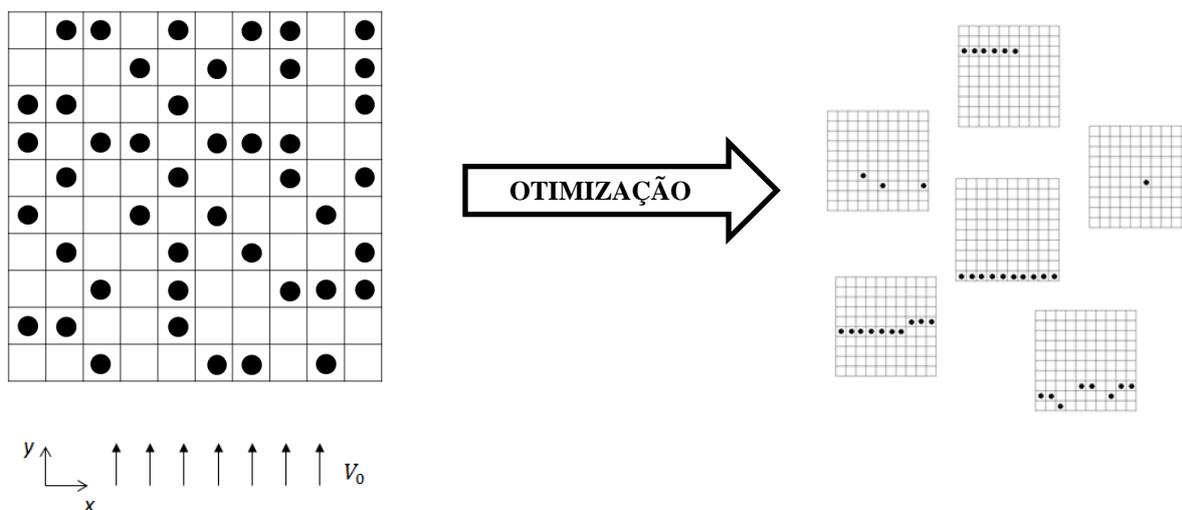


Figura 36. Ilustração do segundo teste

O terceiro teste realizado teve como objetivo avaliar a capacidade do ACOP de posicionar aerogeradores minimizando a influência do efeito esteira. Para tal foi imposta uma configuração inicial de dois aerogeradores onde um encontrava-se completamente sombreado pela esteira do outro. Em seguida foi atribuída a liberdade de posicionamento do aerogerador sombreado enquanto o outro se manteria em uma posição fixa. Como função objetivo do Algoritmo Genético, foi adotado o cálculo da produção total do parque, pois, ao solicitar a maximização desse parâmetro, o programa seria induzido a posicionar o aerogerador livre de forma que não sofresse mais o sombreadamento causado pelo aerogerador fixo. Para esse teste, o resultado esperado seria o posicionamento dos aerogeradores lado a lado. Contudo, como explicado no item 4.3, o algoritmo não busca apenas o melhor indivíduo, mas sim uma população composta pelos melhores indivíduos. Logo, obtiveram-se diversas possibilidades de posicionamento, todas fornecendo produção máxima. A figura 37 ilustra essa situação.

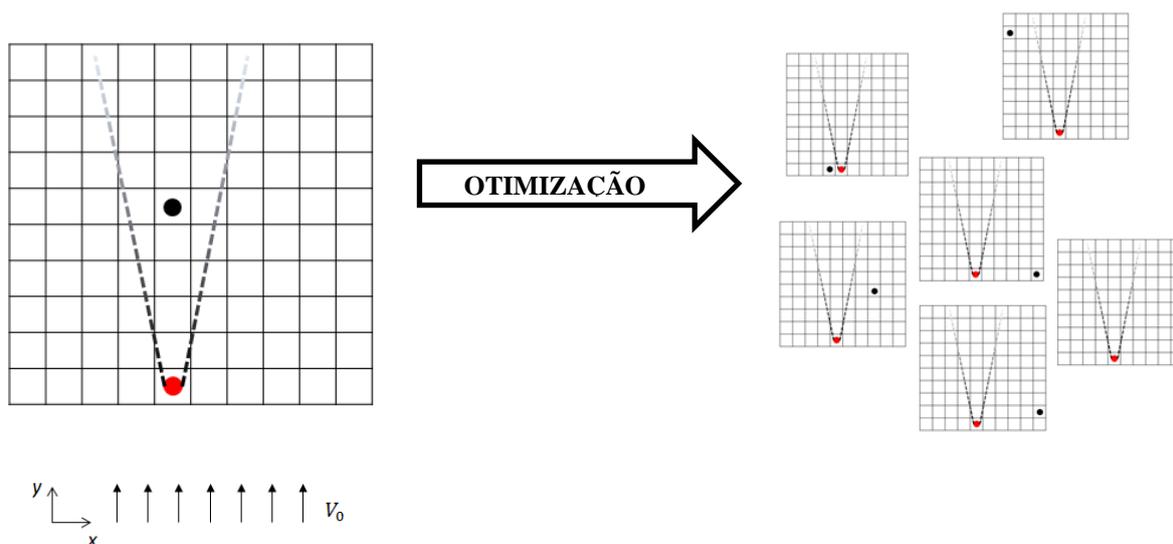


Figura 37. Ilustração do terceiro teste

Observando os resultados dos dois primeiros testes, percebe-se que em processos de otimização o objetivo a ser atingido pode não ser conveniente ou satisfatório. Por exemplo, o primeiro o processo de otimização resultou em uma configuração em que não se aproveita da melhor forma a capacidade de geração de cada aerogerador, ou seja, nessa configuração há um grande número de aerogeradores sujeitos a um escoamento muito perturbado e de baixíssimo potencial de produção. Já para o segundo processo não houve convergência do resultado e em grande maioria as configurações obtidas foram insatisfatórias por aproveitar de maneira insignificante o potencial disponível no terreno delimitado.

Nesse sentido, alguns cuidados devem ser tomados antes de se iniciar um processo de otimização. Um dos fatores a considerar são as restrições do resultado, ou seja, indivíduos que não obedecerem a certo requisito devem ser descartados, acelerando o processo de evolução e induzindo a convergência para resultados mais satisfatórios. Por exemplo, para o primeiro teste uma restrição na eficiência certamente iria maximizar o aproveitamento da capacidade de geração de cada aerogerador. Outro fator é escolher adequadamente os objetivos a serem atingidos, pois a otimização deles pode gerar

resultados corretos, porém insatisfatórios. Por exemplo, para o segundo teste caso fossem escolhidos como objetivo tanto a eficiência como o número de aerogeradores, o processo de otimização iria convergir para configurações satisfatórias.

5. RESULTADOS

Os resultados obtidos usando os algoritmos desenvolvidos, explicados nos tópicos 3.3 e 4.3, são apresentados e comparados a resultados de estudos anteriores (Mosetti et al., 1994, Grady, 2005, Marmidis, 2008) e ao software WindFarmer. O uso do WindFarmer é uma boa ferramenta para comparação pois possui dados validados através de medições em parques eólicos já em operação. Como parâmetros de comparação foram escolhidos o número de turbinas, a potência total gerada, a eficiência e o fator de capacidade.

No intuito de verificar a validade dos algoritmos desenvolvidos os testes foram divididos em duas principais etapas: uma para verificação do ACP e outra para verificação do ACOP.

5.1 VERIFICAÇÃO PARA PARQUE COM N AEROGERADORES EM DISPOSIÇÃO JÁ ESTUDADA

Nessa etapa o objetivo foi avaliar a confiabilidade dos resultados gerados pelo ACP, pois esse programa é a função objetivo do algoritmo de otimização desenvolvido e caso seus resultados não sejam coerentes, o processo de otimização será falho. Outro fator relevante analisado foi a influência do C_T , presente no cálculo da velocidade resultante segundo a equação 3.9, nos resultados. Em trabalhos anteriores (Anshul, 2010, Grady, 2005 e Mosetti et al., 1994) essa variável foi considerada constante.

5.1.1 Verificação dos resultados obtidos no ACP

Levando em consideração a disponibilidade de dados, foi escolhida para simulação e comparação de resultados a configuração proposta por Mosetti et al., 1994, onde não há variação da velocidade e direção do vento. A tabela 4 e a figura 38 mostram os parâmetros de entrada utilizados.

Parâmetros de entrada	
Rugosidade (Z_0):	0,3
Velocidade do vento em escoamento livre (V_0):	12 m/s
Altura do cubo do aerogerador (h):	60 m
Diâmetro do rotor (D):	40 m
Dimensões do parque:	2000X2000 m
C_t :	0,88

Tabela 4. Parâmetros de entrada

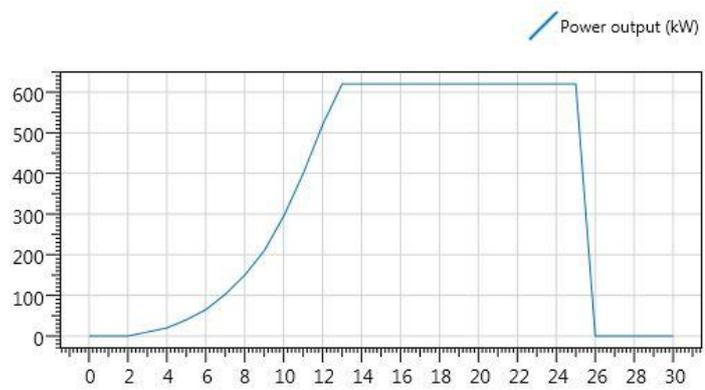
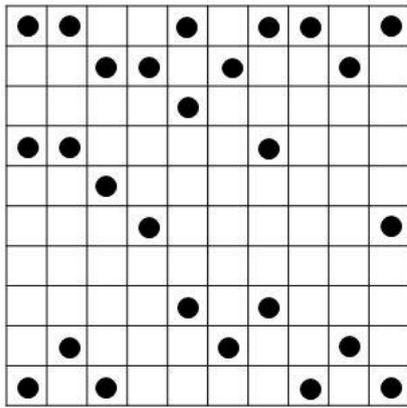


Figura 38. Configuração proposta por Mosetti et al. (1994) e Curva de Potência utilizada

Inicialmente, essa configuração de parque eólico foi simulada no WindFarmer e seus resultados foram coletados para comparação com os resultados apresentados por Mosetti et al.. O propósito dessa simulação é comparar o modelo de esteira utilizado pelo autor em questão e no presente trabalho (modelo de Jensen) com o modelo computacional utilizado pelo software WindFarmer (modelo de Ainslie). Dado o fato de o WindFarmer não trabalhar com matrizes e sim com coordenadas geográficas, o posicionamento dos aerogeradores foi feito manualmente, informando as coordenadas de cada aerogerador, de forma que descrevesse fielmente a configuração matricial proposta por Mosetti et al.

Posteriormente essa configuração foi simulada no ACP e avaliada a proximidade dos resultados com os obtidos no trabalho do Mosetti et al. e no WindFarmer. A tabela 5 apresenta os resultados obtidos nessa verificação.

	Número de turbinas	Potência Total [kW]	Eficiência [%]	Fator de Capacidade [%]
Mosetti et al.	25	12375	95,0	79,8
ACP	26	12921	95,5	80,0
Wind Farmer	26	13127	97,0	81,4

Tabela 5. Resultados da verificação do ACP

Obtidos os dados, foi possível inferir que o modelo proposto por Jensen (1983) é uma boa aproximação para descrição do efeito esteira, visto que os resultados obtidos com esse modelo muito se aproximaram dos resultados gerados no WindFarmer, que utiliza o modelo de Ainslie para os cálculos. A diferença encontrada entre os dois modelos se dá principalmente pela forma como é descrito o perfil da esteira, pois no modelo de Jensen há uma superestimação no déficit de velocidade, como pode ser visto na figura 39, onde a área hachurada representa a parte superestimada.

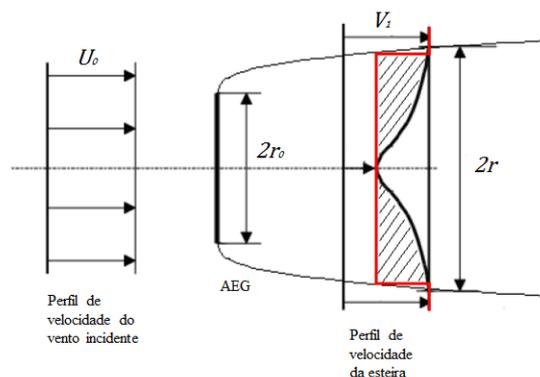


Figura 39. Comparação do perfil de vento entre os modelos de Ainslie e Jensen

Comparando os dados de potência total, eficiência e fator de capacidade observou-se que os dados obtidos no ACP apresentam uma pequena diferença se comparado com o WindFarmer, não superando 1,7%, mostrando que a metodologia de cálculo desenvolvida para o ACP é confiável e serve como uma boa estimativa inicial. Dessa forma concluímos que o ACP é uma ferramenta que gera dados confiáveis sendo adequado para ser utilizado como função objetivo no algoritmo de otimização.

5.1.2 Influência do C_T no cálculo da produção energética

Durante o desenvolvimento do ACP, percebeu-se que o fator C_T (curva em anexo) possuía uma grande variação com o aumento da velocidade. Como este parâmetro é utilizado no cálculo da esteira e a produção do parque é influenciada pela esteira que cada aerogerador produz, tal parâmetro não pode ser considerado constante. Com isso, decidiu-se inserir também a curva que representa o C_T de uma turbina nos cálculos feitos no ACP e fazer algumas análises dos resultados gerados para ver o quão diferente seria o resultado.

Para esse teste foi inserida a curva de C_T do aerogerador utilizado nos trabalhos do Mosetti no ACP e no WindFarmer, e os resultados comparados com o teste realizado em 5.1.1 onde C_T foi considerado constante e igual a 0,88. A tabela 6 apresenta os resultados obtidos.

	Número de turbinas	Potência Total [kW]	Eficiência [%]	Fator de Capacidade [%]
Mosetti et al.	25	12375	95,0	79,8
ACP_{Constante}	26	12921	95,5	80,0
ACP_{Variável}	26	13316	98,5	82,6
WF_{Constante}	26	13127	97,3	81,4
WF_{Variável}	26	13242	99,0	82,1

Tabela 6. Resultados da comparação entre C_T constante e variável

Analisando os resultados obtidos verificou-se que o C_T é um parâmetro que influencia diretamente a produção de um parque eólico. Para a situação estudada, o uso do C_T variável acarretou em um aumento próximo de 3% na produção total do parque. Dessa forma, considerá-lo constante causaria uma subestimação do potencial de produção de um parque eólico.

A fim de visualizar melhor a influência desse parâmetro, foi gerado um gráfico onde foi calculada a produção de um aerogerador sob sombreamento total variando a sua distância em relação ao aerogerador a barlavento. Esse gráfico é apresentado na figura 40.

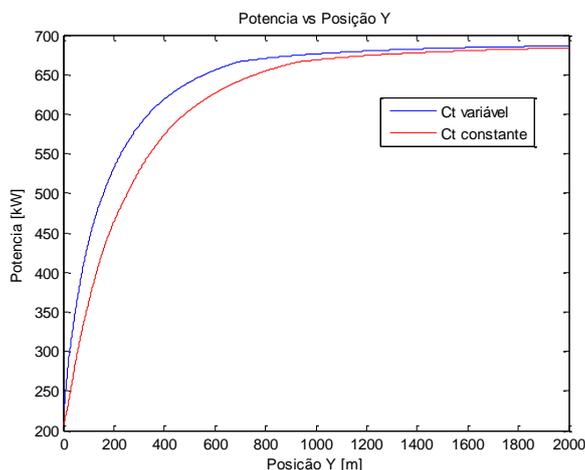


Figura 40. Influência do C_T na produção

A partir do gráfico, por exemplo, é possível perceber que um aerogerador com C_T constante a 400m de um aerogerador a sotavento apresenta uma queda significativa na produção, aproximadamente 8%, se comparado à sua produção caso fosse considerado o C_T variável.

5.2 PRODUÇÃO ENERGÉTICA PARA N AEROGERADORES EM DISPOSIÇÃO OTIMIZADA

Esta etapa teve por objetivo verificar a qualidade do processo de otimização. Foram considerados como parâmetros para avaliação da qualidade do processo a adequabilidade dos resultados encontrados e facilidade de convergência.

Para isso foram feitas duas simulações, onde na primeira utilizou-se os parâmetros usados por Mosetti et al. em seus testes e na segunda foram adotados parâmetros que mais se aproximassem do cenário nacional de geração eólica.

5.2.1 Otimização de layout aleatório e comparação com outros trabalhos

A fim de verificar o desempenho do ACOP, algumas simulações foram feitas e os resultados foram comparados com trabalhos de outros autores (Mosetti et al., 1994, Grady et al., 2005, Marmidis, 2008). Tais trabalhos foram escolhidos por utilizarem os mesmos parâmetros adotados por Mosetti, além de usar o modelo de Jensen para descrever a esteira e Algoritmos Probabilísticos como

ferramenta de otimização, fazendo com que o controle dos resultados e a confiabilidade desses sejam garantidos.

As configurações propostas por estes autores foram simuladas no ACP a fim de obter os resultados para posterior comparação, tornando-a o mais imparcial possível. Feito isso, foi inserida uma configuração de parque eólico com as mesmas condições utilizadas pelo autor a ser comparado no ACOP para ser otimizada. O objetivo desse processo foi verificar a capacidade do ACOP de atingir uma configuração de desempenho próximo ou superior aos propostos pelos autores supracitados. As configurações simuladas são ilustradas na figura 41, lembrando que o vento incide no sentido positivo do eixo y, e os resultados correspondentes foram reportados na tabela 7.

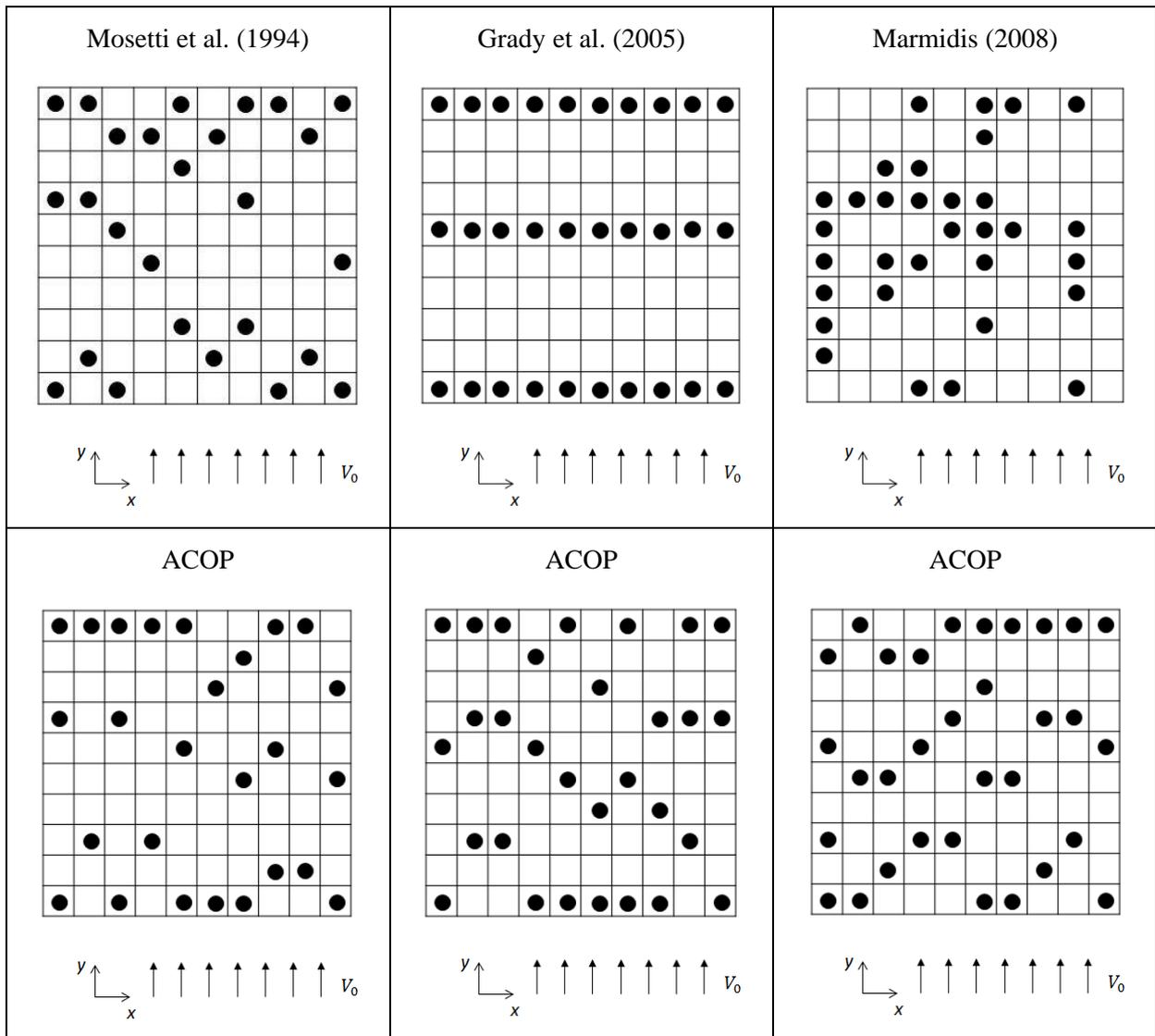


Figura 41. Configurações obtidas pelos autores e ACOP

	Nº de turbinas	Produção Total [kW]	Eficiência [%]
Mosetti et al.	26	12921	95,5
ACOP	26	12985	96,0
Grady et al.	30	14764	94,6
ACOP	30	14790	94,8
Marmidis	32	13467	80,9
ACOP	32	15574	93,6

Tabela 7. Resultados da otimização para comparação com diferentes autores

A partir dos resultados ilustrados na tabela 7, algumas conclusões podem ser feitas. Primeiramente, foi possível perceber a qualidade da metodologia utilizada neste trabalho tendo em vista a proximidade entre os resultados obtidos e os relatados pelos autores.

Além disso, notou-se a eficácia do algoritmo desenvolvido neste trabalho, bem como da ferramenta, o modeFRONTIER, utilizada para o desenvolvimento do algoritmo. Isso foi constatado dada a proximidade dos resultados se comparado aos trabalhos do Mosetti et al. (1994) e Grady et al. (2005), tendo em vista que esses dois autores utilizaram o Algoritmo Genético para a otimização.

Por fim, foi verificada a adequabilidade do Algoritmo Genético à situação estudada. Comparando os resultados obtidos pelo ACOP com os obtidos por Marmidis, percebe-se um aumento significativo da eficiência e produção total do parque, aproximadamente 15%. Essa diferença provavelmente está relacionada ao método de otimização utilizado, pois Marmidis utiliza o método Monte Carlo e o presente trabalho utiliza o Algoritmo Genético que se mostrou mais eficaz.

5.2.2 Otimização aleatória com parâmetros arbitrados

Como teste final de verificação do ACOP foi feita uma simulação de otimização com dados técnicos mais próximos do contexto atual de geração eólica no Brasil. Além disso, essa simulação foi reproduzida no software WindFarmer para verificar a proximidade dos resultados obtidos pelo ACOP com um software comercial de grande expressividade no mercado.

Para a realização deste teste, primeiramente foi necessário conseguir os dados referentes ao aerogerador, terreno e vento. Os dados do aerogerador, em anexo, foram adquiridos no site do fabricante, e esses são referentes ao modelo Vestas V90 – 3,0 MW, consideravelmente utilizado no cenário nacional de geração eólica. Os dados de vento foram estimados através do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (Amarante, 2001), e foi escolhida a região do interior da Bahia onde a média de vento está em torno de 9,5 m/s. A rugosidade foi obtida através da Tabela 1, onde ficou definida como mais adequada ao terreno observado na região escolhida a rugosidade Z_0 de 0,3.

Posteriormente, foram arbitrados alguns parâmetros como o número de aerogeradores a serem instalados e as dimensões do terreno. A fim de manter o padrão adotado nas simulações anteriores optou-se por um terreno de 2000 metros de largura por 2000 metros de comprimento. Quanto ao número de aerogeradores escolheu-se a quantidade de 30 máquinas.

Definidos os parâmetros, esses foram inseridos no ACOP e no WindFarmer e iniciou-se o processo de otimização e os resultados obtidos são apresentados na tabela 8.

	Número de turbinas	Potência Total [kW]	Eficiência [%]	Fator de Capacidade [%]
ACOP	30	54932	87,1	61,0
Wind Farmer	30	55936	92,5	62,1

Tabela 8. Resultados da otimização com dados atuais

Avaliando os resultados obtidos nesse processo é possível perceber uma diferença entre os valores. Isso se deve principalmente à maior flexibilidade de posicionamento dos aerogeradores no programa WindFarmer que, ao contrário do ACOP, não possui restrição de posicionamento. Outro fator responsável é o modelagem do efeito esteira utilizada pelo WindFarmer que permite uma melhor descrição se comparado ao modelo usado no ACOP.

No intuito de confirmar a influência da flexibilidade de posicionamento dos aerogeradores no desempenho da otimização, foi realizada uma simulação onde diminuiu-se a possibilidade de alocação dos aerogeradores. Para o caso comparado com o WindFarmer na Tabela 8 foi utilizada uma matriz 10X10 e para esse teste de confirmação da teoria foi utilizada uma matriz 8X8 e uma 12X12, ou seja, o primeiro caso possui 100 locais de possível alocação de aerogeradores, o segundo apenas 64 e o terceiro 144. A tabela 9 apresenta os resultados confirmando a hipótese sugerida e a figura 42 mostra um gráfico da eficiência pela dimensão da matriz (número de linhas e colunas da matriz) mostrando a evolução. Os pontos encontrados são mostrados no gráfico pelos elementos triangulares. A curva em azul ilustra um ajuste de curva pelo método de Richardson, onde nesse caso a convergência foi estimada em 92,5%, já a curva em vermelho é um ajuste de potência feito pela ferramenta CFTool do matlab.

	Número de turbinas	Potência Total [kW]	Eficiência [%]	Fator de Capacidade [%]
ACOP_{8X8}	30	53775	85,3	59,7
ACOP_{10X10}	30	54932	87,1	61,0
ACOP_{12X12}	30	55395	87,9	61,6

Tabela 9. Comparação da otimização para diferentes dimensões de matrizes

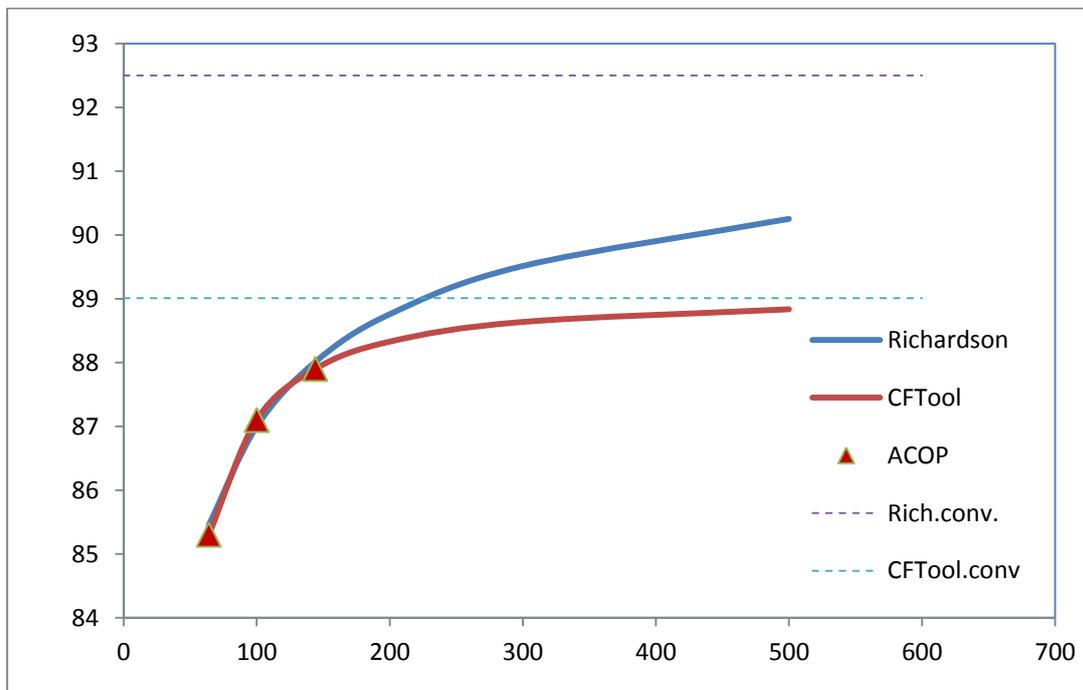


Figura 42. Influência da dimensão da matriz no processo de otimização

Podemos perceber que a convergência se daria para um valor de otimização de 89,1% mostrando que outros fatores também influenciam a otimização.

Apesar da diferença encontrada nos resultados dos dois programas, em torno de 1,8% menor no ACOP, este teste mostrou que o ACOP é uma boa ferramenta para estimativas iniciais de produção em um parque eólico a ser implantado.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Um dos maiores desafios encontradas pelos agentes de implantação ao projetar um parque eólico é atingir a maior produção energética para um espaço limitado. Dessa forma, a procura pelo melhor posicionamento dos aerogeradores dentro do parque é de fundamental importância na busca de um layout que seja minimamente prejudicado pelo efeito esteira. Dentro dessa perspectiva, o presente trabalho teve por objetivo desenvolver um algoritmo de otimização de *layout* de parques eólicos, que gere como resultado a melhor disposição dos aerogeradores em um espaço determinado.

Para o desenvolvimento de um algoritmo computacional capaz de estimar a produção energética de um parque eólico, fez-se fundamental estudar os fatores envolvidos no desenvolvimento e no desempenho desses. Nessa etapa foram estudadas as influências da localização, do regime de ventos e do modelo de aerogerador a ser escolhido.

Posteriormente se fez necessário estudar o principal causador de perdas energéticas, o efeito esteira. Sendo assim, foram selecionados para os dois modelos mais utilizados para descrição do efeito esteira, os modelos de Jensen e Ainslie. Levando em consideração o objetivo proposto e adequabilidade aos recursos disponíveis, foi escolhido o modelo de Jensen para a implementação no código ACP. Desenvolvido o código, foram realizados testes e verificações para analisar a capacidade do código de calcular a produtividade de um parque considerando o efeito esteira e o comportamento da queda de produção devido a esse efeito e suas variações.

Finalizado o algoritmo para cálculo da produção de parques eólicos, que seria utilizado como função objetivo no algoritmo de otimização, foi realizado um estudo a respeito dos principais métodos de otimização para verificar a adequabilidade do Algoritmo Genético na resolução do problema proposto. Feito isso foram apresentados os principais conceitos e explicado o funcionamento do Algoritmo Genético, como também a analogia desses ao problema estudado nesse trabalho. Com embasamento teórico suficiente, foi desenvolvido o ACOP e algumas situações simples de resultado conhecido foram simuladas para avaliar a confiabilidade dos resultados fornecidos por este programa. A partir desses testes, verificou-se o bom desempenho do ACOP para as otimizações e também a necessidade de se tomar alguns cuidados antes de se iniciar um processo de otimização afim de atingir um resultado proveitoso.

Por fim, desenvolvidos e testados o ACP e o ACOP, partiu-se para a etapa de testes e comparações com situações previamente estudadas e com um software comercial, o WindFarmer. Nesta etapa os testes foram divididos em dois grupos principais, onde um avaliou o ACP e o outro o ACOP.

Dentro do primeiro grupo, o primeiro teste realizado teve o intuito de verificar a proximidade entre os resultados obtidos no ACP, Mosetti et al. e WindFarmer para uma mesma configuração de layout e parâmetros de entrada. Com este teste observamos que o modelo proposto por Jensen (1983) é uma boa aproximação para a descrição do efeito esteira e, além disso, verificou-se a capacidade de cálculo do ACP. Ainda no primeiro grupo, o segundo teste objetivou a análise da influência do C_T para o cálculo da produção de um parque eólico e através dele foi constatado que há uma subestimação da produção quando esse parâmetro é considerado constante.

No segundo grupo de testes, primeiramente comparou-se a eficácia do processo de otimização realizado pelo ACOP com processos de otimização adotados por outros autores, que utilizaram o Algoritmo Genético ou outra ferramenta de otimização. A partir dos resultados coletados constatou-se que o ACOP apresentou bom desempenho, pois atingiu resultados, mesmo que pouco, próximos aos encontrados pelos outros autores. Além disso, foi verificada a adequabilidade do Algoritmo Genético à situação estudada, visto que os resultados foram melhores se comparados ao outro método probabilístico de otimização em questão. No segundo teste foi feita uma simulação de otimização com dados técnicos mais próximos do contexto atual de geração eólica no Brasil. Essa simulação foi realizada tanto no ACOP como no WindFarmer e seus resultados mostraram que o ACOP teve um bom desempenho, contudo, devido a suas limitações de posicionamento dos aerogeradores e outros fatores, o resultado obtido foi inferior ao alcançado pelo WindFarmer.

A partir dos estudos e procedimentos realizados neste trabalho, confirmou-se a expressividade do efeito esteira na definição do layout de parques eólicos. Além disso o algoritmo desenvolvido mostrou-se uma boa ferramenta para otimização da produção de um parque eólico, servindo como estimativa inicial em projetos de parques eólicos. Inferiu-se dos resultados obtidos que o Algoritmo Genético é um método de otimização simples e eficiente, capaz de gerar excelentes resultados para o tipo de problema abordado. Se aprimorado, o programa criado neste trabalho poderá prever com maior confiabilidade o desempenho de um parque eólico.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste trabalho motivam o aprimoramento do ACP e ACOP nos seguintes quesitos:

- Pesquisa das limitações dos programas desenvolvidos: dimensões máximas e mínimas do parque e do aerogerador, condições climáticas críticas;
- Introdução da possibilidade de uso de condições de vento variáveis (velocidade e direção);
- Inserção de características topográficas, pois no presente trabalho o terreno é assumido como plano e de rugosidade uniforme;

BIBLIOGRAFIA

- AINSLIE J. F. **Calculating the flowfield in the wake of wind turbine**. Em: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 27; 1988.
- AMARAL, R. M., **Métodos Computacionais em Engenharia Mecânica**. Em: Faculdade de Ciências e Tecnologia – Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial – Universidade de Lisboa, 2008.
- AMARANTE, O. A. C.; ZACK, J.; BROWER, M.; DE SÁ, A. L., “**Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**”, CEPEL, 2001.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Geração, SFG, 2012.
- ANEEL, 2013. Disponível em:
<<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=53&idPerfil=5&idiomaAtual=0>>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2013.
- BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANI, E., **Wind energy handbook**. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. 617p.
- HOLTZ, 2005. “**Traçado automático de envoltórias de esforços em estruturas planas utilizando um algoritmo evolucionário**”. Em: Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.
- ENERCON, 2012. Modificado de <www.enercon.de>. Acesso em: 18 de maio de 2012.
- ESTECO, 2012. Disponível em: www.esteco.com/home/mode_frontier/Optimization/Schedulers.html. Acesso em: 8 de janeiro de 2013.
- GONZÁLEZ J. S.; RODRIGUEZ A. G. G.; MORA J. C.; SANTOS J. R.; PAYAN M. B.. **Optimization of Wind farm turbines layout using na evolutive algorithm**. Em: Renewable Energy 35, 2010.
- GONZÁLEZ-LONGATT, F.; WALL, P.; TERZIJA, V.. **Wake effect in wind farm performance: Steady-state and behavior**. Em: Renewable Energy 39, 2012.
- GRADY, S. A.; HUSSAINI, M. Y.; ABDULLAH, M.M., **Placement of Wind Turbines Using Genetic Algorithms**. Em: Renewable Energy 30, 2005
- GWEC, 2012. Disponível em:
<http://www.gwec.net/fileadmin/documents/Publications/Brazil_report_2011.pdf>. Acesso em: 11 de novembro de 2012.
- GARRAD HASSAN, **WindFarmer Theory Manual**. GL Garrad Hassan, 2011.
- GARRAD HASSAN, 2012. Disponível em: <<http://www.gl-arradhassan.com/en/index.php>>. Acesso em: 23 de novembro de 2012.
- HK RE NET, 2013. Disponível em: <http://re.emsd.gov.hk/english/wind/large/large_rp.html>. Acesso em: 16 de janeiro de 2013.
- JENSEN, N.O.. **A Note on Wind Generator Interaction**; 1983. p. 5.
- KOCH F., GRESCH M.; SHEWAREGA F.; ERLICH I., BACHMANN U.. **Consideration of wind farm wake effect in Power system dynamic simulation**. Em: Power tech, 2005 IEEE Russia; 2005. p.1-7.

LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. F., **Introdução aos algoritmos genéticos**. Em: Galvão, C.O.; Valença, M.J.S.. (Org.). *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS : Associação Brasileira de Recursos Hídricos., 1999, v. , p. 99-150.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2012. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/buscaresult.html?action=search&query=proinfra&index=indice_mme&searchPage=5&fields=content>. Acesso em: 17 de setembro de 2012.

MOSETTI, G.; POLONI, C.; DIVIACCO, B., **Optimization of Wind Turbine Positioning in Large Windfarms by Means of a Genetic Algorithm**. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 51, 1994.

MOSKALENKO, N.; RUDION, K.; ORTHS, A.. **Study of Wake Effects for Offshore Wind Farm Planning**, 2010.

NORDEX, 2012. Modificado de <www.nordex-online.com>. Acesso em: 18 de Maio de 2012.

NPTTEL, 2012. Disponível em:< http://www.nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIScBANG/OPTIMIZATION%20METHODS/pdf/Module_1/M1L1_LN.pdf> Acesso em: 27 de novembro de 2012.

BERG, M. B. A. M.; GONCALVES, G. S.; ANFLOR, C. T. M.. **Otimização topológica em engrenagens utilizando algoritmo genético**. Em: VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012, São Luís - Maranhão. Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012.

PIRES, A. M., **MICROSITING de Parques Eólicos**, Megajoule, 2012.

REENERGY Brasil, ano 1, 6ª ed., 2011.

SARAMAGO, S. F. P.; OLIVEIRA, G. T. S., **Estratégias de Evolução Diferencial Aplicadas a Problemas de Otimização Restritos**. Em: 15º POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFU, 2005.

SILVA, E.C.N. **Otimização Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos**. USP, 2010.

SPPIBLOG, 2012. Retirado de: <<http://sppiblog.org/tag/wind-energy>>. Acesso em: 18 de Agosto de 2012.

WEISE, T., 2009, “**Global Optimization Algorithms – Theory and Application –**”, 2nd Edition, <http://www.it-weise.de>.

ZHANG, X. Y.; WANG, W. Q.. **Wind farm and wake effect modeling for simulation of a studied power system**. Em: 2009 IEEE/PES power systems conference and exposition.

ANEXOS

Código Algoritmo Preliminar:

```
%%--Algoritmo Primário (para 2 AEG)--%%

clc
clf
clear all
close all

V0=10.3;           %Velocidade de entrada [m/s]
D=48;             %Diâmetro do rotor [m]
X1=500;          %Coordenada x do aeg1 em relação ao aeg0 [m]
%Y1=0;          %Coordenada y do aeg1 em relação ao aeg0 [m]
lim=100;         %Limite de variação da posição [m]

V112=[1  0  0;
      2  0  0;
      3 26  0.897;
      4 132 0.819;
      5 302 0.807;
      6 554 0.805;
      7 907 0.798;
      8 1375 0.788;
      9 1955 0.771;
     10 2572 0.705;
     11 2984 0.56;
     12 3065 0.406;
     13 3075 0.307;
     14 3075 0.24;
     15 3075 0.193;
     16 3075 0.159;
     17 3075 0.132;
     18 3075 0.112;
     19 3075 0.096;
     20 3075 0.083;
     21 3075 0.072;
     22 3075 0.064;
     23 3075 0.056;
     24 3075 0.05;
     25 3075 0.045;
     26 0  0;
     27 0  0;
     28 0  0;
     29 0  0;
     30 0  0];

V00 = V112(:,1);
Pott = V112(:,2);
Ctt = V112(:,3);

%%--Cálculo da Constante de Perda (Kp)

h=100;           %Altura do rotor [m]
```

```

z0=0.0002; %rugosidade do terreno

Kp=0.5/(log(h/z0));

%%--Cálculo do diâmetro da esteira (De) [m]

De=D+2*Kp*X1;

%%--Cálculo do coeficiente de empuxo (Ct)

Ct=interp1(V00,Ctt,V0);

%%--Cálculo da velocidade do vento na esteira (Ve) [m/s]

Ve=V0*(1-(1-(sqrt(1-Ct)))*(D/(D+2*Kp*X1))^2);

%%--Cálculo da área sombreada

R=De/2;
r=D/2;
gammaRR=[];
gammarr=[];

Aww=[];
Y11=[];

for Y1 = -lim:lim;
    if Y1>0

        Y11=[Y11;Y1];

        if Y1<=R-r;
            Aw=pi*(r^2);
            gamaR=0;
            gamar=0;
        elseif ((Y1>R-r) && (Y1<R+r))
            gamaR=acos(((R^2)+(Y1^2)-(r^2))/(2*Y1*R));
            gamar=pi-acos(((R^2)-(Y1^2)-(r^2))/(2*Y1*r));
            Aw=((R^2)*(gamaR-(sin(2*gamaR)/2)))+((r^2)*(gamar-
((sin(2*gamar)/2))));

            elseif Y1>=R+r;
                Aw=0;
                gamaR=0;
                gamar=0;
            end
            gammaRR=[gammaRR;gamaR];
            gammarr=[gammarr;gamar];
            Aww=[Aww;Aw];
        end

        if Y1<0
            Y11=[Y11;Y1];
            if abs(Y1)<=R-r;
                Aw=pi*(r^2);
                gamaR=0;
                gamar=0;
            elseif ((abs(Y1)>R-r) && (abs(Y1)<R+r))

```

```

    gamaR=acos(((R^2)-(Y1^2)-(r^2))/(2*Y1*r));
    Aw=((R^2)*(gamaR-(sin(2*gamaR)/2)))+((r^2)*(gamaR-
((sin(2*gamaR)/2))));

    elseif abs(Y1)>=R+r;
        Aw=0;
        gamaR=0;
        gamaR=0;
    end
    gammaRR=[gammaRR;gamaR];
    gammarr=[gammarr;gamaR];
    Aww=[Aww;Aw];
end

end

%%--Cálculo da produção energética

Vq=((Ve*Aww)+(V0*((pi*(r^2))-Aww))/(pi*(r^2)); %Velocidade equivalente
[m/s]

Pot=interp1(V00, Pott,Vq); %Produção energética [kW]

figure(1);
plot(Y11,Aww)
title('Aw vs Posição Y');
axis([-100 100 0 2000]);
xlabel('Posição Y[m]');
ylabel('Aw [m²]');

figure(2);
plot(Y11,Pot)
title('Produção vs Posição X');
axis([-100 100 1900 2800]);
xlabel('Posição X[m]');
ylabel('Produção [kWh]');

```

Código ACP:

```
%%--Algoritmo de Cálculo da Produção (ACP)--%%

clc
clear all
close all

%%--ENTRADA de dados do AEG--%%

curva_aeg = input('Nome do arquivo .txt com dados do AEG: ','s');

filn=curva_aeg;
fid=fopen(filn,'r');

for i=2:1

    [gb]=fscanf(fid,'%s65');
end

clear gb;

[aux]=fscanf(fid,'%f %f %f ',[3 inf]);

curva = aux';

V00 = curva(:,1);
Pott = curva(:,2);
Pot_max = curva(20,2);
Ctt = curva(:,3);

r=20;
h=60;
d=2*r;
A0=pi*(r^2);

%%--ENTRADA de dados do terreno--%%

terreno = input('Nome do arquivo .txt com dados do terreno: ','s');

filn=terreno;
fid=fopen(filn,'r');

for i=2:1
    [gb]=fscanf(fid,'%s65');
End

clear gb;

[aux2]=fscanf(fid,'%f %f %f ',[3 inf]);

limx = aux2(1,1);
limy = aux2(1,2);

V0 = aux2(2,1);
z0 = aux2(3,1);
```

```

%%--Matriz posição--%%

matriz=[1 1 1 1 1 0 0 1 1 0;
        0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;
        0 0 0 0 0 1 0 0 0 1;
        1 0 1 0 0 0 0 0 0 0;
        0 0 0 0 1 0 0 1 0 0;
        0 0 0 0 0 0 1 0 0 1;
        0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
        0 1 0 1 0 0 0 0 0 0;
        0 0 0 0 0 0 0 1 1 0;
        1 0 1 0 1 1 1 0 0 1];

nlin=length(matriz);
ncol=length(matriz);

k=0;

for i =1:nlin
    for j=1:ncol
        if matriz(i,j)==1;
            k=k+1;
            coordx(k)=limx/ncol*j;
            coordy(k)=limy/nlin*i;
        end
    end
end

coord=[coordx',coordy'];
gammaRR=[];

%(coord(i,2)-coord(j,2)) distancia axial
%(coord(i,1)-coord(j,1)) distancia radial

for i=2:k
    for j=1:i-1
        if (coord(i,1)-coord(j,1))>=0 %AEG a esquerda da esteira

            R(i,j)=(r+((0.5/(log(h/z0)))*(coord(i,2)-coord(j,2))))*2;

            if (coord(i,1)-coord(j,1))<=R(i,j)-r; %Compl. sombreado

                AS(i,j)=pi*(r^2);
                D(i,j)=abs(coord(i,1)-coord(j,1));

            elseif (abs(coord(i,1)-coord(j,1))>R(i,j)-r) &&
                (abs(coord(i,1)-coord(j,1))<R(i,j)+r) % Parcialmente sombreado

                %i: AEG provocando esteira
                %j: AEG sombreado

                D(i,j)=abs(coord(i,1)-coord(j,1));

                teta=acos(((r^2)+(D(i,j)^2)-(R(i,j)^2))/(2*D(i,j)*r));
                beta=acos(((R(i,j)^2)+(D(i,j)^2)-(r^2))/(2*D(i,j)*R(i,j)));

                AS(i,j)=((r^2)*(teta-
                (sin(teta)*cos(teta))))+(R(i,j)^2)*(beta-(sin(beta)*cos(beta))));

```

```

elseif (coord(i,1)-coord(j,1))>=R(i,j)+r
    AS(i,j)=0;

    D(i,j)=abs(coord(i,1)-coord(j,1));
end

end

if (coord(i,1)-coord(j,1))<0           % AEG a direita da esteira

    R(i,j)=(r+((0.5/(log(h/z0)))*(coord(i,2)-coord(j,2))))*2;

    if abs(coord(i,1)-coord(j,1))<=R(i,j)-r; % Compl. sombreado

        AS(i,j)=pi*(r^2);

        D(i,j)=abs(coord(i,1)-coord(j,1));

        elseif (abs(coord(i,1)-coord(j,1))>R(i,j)-r) &&
(abs(coord(i,1)-coord(j,1))<R(i,j)+r)   % Parcialmente sombreado

            %i: AEG provocando esteira
            %j: AEG sombreado

            D(i,j)= abs(coord(i,1)-coord(j,1));
            alfa=acos(((R(i,j)^2)+(D(i,j)^2)-(r^2))/(2*D(i,j)*R(i,j)));

            gama=acos(((r^2)+(D(i,j)^2)-(R(i,j)^2))/(2*D(i,j)*r));

            AS(i,j)=((R(i,j)^2)*(alfa-
(sin(alfa)*cos(alfa))))+((r^2)*(gama-(sin(gama)*cos(gama)))));

            elseif abs((coord(i,1)-coord(j,1)))>=R(i,j)+r

                AS(i,j)=0;
                D(i,j)=abs(coord(i,1)-coord(j,1));
            end
        end

end

if (coord(i,2)-coord(j,2))==0           %AEG na mesma linha
    AS(i,j)=0;

end

end

end

for i=1:k

    Ct1(i) = 0.7;
    oldct(i) = 0.1;
    novoct(i) = 0.8;
end
x=AS;

for i=2:k
    for j=1:i-1

        if x(i,j)== A0;

```

```

    x(i,j)== 1;
    end

    z(i,j) = (x(i,j)/(2*R(i,j)^2));
    z1(j)=sum(z(:,j));
    cr(j)=1-(sqrt(1-Ct1(j)));

V(j)=V0*(1-(cr(j)*(d^2)/A0)*z1(j));

ct2(j) = interp1(V00,Ctt,V(j));

%%--Calculo do Ct--%%

    while abs(novoct(j) - oldct(j)) > 0.001

        oldct(j) = Ct1(j);

        Ct1(j) = ct2(j);
        cr(j)=1-(sqrt(1-Ct1(j)));

        V(j)=V0*(1-(cr(j)*(d^2)/A0)*z1(j));

        ct2(j) = interp1(V00,Ctt,V(j));
        novoct(j) = ct2(j);

    end
end
end

V(k)=V0;

for j=1:k

    Pot(j)=interp1(V00, Pott,V(j));
    Prod(j)=(Pot(j));

end

k

%%--Calculo da Produção, ef e FC--%%

Prod_parque=sum(Prod(1,:))

Pot_ideal=interp1(V00, Pott,V0);

ef = 100*Prod_parque/(k*(Pot_ideal));

FC = 100*Prod_parque/(k*(Pot_max))

%%--Visualizacao da matriz posicao--%%

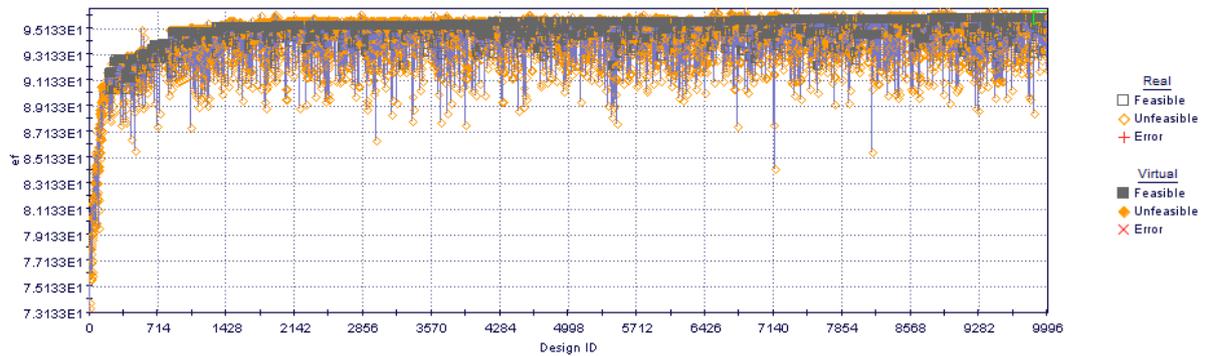
mat = matriz;
[r,c] = size(mat);
imagesc((1:c)+0.5, (1:r)+0.5,mat);
colormap(gray);
axis equal

```

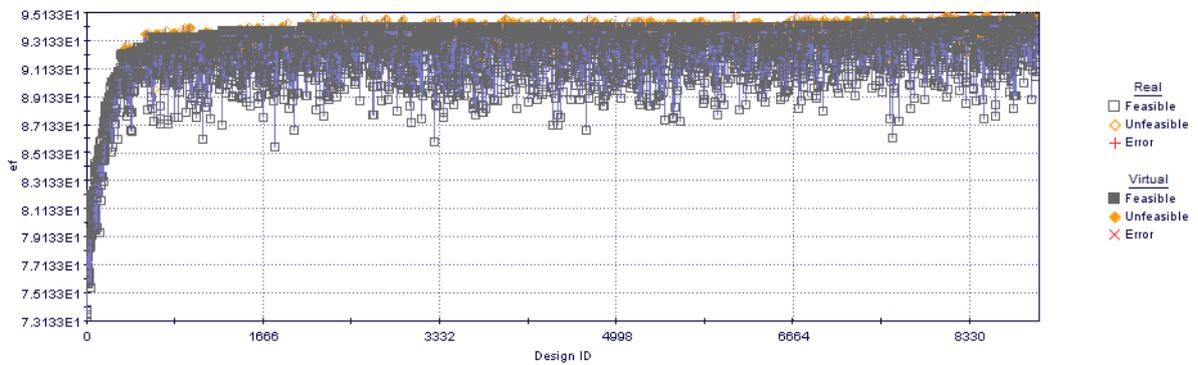
```
set(gca, 'XTick', 1:(c+1), 'YTick', 1:(r+1), ...  
        'XLim', [1 c+1], 'YLim', [1 r+1], ...  
        'GridLineStyle', '-', 'XGrid', 'on', 'YGrid', 'on');  
  
%%--Arquivo txt para avaliação no ACOP--%%  
  
save parqueeol.txt ef Prod_parque k -ascii
```

Históricos gerados a partir das otimizações realizadas:

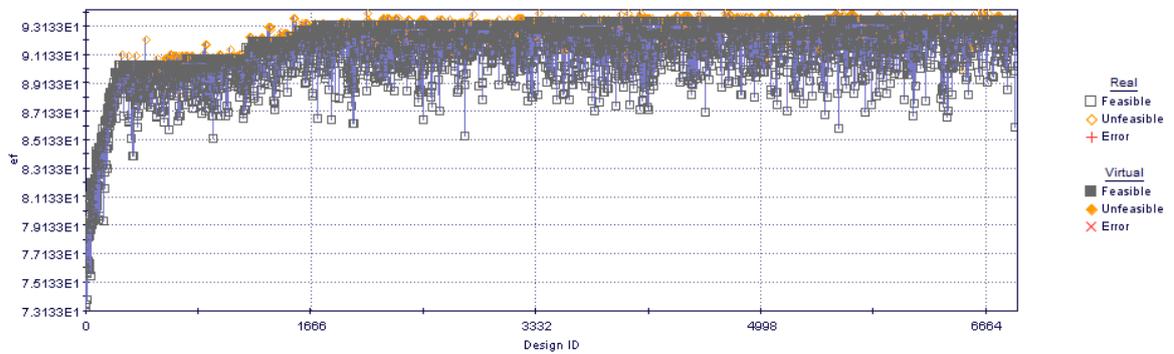
Otimização no ACOP para comparação com Mosetti et al.:



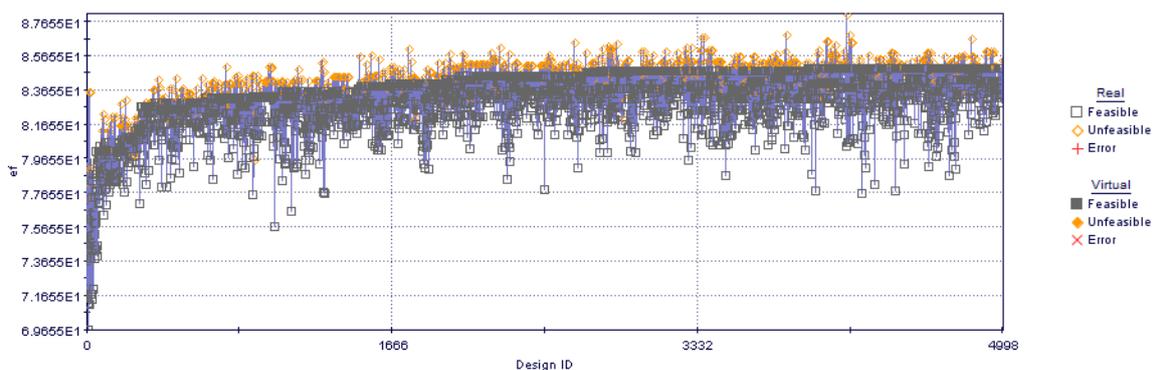
Otimização no ACOP para comparação com Grady et al.:



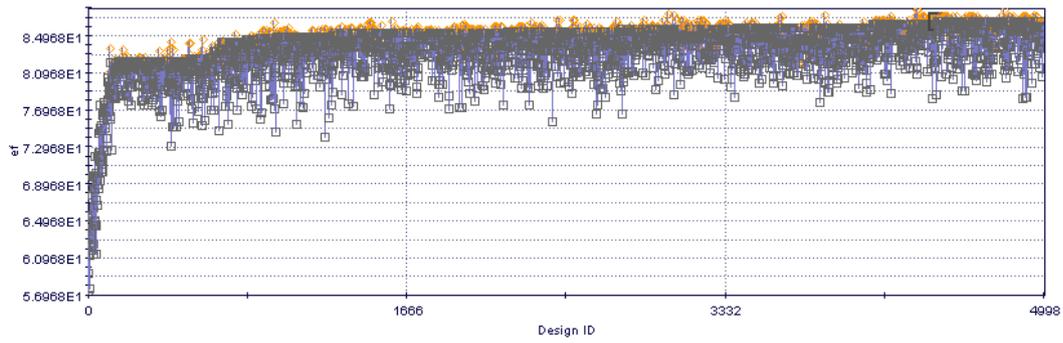
Otimização no ACOP para comparação com Marmidis:



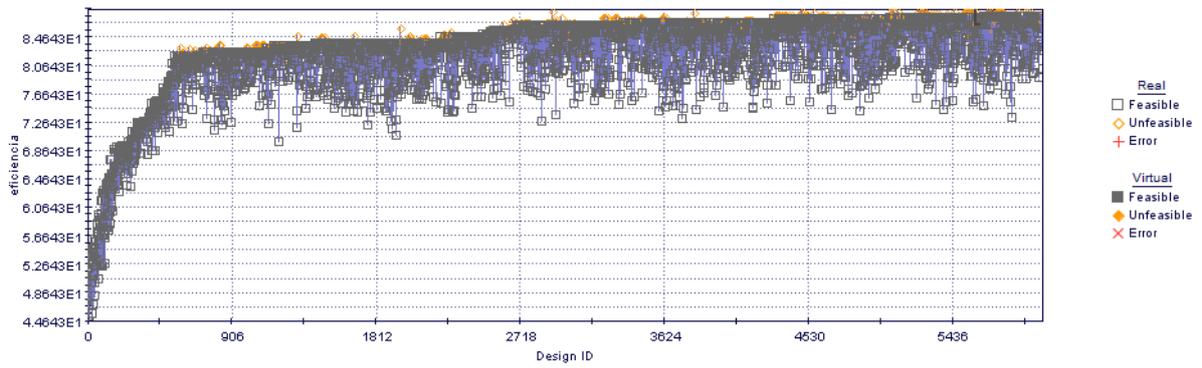
Otimização no ACOP em matriz 8X8 para comparação com WindFarmer:



Otimização no ACOP em matriz 10X10 para comparação com WindFarmer:

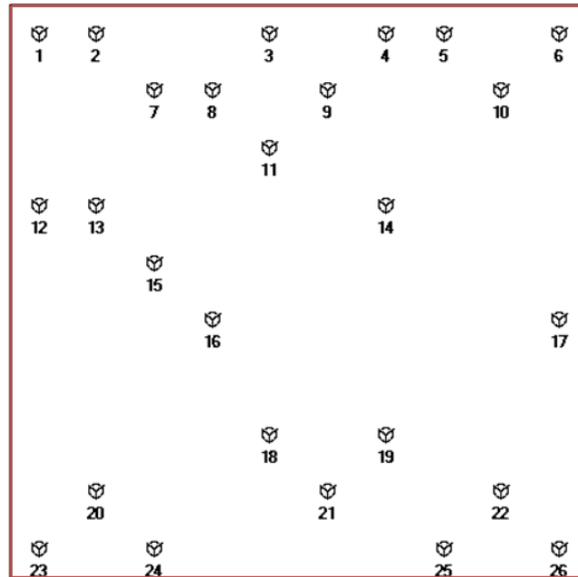


Otimização no ACOP em matriz 12X12 para comparação com WindFarmer:

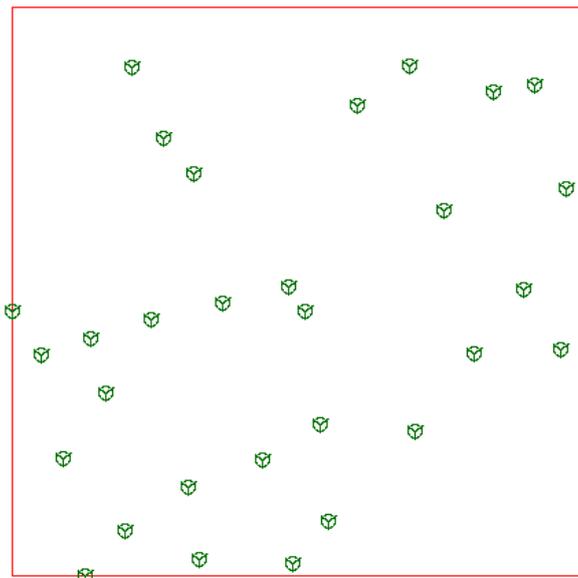


Configurações WindFarmer:

Configuração proposta por Mosetti et al. inserida no software WindFarmer:



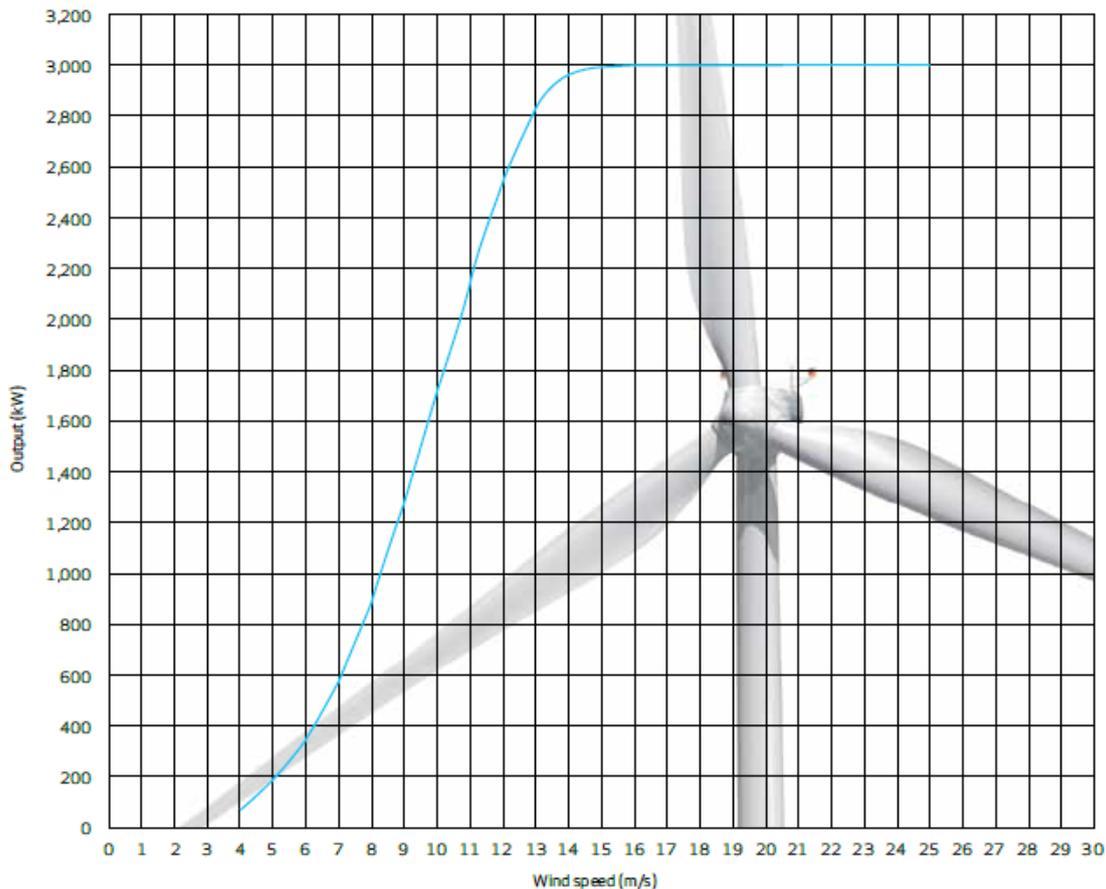
Configuração obtida na otimização realizada no software WindFarmer para comparação com ACOP:



Curva de potência do aerogerador Vestas modelo V90 – 3,0 MW

POWER CURVE FOR V90-3.0 MW

Noise reduced sound power modes are available



Curva do C_T para o aerogerador Vestas modelo V90 – 3,0 MW

