

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE NUMÉRICA DA DISPOSIÇÃO DE AEROGERADORES PRÓXIMOS
ESTUDO DE CASO SEGUNDO A TEORIA CONSTRUCTAL

por

Jefferson Küchle

Dissertação para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Julho de 2016

ANÁLISE NUMÉRICA DA DISPOSIÇÃO DE AEROGERADORES PRÓXIMOS
ESTUDO DE CASO SEGUNDO A TEORIA CONSTRUCTAL

por

Jefferson Küchle
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia.

Área da Concentração: Energia.

Orientadora: Prof. Dr^a. Adriane Prisco Petry

Aprovado por:

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Prof. Dr^a. Jussara Maria Leite Mattuella

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler - UFRGS

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 24 de Julho de 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, eixo central de todo desenvolvimento;
à minha orientadora, Prof. Dr^a. Adriane Petry, sempre disposta a ajudar e orientar;
ao Prof. Dr. Luiz Alberto Rocha pelos diversos momentos de aprendizado;
aos colegas de trabalho, da UFRGS e amigos que me incentivaram;
à Empresa TMSA, em especial ao Eng. Irani Sandi.

“Os problemas significativos que enfrentamos não podem ser resolvidos
no mesmo nível de pensamento em que estávamos quando os criamos.”

Albert Einstein

RESUMO

Turbinas eólicas usualmente são agrupadas em grandes parques, reduzindo o custo de instalação, transmissão da energia e manutenção periódica. A superposição das esteiras sobre turbinas adjacentes normalmente reduz consideravelmente a capacidade total, objeto de estudo de *Micrositing*. Porém, por vezes o “efeito Venturi” ocasionado pelas turbinas à montante induz maior velocidade às turbinas adjacentes aumentando o potencial eólico disponível nas linhas consecutivas. De forma inovadora empregar o Design Constructal de Bejan, o modelo do disco atuador genérico e a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para obter a melhor disposição geométrica das turbinas em uma área plana e não rugosa, com foco à maior potência extraída por área de turbinas instaladas. Para tal, modelar e prever o comportamento da esteira é fundamental, assim como conhecer os modelos de esteira e a aplicabilidade dos métodos empregados. O Design Constructal é a fonte dos parâmetros geométricos base das simulações: o espaçamento entre as turbinas e as razões de diâmetros. Após 64 simulações semi-iterativas e mais de 60 iterativas verifica-se que o maior ganho em potência disponível por área é de 7,37% para a configuração $V = 7\text{m/s}$, $S = 3D$, $d/D = 0.5$, $L = 3D$ e 8,48% para a configuração $V = 11\text{m/s}$, $S = 3D$; $d/D = 0.25 \& 0.5$, $L = 0.75D$, valor relativo à execução de somente um diâmetro de 100 metros.

Palavras-chave: Energia Eólica; Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD); Disco Atuador; Micrositing; Teoria Constructal.

ABSTRACT

Usually wind turbines are grouped in large parks, reducing the cost of installation, energy transmission and periodic maintenance. But the overlapping of the aerodynamical wakes on adjacent turbines reduces the total capacity, Micrositing study. However, the "Venturi effect" caused by the turbines upstream sometimes increases the speed to the adjacent turbines increasing the wind potential available in straight lines. Innovatively employing the Design Constructal Bejan, the model of the actuator disc and Computational Fluid Dynamics (CFD) to search the best geometrical layout of the turbines on a roughless and flat area, focus on higher power extracted by area. To do this, model and predict the wake of behavior is fundamental, as well as know the aerodynamical wakes models and the applicability of the methods employed. The Design Constructal is the source of the simulation's parameters: spacing between the turbines and the diameter's ratio. After concluded 64 semi-iterative and iterative simulations, and more than 60 verifies, the best gain in available power per area is 7.37% for the configuration $V = 7 \text{ m/s}$; $S = 3d$; $d/D = 0.5$; $L = 3D$. And the gain of 8.48% for the configuration $V = 11\text{m/s}$, $s = 3D$; $d/D = 0.25 \text{ \& } 0.50$; $L = 0.75D$, comparing to the implementation of just 100 meters diameter.

Keywords: Wind Energy; Computational Fluid Dynamics (CFD); Actuator Disc Theory; Micrositing; Constructal Theory.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	A Energia eólica.....	4
3.2	A Esteira Aerodinâmica	7
3.3	A otimização de parques eólicos – Micrositing.....	9
3.4	O modelo do disco atuador genérico.....	13
3.5	A Teoria Constructal.....	18
4	METODOLOGIA DE ANÁLISE.....	22
4.1	Emprego da Dinâmica dos Fluidos Computacional - CFD	22
4.1.1	Modelo de turbulência $k-\varepsilon$	23
4.1.2	Definição do Domínio e Condições de Contorno	25
4.2	O Design Constructal	26
4.3	Metodologias de resolução de esteiras	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
5.1	Qualidade da malha.....	33
5.2	Cálculo semi-iterativo $V = 7$ m/s	36
5.2.1	Espaçamento entre turbinas de $S = 3$ D.....	36
5.2.2	Espaçamento entre turbinas de $S = 5$ D.....	41
5.3	Cálculo semi-iterativo $V = 11$ m/s	45
5.3.1	Espaçamento entre turbinas de $S = 3$ D.....	45
5.3.2	Espaçamento entre turbinas de $S = 5$ D.....	49
5.4	Cálculo totalmente iterativo $V = 11$ m/s.....	53
6	CONCLUSÕES.....	56
7	TRABALHOS FUTUROS.....	58
	REFERÊNCIAS.....	60
	ANEXO A.....	64
A.1	Curvas características	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	a) Moinho grego atual; b) projeto original do século I d.C	4
Figura 3.2	Turbina eólica atual: a) turbina eólica de eixo horizontal b) Nacele em vista de corte e principais componentes	5
Figura 3.3	Conversão eólica: comportamento da velocidade axial e pressão.	8
Figura 3.4	Vórtices provenientes da conversão eólica: ponta de pá, perfil e cubo.	8
Figura 3.5	Vórtices e estruturas turbulentas provenientes da conversão eólica;	9
Figura 3.6	Distribuição das turbinas eólicas no Distrito de Zaan, Holanda, ano 1731 d.C.....	10
Figura 3.7	Parque eólico densamente ocupado em Palm Springs, Califórnia, EUA. ...	11
Figura 3.8	A eficiência das turbinas e o Limite de Betz.....	13
Figura 3.9	O Disco Atuador -tubo de corrente que delimita o escoamento.	14
Figura 3.10	Faixa de aplicabilidade do método do elemento de pá e disco atuador.....	17
Figura 3.11	Os escoamentos apresentam características similares,	19
Figura 3.12	Níveis de complexidade encontrados na natureza.....	21
Figura 4.1	Orientação das turbinas, graus de liberdade e restrições.	27
Figura 4.2	Simulação com os parâmetros $S = 3D$; $d/D = 0.5$; $L = 2D$	29
Figura 5.1	a) Comparação de [Castellani, 2009]; b) obtidos numericamente CFD.....	34
Figura 5.2	Influência da malha na velocidade obtida em três turbinas.	35
Figura 5.3	Discretização espacial, refinamento maior nas turbinas e esteiras.....	36
Figura 5.4	Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.25$	37
Figura 5.5	Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.50$	37
Figura 5.6	Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.75$	38
Figura 5.7	Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 1.0$	39
Figura 5.8	Potência por área total de aerogeradores instalados [kW/m]	40
Figura 5.9	Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 0.25$	41
Figura 5.10	Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 0.5$	42
Figura 5.11	Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 0.75$	42
Figura 5.12	Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 1.0$	43
Figura 5.13	Potência por área total de aerogeradores instalados [kW/m]	44
Figura 5.14	Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.25$	45

Figura 5.15	Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.5$	46
Figura 5.16	Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.75$	46
Figura 5.17	Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 1.0$	47
Figura 5.18	Potência por área total de aerogeradores instalados [kW/m]	48
Figura 5.19	Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 0.25$	49
Figura 5.20	Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 0.5$	49
Figura 5.21	Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 0.75$	50
Figura 5.22	Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 1.0$	51
Figura 5.23	Potência por área total de aerogeradores instalados [kW/m]	52
Figura 5.24	Resultado iterativo da potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.25$	53
Figura 5.25	Resultado iterativo da potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.5$	54
Figura 5.26	Resultado iterativo da potência por área total de aerogeradores instalados [kW/m]em função da distância da segunda fileira L/D ; $S = 3D$; $V = 11\text{m/s}$	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Parâmetros da Teoria Constructal.....	21
Tabela 4.1	Parâmetros para as disposições das turbinas eólicas nas análises CFD.	28
Tabela 5.1	Malha Velocidades médias pelo número de elementos e tempo de simulação	34
Tabela 6.1	Os melhores resultados em potência disponível por área – $V = 7$ m/s	56
Tabela 6.2	Os melhores resultados em potência disponível por área – $V = 11$ m/s	56
Tabela A.1	Curvas características (3,5 MW; 2MW, 800kW e 330kW).....	64

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BEN	Balanço Energético Nacional
BEM	Modelagem do Disco Atuador
CFD	Mecânica dos Fluidos Computacional
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachusetts
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PIB	Produto Interno Bruto
PROMECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RANS	Equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

a	Fator de indução axial	
a_{i-1}	Coeficiente de indução axial inicial	
a_i	Coeficiente de indução axial na iteração	
A_R	Área varrido pelo rotor em movimento	[m ²]
A_∞	Área no escoamento livre	[m ²]
A_w	Área na esteira da turbina	[m ²]
$C_{\varepsilon 1}; C_{\varepsilon 2}; C_\mu; \sigma_k$	Constantes da equação de transporte da turbulência	
C_p	Coeficiente de potência da turbina	
C_T	Coeficiente de torque da turbina	
d	Diâmetro da turbina menor	[m]
D	Diâmetro da turbina maior	[m]
E	Força de empuxo	[N]
E_i	Força de empuxo no intervalo de tempo	[N]
f	Forças de campo	[N]
\tilde{I}	Matriz identidade unitária	
K	Quantidade de movimento na turbina	[kg.m/s ²]
L	Distancia longitudinal entre turbinas	[m]
\dot{m}	Vazão mássica na turbina	[kg/s]
n	Número de Ramificações	
p'	Pressão decomposta	[Pa]
p_d	Pressão estática à jusante do disco atuador	[Pa]
P_e	Potência média extraída	[W]
P_{dis}	Potência disponível no escoamento	[W]
P_m	Potência extraída	[W]
P_k	Produção de k	[m ² /s ³]
P_S	Diferença de pressão da conversão eólica	[Pa]
P_{Total}	Potência Total de todas as turbinas	[W]
p_u	Pressão estática à montante do disco atuador	[Pa]

p_{∞}	Pressão estática do escoamento livre	[Pa]
Res	Resíduo das iterações de velocidade no disco atuador	
S	Espaçamento lateral entre turbinas	[m]
U	Vetor velocidade	[m/s]
Vd_i	Velocidade média dentro do disco atuador na iteração	[m/s]
Vd_{i-1}	Velocidade média inicial dentro do disco atuador	[m/s]
V_{dom}	Velocidade de entrada imposta no domínio	[m/s]
V_{∞}	Velocidade do escoamento livre	[m/s]
V_R	Velocidade no plano do rotor	[m/s]
$V_{\infty i}$	Velocidade média inicial do escoamento livre	[m/s]
V_w	Velocidade na esteira da turbina	[m/s]

Letras Gregas

ε	Taxa da energia cinética dissipada	
ρ	Massa específica do ar	[kg/m ³]
k	Constante de Von Karman	
μ	Viscosidade dinâmica	[kg.m/s]
μ_{ef}	Viscosidade dinâmica efetiva	[kg.m/s]
μ_t	Viscosidade dinâmica turbulenta	[kg.m/s]

1 INTRODUÇÃO

Dentro do cenário econômico mundial, a demanda energética cresce sob curvas exponenciais. No Brasil está evidente uma demanda energética em maior taxa de crescimento que o Produto Interno Bruto (PIB), sendo que atualmente figuramos dentre as maiores economias mundiais. O departamento de pesquisa energética do Ministério de Minas e Energia elabora anualmente o Balanço Energético Nacional (BEN). O BEN é o resultado de extensa pesquisa, constituindo-se em uma base de dados ampla e sistematizada aglutinada em ciclos anuais. De suma importância no planejamento energético, o BEN tem se mostrado um importante instrumento para projeções de estudos energéticos, na medida em que apresenta dados estatísticos confiáveis da oferta e do consumo de energia no país. As fontes de energia sustentáveis atualmente contribuem com a mais importante parcela da matriz energética elétrica nacional. Comparando com os percentuais mundiais o Brasil apresenta 74% de sua matriz energética elétrica composta por fontes sustentáveis contra 21% no mundo, uma posição de destaque. Os 74%, estão divididos majoritariamente por hidráulica 65% e biomassa de cana 7%; eólica constitui 2% das sustentáveis. A capacidade eólica instalada que atingiu 2.207 MW em 2013, mais que duplicou em 2014; são 4.903 MW instalados, aumento de 122% somente no ano [BEN, 2014].

Assim a construção de grandes parques eólicos em regiões costeiras brasileiras é um prognóstico assertivo, tomando-se por base os parques já existentes e em construção principalmente na Europa. Parques eólicos agrupam as turbinas reduzindo os custos de instalação, manutenção e operacionais. Porém se mal dimensionados podem alcançar menor capacidade anual, por efeito da superposição de turbinas [Custódio, 2002].

Modelos numéricos que possam prever os efeitos de esteira, e em conjunto com o Design Constructal [Bejan, 2013] maximizar a potência extraída de um grande parque eólico são foco de estudo do presente trabalho. A Teoria Constructal de Adrian Bejan demonstra que a evolução se desenvolve no sentido a maximizar os acessos e reduzir o salto energético. Assim os ganhos podem ser maximizados quando as restrições e imperfeições são distribuídas uniformemente. Analisando a extração de potência eólica sob esta perspectiva, busca-se a maximização dos acessos, na forma de aumento da potência eólica por área total de geradores instalados, seguindo na direção da crescente demanda mundial por energias limpas a custos competitivos.

2 OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Desenvolver a simulação numérica de um conjunto de turbinas eólicas próximas dispostas em um terreno plano e pouco rugoso utilizando a metodologia Navier-Stokes RANS e a abordagem do rotor via modelo matemático do disco atuador genérico. Conceber um trabalho com alto índice de inovação utilizando-se da ferramenta Design Constructal, proveniente da Teoria Constructal de Adrian Bejan, para otimizar a disposição das turbinas e obter a maior potência extraída por área total de aerogeradores instalados.

Como objetivo secundário desenvolver uma metodologia de cálculo totalmente iterativa da esteira via disco atuador genérico iterativo, que modele o comportamento da turbina atuando e recebendo influência das demais máquinas próximas quando inserida no escoamento perturbado.

No primeiro capítulo está uma breve introdução da participação eólica no cenário energético brasileiro, assim como as oportunidades de crescimento frente às perspectivas de demanda em um futuro próximo. Dentro deste âmbito a importância dos parques eólicos e sua correta concepção a fim de maximizar a potência extraída por aerogeradores instalados.

O terceiro capítulo apresenta grande carga teórica, fundamentalmente necessária ao desenvolvimento do presente trabalho. Na primeira subseção uma apresentação da energia eólica com as suas principais características físicas e também a utilização dos ventos pela humanidade, desde os primórdios até os tempos atuais. Também relata a alta eficiência das máquinas eólicas atuais. Na segunda subseção a definição da esteira aerodinâmica e sua importância quando analisadas disposições de muitas turbinas eólicas em um terreno, subseção quatro, estudo de *Micrositing* baseado em esteiras aerodinâmicas. Na subseção cinco uma aproximação de esteiras por um modelo matemático, a fim de simplificar a análise dos parques eólicos, o modelo do disco atuador genérico. Na subseção seis apresenta-se a Teoria Constructal e o Design Constructal de Adrian Bejan, fruto de desenvolvimento em diversas áreas do conhecimento humano e que de forma inovadora é utilizado para otimização de *micrositing* neste presente trabalho.

No quarto capítulo está apresentada a metodologia de análise e resolução do campo de velocidades tridimensional em um parque eólico via modelagem do disco atuador genérico e emprego da dinâmica dos fluidos computacional – CFD. Após explica-se a otimização da disposição de aerogeradores via Design Constructal de Adrian Bejan, com variação de

parâmetros pré-definidos. São apresentadas duas metodologias de resolução de esteiras: semi-iterativa e totalmente iterativa como forma de obtenção das esteiras.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos após a aplicação das metodologias de análise previamente discutidas. Primeiramente a qualidade da malha, a discretização espacial do domínio da simulação, sua influência sobre os resultados do disco atuador genérico. Após são discutidos os resultados semi-iterativos para a velocidade de 7 m/s e 11 m/s e todos os demais parâmetros de espaçamento obtidos via Design Constructal; prosseguindo-se para os resultados totalmente iterativos para as mesmas velocidades e parâmetros pré-definidos.

No sexto capítulo estão presentes as conclusões obtidas após as simulações numéricas realizadas com os parâmetros constructais pré-definidos, evidenciando-se os resultados que indicam maior potencial eólico total disponível e as configurações de parâmetros que não trazem vantagem ou são desfavoráveis à disponibilidade eólica total.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Energia eólica

A energia eólica consiste da movimentação das massas de ar da atmosfera terrestre, com origem básica em três fenômenos: a rotação do planeta, o aquecimento não uniforme da superfície pela radiação solar e também a inclinação do eixo de rotação [Custódio, 2002]. Portanto esta é considerada uma fonte renovável e ilimitada de energia baseando-se nestes três fenômenos termo-físicos cíclicos, uma forma de energia abundante e disponível. Plantas e animais se valem das correntes atmosféricas para diferentes fins: a polinização e reprodução, e grandes migrações de aves e insetos em busca de alimento. Diversas espécies de aves e insetos voadores conhecem a sazonalidade dos ventos e se valem das movimentações atmosféricas de forma a cobrir grandes distâncias em curtos períodos de tempo. A humanidade utiliza a força dos ventos nos barcos à vela e moinhos de grãos desde as primeiras civilizações documentadas. A Figura 3.1, abaixo mostra o projeto de um moinho grego e também um moinho atual instalado na Ilha de Santorini - Grécia; cujo projeto original data do século I d.C.

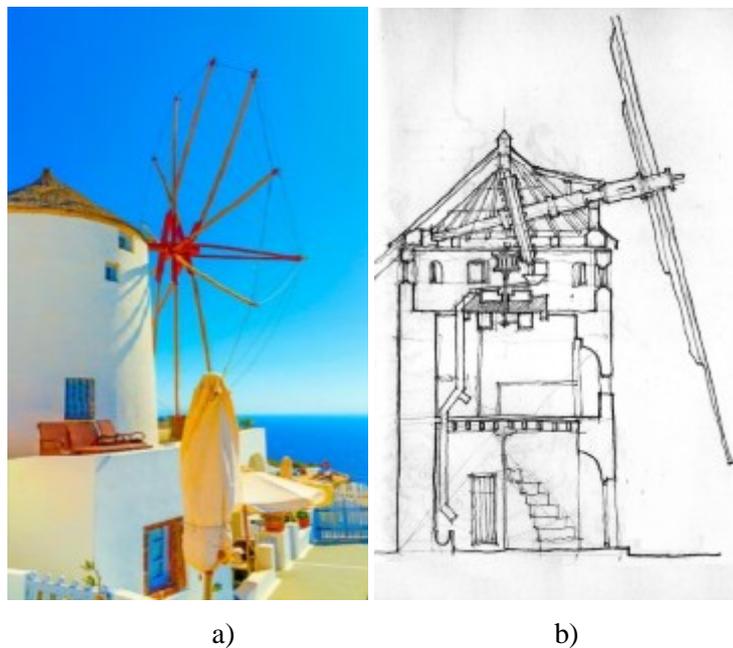


Figura 3.1 – (a) Moinho grego atual; (b) projeto original do século I d.C.

Com o amplo desenvolvimento da eletricidade, o emprego de turbinas eólicas direcionou-se à obtenção de energia elétrica, facilmente transmitida em linhas de alta tensão por longas distâncias. Os atuais aerogeradores são máquinas rotativas de alta eficiência que convertem energia cinética do escoamento em potência de eixo através da rotação das pás aerodinâmicas. A potência mecânica no cubo do rotor é então convertida em eletricidade por um gerador elétrico concatenado. As eficiências alcançadas são muito altas se comparadas a outros processos de transformação de energia [Carcangiu, 2008] cita que as turbinas eólicas podem ser classificadas de acordo com suas características construtivas e de funcionamento. Atualmente existem as turbinas eólicas de eixo horizontal e as de eixo vertical. A Figura 3.2 mostra uma turbina eólica de eixo horizontal (TEEH), máquina foco deste trabalho por ser amplamente empregada, principalmente porque apresenta maior coeficiente de potência, opera em alturas mais elevadas da camada limite atmosférica, onde o vento é mais intenso e uniforme e são mais estáveis mecanicamente, podendo assumir diâmetros maiores e maior capacidade de extração. Na Figura 3.2(b) a nacelle em corte de uma turbina Wobben-Enercon.

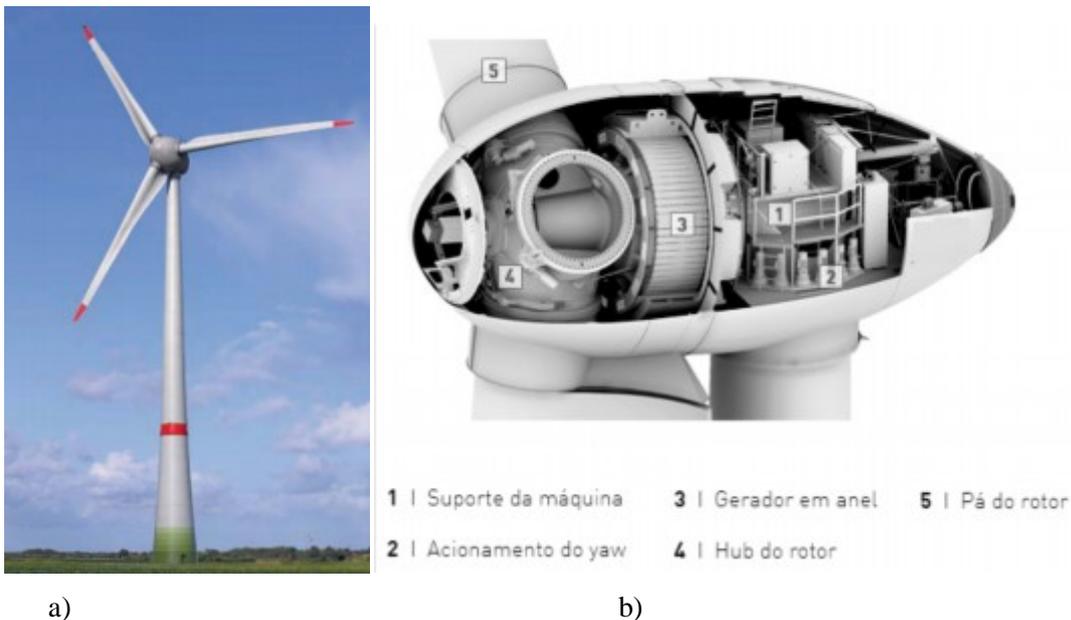


Figura 3.2 – Turbina eólica atual: (a) Turbina eólica de eixo horizontal (b) Nacelle em vista de corte e principais componentes

Fonte: Catálogo Wobben-Enercon 2016.

Uma turbina eólica em funcionamento está submetida à quantidade de movimento da massa de ar que se desloca à velocidade V (m/s) atravessando a seção plana transversal do rotor da turbina A (m^2). Contabilizando a quantidade de movimento em um determinado intervalo de tempo, tem-se a potência total disponível. A potência é proporcional à velocidade do vento ao cubo. Assim o menor incremento de velocidade é elevado ao cubo no cálculo da potência conforme a equação 3.1. O rendimento efetivo da conversão na turbina eólica, chamado de coeficiente de potência depende da velocidade do vento ao cubo e é dado pela equação 3.2. A potência disponível é a potência relativa à velocidade do ar em uma área delimitada pelas pás em movimento. A capacidade de extração, na forma do coeficiente de potência, está relacionada ao tipo de gerador, altura de instalação, e principalmente, à velocidade que a turbina opera [Burton, 2006]. Sabendo que P_m é a potência extraída, o coeficiente de potência está na equação 3.2.

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3 \quad (3.1)$$

$$C_p = \frac{P_m}{P_{dis}} \quad (3.2)$$

Onde ρ é a massa específica do ar e V é a velocidade média no centro do cubo do rotor e P_m a potência convertida em energia rotativa de eixo. [Castro, 2008] cita que a potência eólica não pode ser integralmente convertida em potência de eixo, uma vez que o ar, depois de atravessar o plano das pás tem de sair com velocidade não nula, esta conclusão resulta do limite de Betz. O físico alemão Albert Betz demonstrou em 1919, através da aplicação de conceitos básicos da mecânica de fluídos a existência de um máximo teórico para o rendimento da conversão eólica, cujo valor leva seu nome até atualidade: o chamado Limite de Betz, o qual equivale à razão 16/27 ou 59,3% e indica o rendimento máximo de uma turbina eólica ideal. Turbinas eólicas modernas, do tipo horizontal de três pás, com construção esmerada e baixa rugosidade nas pás operam a rendimentos da ordem de 40% a 50%. Esta eficiência é de valor invejável se compararmos com ciclos térmicos atmosféricos ou ciclos a vapor d'água.

3.2 A Esteira Aerodinâmica

Ao realizar a conversão da energia cinética do ar em energia mecânica rotativa, o aerogerador impõe ao escoamento uma redução na velocidade do escoamento livre, além de rotação ocasionada pelo movimento de giro das pás e o considerável aumento da turbulência no escoamento perturbado. Tais fatores justificam o termo "sombra" utilizado para a esteira e são foco de estudo de diversos grupos de pesquisa teórica e experimental de eólica. Quando uma turbina é instalada na região de influência de outra, a energia extraída será reduzida ao seu menor potencial, devido à velocidade média inferior à original do escoamento [Custódio, 2009]. Além disso, as flutuações de velocidade provenientes da maior intensidade de turbulência provocam um maior desgaste dos componentes mecânicos, com vibrações e forças desbalanceadas, ocasionando fadiga. O posicionamento de uma turbina eólica na esteira de turbulência não é desejável nem recomendada, mas, por vezes ocorre devido às restrições necessárias.

A Figura 3.3 mostra de forma qualitativa o comportamento da pressão e da velocidade em uma linha de escoamento que cruza o plano do rotor. Conforme o escoamento aproxima-se do rotor sua velocidade decai e a pressão aumenta. Ao cruzar o plano gerado pelas pás em rotação a pressão cai abruptamente e a velocidade permanece decaindo suavemente. Na região imediatamente após o rotor há uma recuperação não uniforme na velocidade e pressão [Crespo et al., 2005]. Tal curva é característica de cada turbina e também da sua condição de operação. Após o rotor, a pressão tende a se equilibrar com a pressão atmosférica e ocorre uma recuperação gradual da velocidade. A viscosidade e a turbulência manifestam-se na forma de uma camada de cisalhamento, transferindo quantidade de movimento da região de corrente livre para dentro da esteira aerodinâmica, uniformizando as velocidades dentro e fora da esteira ao longo do tempo.

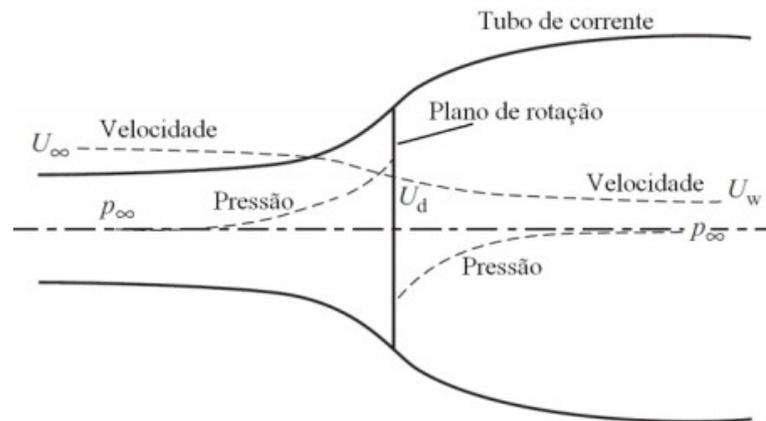


Figura 3.3 - Conversão eólica: comportamento da velocidade axial e pressão.

Adaptado de Burton, 2006.

O escoamento na esteira é recirculante, com um campo de velocidades inflexional [Silveira Neto, 2002]. A esteira apresenta estruturas coerentes, com alto grau de organização local e que guardam geometria bem definida por um tempo superior ao período de giro próprio, e conforme afastam-se da turbina perdem intensidade até desaparecer completamente [Ludwig, 2011]. A Figura 3.4 mostra esquematicamente os principais tipos de vórtices gerados na turbina em operação: vórtices de perfil e ponta de pá; vórtices da nacele e cubo; e ainda existem os não indicados vórtices da torre estrutural vertical adaptado de [Ivanell, 2009]. A Figura 3.5 mostra a evolução e disposição da vorticidade em uma turbina eólica, fruto de simulação CFD realizada pelo Sandia National Laboratories: Energy and Climate Renewables [2016].

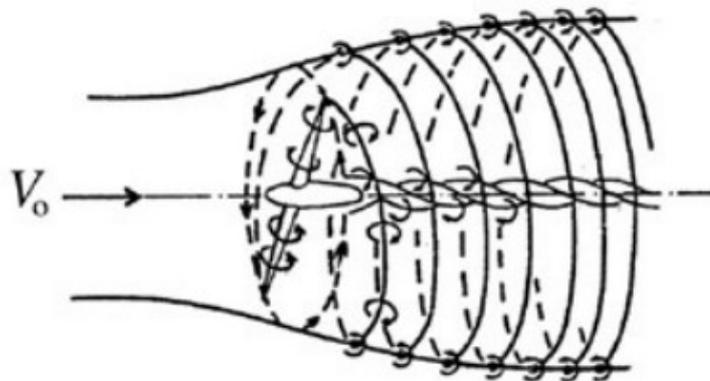


Figura 3.4 - Vórtices provenientes da conversão eólica: ponta de pá, perfil e cubo.

Esquema representativo adaptado [Ivanell, 2009]

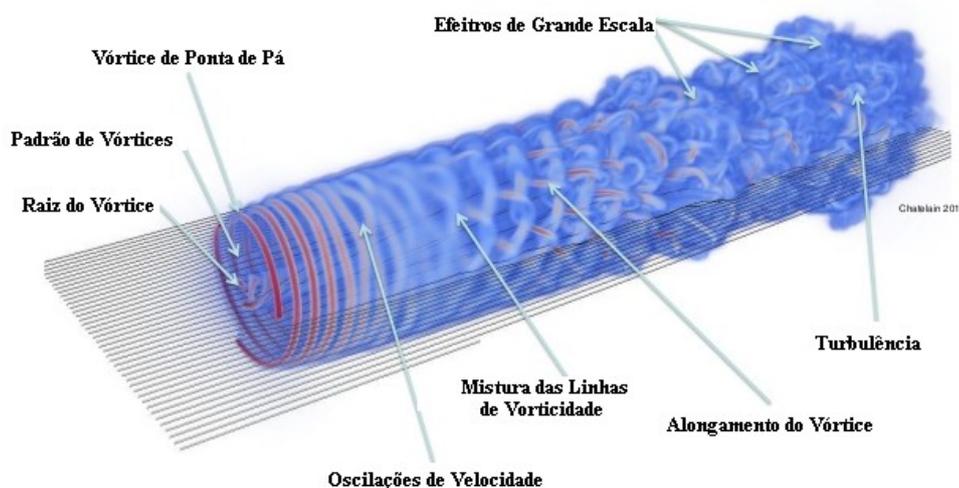


Figura 3.5 - Vórtices e estruturas turbulentas provenientes da conversão eólica;
Adaptado de Sandia National Laboratories: Energy and Climate Renewables [2016].

A fim de melhorar a compreensão e separar as áreas de estudo da esteira aerodinâmica, [Vermer et al,2003] divide a região do escoamento perturbado em esteira próxima e esteira distante; basicamente definidas pela distância do aerogerador. As esteiras possuem características bastante distintas entre si, definindo duas linhas de pesquisa independentes dentro do mesmo tema. Estudos numéricos e experimentais seguem a mesma divisão.

A esteira próxima, que inicia imediatamente após o plano das pás e estende-se até três vezes o diâmetro fornece o desempenho aerodinâmico da turbina, pois aqui estão presentes os maiores gradientes de velocidade e vorticidade, fonte de informação a respeito dos parâmetros de operação, geometria e rendimento aerodinâmico.

E a esteira distante, após três diâmetros de distância possui características predominantemente convectivas e difusivas, que normalmente não fornecem detalhadas informações da operação da turbina e são obtidos apenas parâmetros médios temporais relativos ao aerogerador em funcionamento [Vermer et al, 2003]. O foco dos estudos da esteira distante normalmente é na influência que uma máquina exerce sobre outra similar, dentro de disposições geométricas em parques eólicos.

3.3 A otimização de parques eólicos – Micrositing

O primeiro grande parque eólico documentado surgiu na Holanda, mais especificamente no industrializado distrito de Zaan em meados do século XVIII. O terreno plano e sem quedas

da região plana holandesa não contribuiu com a utilização de rodas d'água como fonte motriz nos processos industriais, muito usuais na Europa deste período. Entretanto, os ventos constantes possibilitaram o desenvolvimento de diversas aplicações para os já estabelecidos "moinhos de vento holandeses". Os moinhos de vento podiam ser acoplados às serras, plainas, furadeiras e outras ferramentas de trabalho em madeira, com pequenas modificações. Desta forma, Zaan já contava com 256 turbinas motrizes das, aproximadamente, 450 existentes em toda a Holanda. A Figura 3.6 mostra as turbinas dispostas sem um padrão aparentemente definido, documento datado do ano de 1731 d.C. Interessante constatar que não existe preocupação com as esteiras ou com a direção de predominância da incidência de vento.

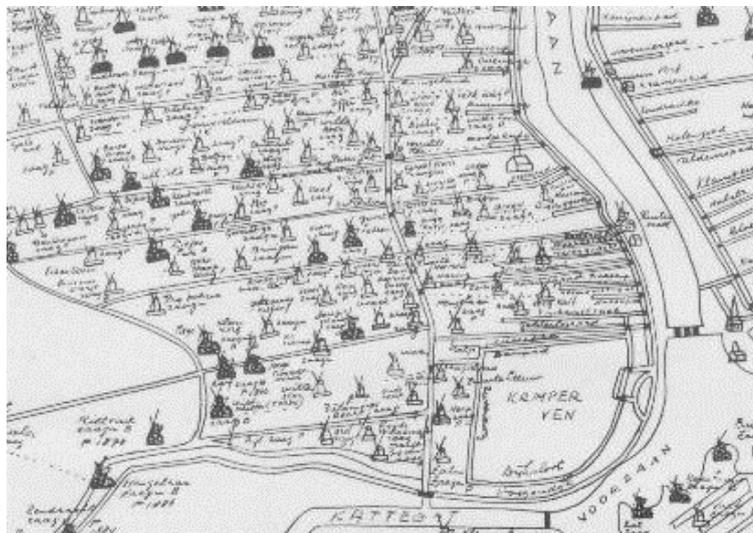


Figura 3.6 - Distribuição das turbinas eólicas no Distrito de Zaan, Holanda, ano 1731 d.C.

De acordo com [Ammara, 2002] o desenvolvimento de fazendas eólicas para geração elétrica iniciou-se na Califórnia na década de 1980, e após espalhou-se ao mundo. Devido à limitada experiência com fazendas eólicas, as primeiras execuções disponibilizaram muito menor energia elétrica anual que o previsto teoricamente, fato posteriormente atribuído à excessiva densidade de turbinas, por área no terreno. No estudo dos aerogeradores, a esteira aerodinâmica é de suma importância à capacidade de geração de um conjunto de aerogeradores dispostos em um parque eólico, que pode ser bastante denso como o indicado na Figura 3.7.



Figura 3.7- Parque eólico densamente ocupado em Palm Springs, California, EUA.

Após os resultados iniciais, estudos teóricos e práticos foram conduzidos chegando-se a conclusão de que 6 a 10 diâmetros de profundidade e 3 a 5 diâmetros de distanciamento perpendicular ao escoamento seriam suficientemente grandes a ponto de evitar ineficiências por sombreamento, com turbinas sob influência das demais próximas [Amarante, 2001]. Porém estes valores recomendados são muito conservadores e conduzem a fazendas eólicas demasiadamente esparsas; encarecem os custos de aquisição da terra, operação e manutenção. Desde então, diversos modelos de esteiras de turbinas eólicas estão em desenvolvimento, assim como metodologias de análise de parques eólicos completos, inclusive com o terreno, o estudo de *micrositing*. De acordo com [Valle et al, 2013], projetos de construção e instalação de turbinas eólicas são complexos; resultando que o dimensionamento e a localização das turbinas devem ser cuidadosamente analisados no anteprojeto. Durante a fase de estudos de viabilidade de parques eólicos, não raras vezes os pesquisadores se deparam com a inexistência de dados de campo, que são caros e demandam longos períodos de aquisição. Este inconveniente torna difícil e arriscado definir as melhores regiões de instalação dos equipamentos. Um modelo de predição da capacidade de geração amplamente utilizado na indústria e que tem mostrado bons resultados no dimensionamento de parques eólicos é o WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) desenvolvido pelo Laboratório RIS na Dinamarca em 1987. Segundo [Stangroom, 2004] o modelo apresentado utiliza um equacionamento analítico linear para o crescimento da esteira, que conduz a resultados rápidos para escoamentos médios pouco perturbados, porém não captura bem os efeitos de

separação e recirculação do fluido em terrenos muito acidentados ou rugosos. Assim a utilização de códigos comerciais de mecânica dos fluidos computacional, *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para estudo da camada limite atmosférica e distribuição de velocidades são cada vez mais comuns. [Loredo-Souza, 2004] ainda recomenda a caracterização da camada limite atmosférica em túnel de vento se tratando de terrenos mais complexos ou com construções relevantes, dado de entrada muito importante na simulação numérica. [Mattuella, 2012] levanta os perfis da camada limite atmosférica em túnel de vento e compara os dados com os obtidos via equações de normas nacionais e internacionais.

Nos estudos mais recentes de *micrositing* modela-se toda a fazenda eólica via CFD - equações de *Navier-Stokes RANS* com alto nível de detalhamento da geometria do terreno e das esteiras das máquinas via modelos numéricos [Ammara, 2002]. Alguns autores modelam completamente a turbina eólica, exemplo [Horn, 2010]. Neste âmbito pode-se citar importantes trabalhos enfocados na esteira e no terreno complexo, exemplo de [Piccoli, 2006], [Valle et al., 2013], [Freitas Filho, 2012] e [Xiao et al., 2010]. Também citar os trabalhos independentes de [Ainslie, 1985] e de [Crespo et al., 1985] que propuseram a obtenção numérica do campo de velocidades da esteira utilizando como entrada os dados de operação tabelados: coeficiente de potência, coeficiente de torque e fator de indução axial. [Mikkelsen, 2003] também cita o método do disco atuador genérico para a obtenção das esteiras: uma simplificação em que uma superfície ou volume atua sobre o escoamento impondo-lhe forças. Para turbinas horizontais de eixo horizontal trata-se de uma superfície ou volume permeável perpendicular à velocidade da corrente principal, que impõe forças, tal como a turbina que opera retirando quantidade de movimento do escoamento de ar, na forma de uma redução de velocidade local. O autor esclarece que normalmente quando empregado o método o foco maior encontra-se na esteira do aerogerador e não fundamentalmente nos aspectos da turbina em si, condição ou regime de operação; [Mikkelsen et al., 2001] indica que em posse do coeficiente de potência pode-se calcular o fator de indução axial, que caracteriza a esteira. De forma análoga ao disco atuador genérico, [Craoto, 2008] modela o rotor da turbina na forma de um disco poroso, e [Lovatto, 2013] na forma de um sumidouro de quantidade de movimento.

3.4 O modelo do disco atuador genérico

Nos primórdios do século XX os principais pesquisadores de eólica buscavam formas de modelar e prever a esteira de turbinas eólicas e rotores aerodinâmicos [Van Kuik et al, 2015]. Avanços importantes foram realizados por Betz e Glauert no sentido de levantar os limites teóricos e prever as pressões e velocidades envolvidas na conversão eólica. É da autoria de ambos em 1935 o método BEM (*Blade Element Momentum*); modelo no qual as pás do rotor são modeladas por elementos independentes que aplicam um balanço da equação da quantidade de movimento ao escoamento próximo. O fluido ao atravessar um elemento de pá recebe trabalho proporcionalmente à queda de pressão e velocidade a que é sujeito. Desta forma, conhecendo as características do perfil aerodinâmico é possível relacionar as velocidades axial e tangencial com o trabalho mecânico resultante. A velocidade de ponta de pá e o tipo de rotor delimitam o coeficiente de potência esperado, como é observado na Figura 3.8. As velocidades induzidas influenciam a velocidade de entrada no plano do rotor e, conseqüentemente, os limites de operação da turbina, aportando ao Limite de Betz.

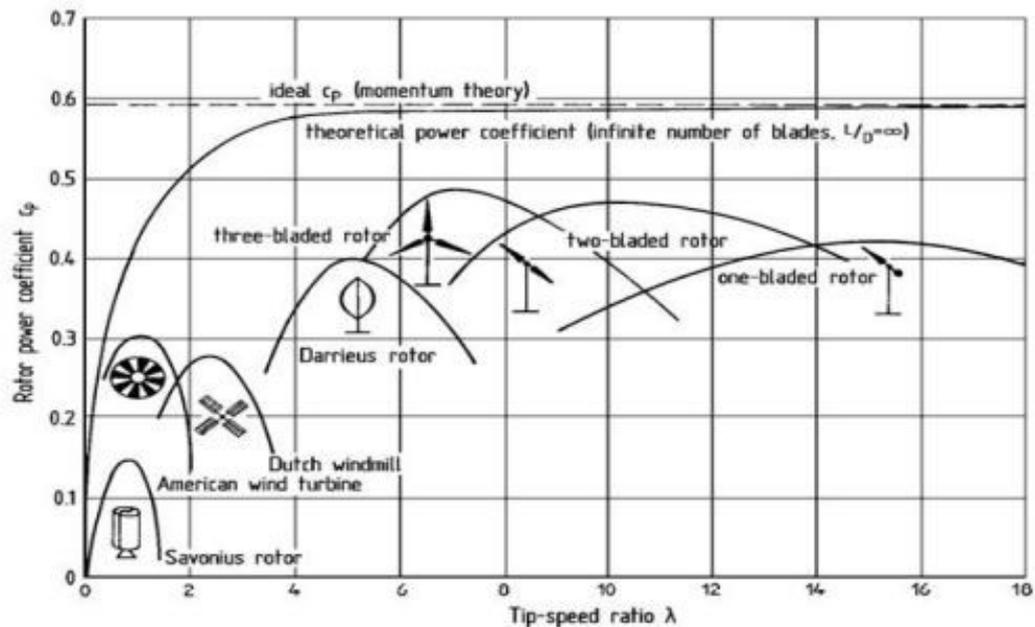


Figura 3.8 - A eficiência das turbinas e o Limite de Betz.

A metodologia BEM serviu de base de desenvolvimento de diversos métodos numéricos para a simulação de esteiras aerodinâmicas de turbinas eólicas, dentre eles o disco atuador e a linha atuadora. Com o advento da computação e a ampla utilização de códigos CFD Navier-

Stokes, RANS p de-se prever com boa aproxima o o comportamento de turbinas sob um terreno com rugosidade e obstáculos aparentes, perfazendo todos os efeitos simultâneos sob a  tica da varia o da quantidade de movimento. A implementa o numérica do disco atuador genérico corresponde a um rotor modelado na forma de um volume permeável, que impõe ao escoamento forças médias temporais resultantes da condi o de opera o em que turbina se encontra submetida. Estas forças são calculadas por meio da velocidade incidente e atuam como pressões no volume. Para isto se faz necessário calcular o coeficiente de potência real e o fator de indu o axial da máquina relacionado ao coeficiente de potência. O disco atuador genérico corresponde a um número infinito de p s, em que todas atuam igualmente e simultaneamente no fluido.   montante do disco, a área da se o transversal   menor que a área do disco e   jusante maior, por conta da conserva o da massa as velocidades caem e a se o aumenta, efeito direto da conversão de potência, na Figura 3.9.

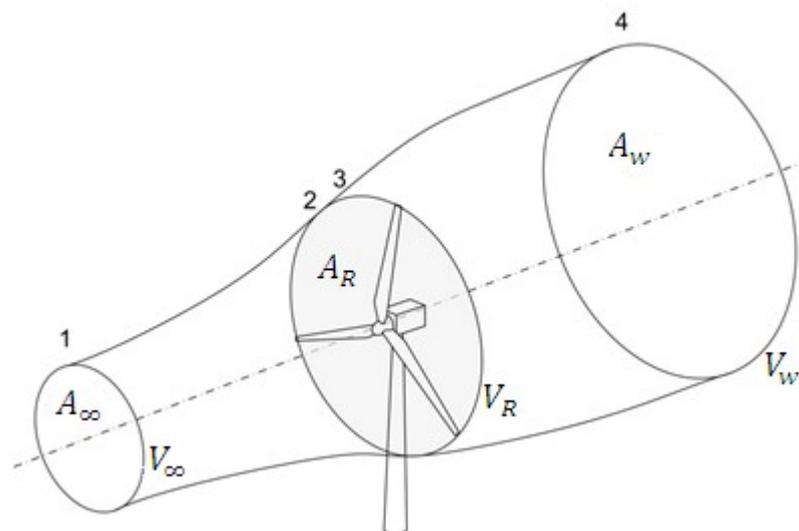


Figura 3.9 - O Disco Atuador -tubo de corrente que delimita o escoamento.

A equa o da conserva o da massa garante que vazão mássica   montante do volume de controle   a mesma que   jusante, com diferentes velocidades na linha de corrente conforme a equa o 3.17.

$$\rho A_\infty V_\infty = \rho A_R V_R = \rho A_w V_w \quad (3.3)$$

A vazão mássica que atua sobre o volume de controle do disco   descrita na equa o 3.18.

$$\dot{m} = \rho AV_R \quad (3.4)$$

E a quantidade de movimento extraída do escoamento:

$$K = \dot{m}(V_\infty - V_w) \quad (3.5)$$

A conversão eólica pode ser modelada via Equação de Bernoulli aplicada aos dois extremos do disco, sobre uma mesma linha de corrente, imediatamente à jusante.

$$p_d + \frac{1}{2}\rho V_R^2 = p_\infty + \frac{1}{2}\rho V_w^2 \quad (3.6)$$

Aplicando a Equação de Bernoulli à montante:

$$p_\infty + \frac{1}{2}\rho V_\infty^2 = p_u + \frac{1}{2}\rho V_R^2 \quad (3.7)$$

Assim, o ponto de singularidade da pressão é a diferença entre as pressões antes e após o disco, fruto da conversão eólica de potência:

$$Ps = p_u - p_d \quad (3.8)$$

E combinando as equações da potência disponível eq.(1) e do coeficiente de potência eq.(2) tem-se a queda de pressão ocasionada pela conversão eólica:

$$p' = \frac{1}{2}\rho(V_\infty^2 - V_w^2) \quad (3.9)$$

O empuxo é o resultado da variação da pressão na área do rotor:

$$E = Ap' \quad (3.10)$$

Que também pode ser expresso em termos das velocidades antes e após:

$$E = \frac{1}{2} \rho A (V_{\infty}^2 - V_w^2) \quad (3.11)$$

Sabendo a velocidade no plano do rotor:

$$V_R = \frac{V_{\infty} + V_w}{2} \quad (3.12)$$

Define-se o fator de indução axial:

$$a = \frac{V_{\infty} - V_R}{V_{\infty}} \quad (3.13)$$

E sucintamente pode-se expressar as velocidades:

$$V_R = V_{\infty} (1 - a) \quad (3.14)$$

$$V_w = V_{\infty} (1 - 2a) \quad (3.15)$$

Em posse do empuxo e da velocidade no plano do rotor, chega-se à potência:

$$P = E V_R \quad (3.16)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho (V_{\infty}^2 - V_w^2) V_R \quad (3.17)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A a V_{\infty}^3 (1 - a)^2 \quad (3.18)$$

De forma análoga à variação de pressão no plano do rotor:

$$p' = \frac{1}{2} \rho a V_{\infty}^2 (1 - a) \quad (3.19)$$

E ao final ao coeficiente de potência:

$$C_p = \frac{2P}{\rho V_{\infty}^3 \pi R^2} \quad (3.20)$$

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (3.21)$$

Assim como ao coeficiente de torque:

$$C_T = \frac{2E}{\rho V_\infty^2 \pi R^2} \quad (3.22)$$

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (3.23)$$

Importante ressaltar que a metodologia do disco atuador possui melhor aproximação para uma faixa de coeficientes de torque, calculada pelo fator de indução axial da turbina a dada velocidade, indicado na Figura 3.10. Conforme aumentamos o coeficiente de torque maior a redução da velocidade à jusante e maiores os vórtices de ponta de pá e recirculações após a passagem do perfil, fenômenos negligenciados no modelo de esteira. [Glauert, 1935] no início do século XX, constatando as limitações do método pesquisou fatores de correção que ampliam o espectro de aplicabilidade do equacionamento BEM, extrapolando-o. No presente trabalho os coeficientes de indução axial permanecem entre 0,12 a 0,19, ou seja, dentro da faixa bem comportada onde a correlação com dados experimentais é excelente e garante a boa aproximação com os experimentais, ou seja, não são necessárias correções ao método, pois encontra-se dentro da faixa de aplicabilidade.

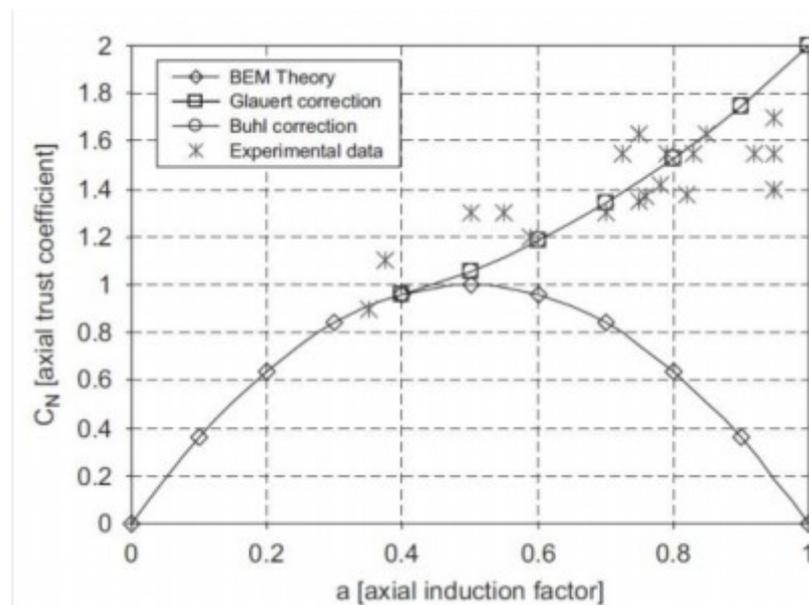


Figura 3.10 - Faixa de aplicabilidade do método do elemento de pá e disco atuador.

Adaptado de [Glauert, 1935].

Dentro do presente estudo, considera-se turbinas eólicas operando dentro da faixa de 7 a 12 m/s, com rotores de 50 a 100 metros de diâmetro, ao nível do mar, temperatura anual média 19 °C (Referência Porto Alegre). O cubo de todos os rotores é fixado a cem metros do solo (100 m) de forma a simplificar o processo de análise através da obtenção de um plano de velocidades. As tabelas no anexo A indicam os valores do coeficiente de potência, fator de indução, coeficiente de torque das turbinas na faixa de operação indicada. Os valores são de uma mesma classe de máquina, turbinas eólicas três pás de eixo horizontal do fabricante Wobben Enercon. A condição das turbinas operando a uma mesma altura promove um estudo de fins acadêmicos. Acréscimos de potência provavelmente se repetirão em estudos tridimensionais com diferentes alturas, tal qual o fabricante recomenda.

3.5 A Teoria Constructal

A Teoria Constructal de Bejan é muito recente e teve seus pilares lançados no final dos anos 90, resultado dos trabalhos de Adrian Bejan na área da termodinâmica e transferência de calor iniciada em 1976 no *Massachusetts Institute of Technology - MIT*. Atualmente Bejan está sediado na *Duke University*, com estudos focados na minimização da geração de entropia, análise exérgica de sistemas, condensação, convecção, e transição à turbulência. A palavra Constructal foi concebida por Bejan, um neologismo do latim *construere*, cujo significado é construir. A teoria aborda como os sistemas podem se organizar de forma a aumentar a eficiência dentro das restrições impostas pela física de cada caso. Afirma que basicamente são as diferenças de potencial, carga, energia, concentração e temperatura que promovem boa parte dos escoamentos e movimentos que conhecemos na natureza. A Lei Zero da termodinâmica aborda o equilíbrio entre os corpos; fundamento de toda a termodinâmica clássica. Adrian Bejan considera como escoamento toda a movimentação, deslocamento e transição que conduza ao menor potencial, o equilíbrio. Dentro da Teoria Constructal existem “escoamentos” de todos os tipos, sejam eles fluídos, energia, concentração, massa e até informação. "Sistemas constituídos de escoamento muitas vezes apresentam forma e estrutura similares, mesmo provenientes de naturezas completamente distintas. Temos de admitir que existem características unificadoras", afirma Adrian Bejan. Ao observar na Figura 3.11 um sistema respiratório, uma árvore, as ligações de um neurônio, um coral marinho, raios em uma tempestade climática, uma bacia hidrográfica e um sistema circulatório animal, encontra-se

basicamente a mesma forma topológica ramificada e estratificada, porém em diferentes escalas e com pequenas variações de forma. [Bejan, 2008] aborda o tema lançando os pilares da Teoria Constructal: "nenhum sistema sujeito ao escoamento pode ser considerado uma ilha, um caso isolado. Não existe um rio a correr sem que haja uma planície a alimentá-lo com água e umidade. O balanço e a coexistência das imperfeições compõem o design, cujo foco é exatamente o mesmo para todos os sistemas: maximizar os acessos e minimizar as imperfeições."

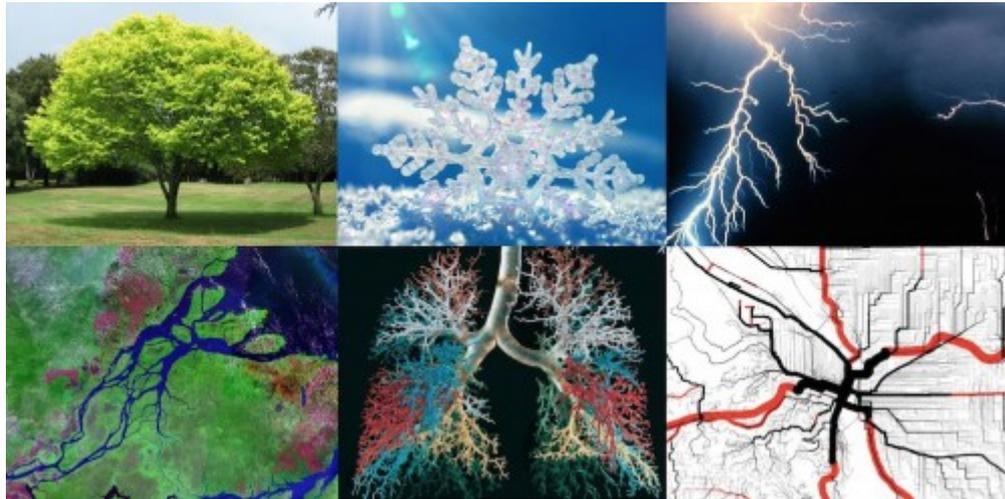


Figura 3.11 - Os escoamentos apresentam características similares, mesmo que de natureza distinta. Adaptado de [Bejan, 2013]

Na termodinâmica clássica os sistemas são abordados como "caixas pretas", em que são conhecidas as entradas e as saídas, sem maior preocupação com o processo em si, abordado em outras disciplinas separadamente, tal como transferência de calor e massa [Bejan, 2008]. Para existir fluxo, advecção ou troca térmica, precisamos de uma diferença de potencial motriz, e quanto maior a diferença de potencial, maior a entropia gerada ao final do processo, fruto da desigualdade de Clausius [Wyllen, 1995]. Bejan extrapola a Segunda Lei da Termodinâmica, em que os processos além de irreversíveis pela desigualdade de Clausius também tendem à menor entropia gerada. Ou seja, na natureza o sistema pode evoluir por si só de forma a distribuir os potenciais e buscar os melhores acessos aos escoamentos. A sustentação fundamental da Teoria Constructal é de que as imperfeições existem na natureza, e devem ser consideradas em todas as análises. Ou seja, o sistema é imperfeito e tende a

permanecer imperfeito sob as mesmas restrições, e o passo evolutivo é distribuir as imperfeições de forma a maximizar os acessos, existem escalas e níveis de imperfeições.

Assim nasce a forma, disposição ou configuração, "*design constructal*" que naturalmente emerge quando é dada liberdade a um sistema provido de restrições que o delimitem. Presenciamos a evolução naturalmente ocorrer no sentido do melhor balanço entre a dissipação nas menores e maiores escalas, visando o máximo rendimento global do sistema [Reis, 2006]. Ou seja, por meio de tentativas evolutivas consecutivas surgem as escalas de tamanho e abrangência em uma hierarquia de melhor rendimento. Os maiores elementos extraem maior quantidade de movimento ocupando um espaço muito maior, ao passo que os menores se utilizam de espaços antes considerados improdutivos. Dentro da escala de hierarquia, por Bejan, existe a estratificação de acordo com as imperfeições inerentes ao sistema, assim como à faixa de abrangência alcançada por cada indivíduo.

A Lei Constructal de Adrian Bejan identifica e enumera as características unificadoras na essência de todo escoamento animado ou inanimado:

- (i) todos os sistemas possuem um propósito, baseado em uma função objetivo comum;
- (ii) a forma permanece livre para sofrer mudanças dentro de suas restrições impostas;
- (iii) as mudanças são resultado do balanço entre duas ou mais tendências opostas;
- (iv) e por final, as formas que sobrevivem e persistem são aquelas que trazem a melhor distribuição das imperfeições no sistema como um todo.

Estudos recentes da Constructal conduzidos por Bejan e ampliados por [Ledezma et al, 1997], [Muzychka, 2006], [Bello-Ochende, 2003] e [Rocha, 2001] sugerem que a complexidade e a diferenciação de escalas podem conduzir à sistemas mais eficientes do ponto de vista energético, seja um sistema fluidodinâmico ou térmico. Assim evidenciou-se que a estratificação das escalas aumenta o percentual do potencial extraído, elevando o rendimento global à custa do aumento da complexidade do sistema [Petrescu, 1994]. Na natureza existem diferentes escalas de complexidade em um mesmo sistema, como se observa na Figura 3.12.



Figura 3.12 - Níveis de complexidade encontrados na natureza.

Adaptado de [Bejan, 2013].

Uma relação de diâmetros é verificada para n canais ramificados que conduzem um fluido em um meio físico. A fórmula base, conforme a equação 4.14 foi testada e validada sistematicamente por diversos cientistas, dentre eles fisiologistas, físicos, químicos e engenheiros. Trata da razão de diâmetros frente ao número de ramificações n .

$$\frac{D}{d} = (n)^{\frac{1}{3}} \quad (3.24)$$

Tabela 3.1 - Parâmetros da Teoria Constructal

D	d	d/D (n=2)	$n^{1/3}$
100 m	100 m	1,0	1,259
100 m	75 m	0,75	
100 m	50 m	0,50	
100 m	25 m	0,25	

Porém, [Bejan, 2007] enfatiza que uma maior complexidade não necessariamente conduz à um sistema mais eficiente do ponto de vista Constructal, pois a complexidade acompanha as imperfeições presentes no sistema. Basicamente existe um nível de complexidade ideal a cada sistema físico analisado.

4 METODOLOGIA DE ANÁLISE

A metodologia de análise consiste na avaliação de diferentes configurações geométricas por meio de simulações numéricas computacionais e a contabilização do saldo de potência total por área total transversal de cada configuração. A inserção das turbinas no escoamento está baseada no modelo do disco atuador de Mikkelsen Sørensen (2003), e diferentes disposições baseadas em escalas de diâmetro e distância analisadas. O objetivo do estudo é a maximização da potência extraída de acordo com a Teoria Constructal [Bejan, 2008]. O domínio e as condições de contorno exercem direta influência nos resultados obtidos na análise e são previamente especificados; utilizar os mesmos parâmetros de entrada para cada conjunto de simulações.

4.1 Emprego da Dinâmica dos Fluidos Computacional - CFD

As duas equações fundamentais da mecânica dos fluidos: conservação da energia e conservação da quantidade de movimento só possuem resultado exato para um pequeno conjunto de problemas em que as hipóteses simplificativas são válidas [Schlichting, 1970]. Abordar as equações de Navier-Stokes numericamente envolve a busca de soluções aproximadas, em que a turbulência é analisada de forma estatística por meio de modelos de turbulência. Neste sentido Reynolds lançou os pilares da metodologia *Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS* em 1895.

A equação de Navier-Stokes na forma vetorial:

$$\rho \frac{DU}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla)U \right) = \rho f - \nabla P + \nabla \cdot \left(\mu \left\{ [\nabla U + (\nabla U)^T] - \frac{2}{3} (\nabla \cdot U) \tilde{I} \right\} \right) \quad (4.1)$$

A equação da conservação da massa:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot U = 0 \quad (4.2)$$

No caso de escoamento incompressível a conservação da massa se resume:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (4.3)$$

A turbulência apresenta-se em diversas escalas de comprimento e em um amplo espectro de frequências tornando sua modelagem completa uma tarefa complexa e até o momento impossível. A abordagem estatística do problema, média no tempo conduz à *Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)* em que as grandezas são divididas em duas variáveis: uma variável média e outra variável das flutuações; divisão é intitulada decomposição de Reynolds em que as grandezas são somadas sobre intervalos de tempo suficientemente grandes. Assim introduzem-se os modelos de turbulência para representar os efeitos totais da turbulência no escoamento (Petry, 2002).

O modelo de turbulência é a abordagem matemática de um fenômeno físico de sete (7) características principais: escoamentos com altos Reynolds; difusivo; irregular; dissipativo; rotacional e tridimensional; e presente em meio contínuo. O fenômeno é simplificado em uma viscosidade turbulenta, e desta forma eliminadas as não-linearidades. O modelo de turbulência empregado nas simulações é o modelo de duas equações $k-\varepsilon$: em que a variável k é a energia cinética do fluido e ε a dissipação de energia cinética turbulenta.

4.1.1 Modelode turbulência $k-\varepsilon$

O modelo de turbulência $k-\varepsilon$ é um modelo a duas equações proposto em 1972 por Nakayama e Harlow e implementado por Launder e Jones [Wilcox 1998]. Recentemente se tornou o modelo mais básico e amplamente utilizado em códigos comerciais de CFD. O termo k é a energia cinética por unidade de massa, e ε a taxa da energia cinética dissipada. O modelo $k-\varepsilon$ trabalha de forma a relacionar as tensões de Reynolds à velocidade média e à viscosidade turbulenta [Wilcox 1998]. O equacionamento de transporte do modelo de turbulência pode ser expresso da seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \times U) - (\mu_{ef} \nabla U) = \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{ef} \nabla U)^T \quad (4.4)$$

Assim a viscosidade efetiva da equação anterior é dada pela composição da viscosidade com a viscosidade turbulenta na forma da equação 3.7:

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_t \quad (4.5)$$

E a viscosidade turbulenta é definida como o produto da velocidade turbulenta com a escala de comprimento turbulenta:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.6)$$

As variáveis k - ε são obtidas por meio de duas equações.

Para a energia cinética turbulenta k , temos:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4.7)$$

Assim, como a taxa de dissipação da energia cinética ε :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (4.8)$$

A pressão é expressada na forma decomposta:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (4.9)$$

E os coeficientes de fechamento padrão do software são:

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44 \quad (4.10)$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1,92 \quad (4.11)$$

$$C_\mu = 0,09 \quad (4.12)$$

$$\sigma_k = 1,0 \quad (4.13)$$

$$\sigma_\varepsilon = 1,3 \quad (4.14)$$

Na finalidade de estudar a esteira da turbina eólica e caracterizar o regime de operação da máquina [El Kasmi et al, 2008] recomenda a utilização do modelo de turbulência k - ε ao

utilizar o modelo do disco atuador genérico. O autor estende seus estudos aos casos mais complexos e busca relacionar os valores de velocidade com pequenas alterações na implementação do modelo dentro de um código CFD próprio.

4.1.2 Definição do Domínio e Condições de Contorno

O domínio é o mesmo para todas as simulações, com altura de 500 metros (5D), 2000 metros (20D) de largura por 2000 metros (20D) de comprimento. As limitações laterais estão a um mínimo de 500 metros do cubo de qualquer turbina, a face de saída encontra-se afastada a um mínimo de 1000 metros da última turbina e a face frontal permanece a pelo menos 500 metros da primeira linha de máquinas. Desta forma a região de interesse permanece no centro do domínio, a fim de receber menor influência das condições de contorno impostas às faces limítrofes. As dimensões estão embasadas na bibliografia e são relacionadas ao maior diâmetro de turbina empregado nas simulações, 100 metros. A altura é 5 diâmetros e a face de entrada tem 20 diâmetros de largura. Todo o domínio tem 20 diâmetros de comprimento total, pois a esteira distante se estende de 10 a 15 diâmetros após o aerogerador. Comparando o estudo aos trabalhos conduzidos em túnel de vento teremos um fator de obstrução máximo de 4% com cinco turbinas de 100 metros, dentro do recomendado [Loredo-Souza et al, 2004].

As condições de contorno devem ser correlatas ao tipo de análise realizada [Maliska, 1995]. No *software* CFX implementa-se para as faces laterais e topo acondição de parede com deslizamento livre, cisalhamento zero. É uma consideração razoável para um domínio muito grande, pois garante um escoamento paralelo à parede, dentro da região de interesse e influencia pouco o centro do domínio. Na saída, utiliza-se uma condição de saída de pressão estática zero, assim o fluido deixa o domínio sem restrições.

O domínio é determinado basicamente pela condição de maior área abrangida a ser analisada. A largura é determinada pelo espaçamento entre dois diâmetros, enquanto o comprimento é determinado pelo maior espaçamento entre duas fileiras consecutivas de máquinas e a altura é composta por cinco vezes o maior diâmetro. O domínio deve ser cuidadosamente dimensionado, pois uma análise de vasta escala impacta exponencialmente no tamanho da malha e, conseqüentemente, no tempo de simulação. Domínios grandes fornecem melhores resultados, porém demandam um tempo computacional alto, enquanto

domínios muito pequenos alteram os resultados, pois restringem demasiadamente o escoamento às turbinas eólicas, impondo limitações ao escoamento.

Definidos o domínio da simulação e os principais parâmetros de simulação tem-se os elementos necessários ao início das análises fluidodinâmicas de cada caso.

4.2 O Design Constructal

A disposição das turbinas constitui o principal objeto de estudo, porém diferentemente do que indica o senso comum, o foco não é a maior produção total. Esta solução é trivial e envolve a execução de somente o maior diâmetro bem disperso, o foco é a produção mais eficiente, em termos da área total de diâmetros, baseando-se nas premissas da Lei Constructal de Bejan. Pesquisadores da Constructal que trabalham em diversos campos do conhecimento verificaram que a maximização dos acessos pode ser obtida empregando-se o Método Design Constructal que consiste em três etapas:

1. Definir a função objetivo a ser otimizada, maximizada;
 - a. Potência por área total de aerogeradores instalados (P_{total});
2. Definir as restrições impostas ao sistema;
 - a. Diâmetros das turbinas eólicas (D , d);
 - b. Espaçamento lateral entre turbinas (S);
3. Definir os graus de liberdade.
 - a. Distância longitudinal (L)

As turbinas são representadas pelos discos de diâmetro maior (D) e menor (d), o espaçamento lateral entre duas turbinas é o parâmetro (S) e a distância entre as duas linhas de turbinas com diferentes diâmetros é o parâmetro (L), como indicado no croqui da Figura 4.1. As razões de diâmetros são as restrições e os afastamentos são os graus de liberdade segundo o Design Constructal. O distanciamento lateral entre duas turbinas a restrição. Este último parâmetro é particularmente importante, pois ocasiona a estricção da seção de escoamento, e consequente aceleração na região adjacente. Submeter a segunda fileira a um potencial eólico maior que a velocidade não perturbada induz acréscimo na disponibilidade de potência ao cubo do incremento de velocidade.

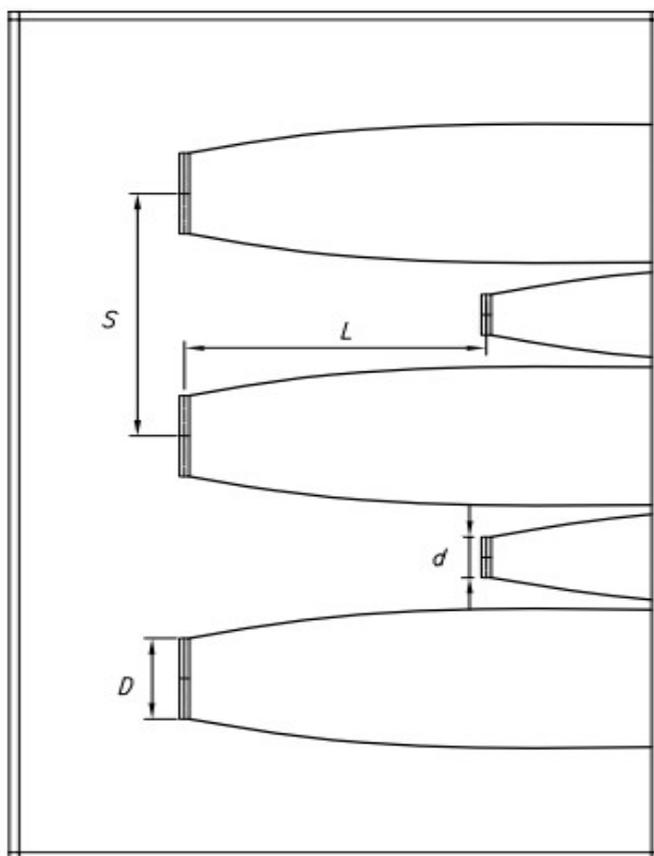


Figura 4.1- Orientação das turbinas, graus de liberdade e restrições.

Definidos os graus de liberdade e as restrições, no *software* CFX Workbench existe a possibilidade de avaliar diferentes configurações através do emprego de parâmetros geométricos genéricos. Valendo deste recurso pode-se estudar o comportamento das diferentes configurações, avaliando a velocidade de operação e conseqüente potência de cada aerogerador individualmente. Baseando-se no Design Constructal são propostas 32 simulações para cada velocidade de entrada (7 m/s e 11 m/s), perfazendo um total de 64 simulações, com o intuito de varrer uma ampla faixa de possibilidades, verificar se existe variação na capacidade por área instalada e localizar os ótimos globais. Conta-se com as premissas do Design Constructal, dados do fabricante de turbinas e também experiência em simulação eólica. Duas velocidades são propostas e suas bases são: a primeira, velocidade corresponde à média brasileira em bons sites e a segunda velocidade à que uma turbina normalmente opera sem redução no coeficiente de potência (C_p). Os parâmetros chave que originarão as configurações estão na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Parâmetros para as disposições das turbinas eólicas nas análises CFD.

S	d/D	L
3D e 5D	0.25	0.25D
		0.50D
		0.75D
		1D
		2D
		3D
		4D
		5D
	0.5	0.25D
		0.50D
		0.75D
		1D
		2D
		3D
		4D
		5D
	0.75	0.25D
		0.50D
		0.75D
		1D
		2D
		3D
		4D
		5D
	1	0.25D
0.50D		
0.75D		
1D		
2D		
3D		
4D		
5D		

Para fins de visualização, uma das simulações CFX base do estudo, a configuração $S = 3D$; $d/D = 0.5$; $L = 2D$ está evidenciada na Figura 4.2.

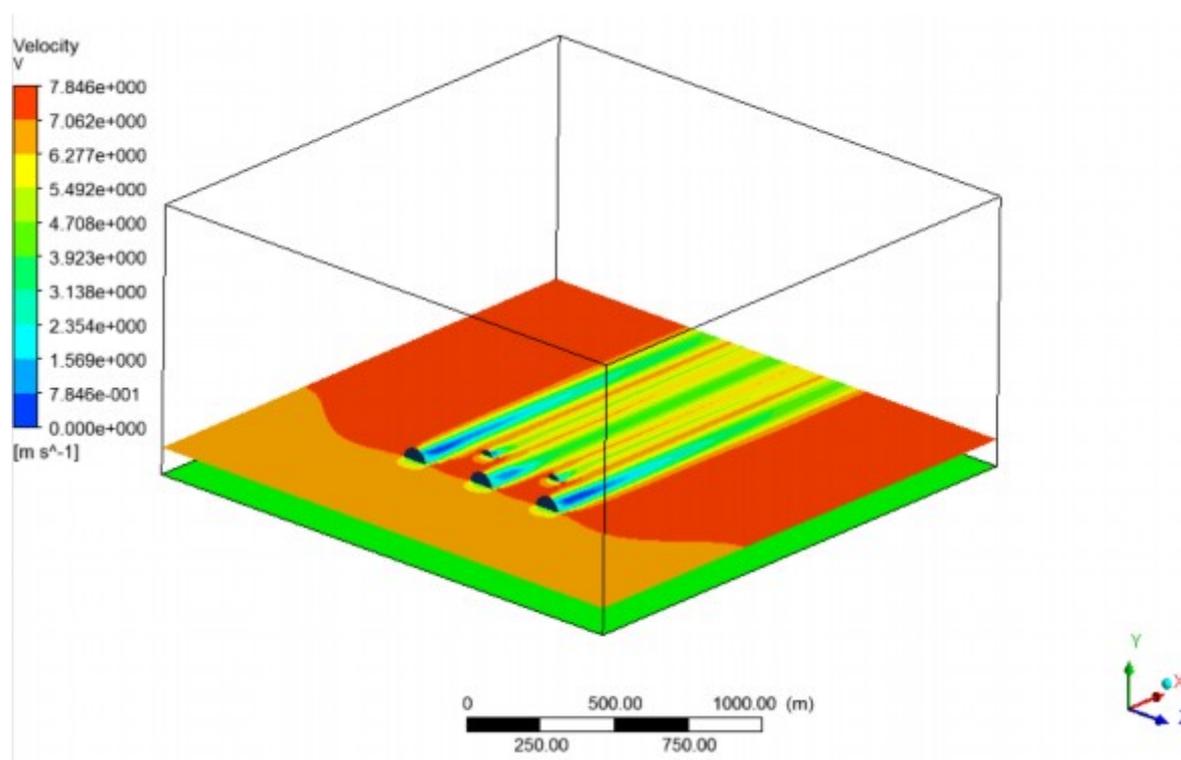


Figura 4.2 - Simulação com os parâmetros $S = 3D$; $d/D = 0.5$; $L = 2D$.

No mercado brasileiro atuam diversas empresas fabricantes de turbinas eólicas: as mais representativas em volume de vendas são a Wobben-Enercon, GE Energy, Gamesa, Vestase Siemens. Devido à disponibilidade e facilidade de acesso às informações da fabricante Wobben-Enercon, estas são empregadas na análise. No site constam os diâmetros de 101 m, 71 m, 48 m e 33 m com catálogos disponíveis online; e são diâmetros muito próximos ao que se tem o intuito de simular via Constructal. A fim de não misturar dados de diversos fabricantes para chegar aos valores exatos, decide-se utilizar somente os dados disponíveis da Wobben-Enercon extrapolando-os para os diâmetros de 100 m, 75 m, 50 m e 25 m e assumindo que as diferenças de diâmetro não impactam diretamente nos coeficientes de potência, o que é bem razoável neste cenário.

4.3 Metodologias de resolução de esteiras

Para cada conjunto de simulações estipula-se a mesma velocidade de entrada do ar no domínio da simulação CFD. Para todas as simulações, a intensidade de turbulência do

escoamento é de 5%, compatível com terrenos de baixa rugosidade. Existem duas velocidades especificamente interessantes: 7 m/s e 11 m/s. A menor velocidade é a mínima na qual existe boa possibilidade de extração eólica, o valor está no início da curva de potência, ou seja, ainda há um ganho de potência para maiores velocidades; e o segundo ponto está situado pouco antes do topo da curva com velocidade próxima do maior coeficiente de potência.

Em todas as análises fixa-se a primeira linha de turbinas com espaçamento lateral de 3 diâmetros ou 5 diâmetros, diâmetro de 100 metros e altura 100 metros do cubo da turbina ao solo. A segunda linha de turbinas sofre as alterações após cada simulação, buscando-se um aumento no coeficiente de potência total.

Duas metodologias de simulação numérica são empregadas para efetuar a análise, uma totalmente iterativa e outra parcialmente iterativa. Na metodologia semi-iterativa levanta-se o perfil de velocidades em uma linha de corrente exatamente entre as duas turbinas frontais. Sobre esta linha serão posicionadas as turbinas consecutivas. Com posse das velocidades nos pontos de aplicação pode-se obter o coeficiente de potência da turbina, o coeficiente de torque e o coeficiente de indução axial. Os dados conduzem à queda de pressão a ser imposta no volume de controle do rotor, no disco atuador genérico. Neste método, supõem-se que a velocidade atuante sobre a segunda linha de turbinas é o resultado das perturbações da primeira linha de turbinas, normalmente uma hipótese correta.

A análise totalmente iterativa é aplicada em um segundo momento, de modo que as turbinas alteram o escoamento adjacente e recebem a influência das demais turbinas em reciprocidade. A velocidade é atualizada a cada iteração, e todos os parâmetros de operação do disco atuador recalculados à nova velocidade de entrada do modelo; um processo mais acurado, porém muito mais dispendioso computacionalmente.

Os parâmetros governantes do processo iterativo são a velocidade de entrada na turbina eólica e a velocidade média obtida dentro do disco atuador após a iteração anterior. À análise é necessário conhecer previamente as curvas de potência das turbinas desenvolvidas. Neste estudo utilizam-se turbinas de catálogo Wobben-Enercon com os diâmetros exatos ou aproximados. O coeficiente de potência (C_p), o fator de indução axial (a) e a pressão que turbina entrega (dP) são resultado da velocidade de entrada calculada iterativamente. A rotina da simulação iterativa é descrita nos passos:

1. Na primeira simulação assume-se que a velocidade na turbina é a velocidade de corrente livre, não-perturbada $V_{\infty} = V_{dom}$

Assim a velocidade no disco V_{di-1}

Calcula-se:

$$a_{i-1} = (V_{di-1} - V_{\infty}) / V_{di-1} \quad (4.15)$$

2. Em tabela se obtém o coeficiente de potência para cada velocidade de operação.

$$V_{\infty i} = (V_{di-1} - V_{\infty}) / V_{di-1} \quad (4.16)$$

$$V_{\infty i} = V_{di-1} (1 - a_{i-1}) \quad (4.17)$$

$$C_p = Tabela(V_{\infty i}) \quad \text{Anexo A1} \quad (4.18)$$

Cálculo iterativo do fator de indução axial (a)

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (4.19)$$

$$P_i = \frac{1}{2} \rho A a_i V_{\infty i}^3 (1 - a_i)^2 \quad (4.20)$$

Sabendo que:

$$E_i = \frac{P_i}{V_{Ri}} \quad (4.21)$$

$$V_{Ri} = V_{\infty i} (1 - a_i) \quad (4.22)$$

$$E_i = \frac{1}{2} \rho A a_i V_{\infty i}^2 (1 - a_i) \quad (4.23)$$

$$p_{di} = \frac{E_i}{A} = \frac{1}{2} \rho a_i V_{\infty i}^2 (1 - a_i) \quad (4.24)$$

Repete-se o passo 2 até atingir a convergência em velocidade média no volume do disco atuador segundo a equação do resíduo equação (4.25).

$$Err = \frac{(U_{inf_i} - U_{inf_{i-1}})}{U_{inf_i}} \leq 1E - 2 \quad (4.25)$$

O método totalmente iterativo modela melhor o problema, pois se aproxima da realidade, a cada simulação aproxima-se à simultaneidade dos efeitos das turbinas inseridas no escoamento. Porém a metodologia totalmente iterativa acresce consideravelmente o custo computacional via múltiplas iterações, e por vezes conduz à não-convergência devido à complexidade das múltiplas iterações. Nas disposições com turbinas muito próximas, uma pequena variação de velocidade de uma turbina ocasiona grande variação nas demais, podendo gerar perturbações que se amplificam e culminam na divergência do processo iterativo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Qualidade da malha

A discretização espacial é de grande importância à análise CFD, tal que diversos autores abordam o tema em exclusividade: a correta concepção da malha é crucial sob pena de influenciar os resultados, conduzindo a situações não-realísticas. Uma malha demasiadamente grosseira, ou com errônea aplicação de elementos pode introduzir erros comparáveis à ordem de grandeza dos dados de entrada, comprometendo totalmente o estudo. O maior refinamento da malha deve estar na região de interesse, de forma a capturar os fenômenos fluidodinâmicos relevantes. Neste estudo, não se tem a usual preocupação com regiões de separação do escoamento ou na camada limite sobre o terreno, pois não são o foco. Dentro da metodologia o disco atuador e as esteiras são relevantes; e a malha sofre refinamento na região adjacente ao disco e à jusante das turbinas, prolongando-se ao final do domínio.

No estudo da esteira fluidodinâmica via CFD, a qualidade da malha é o principal parâmetro de todo o processo de análise via disco atuador genérico, reforçando que a maior resolução nos traz respostas mais realísticas, porém malhas demasiadamente refinadas podem tornar tempo de simulação inviável frente a um grande número de volumes de controle [Castellani, 2009]. Assim, o autor se propõe a determinar uma malha de tamanho razoável que forneça resultados compatíveis com os experimentais para um único disco atuador genérico inserido em um escoamento não-perturbado. O autor define números mínimos de volumes de controle para determinados diâmetros pré-escolhidos. Os perfis de velocidade obtidos fornecem a variação de pressão para cada turbina analisada e são a assinatura dos geradores no escoamento. Busca-se a maior proximidade do modelo do disco atuador com a realidade de um rotor completo em operação. A resolução para um elemento de malha deve ser no máximo 1/12 do diâmetro do disco genérico empregado [Castellani, 2009]. A assinatura de um rotor individualmente inserido no escoamento deve ser coerente com dados numéricos e experimentais, observar Figura 5.1 de [Castellani, 2009] à esquerda, e o obtido numericamente CFD com a malha utilizada no presente trabalho, à direita.

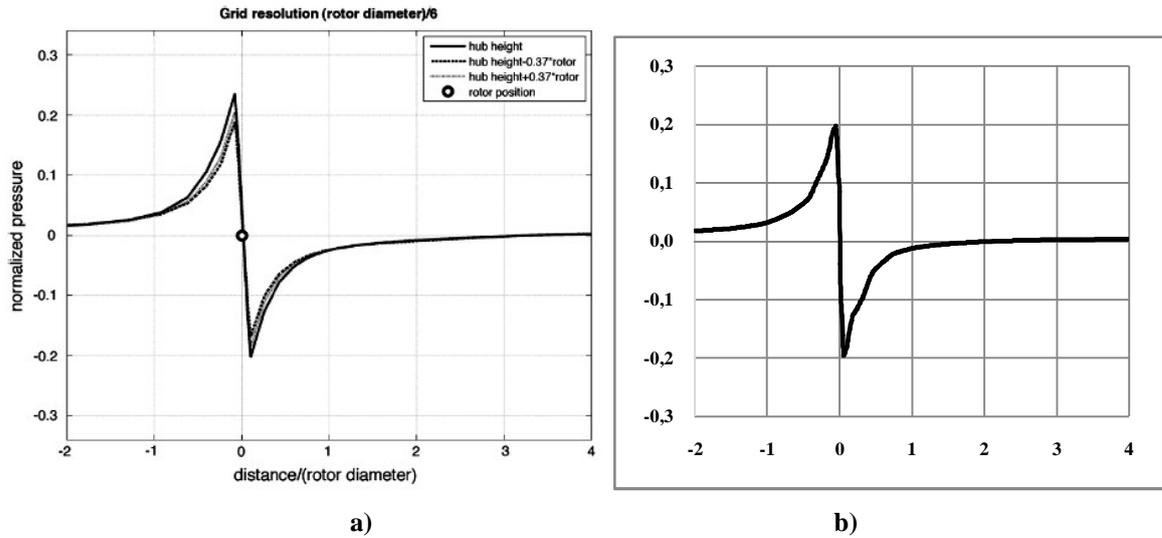


Figura 5.1- a) Comparação de [Castellani, 2009]; b) obtidos numericamente CFD

Os gráficos apresentados confirmam a correlação da malha com os trabalhos de [Castellani, 2009], [Castellani et al, 2013] e [Cabezón, 2009]. Na Tabela 4.1 estão os valores de velocidade para diferentes malhas com crescente número de elementos, na finalidade de verificar uma malha aceitável à aplicação e relativamente levedo ponto de vista computacional. Os resultados da tabela também são plotados na Figura 5.2.

Tabela 5.1- Malha Velocidades médias pelo número de elementos e tempo de simulação

Elementos	Velocidades Médias			Tempo Computacional
62490	3,96 m/s	4,03 m/s	4,08 m/s	5 min
119688	3,54 m/s	3,60 m/s	3,65 m/s	12 min
137110	3,60 m/s	3,55 m/s	3,63 m/s	20 min
172913	3,55 m/s	3,63 m/s	3,63 m/s	30 min
223053	3,70 m/s	3,61 m/s	3,70 m/s	40 min
261653	3,69 m/s	3,61 m/s	3,55 m/s	110 min
348008	3,66 m/s	3,70 m/s	3,71 m/s	200 min
543453	3,67 m/s	3,69 m/s	3,72 m/s	240 min

Para uma melhor visualização dos dados observa-se a Figura 5.2.

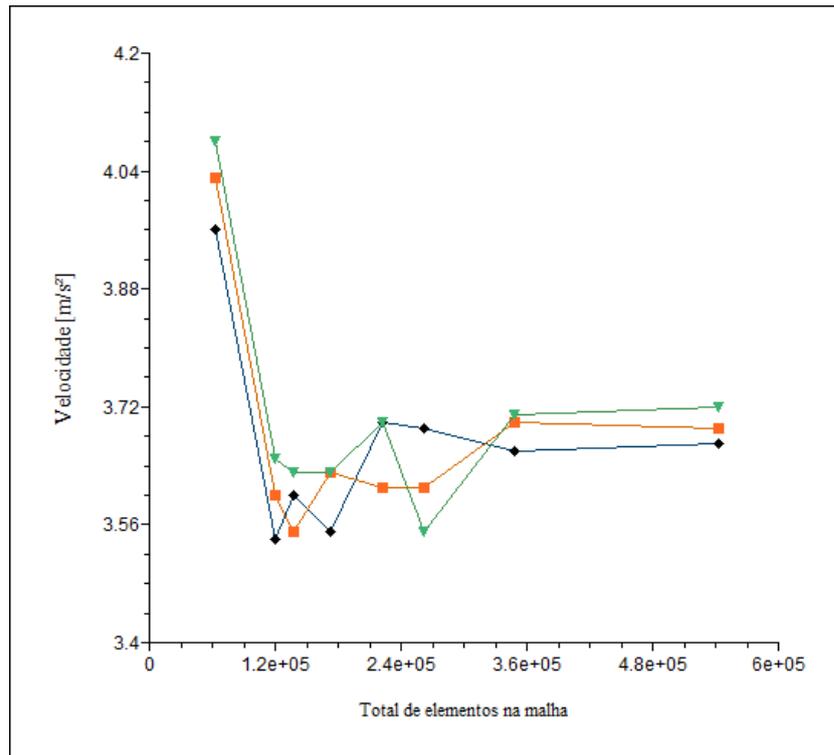


Figura 5.2- Influência da malha na velocidade obtida em três turbinas.

A velocidade no disco, com a malha de 600 mil elementos encontra-se estabilizada, e abaixo de um milhão de elementos esta malha ainda é considerada relativamente leve; para malhas maiores tem-se ainda menor influência da discretização espacial nos resultados de velocidade obtidos na simulação. Na continuidade do estudo utiliza-se a malha maior do gráfico apresentado, com um total de aproximadamente 600 mil elementos. Na Figura 5.3 tem-se a malha empregada nas simulações CFD; predominantemente hexaédrica, com tetraedros apenas próximo às turbinas, na esteira próxima e à jusante das turbinas verifica-se maior refinamento, pois são regiões de interesse na análise. Desta forma a malha apresenta boa correlação com os resultados obtidos pelos autores citados na grande área de eólica.

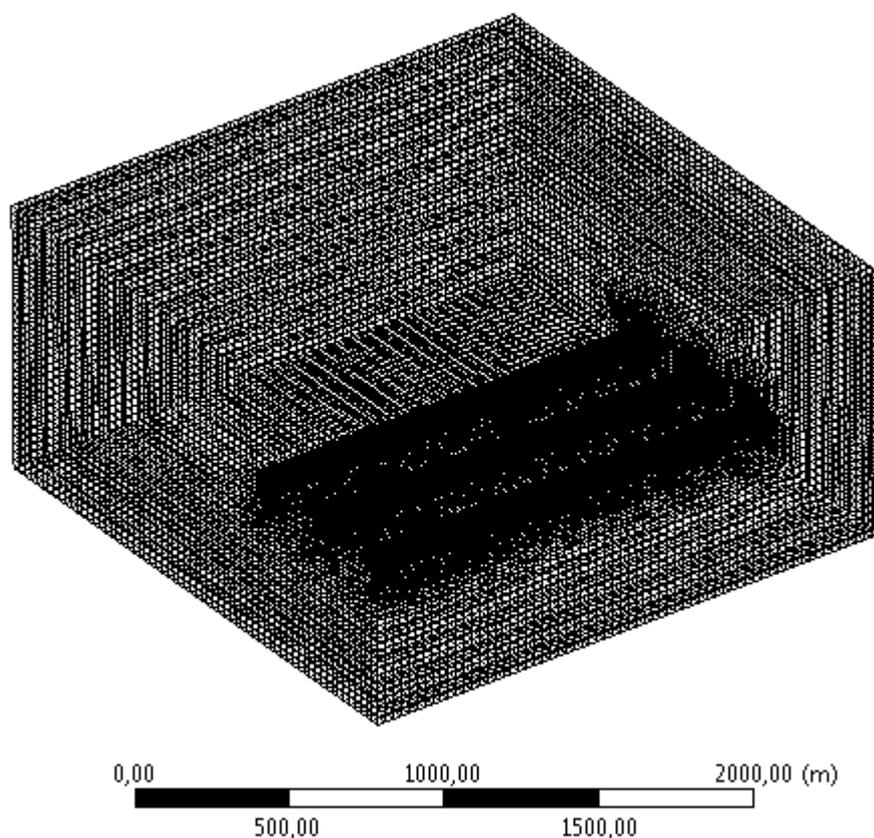


Figura 5.3 - Discretização espacial, refinamento maior nas turbinas e esteiras.

[Mikkelsen, 2003] determina a sensibilidade da malha do disco atuador para diferentes números de Reynolds a um pré-determinado coeficiente de torque ($C_t = 0.89$), que resulta no Limite de Betz. O autor verifica a variação do C_p com relação à malha e conclui na mesma linha de que uma fração de diâmetro de $1/10$ é suficiente para conceber uma malha assertiva. O autor aponta apenas 1% de diferença entre valores numéricos e experimentais para este critério, de comum acordo [Castellani, 2009].

5.2 Cálculo semi-iterativo $V = 7$ m/s

5.2.1 Espaçamento entre turbinas de $S = 3D$

O espaçamento lateral de 3 diâmetros ($S = 3D$) é o mínimo recomendado na literatura de energia eólica. Até mesmo os fabricantes de turbinas recomendam 3 diâmetros de espaçamento lateral em uma instalação muito densa de turbinas em um parque eólico. Sabe-se

que quanto menor o espaçamento maior influência é percebida na segunda fileira de máquinas e que esta influência decai suavemente conforme a distância cresce. No diâmetro de 25 metros na segunda fileira ($d/D = 0.25$) temos os gráficos da Figura 5.4.

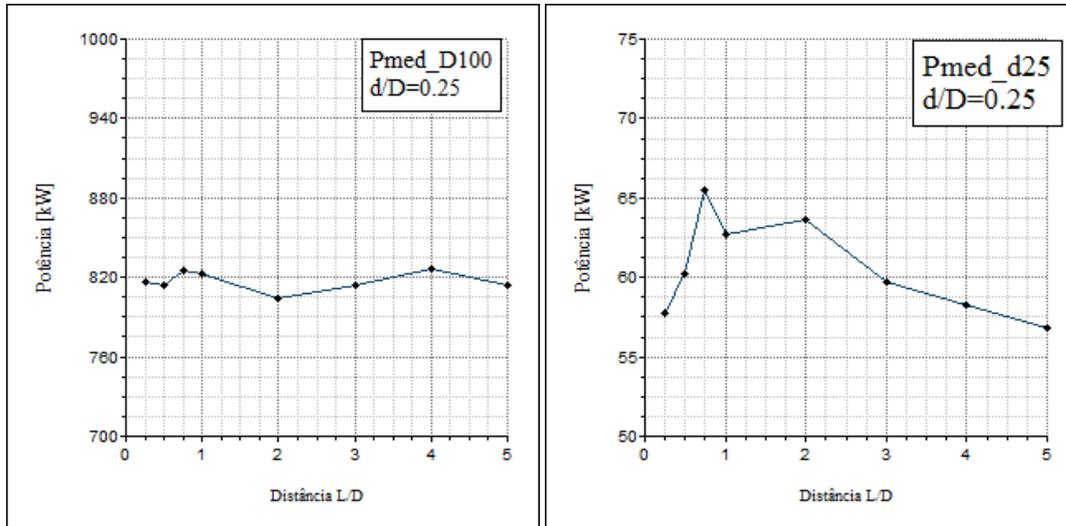


Figura 5.4- Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.25$.

Com o pequeno diâmetro na segunda fileira ($d = 0.25D$) observa-se o pico de potência para $L = 0.75D$ e um novo pico, mas menor em $L = 2D$; a potência na primeira fileira se mantém estável, apenas pequena redução em $L = 2D$.

No diâmetro de 50 m na segunda fileira ($d/D = 0.5$) estão os gráficos para a primeira e segunda fileiras na Figura 5.5.

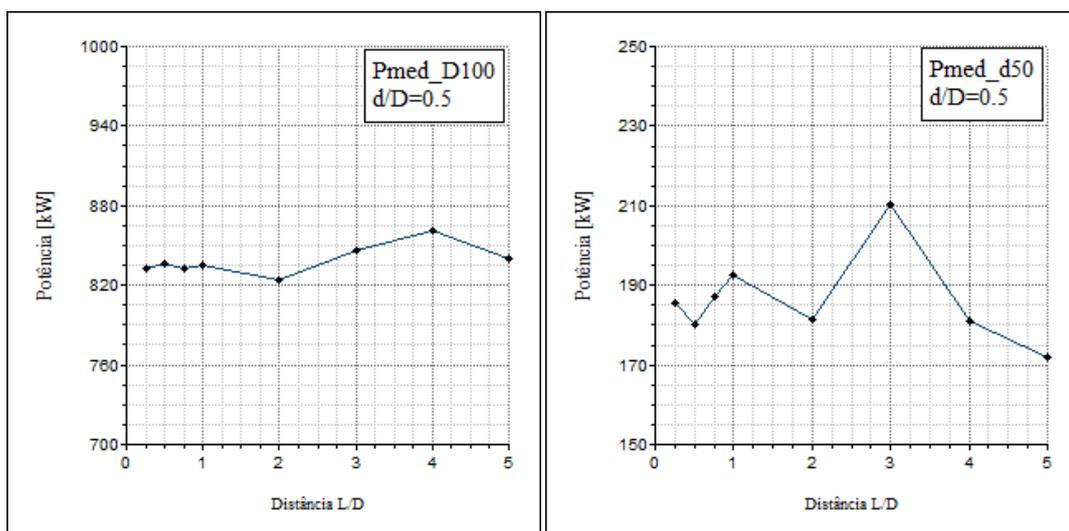


Figura 5.5 - Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.50$.

Através dos gráficos evidencia-se um elevado aumento de potência na segunda fileira ($d = 0.5D$) para $L = 3D$ e um pequeno acréscimo em $L = 1D$; a potência na primeira fileira se mantém estável até $L = 2D$ aumentando suavemente até $L = 4D$, e após segue uma queda suave.

Empregando o diâmetro de 75 m na segunda fileira ($d/D = 0.75$) estão os valores de potência média disponíveis nos gráficos da Figura 5.6.

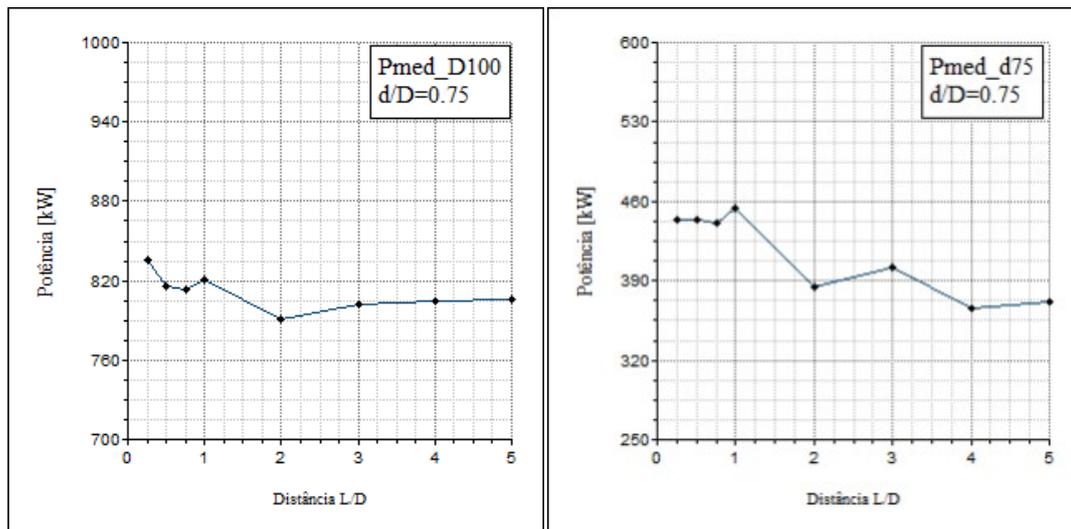


Figura 5.6 - Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.75$.

Permanece evidente um aumento de potência na segunda fileira ($d = 0.75D$) para $L = 1D$ e após segue-se um decréscimo alternante; a potência na primeira fileira se mantém estável apenas com pequena oscilação entre $L = 1D$ e $L = 3D$.

Dispondo o segundo diâmetro idêntico ao primeiro, 100 m ($d/D = 1.0$) tem-se os gráficos das médias na Figura 5.7.

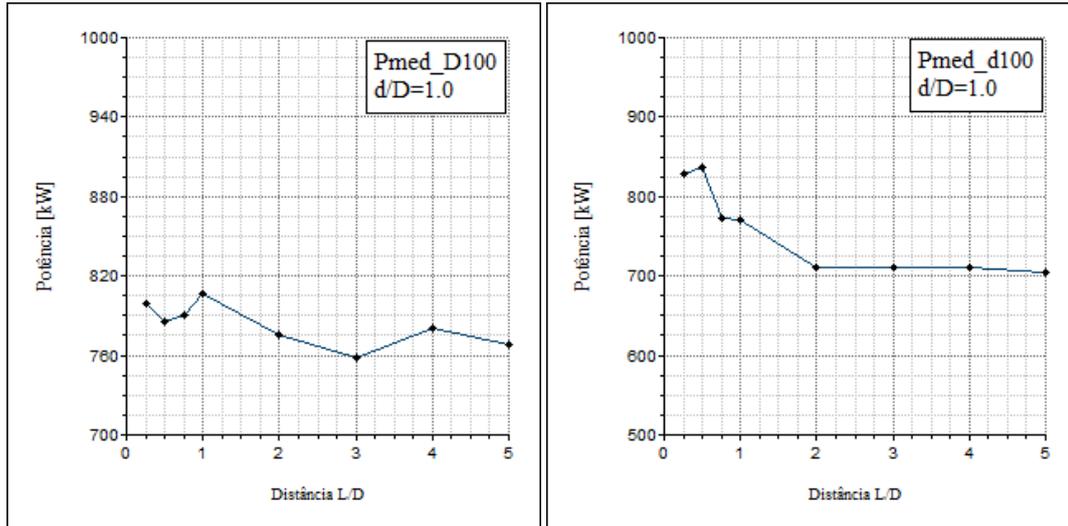


Figura 5.7 - Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 1.0$.

Muito evidente o acréscimo de potência na segunda fileira ($d = 1.0D$) para $L = 0.5D$ e para distância maiores uma queda e posterior estabilização; a potência na primeira fileira se mantém relativamente estável oscilando de $L = 1D$ até $L = 5D$.

Na configuração de espaçamento lateral $S = 3D$; e velocidade livre de $V = 7\text{m/s}$ pode-se concluir extraindo as potências por área total de aerogeradores instalados a cada diferente configuração. Evidencia-se assim a eficiência global das disposições estudadas na Figura 5.8.

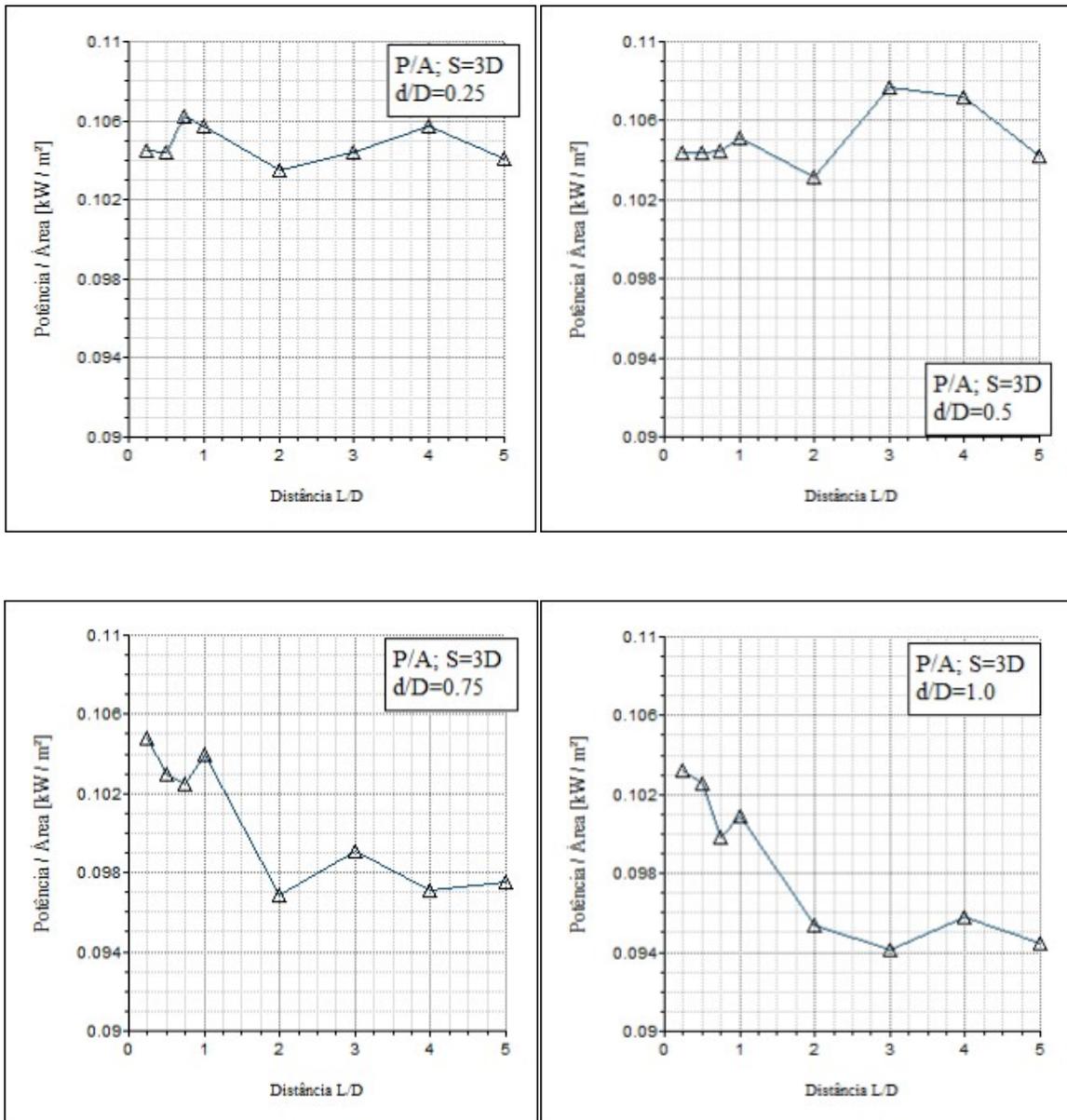


Figura 5.8 - Potência por área total de aerogeradores instalados [kW/m] em função da distância da segunda fileira L/D ; $S = 3D$; $V = 7\text{m/s}$.

O maior valor encontrado é de $0,108\text{ kW/m}^2$ para a configuração $d/D = 0.5$ e $L = 3D$, assim as curvas de potência por área total indicam maior rendimento para os menores diâmetros na segunda fileira em espaçamento de $0.75D$ e $3.0D$ para $d/D = 0.25$ e $d/D = 0.5$ respectivamente.

5.2.2 Espaçamento entre turbinas de $S = 5 D$

Empregando maior espaçamento lateral espera-se encontrar menor aceleração no escoamento interior e adjacente à primeira linha de máquinas. Porém possivelmente a estricção do escoamento e consequente aceleração continue a ocorrer em pontos mais distantes, provavelmente um efeito de aceleração menos pronunciado, e mais distante.

Assim para o diâmetro de 25 m ($d/D = 0.25$) tem-se os gráficos na Figura 5.9.

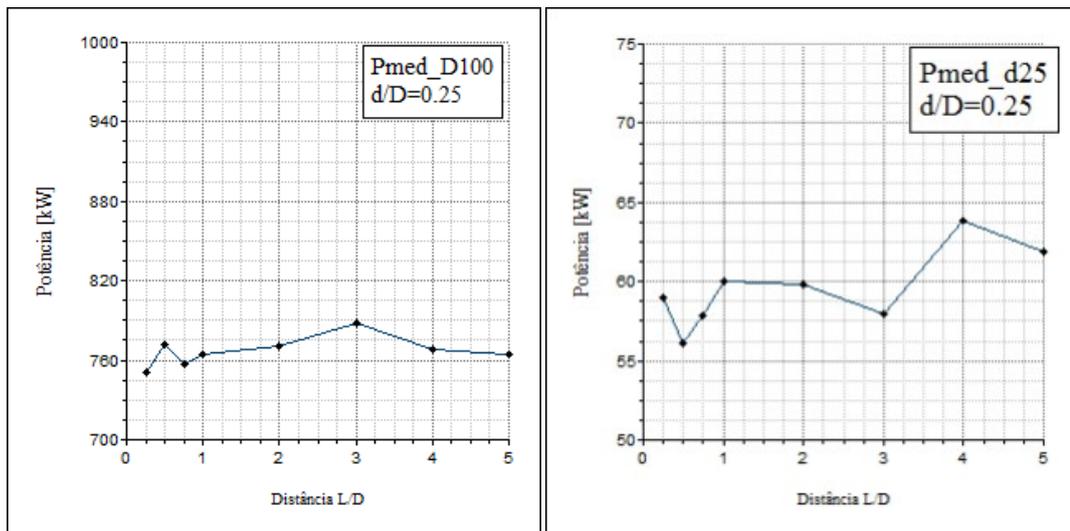


Figura 5.9 - Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 0.25$.

A potência percebida na segunda fileira aumenta consideravelmente em $L = 4D$ para o menor diâmetro ($d = 0.25D$); antes da referida distância se mantém instável e oscilante. A primeira fileira se mantém relativamente estável com pequeno pico em $L = 3D$.

Alterado o diâmetro da segunda fileira para 50 m ($d/D = 0.5$) tem-se os gráficos indicados na Figura 5.10.

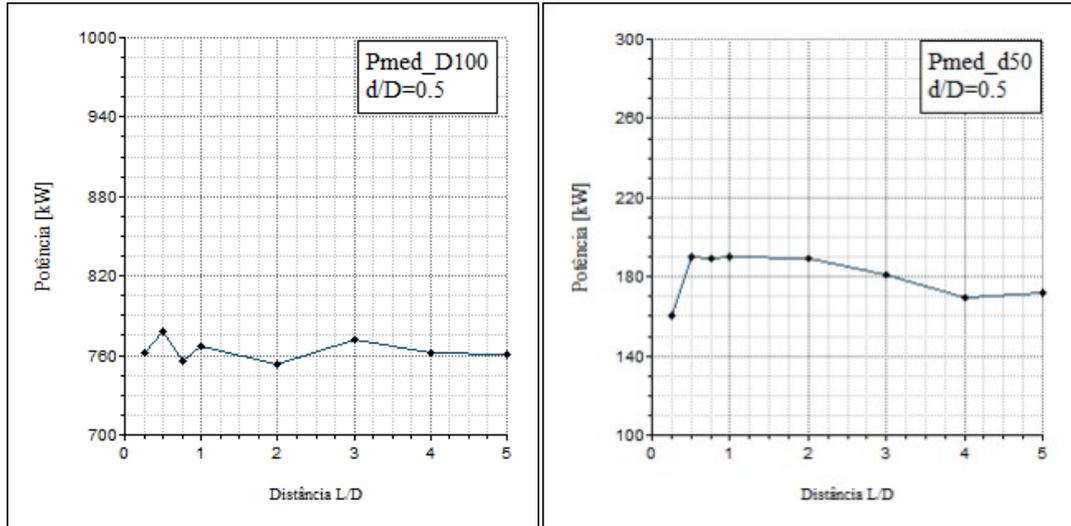


Figura 5.10 - Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 0.5$.

A potência encontrada no menor diâmetro ($d = 0.5D$) aumenta em $L = 0.5D$, porém se mantém constante para valores maiores e após sofre um leve queda em $L = 4D$. A primeira fileira se mantém relativamente estável com leve alternância de resultados.

Aumenta-se o diâmetro da segunda fileira para 75 m ($d/D = 0.75$), e prossegue-se com a concepção dos gráficos, na Figura 5.11.

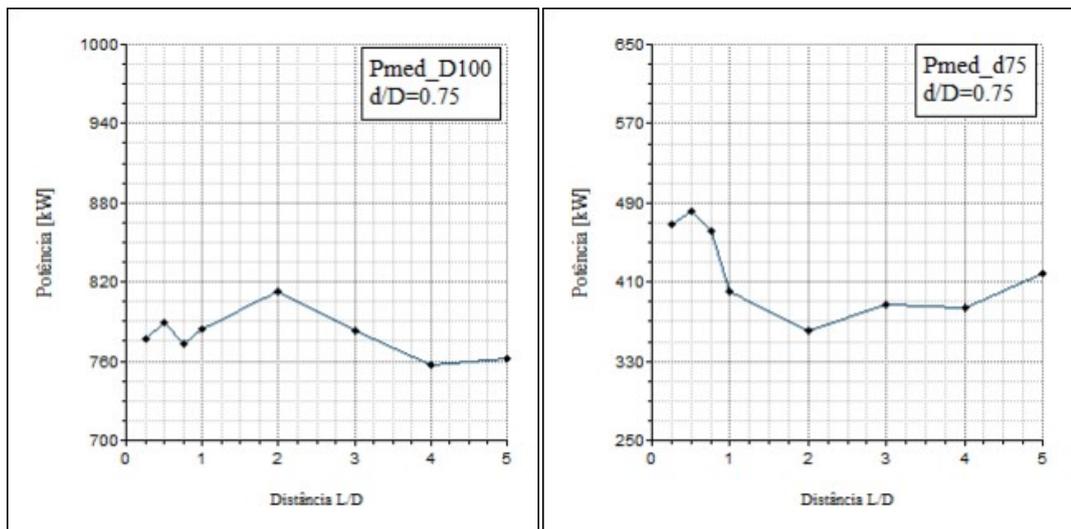


Figura 5.11 - Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 0.75$.

Os valores de potência da segunda fileira ($d = 0.75D$) indicam um grande pico em $L = 0.5D$ aumenta consideravelmente em $L = 4D$ para o menor diâmetro ($d = 0.25D$); antes da

referida distância se mantém instável e oscilante. A primeira fileira se mantém relativamente estável com pequeno pico em $L = 3D$.

Com o diâmetro da segunda fileira idêntico à primeira $d=100$ m ($d/D = 1.0$) procede-se aos gráficos de potência na Figura 5.12.

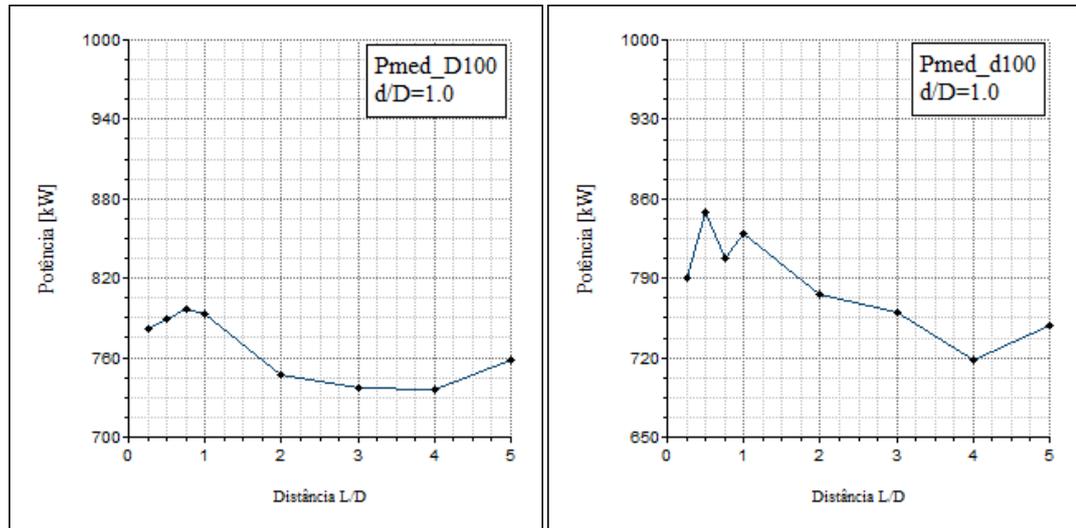


Figura 5.12 - Potência nas turbinas. $V = 7\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 1.0$.

Para o segundo diâmetro idêntico ao primeiro ($d = 1D$) existe um pico de potência pronunciado em $L = 0.75D$ para a primeira fileira e $L = 0.5D$ na segunda linha de turbinas ($d = 1D$). Para distâncias maiores tem-se uma queda nas potências encontradas, ao final um leve aumento em $L = 5D$.

As curvas de potência extraída por área total de aerogeradores instalados segue nos gráficos da Figura 5.13 para a configuração de espaçamento lateral $S = 5D$, e velocidade do escoamento $V = 7\text{m/s}$ representam a eficiência global dos casos estudados.

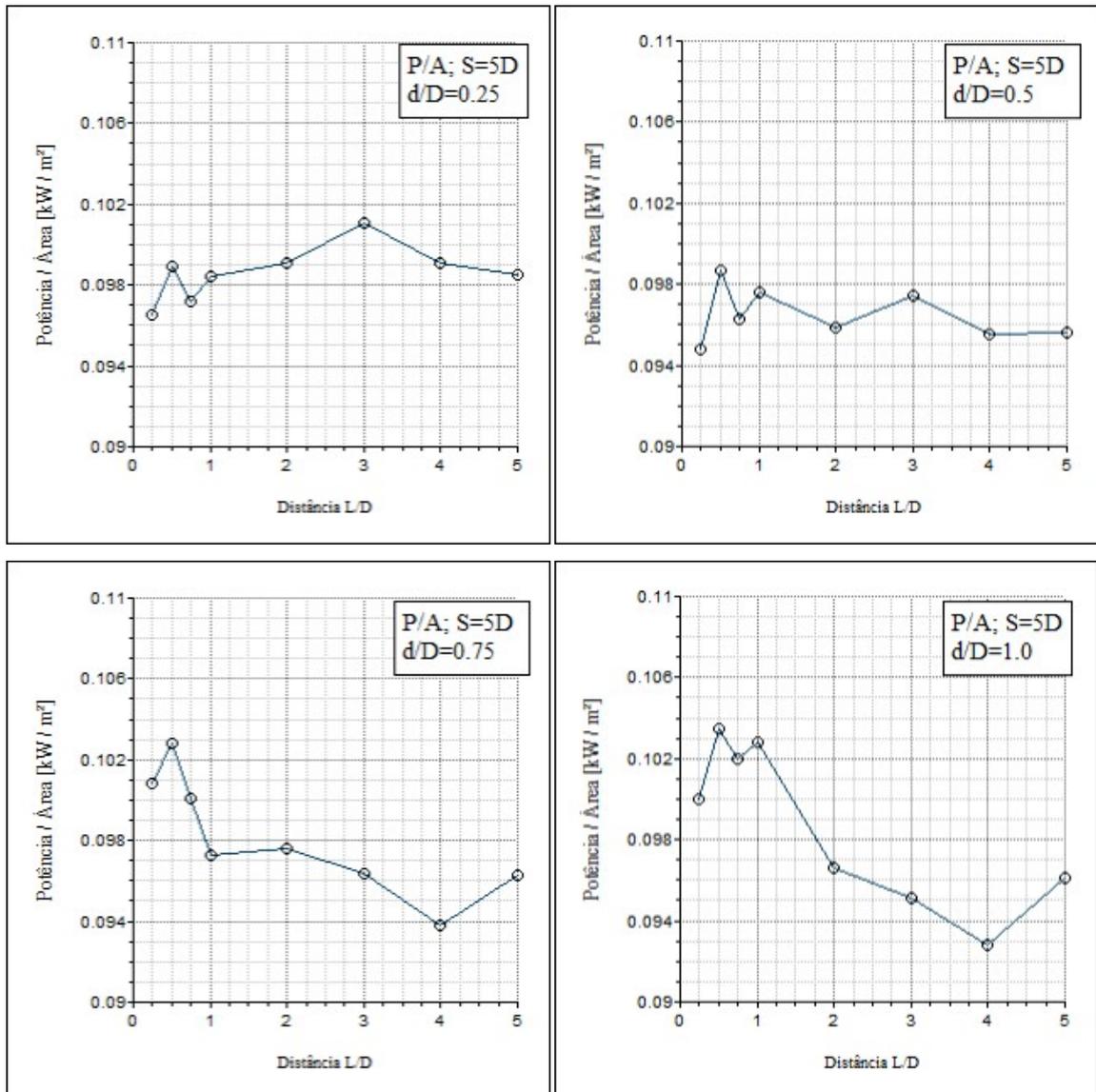


Figura 5.13- Potência por área total de aerogeradores instalados [kW/m] em função da distância da segunda fileira L/D; S = 5D; V = 7m/s.

O maior valor encontrado é de aproximadamente 0,103 kW/m² para a configuração d/D = 0.75 e L = 0.5D e repete-se em d/D = 1.0 e L = 0.5D. Para o espaçamento de S = 5D as curvas de potência por área total indicam maior rendimento para os diâmetros maiores, diferentemente do caso anterior com espaçamento menor: S = 3D.

5.3 Cálculo semi-iterativo $V = 11 \text{ m/s}$

A velocidade do escoamento incidente para os próximos casos abrangidos neste capítulo é de 11 m/s , velocidade em que normalmente é alcançado o maior coeficiente de potência dos aerogeradores comerciais em estudo, observar o anexo A1. Ou seja, a partir da referida velocidade o coeficiente de potência individual decai mesmo que em operação à maiores velocidades. Busca-se evidenciar um aumento de potência relacionado somente à maior velocidade incidente, sem que necessariamente exista ganho no rendimento individual das turbinas. Sutilmente buscar um aumento de potência global por área instalada, mesmo que a menor rendimento individual nos aerogeradores.

5.3.1 Espaçamento entre turbinas de $S = 3 D$

Na Figura 5.14 estão evidenciados os gráficos de potência média com velocidade de 11 m/s na corrente livre, razão de diâmetros de $d/D = 0.25$, e espaçamento lateral $S = 3 D$.

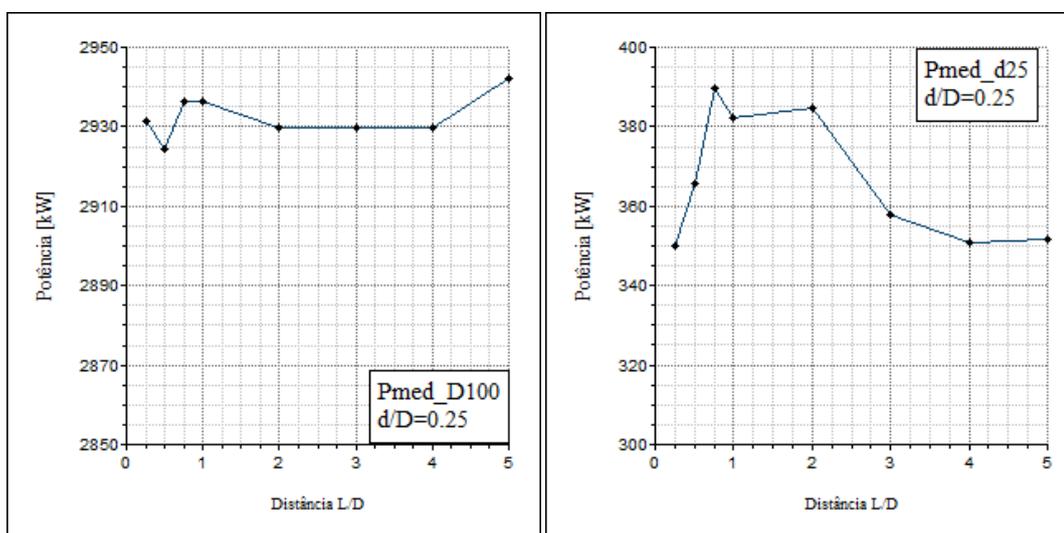


Figura 5.14 - Potência nas turbinas. $V = 11 \text{ m/s}$; $S = 3 D$; $d/D = 0.25$.

A potência na primeira fileira de turbinas apresenta um leve pico em $L = 0.75 D$ até $L = 1 D$; após estabilidade e ao final um repentino crescimento em $L = 5 D$. Na segunda fileira, com o diâmetro de $d/D = 0.25$ observa-se um pronunciado pico em $L = 0.75 D$ e após, para valores de distanciamento maiores uma queda abrupta.

Aumenta-se o diâmetro para 50 m ($d/D = 0.5$), fornecendo assim os gráficos de potência média na Figura 5.15.

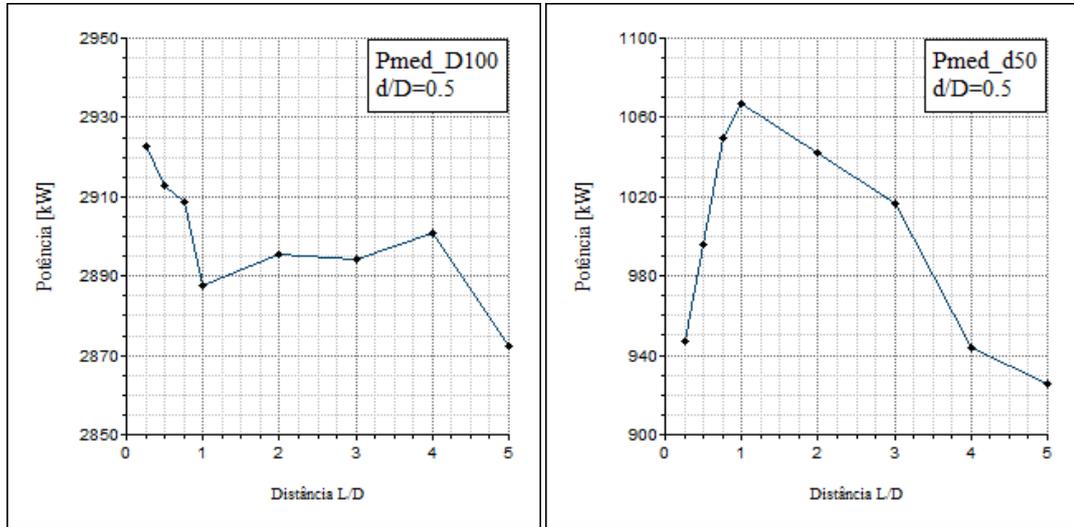


Figura 5.15 - Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.5$.

A potência média encontrada na segunda fileira ($d = 0.5D$) cresce de $L = 0.25D$ até um máximo em $L = 1D$ e após este valor entra em queda abrupta. A primeira fileira se mantém relativamente constante após queda entre $L = 0.25D$ e $L = 1D$.

Com o diâmetro ligeiramente maior que o anterior, 75 m ($d/D = 0.75$) tem-se os gráficos da Figura 5.16.

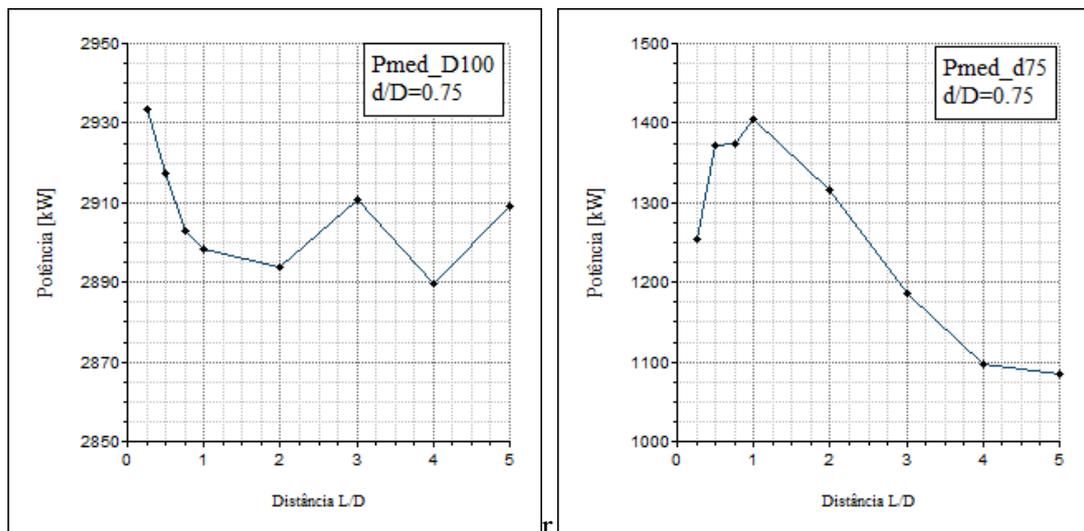


Figura 5.16 - Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.75$.

A potência na segunda fileira ($d = 0.75D$) aumenta até $L = 1D$ e após assume queda constante. A primeira fileira se mantém relativamente estável e oscilatória após o valor máximo encontrado em $L = 0.25D$.

Igualando-se o segundo diâmetro aos 100 m de diâmetro na primeira fileira ($d/D = 1.0$) procede-se aos gráficos da Figura 5.17.

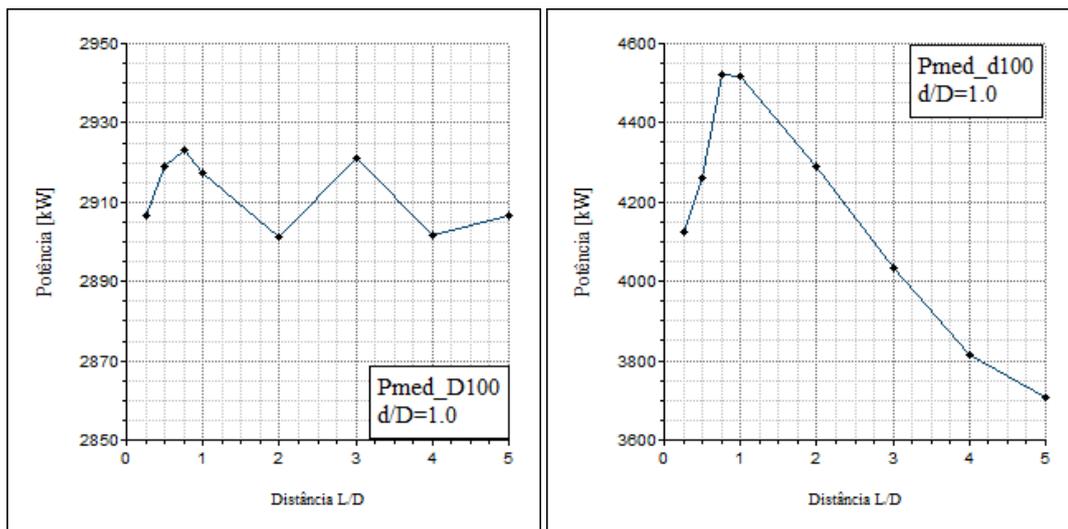


Figura 5.17 - Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 1.0$.

Para diâmetros idênticos a potência na segunda fileira ($d = 1D$) aumenta até $L = 0.75D$ e após assume queda acentuada e constante. Entretanto na primeira fileira ocorre uma alternância de máximos e mínimos após o valor de $L = 0.75D$.

As potências individuais de cada diâmetro, se calculadas sobre a área total dos aerogeradores fornecem a eficiência total das configurações estudadas na forma de potência por área, ilustrada na Figura 5.18.

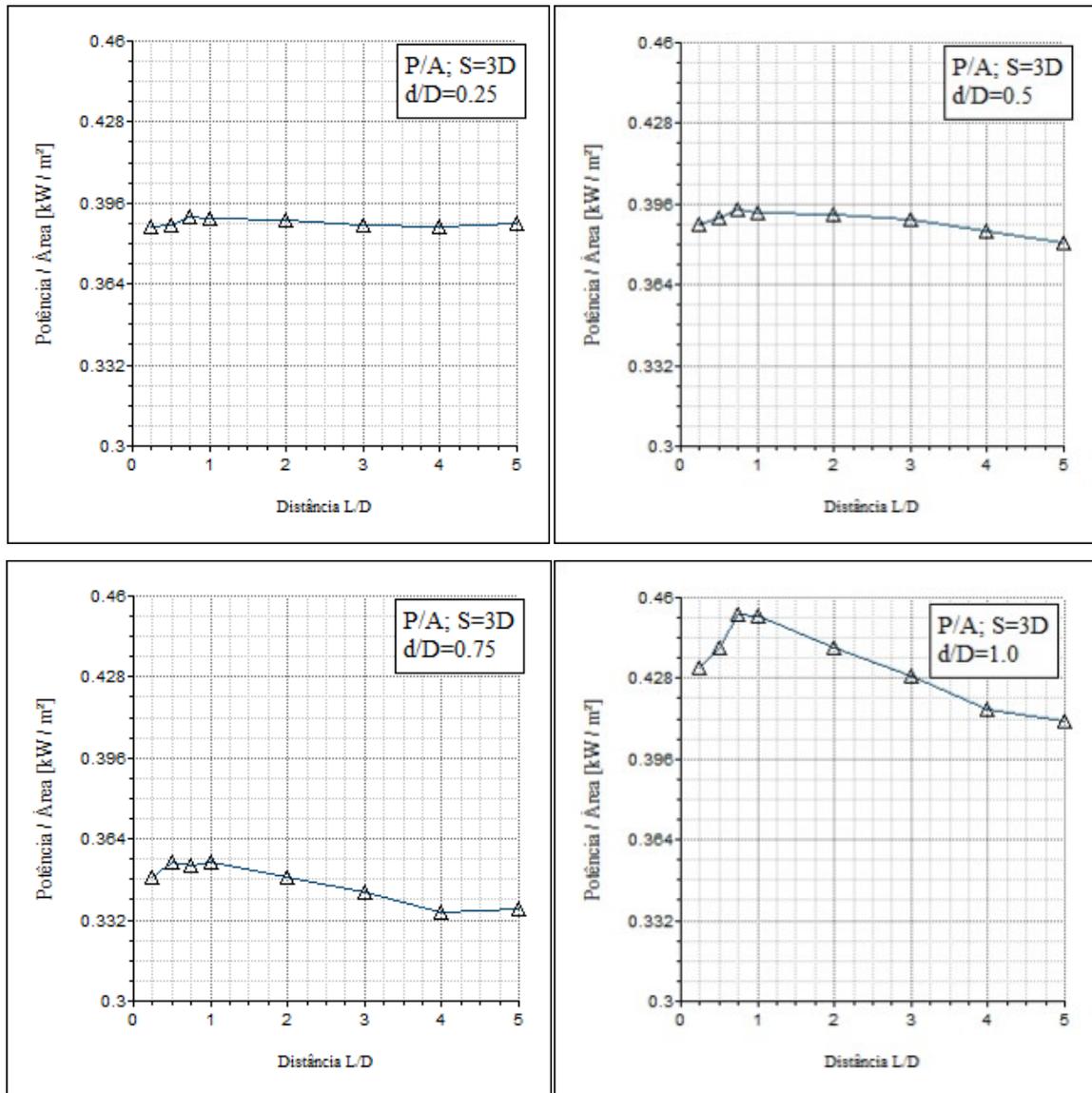


Figura 5.18 - Potência por área total de aerogeradores instalados [kW/m] em função da distância da segunda fileira L/D; $S = 3D$; $V = 11\text{m/s}$.

Na configuração $S = 3D$ e $V = 11\text{m/s}$, com os diâmetros $d/D = 0.25$ e $d/D = 0.5$ os resultados são muito similares e apontam para um máximo valor de potência por área de $0,396\text{ kW/m}^2$ para $L = 0.75D$ em ambos. A análise de $d/D = 0.75$ conduz a um resultado semelhante, porém de menor valor absoluto: 0.360 kW/m^2 aproximadamente. Porém se analisados os diâmetros iguais entre a primeira e segunda fileiras o valor de pico é de 0.45 kW/m^2 em $L = 0.75D$, muito superior aos encontrados para os demais diâmetros nas mesmas condições.

5.3.2 Espaçamento entre turbinas de $S = 5D$

Aumenta-se o espaçamento lateral para $S = 5D$, e procede-se à análise o diâmetro menor na segunda fileira com 25 m ($d/D = 0.25$), resultados de potência na Figura 5.19.

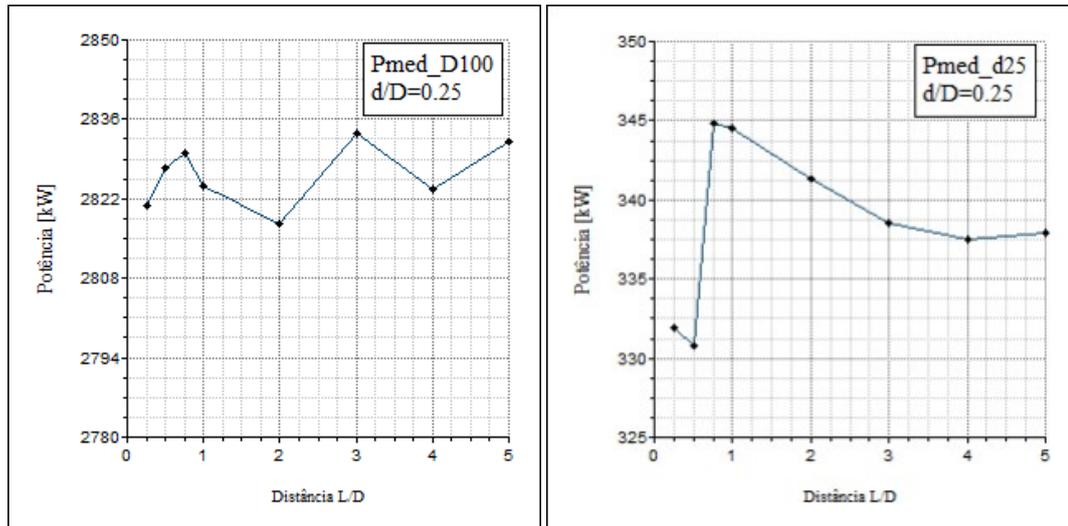


Figura 5.19 - Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 0.25$.

A potência média na segunda fileira ($d = 0.25D$) aumenta abruptamente em $L = 0.75D$ e após assume queda aparentemente assintótica. Entretanto na primeira fileira ocorre uma alternância de valores entre máximos e mínimos após o valor de $L = 0.75D$.

Assim prossegue-se ao próximo diâmetro de 50m ($d/D = 0.5$) na Figura 5.20.

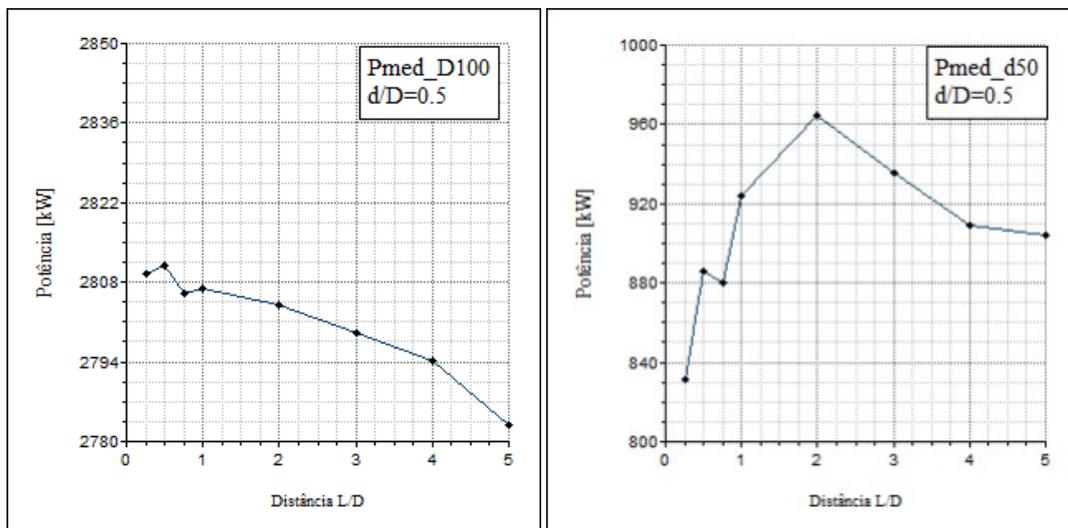


Figura 5.20 - Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 0.5$.

Assim na segunda fileira ($d = 0.5D$) a potência encontrada aumenta continuamente até atingir seu pico $L = 2D$ decaindo continuamente para espaçamentos maiores a este valor. A primeira fileira se mantém em queda suave desde o menor espaçamento $L = 0.25D$.

O próximo diâmetro de análise é 75 metros ($d/D = 0.75$) na Figura 5.21.

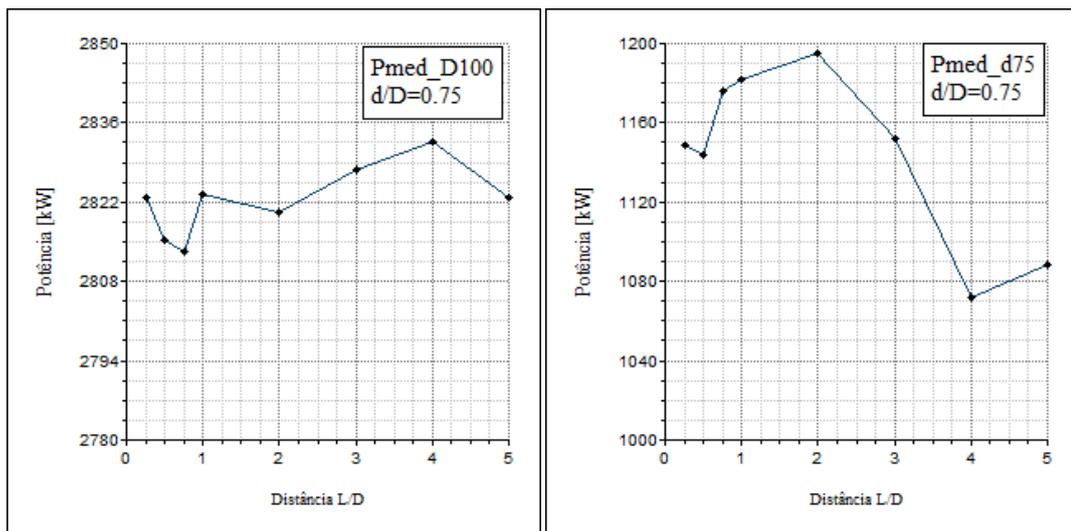


Figura 5.21- Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 0.75$.

Para este caso ($d = 0.75D$) também pode ser observada elevação da potência com o aumento do espaçamento até o pico em $L = 2D$, e decaindo continuamente após. Porém a primeira fileira de turbinas apresenta leve mas contínuo aumento na potência gerada desde o distanciamento de $L = 1D$.

Assim prossegue-se o estudo ao último caso do capítulo $V = 11\text{m/s}$ $S = 5D$, com diâmetros idênticos de 100 m ($d/D = 1.0$) em ambas as fileiras na Figura 5.22.

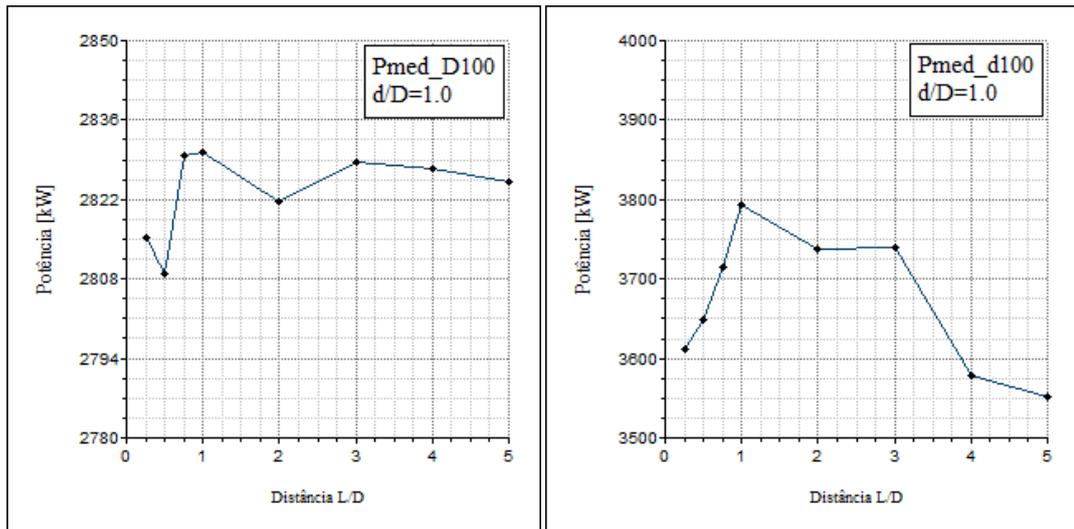


Figura 5.22 - Potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 5D$; $d/D = 1.0$.

Na segunda fileira ($d = 1D$) a potência encontrada apresenta seu pico em $L = 1D$ decaindo continuamente para espaçamentos maiores ou menores ao referido valor. A primeira fileira se mantém estável após o abrupto crescimento entre $L = 0.5D$ e $L = 0.75$.

Em posse das potências individuais calculam-se as potências por área total de aerogeradores instalados para cada um dos casos estudados, evidenciando desta forma os máximos globais do sistema na Figura 5.23.

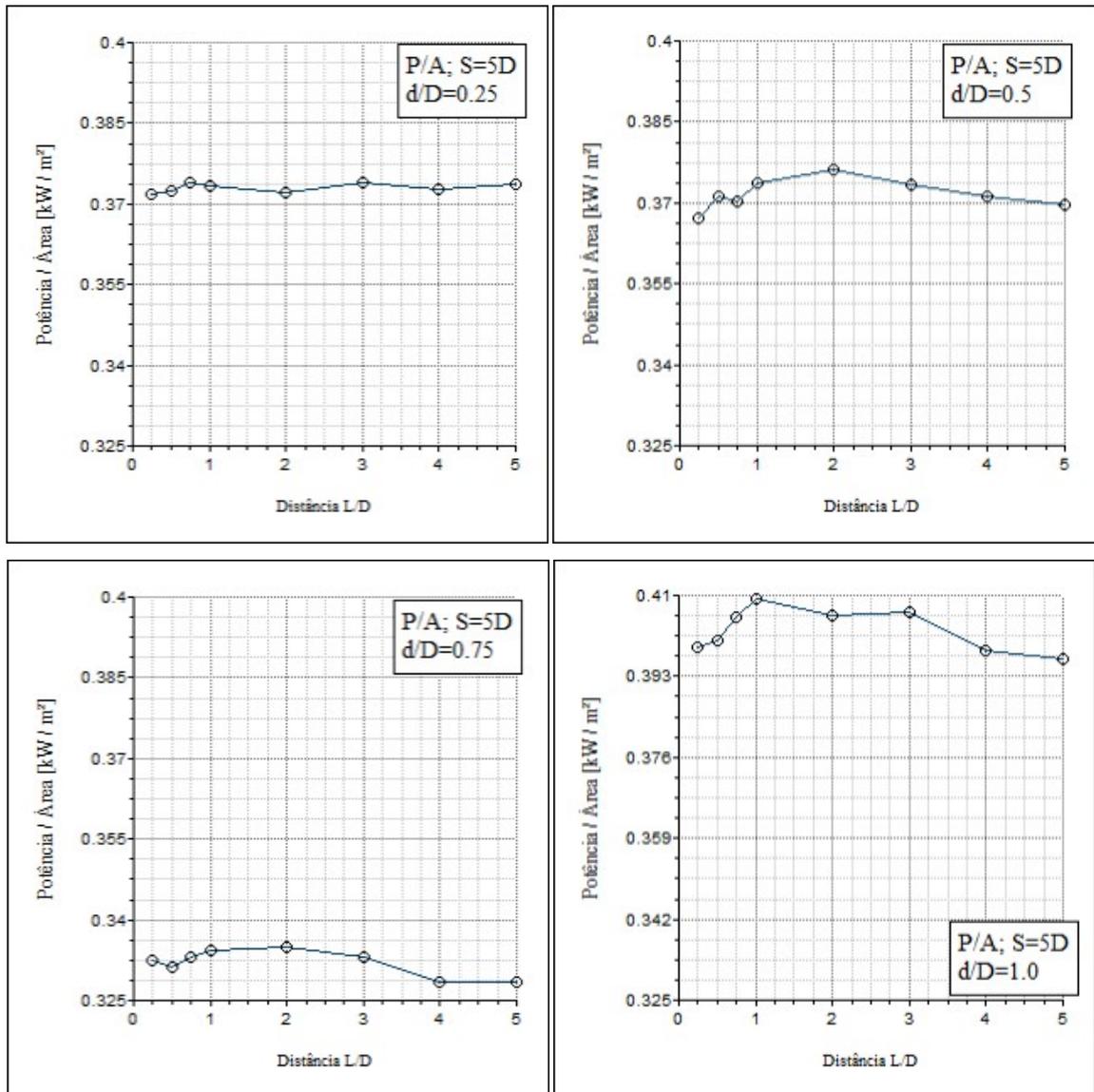


Figura 5.23- Potência por área total de aerogeradores instalados [kW/m] em função da distância da segunda fileira L/D ; $S = 5D$; $V = 11\text{m/s}$.

Na configuração $S = 5D$ e $V = 11\text{m/s}$, com os diâmetros $d/D = 0.25$ e $d/D = 0.5$ os resultados são muito similares e apontam para um máximo valor de potência por área de $0,375\text{ kW/m}^2$ para $L = 1D$ em $d/D = 0.25$ e $L = 2D$ para $d/D = 0.5$. A curva de $d/D = 0,75$ é similar e apresenta o mesmo comportamento, porém com pico de menor valor, $0,336\text{ kW/m}^2$ aproximadamente, para $L = 2D$. Diferentemente, na curva de diâmetros iguais $d/D = 1.0$ valor de pico encontrado é de $0,41\text{ kW/m}^2$ em $L = 1D$, muito acima dos valores encontrados para os menores diâmetros sob as mesmas condições.

5.4 Cálculo totalmente iterativo $V = 11 \text{ m/s}$

Um modelo de esteira totalmente iterativo é muito interessante, pois relaciona à velocidade de entrada na turbina o regime de operação da máquina, tal como ocorre na realidade. Assim toda e qualquer alteração na velocidade incidente é computada no cálculo da potência.

Somente para a velocidade de 11 m/s e espaçamento $S = 3$ foram realizadas as simulações totalmente iterativas, casos em que a convergência foi alcançada, para cada caso mostra-se necessário um mínimo de quinze (15) simulações para alcançar a convergência com o critério de convergência aplicado sobre a velocidade média no disco atuador das turbinas; variação de $1\text{E-}2$ do novo valor encontrado em relação ao do passo anterior. Para a configuração com o menor diâmetro $V = 11\text{m/s}$, $S = 3D$, $d/D = 0.25$, e após a convergência são computadas as potências médias dos gráficos na Figura 5.24.

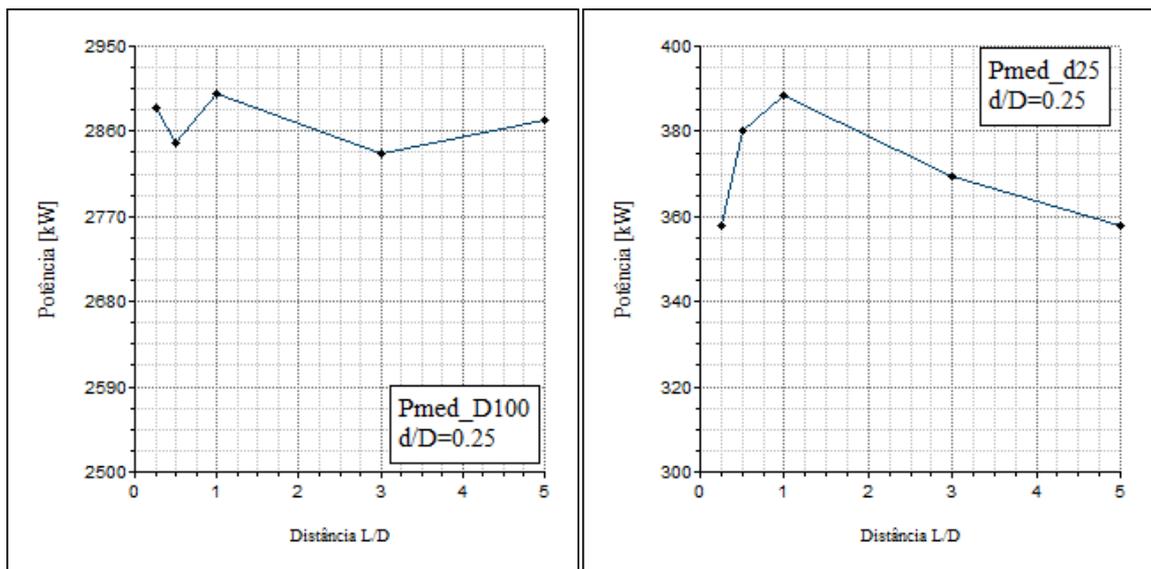


Figura 5.24- Resultado iterativo da potência nas turbinas. $V = 11\text{m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.25$.

A potência média encontrada na segunda fileira ($d = 0.25D$) aumenta até $L = 1D$ e após apresenta uma queda constante. A primeira fileira se mantém relativamente estável com um pequeno pico em $L = 1D$ e um mínimo em $L = 3D$.

Desta forma prossegue-se ao próximo caso totalmente iterativo, $V = 11 \text{ m/s}$, $S = 3$, $d/D = 0.5$; evidenciado em potência na Figura 5.25.

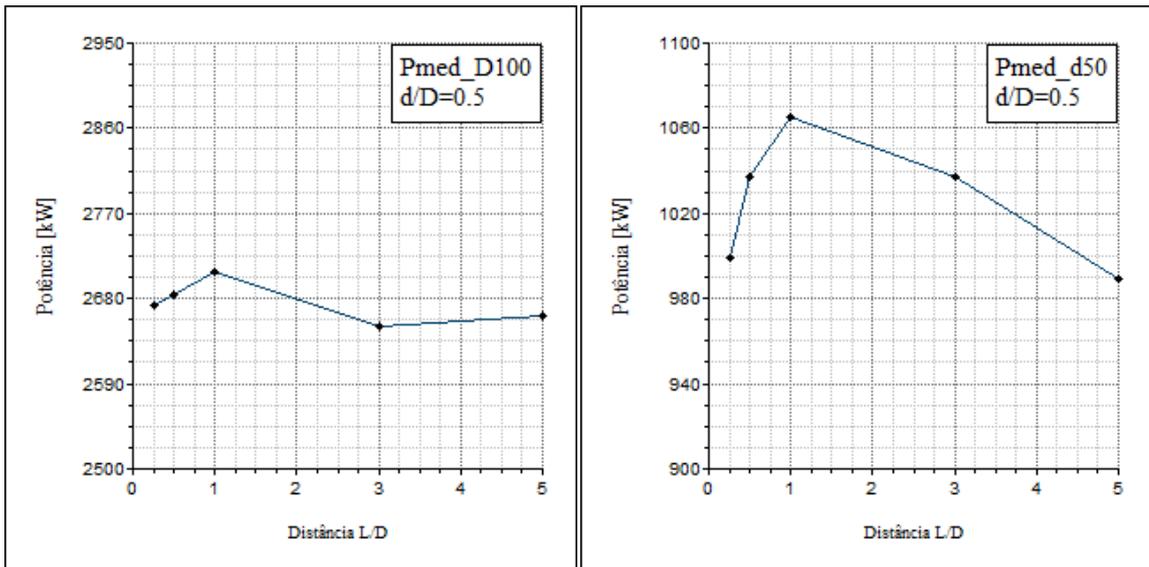


Figura 5.25- Resultado iterativo da potência nas turbinas. $V = 11\text{ m/s}$; $S = 3D$; $d/D = 0.5$.

Pode-se observar o pico bastante pronunciado na segunda fileira de diâmetro $d/D = 0.5$ para $L = 1D$ seguindo-se uma queda suave; assim como um pico de potência em $L = 1D$ para a primeira fileira, com alternância de valores. Levantadas as potências individuais calculam-se as potências por área total de aerogeradores instalados para o estudo totalmente iterativo, buscam-se os máximos globais do sistema como um todo na Figura 5.26.

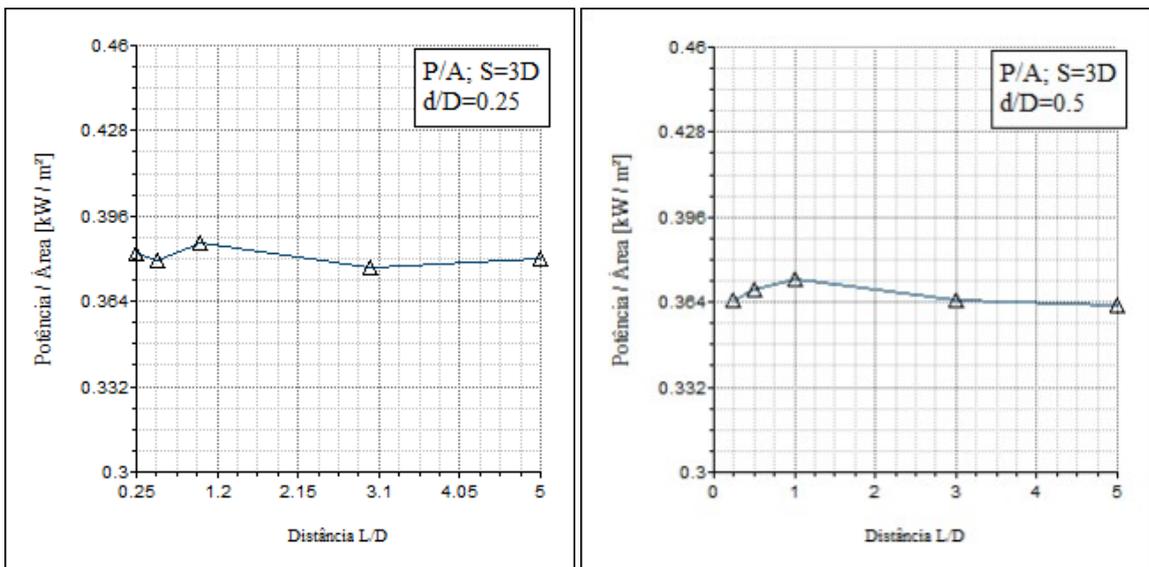


Figura 5.26–Resultado iterativo da potência por área total de aerogeradores instalados [kW/m]em função da distância da segunda fileira L/D ; $S = 3D$; $V = 11\text{ m/s}$.

Através da Figura 5.26 conclui-se que tanto para ambos os diâmetros: $d/D = 0.25$ e $d/D = 0.5$ o maior ganho de potência ocorre no espaçamento $L = 1D$; e após, para maiores espaçamentos segue-se uma queda suave. Porém ressaltar que o maior ganho de potência por área, valor absoluto ocorre para o diâmetro menor $d/D = 0.25$ com o valor de 0.3862 kW/m^2 .

6 CONCLUSÕES

Um estudo com alto grau de inovação, em que diferentes campos do conhecimento são conjugados de forma a promovero aumento da eficiência de extração de potência de um grupo de aerogeradores próximos, empregando os mais recentes desenvolvimentos no campo da otimização (Design Constructal, Teoria Constructal) com modernas ferramentas de cálculo computacional (CFD, Micrositing) e modelos matemáticos consolidados (disco atuador).

O modelo do disco atuador é uma importante ferramenta no estudo do comportamento da esteira de turbinas eólicas e no presente trabalho fornece coerentes resultados face à turbina operando dentro dos limites do coeficiente de torque e indução axial. O método reduz consideravelmente o tempo computacional, podendo ser empregado em *micrositing* de fazendas eólicas. Ressaltar queo método possui limitações na proximidade do aerogerador, logo no início da região da esteira próxima (menos de $0.25D$), atribuído a não captura dos efeitos de recirculação em perfil e vórtices de ponta de pá.

Os melhores resultados obtidos de todas as análises indicam ganho em potência disponível por área de 7,37% para a configuração $V = 7\text{m/s}$, $S = 3D$, $d/D = 0.5$, $L = 3D$ e 8,48% para a configuração $V = 11\text{m/s}$, $S = 3D$; $d/D = 0.25 \& 0.5$, $L = 0.75D$, valor relativo à execução de somente um diâmetro de 100 metros. Verificar os resultados nas Tabela 6.1 e Tabela 6.2 para os quatro melhores resultados encontrados, em duas distintas velocidades de vento.

Tabela 6.1- Os melhores resultados em potência disponível por área – $V = 7\text{ m/s}$

Melhores Configurações Geométricas $V = 7\text{m/s}$				Ganho [%]
$S = 3D$	$d/D = 0.5$	$L = 3.0D$	0,108 [kW/m ²]	7,37
$S = 5D$	$d/D = 0.75$	$L = 0.5D$	0,103 [kW/m ²]	2,40

Tabela 6.2- Os melhores resultados em potência disponível por área – $V = 11\text{ m/s}$

Melhores Configurações Geométricas $V = 11\text{m/s}$				Ganho [%]
$S = 3D$	$d/D = 0.25;0.5$	$L = 0.75D$	0,396 [kW/m ²]	8,48
$S = 5D$	$d/D = 0.5$	$L = 2.0D$	0,375 [kW/m ²]	2,73

Para um melhor rendimento global a teoria Constructal de Bejan pré-define os diâmetros a serem empregados na segunda fileira e também as distâncias entre turbinas como frações do diâmetro frontal. Nas simulações numéricas a hipótese se confirma, pois a estricção do escoamento por *efeito Venturi* das esteiras das turbinas à montante leva as turbinas à jusante a uma maior velocidade incidente, e conseqüente aumento na potência extraída e rendimento. Na configuração das turbinas da segunda fileira com menor diâmetro que as frontais o fenômeno é melhor verificado, aumento da potência total extraída.

Nas simulações totalmente iterativas o segundo diâmetro alcança rendimento superior ao primeiro, elevando o coeficiente de potência total tal como nas simulações semi-iterativas.

7 TRABALHOS FUTUROS

Provavelmente existem faixas do domínio promissoras, verificar estas regiões aplicando novos espaçamentos entre turbinas e diferentes diâmetros e confirmar a não-existência de máximos globais ocultos sob máximos locais.

Aproveitar melhor o potencial do escoamento aplicando mais uma fileira de aerogeradores com diâmetro menor à jusante, após a última fileira. Nesta região, ainda existe ganho a ser obtido, nos espaços e intervalos pouco explorados do domínio.

Há possibilidade de desenvolver um algoritmo que priorize as regiões mais promissoras no âmbito da eólica, focando as simulações em faixas de parâmetros com base nos resultados encontrados previamente.

Evoluir a modelagem do disco atuador, acrescentando equações que induzam circulação, vorticidade e aumento da intensidade de turbulência melhoraria a acuracidade dos resultados obtidos na esteira próxima e em disposições de aerogeradores bem compactas. De uma forma geral tornaria o modelo mais fidedigno, capturando a menor escala dos efeitos obtidos. O perfil de pá e a velocidade angular do aerogerador não são dados fornecidos pelos fabricantes de turbinas eólicas comerciais, são necessárias premissas para aprimorar o modelo, com base em suposições teóricas da teoria eólica.

Nas configurações de diâmetro similar na primeira e segunda fileira ou com espaçamento muito pequeno (menor que $0.25D$) a metodologia de simulação totalmente iterativa é promissora, ainda que pouco robusta. A influência simultânea da variação dos parâmetros conduz à divergência do processo iterativo para muitos casos, carece de desenvolvimento para aumentar a robustez e estabilidade.

Os principais fabricantes de turbinas eólicas recomendam que a altura de instalação do centro do cubo da turbina seja relacionada ao diâmetro das pás na mesma proporção. Na dissertação utiliza-se somente uma altura no centro do cubo dos rotores, todos a 100 metros do solo ($1D$). Tal suposição simplifica o estudo, pois permite trabalhar sobre um campo de velocidades bidimensional. Em uma análise tridimensional a rugosidade do solo é relevante, assim como a camada limite atmosférica do escoamento livre, na forma das velocidades de entrada. A fim de simplificar a observância da variação dos resultados frente à variação de espaçamentos entre turbinas relacionando Constructal & Eólica, o perfil de velocidades de entrada é uniforme e a rugosidade do solo muito baixa. A adoção de alturas diferentes

das indicadas pelo fabricante não invalida os resultados encontrados, pois na abordagem tridimensional supõem-se que existirão estrições do escoamento entre as turbinas à montante de forma similar. Para trabalhos futuros é de interesse modelar o escoamento com diferentes alturas de turbinas, tal como os fabricantes recomendam, verificando a ocorrência de ganhos de potência para diferentes disposições geométricas.

REFERÊNCIAS

- Amarante, O. A. C; **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, 2001.
- Ammara, I., Leclerc C., Masson C.; **A viscous three-dimensional differential/actuator-disk method for the aerodynamic analysis of wind farms**. Journal of Solar Energy Engineering Vol. 124; 2002.
- Ainslie, J. F., **Development of an Eddy-Viscosity Model for Wind Turbine Wakes**, Proc. of 7th BWEA Conf., pp. 61–65; 1985.
- Bejan, A.; Lorente S., **Design with Constructal Theory**. 1St Edition, Wiley, 2008.
- Bejan, A., **Shape and Structure, from Engineering to Nature**, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- Bejan, A.; Zane J. P., **Design in Nature**. Ed. Anchor, 2013.
- Bejan, A., E. Sciubba, **The optimal spacing for parallel plates cooled by forced convection**, Int. J. Heat Mass Transfer 35 (1992) 3259–3264.
- Bejan, A.; **Constructal theory of pattern formation**, Hydrology and Earth System Sciences; 2007.
- Bello-Ochende, T., Bejan, A.; **Fitting the Duct to the ‘Body’ of the Convective Flow**, Int. J. Heat Mass Transfer, 46, pp. 1693–1701. 2003.
- Bello-Ochende, T., Bejan, A., **Maximum heat transfer density, plate with multiple length scale**, Int. J. Heat Mass Transfer, 43, pp. 1181–1186. 2004.a
- Bello-Ochende, T., Bejan, A.; **Multi-scales cylinders in cross flow**, Int. J. Heat Mass Transfer, 48. 2004.b
- Burton, T. and Sharpe, D., **Wind Energy Handbook**. John Wiley & Sons Ltd, ISBN 0-471-48997-2, Chichester, 2006.
- Cabezón D, Sanz J, Martí I, Crespo A. **CFD modelling of the interaction between the Surface Boundary Layer and rotor wake. Comparison of results obtained with different turbulence models and mesh strategies**. In: European wind energy conference & exhibition proceedings, Parc Chanot, Marseille, France, 16–19; 2009.
- Carcangiu, C. E., **CFD-RANS Study of Horizontal Axis Wind Turbines**, PhD Thesis, Università degli Studi di Cagliari, Itália; , 2008.
- Carvalho, P., **Geração Eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003.

Castellani F. **Grid control for CFD wakes simulation in complex terrains.** In: European Wind Energy Conference & Exhibition Proceedings – Parc Chanot, Marseille, France, 16–19, 2009.

Castellani F., Vignaroli A. **An Application of the Actuator Disc Model for Wind Turbine Wakes Calculations.** In: Applied Energy 101 (2013) 432-440 Elsevier.

Castro, RuiM.G., **Introdução à Energia Eólica.** Universidade de Lisboa, 2008.

Crasto G.; Gravdahl AR. **CFD wake modeling using a porous disc.** In: European wind energy conference & exhibition proceedings, Brussels Expo, Belgium, 31, 2008.

Crespo, A., Manuel, F., Moreno, D., Fraga, E., and Hernandez, J., 1985, **Numerical Analysis of Wind Turbine Wakes**, Workshop on Wind Energy Applications, Delphi, Greece, pp. 15–25.

Custódio, R. S., **Parâmetros de Projeto de Fazendas Eólicas e Aplicação Específica no Rio Grande do Sul.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

El Kasmi A, Masson C. **An extended k–e model for turbulent flow through horizontal-axis wind turbine.** J Wind Eng Indus Aerodyn 2008;96: 103–22.

Freitas Filho, D. G. R. **Análise da Aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional para Avaliação do Potencial Eólico em Terrenos Complexos.** Dissertação de mestrado no PROMEC-UFRGS. Porto Alegre 2012.

Glauert, H., (1935b). **Windmills and Fans. Aerodynamic theory** (ed. Durand, W. F.). Julius Springer, Berlin, Germany.

Horn, D. A. **Análise numérica da esteira aerodinâmica formada por uma turbina eólica com dimensionamento ótimo de Betz.** Dissertação de mestrado no PROMEC-UFRGS. Porto Alegre 2010.

Ivanell, S. S. A., **Numerical Computations of Wind Turbine Wakes.** Technical Reports from Royal Institute of Technology. Gotland University, Stockholm 2009.

Ledezma G. A., Bejan, A., **Optimal geometric arrangement of staggered vertical plates in natural convection,** Int. J. Heat Mass Transfer, 119, pp. 700–708.1997.

Loredo-Souza. A. M.; Schettini. E. B. C.; Paluch. **Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento.** In: Möller, S. V.; Silvestrini, J. H. **Turbulência. Volume 4:** Rio de Janeiro. ABCM, 2004.

Lovatto, M. L. **Modelagem computacional da esteira aerodinâmica de turbinas eólicas baseada em sumidouro de quantidade de movimento.** Monografia (Trabalho de

Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

Ludwig, D. E. **Análise numérica da influência de fatores atmosféricos na esteira aerodinâmica de turbinas eólicas**. Dissertação de mestrado no PROMEC-UFRGS. Porto Alegre 2011.

Petrescu, S.; **Comments on the Optimal Spacing of Parallel Plates Cooled by Forced Convection**, Int. J. Heat Mass Transfer, 37, p. 1283.1994

Maliska, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. 1995.

Mattuella, J. L. **Avaliação em Túnel de Vento do Comportamento da Camada Limite Atmosférica em Terrenos Complexos**. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2012.

Mikkelsen R. **Actuator disc methods applied to wind turbines**. PhD thesis, Technical University of Denmark, Mek dept.; 2003.

Mikkelsen, R., Sorensen, J. N., and Shen, W. Z., **Modelling and Analysis of the Flow Field Around a Coned Rotor**. Wind Energy. 2001.

Muzychka, Y. S.; **Constructal multi-scale design of compact micro-tube heat sinks and heat exchangers**. Faculty of Engineering and Applied Science, St. Jonh's, Canada. 2006.

NREL, **NREL 10-m Wind Turbine Testing in NASA Ames 80'x120' Wind Tunnel**, (<http://wind.nrel.gov/amestest/>);

Petry, A. P. “**Análise Numérica de escoamentos Turbulentos Tridimensionais empregando o Método dos Elementos Finitos e Simulação de Grandes Escalas**”, Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2002.

Piccoli, G. L. **Análise da Viabilidade de uma Fazenda Eólica Empregando Dinâmica dos Fluidos Computacional**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

Reis, A. H., **Constructal theory: From Engineering to Physics, and how flow systems develop shape and structure**. University of Évora, Physics Department and Évora Geophysics Center. Portugal, Évora, 2006.

Rocha, L. A. O., Bejan, A., **Geometric Optimization of Periodic Flow and Heat Transfer in a Volume Cooled by Parallel Tubes**. ASME J. Heat Transfer, 123, pp. 233–239. 2001.

Schlichting H. **Boundary-Layer Theory**, Sétima Edição, McGraw-Hill, EUA; 1970

Silveira Neto, A. D. Fundamentos da Turbulência em Fluidos. In: Freire, A. P. S., Menut, P. P. M.; **Turbulência**. Rio de Janeiro, ABCM, 2002. p.2-48.

Stangroom, P.; **CFD Modelling of wind flow over terrain**. University of Nottingham, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, 2004.

Valle, R. M. Moreira, G. A., Nascimento, C. A.; **Análise do potencial eólico de uma micro-região utilizando um modelo de camada limite atmosférica**. Revista Ibero americana de Ingeniería Mecánica. Vol. 17, Nº2, pp. 59-71, 2013.

Van Kuik; G. A. M.; Sørensen J.; Okulov V. L.; **Rotor theories by Professor Joukowsky: Momentum theories**. Progress in Aerospace Sciences 73 1-18; 2015.

Vermeer LJ, Sørensen J., Crespo A. **Wind turbine wake aerodynamics**. Prog. Aerospace Sci 2003; 39:467–510.

Xiao, Y.; Chao, L. **CFD Approach to the Micrositing of Wind Turbines in Complex Terrain**. The Research Center of Urban & Civil Engineering Disaster Prevention & Reduction, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen, Guangdong, China, 2010.

Wenzel G. M., **Análise Numérica da Esteira de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal: Estudo comparativo com Modelos Analíticos**. Dissertação de mestrado PROMEC-UFRGS. Porto Alegre 2010.

Wilcox D.C.; **Turbulence Modeling for CFD**. DCW Industries Inc., EUA. 1998.

Wylen, V.; Jonh, G. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. Tradução da quarta edição americana por Euryale de Jesus Zerbini, Ricardo Santili Ekman Simões. São Paulo, 1995. Editora Edgar Blucher.

Kris de Decker.; **Wind powered factories: history (and future) of industrial windmills**. Low-Tech Magazine. Barcelona. 2009.

ANEXO A

A.1 Curvas características

Fonte: Catálogo Wobben-Enercon

Tabela A. 1 – Curvas características (3,5 MW; 2MW, 800kW e 330kW)

Enercon - E101		3.5MW		
Tipo de Controle:		Pitch		
Temperatura Média Anual [°C]:		19		
Altitude do Local [m]:		2		
Diâmetro [m]:		101		
Altura do Rotor [m]:		135		
ρ [kg/m ³]:		1,225	1,194513965	
	V [m/s]	Pe [kW]	Pdisp [kW]	Cp
	1	0	5	0,00
	2	3	39	0,08
	3	37	132	0,28
	4	118	314	0,38
	5	258	613	0,42
	6	479	1060	0,45
	7	790	1683	0,47
	8	1200	2513	0,48
	9	1710	3577	0,48
	10	2340	4907	0,48
	11	2867	6532	0,44
	12	3034	8480	0,36
	13	3050	10781	0,28
	14	3050	13466	0,23
	15	3050	16562	0,18
	16	3050	20100	0,15
	17	3050	24109	0,13
	18	3050	28619	0,11
	19	3050	33659	0,09
	20	3050	39258	0,08
	21	3050	45446	0,07
	22	3050	52252	0,06
	23	3050	59707	0,05
	24	3050	67838	0,04
	25	3050	76676	0,04

Enercon - E70	2MW		
Tipo de Controle:	Pitch		
Temperatura Média Anual [°C]:	19		
Altitude do Local [m]:	2		
Diâmetro [m]:	71		
Altura do Rotor [m]:	100		
ρ [kg/m ³]:	1,225		
V [m/s]	Pe [kW]	Pdisp [kW]	Cp
1	0	2	0,00
2	2	19	0,10
3	18	65	0,27
4	56	155	0,36
5	127	303	0,42
6	240	524	0,46
7	400	832	0,48
8	626	1242	0,50
9	892	1768	0,50
10	1223	2425	0,50
11	1590	3228	0,49
12	1900	4190	0,45
13	2080	5328	0,39
14	2230	6654	0,34
15	2300	8184	0,28
16	2310	9933	0,23
17	2310	11914	0,19
18	2310	14143	0,16
19	2310	16633	0,14
20	2310	19400	0,12
21	2310	22458	0,10
22	2310	25821	0,09
23	2310	29505	0,08
24	2310	33523	0,07
25	2310	37891	0,06

Enercon - E48	800kW		
Tipo de Controle:	Pitch		
Temperatura Média Anual [°C]:	19		
Altitude do Local [m]:	2		
Diâmetro [m]:	48		
Altura do Rotor [m]:	50		
ρ [kg/m ³]:	1,225		
V [m/s]	Pe [kW]	Pdisp [kW]	Cp
1	0	1	0,00
2	2	9	0,23
3	12	30	0,40
4	32	71	0,45
5	66	139	0,48
6	120	239	0,50
7	191	380	0,50
8	284	567	0,50
9	405	808	0,50
10	555	1108	0,50
11	671	1475	0,45
12	750	1915	0,39
13	790	2435	0,32
14	810	3041	0,27
15	810	3741	0,22
16	810	4540	0,18
17	810	5445	0,15
18	810	6464	0,13
19	810	7602	0,11
20	810	8867	0,09
21	810	10264	0,08
22	810	11802	0,07
23	810	13485	0,06
24	810	15322	0,05
25	810	17318	0,05

Enercon - E33		0.330MW		
Tipo de Controle:		Pitch		
Temperatura Média Anual [°C]:		19		
Altitude do Local [m]:		2		
Diâmetro [m]:		33,4		
Altura do Rotor [m]:		37		
ρ [kg/m ³]:		1,225	1,19451396	
	V [m/s]	Pe [kW]	Pdisp [kW]	Cp
	1	0	1	0,00
	2	0	4	0,00
	3	5	14	0,35
	4	13,7	34	0,40
	5	30	67	0,45
	6	55	116	0,47
	7	92	184	0,50
	8	138	275	0,50
	9	196	391	0,50
	10	250	537	0,47
	11	292,8	714	0,41
	12	320	927	0,35
	13	335	1179	0,28
	14	335	1473	0,23
	15	335	1811	0,18
	16	335	2198	0,15
	17	335	2637	0,13
	18	335	3130	0,11
	19	335	3681	0,09
	20	335	4293	0,08
	21	335	4970	0,07
	22	335	5714	0,06
	23	335	6529	0,05
	24	335	7419	0,05
	25	335	8385	0,04

