

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

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE FATORES ATMOSFÉRICOS NA
ESTEIRA AERODINÂMICA DE TURBINAS EÓLICAS

por

Daniel Evandro Ludwig

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, março de 2011

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE FATORES ATMOSFÉRICOS NA
ESTEIRA AERODINÂMICA DE TURBINAS EÓLICAS

por

Daniel Evandro Ludwig
Engenheiro Mecânico

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

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr^a Adriane Prisco Petry

Aprovado por:

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha UFRGS

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider UFRGS

Prof. Dr^a. Sônia Magalhães dos Santos FURG

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 22 de março de 2011

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, de modo especial aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

à minha orientadora, *Prof^a. Dr^a. Adriane Prisco Petry* pelo tempo disponibilizado e pela confiança transmitida ao longo do trabalho.

ao amigo *Msc. Eng. João Américo Aguirre de Oliveira Jr.* pelo auxílio na utilização da ferramenta computacional.

aos meus pais, *Aldino e Laides*, a minha irmã *Marceli* e meu cunhado *Alex* que, apesar da distância e dificuldades, sempre incentivaram meus estudos e apoiaram minhas decisões.

aos colegas do GESTE – Grupo de Ensaios Térmicos e Energéticos.

à CAPES pelo aporte financeiro.

aos amigos e colegas que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A evolução do uso da energia eólica nas últimas décadas está diretamente relacionada ao desenvolvimento da tecnologia empregada na conversão e projeto das instalações. Neste contexto o presente trabalho apresenta um estudo sobre a influência de fatores atmosféricos, tais como a turbulência e a presença de um perfil de velocidades referentes à camada limite atmosférica, no desenvolvimento da esteira aerodinâmica de uma turbina eólica dimensionada segundo a teoria de Betz. O estudo é realizado utilizando o método dos volumes finitos para a solução das equações de Navier-Stokes com Médias de Reynolds (RANS). O problema de fechamento é contornado com a modelagem da turbulência segundo o modelo SST. A análise é realizada empregando o programa ANSYS-CFX 12.0 com modelagem do escoamento em regime transiente e incompressível. O domínio, discretizado com volumes tetraédricos e prismáticos, é dividido em uma região em que está inserido o rotor da turbina e outra equivalente ao túnel de vento utilizado no trabalho experimental de referência, com condição de interface conectando os volumes. A análise é focada no estudo da esteira distante do rotor com resultados comparados aos experimentais existentes na literatura. O estudo é dividido em três casos com intensidades de turbulência na entrada do domínio equivalentes a 0,6%, 2% e 6 % respectivamente, utilizadas tanto nas simulações com perfil uniforme de velocidades quanto para aquela com perfil logarítmico de velocidades. Os resultados, apresentados de forma adimensional para a velocidade em diferentes distâncias a jusante do rotor, são coerentes com resultados experimentais de outros autores. As simulações realizadas demonstram a importância de considerarem-se os efeitos atmosféricos no dimensionamento de projetos de instalação de sistemas de conversão de energia eólica.

Palavras-chave: Energia Eólica, Turbina, Esteira, Camada Limite Atmosférica, Turbulência.

ABSTRACT

Advances in the study of numerical simulations of turbulent flows, coupled with the increase of computational power, has enabled computational solutions for more complex engineering problems. The evolution in the use of wind energy in recent decades is directly related to the development of technology involving the conversion and project of installations. In this context, this work shows a study on the influence of atmospheric factors like turbulence and the existence of a velocity profile related to the atmospheric boundary layer, in the development of the aerodynamic wake of a wind turbine projected following the Betz theory. The study is done using the method of finite volumes to solve the Reynolds Averaged Navier-Stokes equations (RANS), the closure problem is outlined with the SST model. The analysis is done using ANSYS-CFX 12.0 software with modeling of transient and incompressible flow. The domain, discretized with tetrahedral and prismatic volumes, is divided into a region where the turbine's rotor is placed and into another one equivalent to the wind tunnel used in experimental research, with an interface condition connecting both domains. The focus of the analysis is the study of the rotor's downstream wake, comparing the results to experimental ones from existing literature. The study is divided into three cases with different turbulence intensities in the domain inlet equivalent to 0.6%, 2% and 6% respectively, used both in the uniform velocity profile and in the logarithmic velocity profile simulations. Results, presented in non-dimensional form for the velocity at different downstream distances from the rotor, are consistent with the experimental results of other authors. Developed simulations show the importance of considering atmospheric effects on sizing projects of wind energy conversion systems.

Keywords: Wind Energy, Turbine, Wake, Atmospheric Boundary Layer, Turbulence.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	1
1.2	MATRIZ ENERGÉTICA GAÚCHA.....	3
1.3	O ESTUDO DE ESTEIRAS.....	4
1.4	OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	ESTEIRA AERODINÂMICA.....	11
2.2	CARACTERIZAÇÃO.....	13
2.2.1	<i>Esteira próxima</i>	15
2.2.2	<i>Esteira distante</i>	16
2.3	MODELAGEM NUMÉRICA DE ESTEIRAS.....	18
2.3.1	<i>Modelos analíticos</i>	19
2.3.2	<i>Disco atuador</i>	20
2.3.3	<i>Linha atuadora</i>	22
2.3.4	<i>Modelagem completa do rotor</i>	24
3	COEFICIENTE DE POTÊNCIA	25
4	CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA	28
5	MODELAGEM NUMÉRICA E MATEMÁTICA	32
5.1	TRABALHO EXPERIMENTAL DE REFERÊNCIA.....	32
5.2	MODELO GEOMÉTRICO.....	33
5.3	DISCRETIZAÇÃO.....	38
5.4	SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	41
5.4.1	<i>Método dos volumes Finitos</i>	41
5.4.2	<i>Modelo de turbulência SST</i>	44
5.5	CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO.....	47
5.5.1	<i>Condições iniciais</i>	47
5.5.2	<i>Condições de entrada</i>	48
5.5.3	<i>Condições de saída</i>	49
5.5.4	<i>Condições de parede</i>	50
5.5.5	<i>Condições de solo</i>	50

5.5.6	<i>Condição de interface</i>	51
6	RESULTADOS	52
6.1	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MALHA	53
6.2	ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DE PASSO DE TEMPO	54
6.3	ESCOAMENTO COM PERFIL UNIFORME DE VELOCIDADES.....	55
6.3.1	<i>Caso 1 – intensidade de turbulência baixa</i>	59
6.3.2	<i>Caso 2 – intensidade de turbulência média</i>	61
6.3.3	<i>Caso 3 – intensidade de turbulência alta</i>	63
6.3.4	<i>Comparação de casos</i>	65
6.4	ESCOAMENTO COM INFLUÊNCIA DE CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA.....	66
6.4.1	<i>Caso 1 com CLA – intensidade de turbulência baixa</i>	67
6.4.2	<i>Caso 2 com CLA – intensidade de turbulência média</i>	70
6.4.3	<i>Caso 3 com CLA – intensidade de turbulência alta</i>	71
6.5	ESTUDO DE ESTEIRA PRÓXIMA.....	73
7	CONCLUSÕES	76
8	PUBLICAÇÕES RELACIONADAS DO AUTOR	78
8.1	ARTIGOS ACEITOS PARA PUBLICAÇÃO	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
	ANEXO 1	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Moinho de eixo vertical para moagem de grãos no Afeganistão [Hau, 2006].....	9
Figura 2.2 – Turbina Eólica de Halladay [Hau, 2006]	10
Figura 2.3 – Foto aérea da fazenda eólica de Horns Rev. [Aeolus, 2011]	12
Figura 2.4 – Distanciamento entre turbinas eólicas. [Amarante, 2001]	13
Figura 2.5 – Sombras dos aerogeradores numa fazenda eólica. [Custódio, 2009].....	14
Figura 2.6 – Esquemática de vórtices criados pela turbina. [Ivanell, 2009]	14
Figura 2.7 – Deflexão da esteira devido ao ângulo de operação da turbina. [Jiménez <i>et al.</i> , 2009].....	16
Figura 2.8 – (a) escoamento em campo aberto (b) escoamento em túnel de vento. [Schreck, 2002].....	18
Figura 2.9 – Ilustração conceito do Disco Atuador. [Ivanell, 2009].	21
Figura 2.10 – Corte na pá mostrando uma seção do aerofólio.	23
Figura 3.1 – Gráfico de C_p em função da velocidade do vento [Custódio, 2009]	26
Figura 3.2 – Relação entre coeficientes de potência e de empuxo [Custódio, 2009].....	27
Figura 4.1 – Camada Limite Atmosférica [Custódio, 2009]	28
Figura 5.1 – Representação dos perfis aerodinâmicos utilizados na criação da pá.....	37
Figura 5.2 – Geometria da pá criada segundo o dimensionamento ótimo de Betz.	37
Figura 5.3 – Malha superficial do rotor	39
Figura 5.4 – Malha superficial em detalhe do eixo da turbina	40
Figura 5.5 – Malha do domínio fixo.....	40
Figura 5.6 – Condições de contorno do problema aplicado a uma geometria semelhante ao túnel de vento de Alfredsson e Dahlberg (1979).....	47
Figura 5.7 – Perfil de velocidades da condição de entrada do domínio	49
Figura 6.1 – Velocidade média obtida com as malhas analisadas.....	54
Figura 6.2 – Campo de velocidades no plano YZ com perfil uniforme de velocidades na entrada do domínio.	56
Figura 6.3 – Campo de velocidades no plano XY com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio.	57
Figura 6.4 – Campo de velocidades em detalhe da ponta da pá do rotor	57

Figura 6.5 – Linhas de corrente cruzando o rotor.....	58
Figura 6.6 – Campo de pressões sobre uma seção da pá a 10 m de raio.	59
Figura 6.7 – Perfis de velocidades para 6 e 8 diâmetros com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio, caso 1.....	60
Figura 6.8 – Perfis de velocidades para 10, 12 e 16 diâmetros com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio, caso 1.....	61
Figura 6.9 – Perfis de Velocidades para 6 e 8 diâmetros com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio, caso 2.....	62
Figura 6.10 – Perfis de Velocidades para 10, 12 e 16 diâmetros com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio, caso 2.....	63
Figura 6.11 – Perfil de Velocidades para 6 e 8 diâmetros com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio, caso 3.	64
Figura 6.12 – Perfil de Velocidades para 10, 12 e 16 diâmetros com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio, caso 3.....	64
Figura 6.13 – Velocidade média no núcleo do rotor ao longo do domínio para diferentes intensidades de turbulência.....	65
Figura 6.14 – Campo de velocidades no plano YZ com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio computacional.	66
Figura 6.15 – Campo de Velocidades no plano do Rotor com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio.	67
Figura 6.16 – Perfil de velocidades não perturbada e a 8 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio, caso 1.	68
Figura 6.17 – Perfis de velocidades para 10, 12 e 16 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio, caso 1.	69
Figura 6.18 – Perfis de velocidades para 6 e 8 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio, caso 2.	70
Figura 6.19 – Perfis de velocidades para 10,12 e 16 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio, caso 2.	71
Figura 6.20 – Perfis de Velocidades para 6 e 8 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio, caso 3.	72

Figura 6.21 – Perfis de velocidades para 10, 12 e 16 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio, caso 3.	72
Figura 6.22 – Perfis de velocidades para 2 e 4 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio.	73
Figura 6.23 – Perfis de Velocidades para 8, 10 e 12 diâmetros.	74
Figura 6.24 – Perfis de velocidades para 2 e 4 com CLA.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Geração de Eletricidade no Cenário de Referência para o Mundo.....	2
Tabela 1.2 – Total de Usinas em Operação, em Construção e com Outorga no RS	3
Tabela 4.1 – Fator de Rugosidade para diferentes tipos de Terrenos.....	29
Tabela 4.2 – Valores aproximados para Z_0 e α	31
Tabela 6.1 – Avaliação das malhas do domínio	54
Tabela 6.2 – Influência do passo de tempo na solução	55

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AID	Airfoil Investigation Database
BEM	Teoria da Quantidade de Movimento no Elemento de Pá
CESUP	Centro Nacional de Supercomputação
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CLA	Camada Limite Atmosférica
DFC	Dinâmica dos Fluidos Computacional
DNS	Direct Numerical Simulation
DNW	Deutsch-Niederländische Windlange
EOL	Central Geradora Eolielétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
KTH	Royal Institute of Technology
LES	Large-Eddy Simulation
MME	Ministério das Minas e Energia
MVF	Método dos Volumes Finitos
NACA	National Advisory Comitte for Aeronautics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RANS	Equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds
RMS	Root Mean Square – Raiz quadrada média
SST	Shear Stress Transport
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHE	Unidade Hidrelétrica de Energia
UTE	Unidade Termelétrica de Energia
WAsP	Wind Atlas Anelysis and Application Program

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

A	Área varrida pelas pás do rotor em movimento	$[m^2]$
A_d	Área do disco atuador	$[m^2]$
B	Número de pás da turbina	
c	Comprimento da corda de um perfil	$[m]$
$C(r)$	Comprimento da corda em função do raio	$[m]$
C_D	Coeficiente de arrasto	
C_E	Coeficiente de empuxo da turbina	
C_L	Coeficiente de sustentação	
C_P	Coeficiente de potência	
D	Diâmetro da turbina	$[m]$
dF	Componente tangencial da força aerodinâmica	$[N/m]$
D_{wake}	Diâmetro da região de esteira	$[m]$
E	Força de empuxo	$[N/m]$
e_D	Vetor unitário na direção do arrasto	
e_L	Vetor unitário na direção da sustentação	
F_1, F_2	Fatores de mistura do modelo SST	
F_D	Força de arrasto	$[N/m]$
F_L	Força de sustentação	$[N/m]$
F_x	Força axial da superfície	$[N/m]$
H	Altura em relação ao solo	$[m]$
h_e	Altura do eixo da turbina	$[m]$
K	Energia cinética turbulenta	$[m^2/s^2]$
k_{wake}	Constante de decaimento da esteira	
L	Distância a jusante da turbina	$[m]$
P	Potência disponibilizada pelo vento	$[W]$
p	Pressão	$[Pa]$
\bar{p}	Pressão média	$[Pa]$
Pk	Produção de k	$[m^2/s^3]$
P_{max}	Potência máxima que pode ser extraída do vento	$[W]$
P_t	Potência extraída pela turbina	$[W]$
r	Raio local da turbina	$[m]$

R	Raio total da turbina	[m]
s_{ij}	Tensor de deformação	
S_M	Termo fonte da quantidade de movimento	[W/m ³]
t	Tempo	[s]
u^*	Velocidade de atrito	[m/s]
U_∞	Velocidade do vento não perturbada	[m/s]
U_{wake}	Velocidade afetada pela esteira	[m/s]
V	Velocidade do vento na altura h	[m/s]
V_i	Velocidade na direção i	[m/s]
\bar{V}_i	Velocidade média na direção i	[m/s]
v'_i	Flutuação de velocidade na direção i	[m/s]
V_j	Velocidade na direção j	[m/s]
\bar{V}_j	Velocidade mediana direção j	[m/s]
V_k	Velocidade na direção k	[m/s]
V_{rel}	Velocidade relativa do vento	[m/s]
V_z	Velocidade do vento na direção Z	[m/s]
V_0	Velocidade média do perfil logarítmico	[m/s]
x_i	Comprimento na direção i	[m]
x_j	Comprimento na direção j	[m]
x_k	Comprimento na direção k	[m]
y	Distância do volume à parede mais próxima	[m]
Y	Altura do domínio computacional	[m]
z_0	Rugosidade aparente do solo	[m]

Letras Gregas

α	Expoente adimensional da lei da potência	
α_1, α_2	Constantes do modelo SST	
α_A	Ângulo de ataque do perfil	[rad]
β	Ângulo de giro relativo	[rad]
β^*	Constante do modelo SST	
β_1, β_2	Constantes do modelo SST	
γ	Ângulo entre a velocidade relativa e a velocidade tangencial	[rad]
δ_{ij}	delta de Kronecker	
κ	Constante de Von Karman	

λ_D	Velocidade de ponta de pá	
μ	Viscosidade Dinâmica	[kg/m.s]
ρ	Massa específica do ar	[kg/m ³]
σ_{k1}	Constante do modelo SST	
σ_{w1}, σ_{w2}	Constantes do modelo SST	
τ_{ij}	Tensor de tensões viscosas	
τ_w	Tensão de cisalhamento na superfície do solo	[kg/m.s ²]
ν	Viscosidade Cinemática	[m ² /s]
ν_t	Viscosidade turbulenta	[m ² /s]
φ	Direção do vento relativo	[rad]
Ω	Velocidade angular	[rad/s]
ω	Taxa de dissipação específica	[m ² /s ³]

1 INTRODUÇÃO

A energia está presente em todos os setores da economia. O crescimento mundial está diretamente relacionado com a disponibilidade e capacidade de converter energia. As indústrias, escritórios, casas, carros, caminhões dependem da energia para funcionarem. Atualmente a maior parte da energia utilizada nas atividades humanas é proveniente de combustíveis fósseis, nucleares e de recursos hídricos.

Nos últimos anos, o padrão de vida de grande parte da população mundial, principalmente em países industrializados, melhorou consideravelmente. Com esta melhora, o consumo de energia no mundo aumentou dez vezes desde 1900 [Geller, 2003]. Este aumento foi atendido pelos combustíveis fósseis, fazendo do carvão e do petróleo as principais fontes de energia mundial. A preocupação com o aquecimento global e com o término das reservas de petróleo está fazendo com que as energias renováveis ganhem destaque no cenário internacional.

No Brasil, os recursos hídricos são largamente utilizados, porém a implantação de novas hidrelétricas requer o deslocamento de um grande número de pessoas e causa um grande impacto ambiental na região alagada pelo reservatório da usina. Além disso, pressões ambientais e sociais poderiam limitar a expansão deste tipo de energia. O novo modelo energético adotado pelo Brasil, buscando diversificar a matriz energética e reduzir a dependência dos recursos hídricos, estimulou a criação de programas de incentivo às fontes alternativas de energia como o PROINFA.

Os investimentos crescentes em energias renováveis estão proporcionando um maior interesse na otimização do aproveitamento dos ventos de uma fazenda eólica. No Brasil há um grande potencial para a utilização desta fonte de energia, o que está proporcionando um aumento significativo na sua utilização.

1.1 Matriz energética brasileira

No ano de 2007 foi publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) brasileiro, em parceria com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Matriz Energética Nacional 2030

[Brasil, 2007], um relatório sobre a oferta e demanda de energia no Brasil para os próximos 25 anos.

Considerando as fontes renováveis de energia elétrica, a estimativa é de que entre os anos de 2005 e 2030 haja um acréscimo de aproximadamente 19,4 GW de potência instalada no país. Destes, as centrais eólicas colaborariam com mais de 4,6 GW, ficando atrás das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), com 7,1 GW, e da geração com resíduos de cana-de-açúcar, com 6,3 GW [Brasil, 2007].

Internacionalmente, estima-se que na matriz energética usada para a geração de energia elétrica, as fontes renováveis de energia aumentarão sua participação de 0,7% em 2002 para 3,9% da matriz no ano de 2030, um crescimento significativo de mais de 550% no período, enquanto a participação de outras fontes de energia importantes, como o petróleo, devem reduzir sua participação em aproximadamente 50% no mesmo período. A Tabela 1.1 reproduz a tabela com as estimativas internacionais das fontes de energia elétrica no mundo.

Tabela 1.1 – Geração de Eletricidade no Cenário de Referência para o Mundo

Geração	(TWh)						%					
	1971	2002	2010	2020	2030	2050	1971	2002	2010	2020	2030	2050
Carvão	2.095	6.241	7.692	9.766	12.091	21.958	40,1	38,8	38,1	37,9	38,2	47,1
Petróleo	1.096	1.181	1.187	1.274	1.182	1.531	21	7,3	5,9	4,9	3,7	3,3
Gás	696	3.070	4.427	6.827	9.329	12.881	13,3	19,1	21,9	26,5	29,5	27,6
Nuclear	111	2.654	2.985	2.975	2.929	3.107	2,1	16,5	14,8	11,6	9,3	6,7
Hidro	1.206	2.610	3.212	3.738	4.248	4.420	23,1	16,2	15,9	14,5	13,4	9,5
Biomassa	9	207	326	438	627	933	0,2	1,3	1,6	1,7	2	2
Renováveis	5	111	356	733	1.250	1.800	0,1	0,7	1,8	2,8	3,9	3,9
TOTAL	5.218	16.074	20.185	25.751	31.656	46.630	100	100	100	100	100	100

Fonte: [Brasil, 2007]

A estimativa para o consumo de energia elétrica no Brasil é de que em 2030 atinja 1083,4 TWh, o que representa um aumento médio de 4% ao ano desde 2005. As fontes hidrelétricas de energia continuam mantendo a liderança na produção de eletricidade, porém sua participação no total gerado se reduz dos 85% (em 2005) para pouco mais de 70%, considerando que grande parte da importação de energia de usinas binacionais é de origem hidrelétrica [Brasil, 2007].

Atualmente, existe um grande crescimento de investimentos no setor de energias alternativas. Estas fontes renováveis e não hidráulicas devem experimentar um crescimento expressivo no período estimado, passando a representar 4% da energia elétrica gerada no país. Destes, estima-se que em 2030 as centrais eólicas estarão gerando cerca de 10,3 TWh de energia, aumentando sua participação de 0,2% em 2005 para cerca de 1% da matriz energética em 2030 [Brasil, 2007].

1.2 Matriz energética gaúcha

A 31ª edição do Balanço Energético Gaúcho [Capeletto e Zanchi de Moura, 2010] traça a evolução da matriz energética do Rio Grande do Sul e dados das fontes utilizadas no Estado. Frente à produção nacional de energia elétrica no ano-base de 2009, com 463120 GWh gerados, o Rio Grande do Sul não pode ser considerado um grande produtor com geração de 18753 GWh.

Em maio de 2010 as centrais geradoras eólicas representavam 2,1% da potência instalada no Estado, com três parques em operação. Até o ano de 2004 haviam sido outorgados outros sete empreendimentos de geração eólica, que irão gerar aproximadamente 235 MW de potência. Como pode ser visto na Tabela 1.2, estes projetos representam mais de 10% das novas usinas a serem instaladas.

Tabela 1.2 – Total de Usinas em Operação, em Construção e com Outorga no RS

TIPO	Em Operação			Em Construção			Outorgadas		
	Nº de Usinas	Potência kW	%	Nº de Usinas	Potência kW	%	Nº de Usinas	Potência kW	%
CGH - Central Geradora Hidrelétrica	34	21.917	0,31				7	4.344	0,19
EOL - Central Geradora Eolielétrica	3	150.000	2,1				7	234.900	10,27
PCH - Pequena Central Hidrelétrica	32	305.021	4,27	6	93.394	6,53	11	195.206	8,53
UHE - Usina Hidrelétrica de Energia	14	4.978.825	69,63	3	983.000	68,73	1	292.000	12,77
UTE - Usina Termelétrica de Energia	38	1.694.315	23,69	2	353.825	24,74	6	1.560.800	68,24
TOTAL RS	121	7.150.078	100	11	1.430.219	100	32	2.287.250	100

Fonte: [Capeletto e Zanchi de Moura, 2010]

As centrais eólicas começaram a sua operação no Estado em 2006, na cidade de Osório. Juntos, os três parques formam a maior usina eólica da América Latina, com potência instalada de 150 MW. No leilão específico para a construção de usinas eólicas realizado em dezembro de 2009, o RS apresentou 86 projetos, totalizando uma potência de 2894 MW. No segundo leilão exclusivo de fonte eólica foram negociados contratos com preço médio de R\$ 148,39/MWh, com o menor preço ofertado apresentando um deságio de 30,69% em relação ao preço inicial de R\$ 189,00/MWh.

O leilão específico para fonte eólica foi necessário porque hoje o custo de produção de uma usina eólica é maior do que o dobro do custo de uma usina hidrelétrica [Capeletto e Zanchi de Moura, 2010]. Este custo elevado é relacionado em parte pelo baixo fator de carga das usinas, pela quantidade de material importado utilizado no parque e pela baixa escala de produção dos materiais.

1.3 O estudo de esteiras

A ampliação da participação da energia eólica na matriz energética mundial passa pelo aprimoramento dos sistemas de conversão eólica. Além do desenvolvimento de aerogeradores com maior capacidade de aproveitamento do potencial eólico são fundamentais projetos de instalação bem desenvolvidos. Neste sentido, são fundamentais bons métodos de previsão da distribuição dos ventos sobre a microrregião de instalação de turbinas eólicas, onde fatores como topografia, obstáculos e ocupação do solo têm grande influência. Uma parte importante do projeto de parques eólicos é a análise da influência da instalação de equipamentos na região, ou seja, o estudo da esteira aerodinâmica das turbinas visando a um melhor aproveitamento dos recursos e reduzindo o custo operacional do sistema.

A redução no custo da energia produzida por sistemas eólicos (R\$ por MWh) nos contratos citados anteriormente deve-se em parte pelo desenvolvimento da tecnologia envolvida nos projetos. O estudo das esteiras aerodinâmicas dos aerogeradores visa aumentar o fator de capacidade dos parques, otimizando a disposição das turbinas no terreno para aumentar a energia convertida pelo parque, sem aumentar consideravelmente os custos de instalação.

As limitações de área disponível, os custos de arrendamento das terras, bem como os impostos, vias internas, cabeamento e demais custos incidentes sobre a terra, fazem com que

as turbinas de um parque eólico sejam instaladas próximas umas das outras, causando interferência em seu funcionamento.

É fundamental o conhecimento dos efeitos de uma turbina eólica no escoamento do ar em uma fazenda eólica. O aumento da turbulência resultante da passagem do ar pelo rotor pode causar danos consideráveis devido à fadiga e a cargas dinâmicas na turbina se não forem devidamente estimadas no projeto.

Na região mais próxima da torre, onde a velocidade média do ar é consideravelmente reduzida em relação ao escoamento não perturbado, a instalação de outra turbina causará uma redução imediata no aproveitamento do vento e, conseqüentemente, do fator de capacidade do parque, definido como a relação entre a produção de energia elétrica do parque com a disponibilidade de energia da instalação operando em potência nominal.

O estudo do escoamento após uma turbina é dividido em esteira próxima e esteira distante. Na região chamada de esteira próxima, localizada de um a três vezes o diâmetro a jusante da turbina, os estudos são focados no desenvolvimento da performance e no processo físico de extração de potência. Já na região da esteira distante, localizada logo após a esteira próxima, os estudos estão focados na influência das turbinas quando estas são instaladas em grupos, como nos parques eólicos.

A influência desta queda de velocidade devido à esteira aerodinâmica causa efeitos que não podem ser desprezados no projeto de um parque eólico. Estes efeitos são diretamente influenciados pelas condições do vento incidente sobre o aerogerador, tornando a análise das condições de entrada do domínio um objeto de estudo importante para o aperfeiçoamento de técnicas de dimensionamento de parques eólicos.

Os modelos numéricos de esteira começaram a ser desenvolvidos na década de 80 para pequenas fazendas eólicas. Estes modelos não eram capazes de considerar os efeitos de estabilidade atmosférica nem prever o desenvolvimento da esteira próxima [Rados *et al.*, 2009].

Um dos modelos mais empregados atualmente na indústria para o dimensionamento de parques eólicos é o WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*), desenvolvido pelo laboratório RISØ, em 1987, na Dinamarca. É baseado em um conceito de que a esteira cresce linearmente ao longo do domínio e produz resultados rápidos para escoamentos médios do vento, mas não reproduz bem a separação e a recirculação do fluido [Stangroom, 2004].

Uma alternativa para aprimorar a modelagem da esteira aerodinâmica de turbinas eólicas é o emprego de modelos computacionais com descrição mais completa dos fenômenos físicos envolvidos. Neste contexto a Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC), solução das equações de Navier-Stokes empregando métodos numéricos, vem sendo foco de pesquisa de vários grupos por todo o mundo. Estes estudos visam extrair informações detalhadas da física envolvida na esteira ou estabelecer metodologias e parâmetros de simulação que orientem a aplicação da DFC para usos de projetos eólicos com redução do custo computacional, um dos principais fatores a limitar o emprego desta modelagem de forma mais ampla. Outro fator que inibe o uso da DFC em projetos de instalações eólicas é a escassez de experimentos e parâmetros claros de aplicação do método ao problema [Stangroom, 2004].

As simulações numéricas de esteiras têm sido desenvolvidas segundo dois métodos principais: os métodos dos atuadores e a modelagem completa do rotor. Os métodos atuadores dispensam a modelagem geométrica e a discretização das pás da turbina, o que reduz significativamente os custos computacionais de uma simulação. Porém, estes métodos negligenciam a componente tangencial da velocidade [Sanderse, 2009]. Também o fato de não haver a necessidade de discretização das pás impossibilita que o método seja usado na otimização da geometria do rotor.

Para as simulações empregando o disco ou as linhas atuadoras, teorias usando o conceito de aplicar as forças das pás de uma turbina no escoamento computacional através do uso de um domínio atuador foram criadas. O método da quantidade de movimento no elemento de pá (BEM - *Blade Element Momentum Method*) é a ferramenta mais comum no cálculo das cargas aerodinâmicas do rotor. Com um baixo custo computacional, ele produz resultados satisfatórios quando há bons dados a respeito do aerofólio considerado [Hansen *et al.*, 2006].

As forças são estimadas a partir do escoamento local segundo metodologias como a BEM. Após, estas forças são inseridas no domínio computacional através de conceitos como o da linha atuadora ou disco atuador.

Os métodos atuadores reduzem consideravelmente os recursos computacionais necessários para as simulações, contudo, como apresentado em [Réthoré *et al.*, 2010], existe diferença significativa entre o modelo de disco atuador e os resultados empregando a modelagem geométrica completa do rotor, especialmente no que se refere à turbulência gerada pelo atua-

dor, sendo esta de uma ordem de grandeza menor se comparada com a turbulência atmosférica utilizada.

As simulações empregando a geometria completa do rotor têm sido estudadas por diversos autores [Postdam e Marvriplis, 2009], [Horn, 2010] e [Réthoré *et al.*, 2010] e certamente representam de forma mais realista a complexidade do fenômeno envolvido. O elevado tempo computacional e necessidade de refinamento da malha sobre o rotor são aspectos que limitam esta tecnologia. O estudo de alternativas de simulação empregando esta metodologia vem sendo foco de diversas publicações.

Neste trabalho apresenta-se o estudo da esteira aerodinâmica de um rotor eólico empregando a Dinâmica dos Fluidos Computacional e a modelagem completa da geometria do rotor. A análise do escoamento turbulento é feita através da solução das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds, empregando o modelo de turbulência SST que é justificado por [Réthoré, 2009], [Sanderse, 2009] e por [Horn, 2010] para fechamento das equações. Avalia-se a capacidade desta modelagem de resolver a esteira quando influenciada por alterações no escoamento incidente, alterações da intensidade de turbulência e da distribuição do perfil de velocidades (uniforme e com dado perfil de camada limite). Avalia-se também o tempo computacional e a aproximação dos resultados com dados experimentais disponíveis na literatura.

1.4 Objetivos e organização do trabalho

Desenvolver a simulação numérica de escoamentos, empregando as RANS e a geometria completa do rotor eólico, para avaliar os efeitos e as alterações nas condições do escoamento incidente em um aerogerador sobre a esteira aerodinâmica de turbinas eólicas é o objetivo principal do presente trabalho.

A avaliação da influência de condições atmosféricas na produção de esteira por um aerogerador busca uma melhor aproximação da velocidade do vento em regiões a jusante de uma turbina eólica, para então otimizar o posicionamento de torres de geração ao longo de uma fazenda eólica. Para tanto, utilizou-se uma ferramenta de análise numérica por volumes finitos na visualização do escoamento do ar na região em estudo.

Como objetivo secundário está a análise da possibilidade de aplicação de uma nova técnica de predição de esteira aerodinâmica pela indústria da área sem a necessidade de emprego de supercomputadores no projeto. Os parâmetros utilizados na simulação numérica, bem como o tempo computacional necessário para o processamento e a metodologia empregada são apresentados de forma a possibilitar a reprodução do trabalho em casos de projetos de parques específicos, onde as características geométricas da turbina, a topografia do terreno e as condições do vento incidente são conhecidas.

O capítulo 2 descreve um breve histórico do aproveitamento da energia dos ventos pelo homem a partir de 1700 a.C. nas planícies mesopotâmicas até o presente estudo sobre o estudo da esteira aerodinâmica de turbinas para a geração de energia elétrica. É feito um estudo sobre as características e teorias aplicadas para a modelagem das mesmas.

O capítulo 3 faz um estudo sobre o coeficiente de potência da turbina eólica com foco na sua aplicação nos estudos de esteira e a relação com o coeficiente de empuxo utilizado nos modelos numéricos comumente utilizados em trabalhos de esteiras e estudados no capítulo anterior.

O capítulo 4 revisa a teoria sobre a camada limite atmosférica presente nos parques eólicos e que é fator importante a ser considerado na escolha do local a ser instalada uma usina.

Na sequência, o capítulo 5 apresenta a metodologia adotada, descreve o modelo geométrico usado na simulação numérica, a formulação desenvolvida por Betz que modela a pá de um aerogerador variando a corda e a torção em função do raio. É demonstrada a discretização em volumes finitos aplicada ao modelo geométrico. Os modelos numéricos de solução das equações de Navier-Stokes e a modelagem da turbulência usada para o problema de fechamento são expostos e revisados, concluindo com a apresentação das condições de contorno adotadas no trabalho.

Os resultados obtidos são expostos e discutidos no capítulo 6 na forma de imagens, gráficos e tabelas comentadas e comparadas com resultados experimentais da literatura.

Por fim, o capítulo 7 fecha o trabalho apresentando as conclusões obtidas com o estudo e as projeções de aplicações em outros casos da metodologia apresentada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso racional da energia do vento teve seu início antes mesmo da descoberta da energia elétrica com o uso em moinhos de vento. Supõe-se que o rei Hammurabi da Babilônia tenha empregado moinhos de vento na irrigação das plantações nas planícies mesopotâmicas por volta do ano de 1700 a.C. [Gasch e Twele, 2002]. Porém, a primeira máquina deste tipo com informações confiáveis a ser registrada é datada de 644 d.C. na região onde atualmente localiza-se o Afeganistão. Trata-se de um moinho de eixo vertical, como mostrado na Figura 2.1, utilizado na moagem de grãos.



Figura 2.1 – Moinho de eixo vertical para moagem de grãos no Afeganistão [Hau, 2006]

Desde então inúmeras aplicações e formas de se aproveitar a energia do vento no cotidiano da sociedade foram desenvolvidas. No século XV, os moinhos de vento trouxeram um grande desenvolvimento aos Países Baixos, na Europa, sendo usados na drenagem das áreas alagadiças dos diques. Estima-se que neste período existiam mais de 200.000 moinhos em operação na Europa, destacando a importância econômica do vento para este povo.

Somente nos séculos XVII e XVIII é que o avanço da matemática e da física possibilitou um desenvolvimento maior da tecnologia para o aproveitamento da energia dos ventos.

Estes estudos aumentaram a potência e o controle dos moinhos de vento, mesmo com uma eficiência aerodinâmica ainda baixa.

No início do século XIX, com a conquista do Oeste nos Estados Unidos, a necessidade de bombeamento de água por uma máquina que não fosse tão pesada quanto os moinhos europeus fez com que, em 1850, o mecânico Daniel Halladay inventasse um moinho cuja aerodinâmica era completamente diferente daqueles conhecidos até então. O número de pás era maior e não eram diretamente ligadas ao eixo. Elas começavam a girar com baixas velocidades de vento e produziam um alto torque, ideal para o bombeamento de água. Este fato levou as empresas ferroviárias a adotarem a turbina eólica de Halladay, ilustrada na Figura 2.2, para suprir a necessidade de água das companhias.



Figura 2.2 – Turbina Eólica de Halladay [Hau, 2006]

Desde a implantação das turbinas de Halladay até o uso na geração de energia elétrica não demorou muito tempo. Em 1891, o dinamarquês Poul La Cour construiu uma turbina acoplada a um dínamo. Esta máquina atraiu o interesse de empresas para a sua construção e desenvolvimento, que teve seu auge com a ocorrência das duas grandes guerras mundiais, que elevaram o preço do petróleo no período.

Na Alemanha, neste mesmo período, começaram os estudos teóricos de Albert Betz abordando os problemas físicos e aerodinâmicos do rotor. Estes estudos resultaram na formu-

lação da base teórica para a forma das pás de uma turbina eólica, que são aceitos até os dias atuais. Betz ainda demonstrou em seus estudos que existe uma limitação que restringe o aproveitamento de no máximo 59,3% da energia do vento pelas turbinas eólicas.

Com o fim da Segunda Guerra Mundial, o preço do barril de petróleo apresentou grande queda e o conhecimento sobre a tecnologia eólica não evoluiu consideravelmente. Já na década de 70 a crise energética mundial fez com que autoridades voltassem a procurar fontes alternativas de energia. Nos Estados Unidos, com o auxílio de empresas privadas, foram instaladas inúmeras plantas de energia eólica, as quais foram intensamente testadas. De forma similar, Canadá, Dinamarca, Suécia e Alemanha se envolveram nos estudos.

As primeiras turbinas eólicas comerciais instaladas no início dos anos 80 tinham rotor entre 10 e 20 metros de diâmetro e potências de 50 a 100 kW. Pesquisas recentes aumentaram a capacidade de produção de energia rapidamente. Na década de 90 existiam turbinas produzindo em torno de 300 kW e atualmente turbinas de 2 MW são usuais, com diâmetros de em torno de 80 metros.

Atualmente as turbinas eólicas são as maiores máquinas rotacionais da terra, com cerca de 110 m de diâmetro. Cada pá tem aproximadamente o comprimento da envergadura de um avião modelo 777 da Boeing, operando na porção inferior da camada limite atmosférica.

2.1 Esteira aerodinâmica

A esteira aerodinâmica, formada na região a jusante de um obstáculo, também conhecida como sua “sombra”, é um fator importante na definição da disposição dos aerogeradores em uma usina. Ao fazer a conversão da energia cinética do ar, a turbina eólica provoca uma diminuição na velocidade do vento que atravessa o rotor. Aliado a isso há o movimento das pás da turbina, que provoca o giro dessa massa de ar. Este efeito está ilustrado na Figura 2.3 da fazenda eólica de Horns Rev, localizada a 15 km da costa oeste da Dinamarca. Este efeito foi capturado pela foto em um dia em que a pressão estava próxima à pressão de vaporização. Mesmo que as condições não estivessem estabilizadas no momento da foto, pode-se ver claramente a presença da vaporização atrás das turbinas. Na foto percebe-se que o vento, após a primeira coluna de turbinas, é menos turbulento do que depois da sua passagem pela segunda turbina.

Uma turbina eólica extrai a energia cinética do vento e a converte em energia mecânica de rotação. Ao cruzar o rotor, as pás provocam o giro da massa de ar, que tem sua energia cinética diminuída, reduzindo a velocidade do vento. Conforme o ar se aproxima da turbina, sua velocidade decai e sua pressão aumenta. Ao cruzar o rotor, há um decréscimo rápido de pressão. Na região imediatamente após o rotor, há um decréscimo não uniforme na pressão e na velocidade axial [Crespo *et al.*, 2005].



Figura 2.3 – Foto aérea da fazenda eólica de Horns Rev. [Aeolus, 2011]

Quando uma turbina é instalada na região de influência de outra, a energia extraída será reduzida devido ao menor potencial do vento, que possui uma velocidade média inferior ao original [Custódio, 2009]. Além da redução da energia disponível, na região da esteira existe um aumento da intensidade turbulenta, que submete a estrutura das turbinas a vibrações que causam um maior desgaste dos componentes.

O distanciamento entre as turbinas de um parque eólico é comumente definido em número de vezes o diâmetro do rotor. De um modo geral considera-se por segurança, para evitar a influência de um rotor no escoamento incidente em outro, uma distância da ordem de dez vezes o diâmetro do rotor, para uma turbina instalada a jusante, e cinco vezes o diâmetro para uma instalada lateralmente em relação à direção do vento predominante [Amarante,

2001]. Uma representação destas distâncias em uma fazenda eólica pode ser vista a seguir na Figura 2.4.

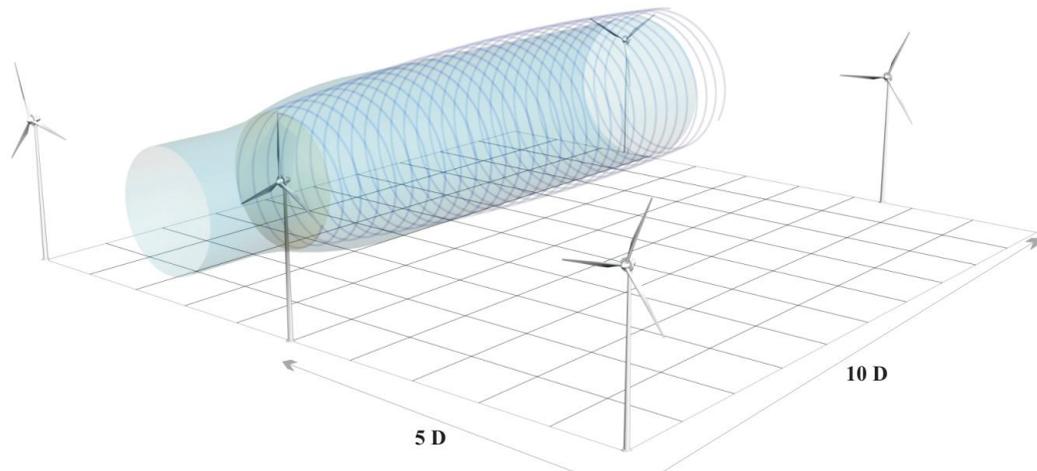


Figura 2.4 – Distanciamento entre turbinas eólicas. [Amarante, 2001]

2.2 Caracterização

Escoamentos do tipo esteira aparecem a jusante do obstáculo que os gera. Trata-se de um escoamento recirculante, com um campo de velocidade inflexional [Silveira Neto, 2002]. São caracterizados pela presença das chamadas estruturas coerentes, que apresentam um alto grau de organização local, promovendo anisotropia e homogeneidade do escoamento. O termo coerente se deve ao fato de as estruturas guardarem uma geometria bem definida por tempo superior ao tempo característico de giro delas mesmas. Esta região tende a desaparecer conforme se afasta da turbina, praticamente recuperando as condições de velocidades originais.

As esteiras em um parque eólico podem provocar efeitos distintos de acordo com sua disposição, podendo uma torre estar completamente ou apenas parcialmente na região de sombra de outra turbina, conforme está ilustrado na Figura 2.5. No caso de instalação da turbina parcialmente na sombra de outra há a incidência de cargas não uniformes na estrutura.

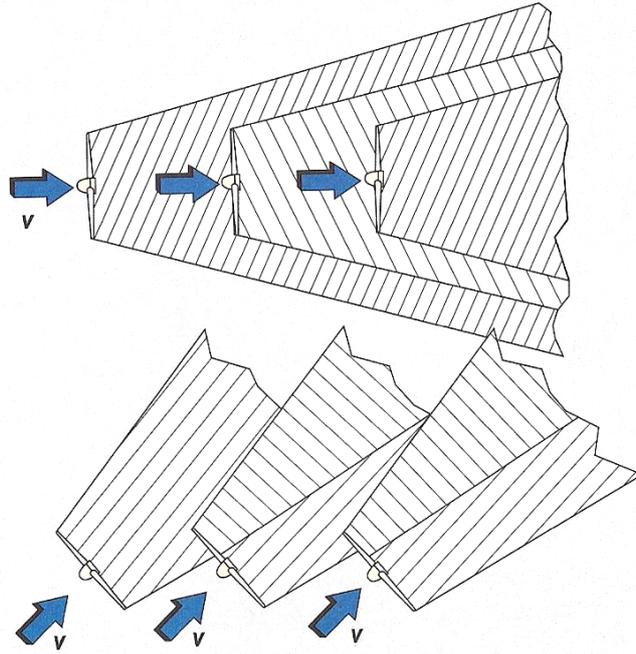


Figura 2.5 – Sombras dos aerogeradores numa fazenda eólica. [Custódio, 2009]

Na Figura 2.6 estão ilustrados os dois tipos de vórtices criados pelas pás de uma turbina, o primeiro gerado em torno do eixo do rotor, e outros menores que são gerados nas pontas das pás.

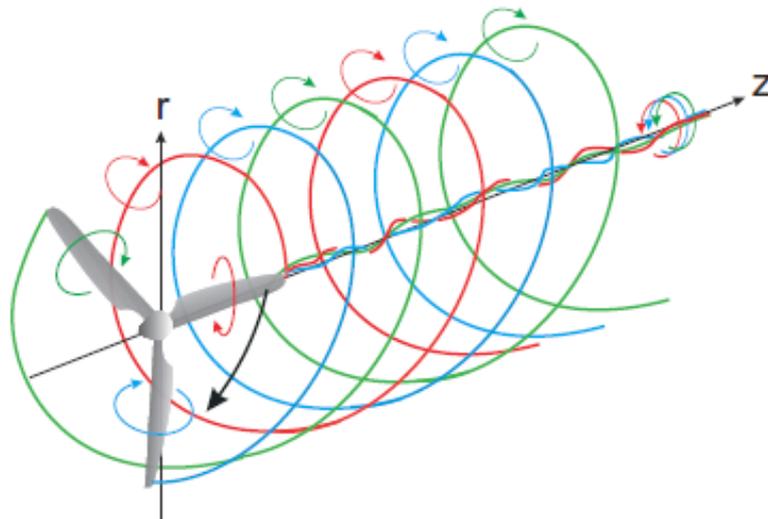


Figura 2.6 – Esquematização de vórtices criados pela turbina. [Ivanell, 2009]

Recentemente, Vermeer *et al.*, 2003, dividiu a área afetada pela turbina em duas regiões, a esteira próxima e esteira distante. Esta divisão foi criada para facilitar e possibilitar o aprofundamento dos estudos em cada uma das regiões, que possuem características diferentes, sem que seja necessário o conhecimento completo da outra.

Enquanto o foco dos estudos na esteira próxima é o desempenho aerodinâmico das pás e demais componentes da turbina, a esteira distante está focada em resolver problemas causados pela influência de uma torre sobre outras quando colocadas em grupos, como em fazendas eólicas.

2.2.1 Esteira próxima

A esteira próxima localiza-se imediatamente após o rotor, estendendo-se até três vezes o diâmetro a jusante da turbina. Esta região tem grande influência da geometria e do número de pás do rotor, em função do descolamento dos vórtices de ponta de pá [Vermeer *et al.*, 2003]. Nesta região é formado um cisalhamento anular que separa o escoamento com velocidade reduzida pelo rotor do escoamento potencial não perturbado.

Poucos bons experimentos são encontrados no que se refere ao estudo da esteira aerodinâmica. O foco principal dos experimentos é para casos com condições controladas, pois são capazes de prover bons resultados para a comparação com simulações numéricas.

A necessidade da aplicação de um fator de escala para estes estudos em túnel de vento é o grande inconveniente para uma representação mais fiel do efeito das turbinas. Por outro lado, os experimentos em escala real possuem a desvantagem de não ser possível controlar as condições atmosféricas do local, como a velocidade e a direção do vento incidente.

Experimentos em túnel de vento com turbinas em escala real apresentam os resultados mais promissores para a esteira próxima, porém estes possuem um custo muito elevado, tanto para a construção de um túnel suficientemente grande quanto para a confecção do modelo. Neste segmento, o Laboratório Nacional de Energias Renováveis americano (*NREL – National Renewable Energy Laboratory*), juntamente com o Centro de Pesquisas Ames, da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), desenvolveu um projeto para a avaliação de uma turbina de eixo horizontal em tamanho real, com duas pás, em um túnel de vento [Simms *et al.*, 1999].

Um experimento similar realizado na União Européia utilizou uma turbina com três pás no túnel de vento da DNW (*Deutsch-Niederländische Windlange: the German-Dutch Wind Tunnels*) com a finalidade de complementar a base de dados disponibilizados pelo experimento do NREL [Snel *et al.*, 2007]. Ambos os testes são usados para a validação de softwares para a modelagem computacional do rotor da turbina e de sua esteira próxima.

Segundo Vermeer *et al.*, 2003, esta região é de grande importância no estudo de turbinas operando com ângulo em relação ao vento incidente (*Yaw*), que causa um efeito de deflexão na esteira aerodinâmica, como está ilustrado na Figura 2.7. Este mesmo efeito apresentado por Jiménez, 2009, utilizando a teoria do disco atuador foi obtido em uma simulação com a modelagem completa do rotor por Horn, 2010.

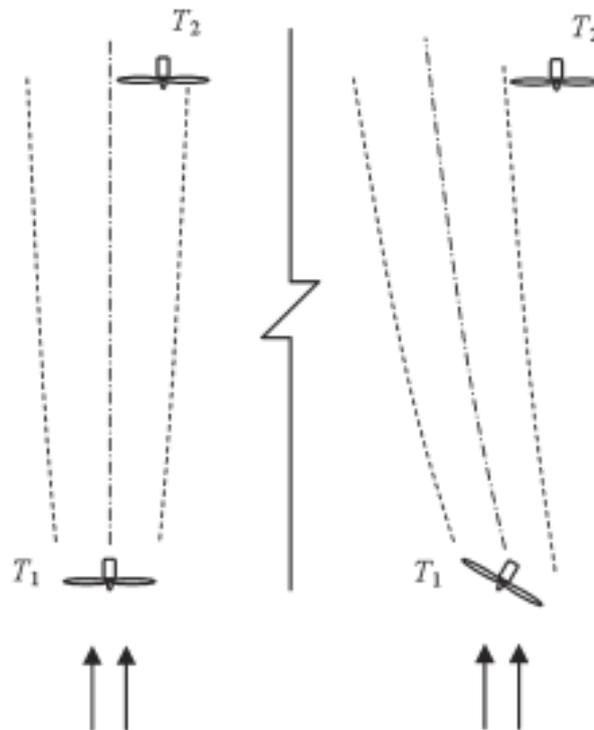


Figura 2.7 – Deflexão da esteira devido ao ângulo de operação da turbina. [Jiménez *et al.*, 2009].

2.2.2 Esteira distante

Após a esteira próxima há uma região de transição, distante de dois a cinco vezes o diâmetro a jusante do rotor, onde a esteira já está completamente desenvolvida e hipoteticamen-

te sem cisalhamento devido ao escoamento ambiente. A esteira distante é definida como a região imediatamente após esta área de transição, estendendo-se até sua extinção ou a presença de outra turbina gerando nova esteira. Nesta área as condições do escoamento são determinadas predominantemente pela convecção e pela difusão turbulenta.

Quando uma turbina está influenciada pela sombra de outra, o vento incidente apresenta uma maior intensidade de turbulência e uma menor velocidade média, reduzindo a extração de potência pelo rotor e aumentando as cargas dinâmicas sobre a torre, reduzindo, consequentemente, o coeficiente de potência e a vida útil do equipamento. Resultados interessantes demonstram que as maiores cargas não são encontradas quando as turbinas estão em linha, mas sim quando estão apenas parcialmente imersas na esteira de outra [Vermeer *et al.*, 2003].

Experimentos nesta área são igualmente difíceis de ser encontrados, pois as dimensões da turbina devem ser suficientemente pequenas para evitar efeitos de bloqueio no túnel, como o trabalho realizado por Alfredsson e Dahlberg, 1979, que realizou o experimento com uma turbina de 25 cm de diâmetro. Até mesmo os maiores túneis de vento conhecidos, usados para experimentos com turbinas, não possuem comprimento suficiente para captar os efeitos da esteira distante de uma turbina em tamanho real.

Diversos autores realizam seus experimentos de esteira diretamente nas fazendas eólicas instaladas nas mais diversas localidades, como os trabalhos apresentados por Barthelmie *et al.*, 2002, que utiliza os dados medidos na fazenda eólica de Vindeby, próxima da costa da Dinamarca, por Magnusson e Smedan, 1999, na fazenda eólica de Alsvik, na costa oeste da ilha de Gotland, e por Wessel e Lange, 2004, que utiliza dados de turbulência medidos nas fazendas de Nibe e Sexbierum. A Figura 2.8 demonstra, através do efeito de fumaça aplicado na pá das turbinas, a instabilidade do escoamento gerado na esteira de uma turbina instalada no campo, caracterizando a principal dificuldade na obtenção de bons resultados em medições nestas condições onde as variáveis de ambiente não podem ser controladas, diferentemente do campo obtido em túnel de vento, que apresenta um campo estável e bem comportado.

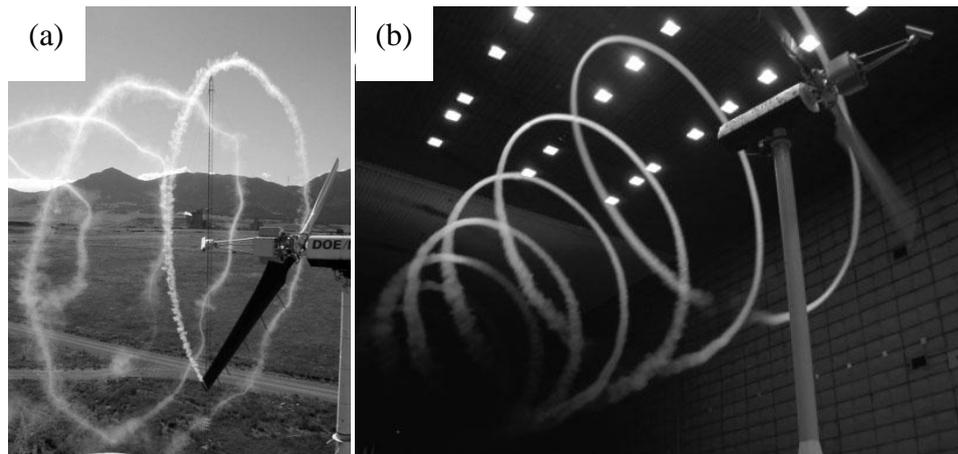


Figura 2.8 – (a) Escoamento em campo aberto (b) escoamento em túnel de vento. [Schreck, 2002]

A intensidade de turbulência na esteira diminui com o distanciamento da turbina e aumenta com o coeficiente de potência da mesma. A superposição de diversas esteiras faz com que os efeitos das turbinas a jusante sejam dissipados mais rapidamente que aqueles do primeiro rotor estudado, resultando em uma menor redução da velocidade média do escoamento nas turbinas instaladas na sequência [Vermeer *et al.*, 2003].

2.3 Modelagem numérica de esteiras

A modelagem de esteiras vem sendo desenvolvida desde o começo do século XX com trabalhos de Lanchester e Betz na predição da potência máxima que uma turbina eólica poderia extrair do vento. Em seguida, Betz, juntamente com Glauert, desenvolveu aquela que é hoje a metodologia usada nos *softwares* para os estudos envolvendo as cargas, efeitos e dimensionamento das pás dos rotores eólicos.

O BEM (*Blade Element Momentum*) foi idealizado em 1935 por Betz e Glauert baseados na teoria do elemento de pá, que assume que as pás podem ser divididas em pequenos elementos que atuam independentemente de seus vizinhos, e na teoria da quantidade de movimento, que assume que a queda de pressão ou quantidade de movimento de um rotor é causada pelo trabalho realizado pelo vento passando através de um plano rotor em cada elemento da pá. Com isso é possível calcular as velocidades induzidas pela redução da quantidade de movimento nas direções axial e tangencial do vento. Estas velocidades induzidas afetam as

condições de entrada do vento no plano do rotor e, conseqüentemente, as forças calculadas pela teoria do elemento de pá [Moriarty e Hansen, 2005].

Baseadas neste modelo foram desenvolvidas metodologias diversas para a simulação numérica de turbinas eólicas. Com o avanço dos recursos computacionais foi possível a aplicação desta teoria em cálculos mais complexos como na solução das equações de Navier-Stokes. Modelos, como o disco atuador e a linha atuadora, são largamente utilizados em pesquisas de esteiras por terem menor custo computacional e, aliados aos conhecimentos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC), por apresentarem resultados aceitáveis.

Além dos modelos baseados em DFC, a indústria da área de energia eólica utiliza modelos analíticos na predição dos efeitos de esteira, dentre os quais estão o modelo PARK, utilizado principalmente pelo programa WAsP [Rathmann *et al.*, 2006], e o modelo analítico de Werle [Werle, 2008].

2.3.1 Modelos analíticos

Os modelos analíticos de esteira apresentam resultados simplificados a respeito do decaimento de velocidades na região de sombra de uma turbina. Estes são largamente utilizados em estudos de posicionamento de torres em um parque eólico através de, entre outros programas, o WAsP [Rathmann *et al.*, 2006] que utiliza o modelo PARK, baseado na expansão linear da esteira.

Este modelo respeita a conservação de quantidade de movimento e foi desenvolvido para reduzir a carga computacional necessária para fornecer uma boa representação do comportamento do escoamento. No cálculo da velocidade é definida uma constante de decaimento k_{wake} da esteira, que pode assumir valores de 0,075 para casos de turbinas em solo e 0,05 para casos em que as turbinas estão instaladas no mar [Wenzel, 2010]. Esta constante está diretamente ligada à rugosidade do terreno, podendo ser obtida por

$$k_{wake} = \frac{0,5}{\ln\left(\frac{h_e}{z_0}\right)} \quad (2.1)$$

onde h_e é a altura do eixo da turbina e z_0 é a rugosidade do terreno.

Desta forma a velocidade na esteira pode ser obtida em função da distância L a jusante da torre por

$$U_{wake} = U_{\infty} \left[1 - (1 - \sqrt{1 - C_E}) \left(\frac{D}{D + 2k_{wake}L} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

sendo C_E o coeficiente de empuxo da turbina, definido na sequência pela equação (2.5), U_{wake} é a velocidade afetada pela esteira e U_{∞} é a velocidade do vento não perturbada. Da mesma forma pode-se definir o diâmetro da região de esteira, D_{wake}

$$D_{wake} = D + 2k_{wake}L \quad (2.3)$$

Outro modelo analítico foi proposto por [Werle, 2008], no qual a região de esteira é dividida em três regiões distintas, esteira próxima, esteira intermediária e esteira distante. A região de esteira próxima é governada por forças de pressão inviscidas, o modelo despreza a camada de mistura turbulenta que inicia no rotor, e sua velocidade é calculada de forma adimensional segundo a Lei de Biot-Savart aplicada ao campo de vorticidade.

Já a região de esteira distante é considerada viscosa e estabelece um caminho na qual as três regiões da esteira se ligam analiticamente para o fechamento. Na região de esteira intermediária é aplicada a solução de Prandtl para a suavização da descontinuidade da velocidade na camada de mistura. O equacionamento da modelagem de Werle é apresentado de forma sucinta por Wenzel, 2010.

2.3.2 Disco atuador

Com o objetivo de evitar o custo computacional devido ao refinamento necessário na malha das pás de um aerogerador, uma aproximação foi introduzida por Sørensen e Myken, 1992, na década de 90. Neste método as pás são representadas por uma distribuição de forças na região ocupada pelas pás em rotação no domínio, formando um disco que atua sobre o escoamento local, como está ilustrado na Figura 2.9.

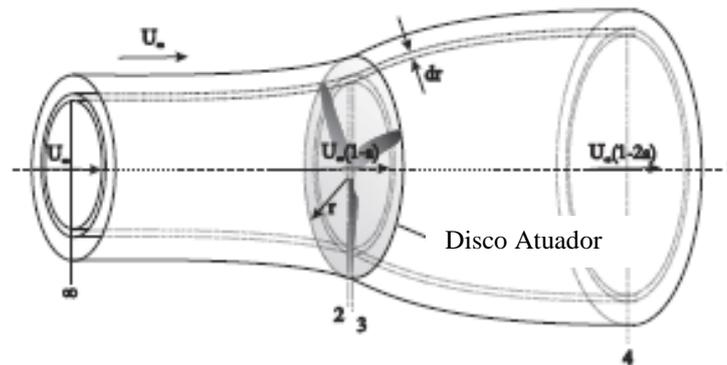


Figura 2.9 – Ilustração conceito do Disco Atuador. [Ivanell, 2009].

O disco atuador atua como uma superfície permeável, de espessura desprezível, normal ao escoamento não perturbado, no qual são impostas as distribuições de força que atuam sobre o ar. A influência do rotor no escoamento é considerada com a substituição das pás por forças impostas nos termos fonte das equações de forma iterativa com o escoamento calculado [Sørensen e Myken, 1992].

A ideia principal no desenvolvimento deste método é resolver o escoamento que passa sobre a turbina, sem que seja preciso resolver a camada limite sobre as pás. Usando este método pode-se resolver simulações de turbinas com uma esteira bem definida. Porém este método é baseado em dados experimentais como os coeficientes de sustentação e de arrasto dos perfis aerodinâmicos em função do ângulo de ataque e do número de Reynolds, deixando o método altamente dependente da qualidade dos dados utilizados [Ivanell, 2009].

O equacionamento desta metodologia é baseado na teoria do momento, sendo a força de empuxo E definida pela força axial total atuando no disco, que pode ser definida como

$$E = \int_{A_d} F_x dA \quad (2.4)$$

onde A_d é a área do disco atuador e F_x denota a força axial da superfície.

Na sequência pode-se definir o coeficiente de empuxo C_E como sendo

$$C_E = \frac{E}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A_d} \quad (2.5)$$

onde ρ é a densidade do ar e U_∞ é a velocidade do vento não perturbado.

Com base neste equacionamento Sørensen e Myken, 1992, empregaram uma distribuição elíptica das forças axiais, dada por

$$F_x = \frac{dE}{dA} = \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 \frac{3}{2} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)\right]^{1/2} C_E \quad (2.6)$$

onde R é o raio total do rotor e C_E é o coeficiente de empuxo dado pela equação (2.5).

A maior limitação deste método é que a distribuição das forças é imposta uniformemente na direção tangencial do disco atuador, a influência das pás é considerada como uma quantidade integrada e dependente de dados experimentais bidimensionais dos aerofólios.

2.3.3 Linha atuadora

De forma similar ao modelo do disco atuador, a modelagem por linha atuadora foi desenvolvida por Sørensen e Shen, 1999, e consiste em distribuir as forças de corpo radialmente ao longo de linhas representando as pás da turbina eólica. Originalmente a formulação foi apresentada em termos das variáveis vorticidade-velocidade. Posteriormente Mikkelsen, 2003, reformulou o método para variáveis primitivas pressão-velocidade para a implementação do método em um programa.

A base do método são as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis com as forças de campo entrando como termos fonte no equacionamento para representar a carga das pás em rotação [Troldborg, 2008].

O cálculo das forças agindo sobre as pás é baseado na aproximação por elemento de pá combinada com características bidimensionais do aerofólio. A Figura 2.10 mostra um corte da seção de um elemento da pá no plano θ -Z.

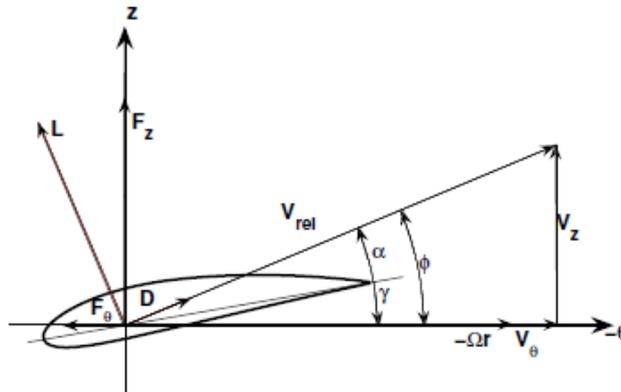


Figura 2.10 – Corte na pá mostrando uma seção do aerofólio.

A velocidade relativa V_{rel} da pá em rotação pode ser calculada por um triângulo de velocidades como

$$V_{rel} = \sqrt{V_z^2 + (\Omega r)^2} \quad (2.7)$$

onde V_z é a componente da velocidade na direção Z, Ω é a velocidade angular e r é o raio local da pá. Com base nesta velocidade é possível calcular as forças de sustentação (F_L) e de arrasto (F_D) como sendo

$$(F_L, F_D) = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c B (C_L e_L, C_D e_D) \quad (2.8)$$

onde C_L é o coeficiente de sustentação, C_D é o coeficiente de arrasto respectivamente, e os vetores unitários e_L e e_D são definidos pelas direções da sustentação e do arrasto respectivamente, ρ é a densidade do ar, V_{rel} é a velocidade relativa do vento, c é o comprimento da corda do perfil e B é o número de pás da turbina. Estas forças aerodinâmicas calculadas para a pá devem ser distribuídas suavemente ao longo do raio em diversos pontos da malha.

A vantagem deste método, baseada em dados experimentais de aerofólios, consiste na diminuição do número de pontos da malha necessário para reproduzir uma pá se comparado com o número necessário para simular a geometria completa da mesma. Contudo, o método é dependente de dados tabelados sobre os perfis aerodinâmicos, o que dificulta a aplicação para

simulações mais complexas, com interação fluido-estrutura, estol dinâmico ou efeitos de transição [Trolborg, 2008].

2.3.4 Modelagem completa do rotor

Diferentemente dos modelos baseados na teoria do elemento de pá, a modelagem completa do rotor não está vinculada a resultados experimentais de aerofólios. É a modelagem com o maior custo computacional. Por outro lado, é a que apresenta menos simplificações e aproximações.

Enquanto modelos simplificados não resultam em dados detalhados nas proximidades da turbina, a modelagem completa do rotor pode fornecer informações sobre o desempenho aerodinâmico do rotor em termos de conversão de potência.

Resultados obtidos por Réthoré *et al.*, 2010, demonstram que em termos de pressão e de velocidades, os métodos atuadores resultam em dados satisfatórios a montante e a jusante da turbina. Contudo, uma comparação em termos de turbulência apresenta grandes diferenças em relação à modelagem completa do rotor.

Esta diferença deve-se ao fato de que nos modelos a turbulência é gerada apenas na camada cisalhante entre o escoamento livre e o contorno da esteira. Como a turbulência na entrada do domínio é baixa, a produção de turbulência é de várias ordens de grandeza menor que a turbulência gerada pelas pás e pela nacela na modelagem completa do rotor. Quando comparada com a turbulência atmosférica, a turbulência gerada é de uma ordem de grandeza menor [Réthoré *et al.*, 2010].

Com o avanço na tecnologia empregada nos computadores, a modelagem completa do rotor está se tornando possível e viável na simulação de turbinas eólicas. Desde o começo da década de 90, quando os modelos atuadores foram desenvolvidos, a velocidade e capacidade de processamento dos supercomputadores aumentaram consideravelmente e tornou viável uma aproximação mais realística dos problemas de aerodinâmica em aerogeradores.

3 COEFICIENTE DE POTÊNCIA

As pás do rotor de um aerogerador são responsáveis pela transformação da energia cinética do vento em energia mecânica rotacional no eixo da turbina. As forças aerodinâmicas resultantes da interação entre o vento e as pás do rotor são responsáveis por esta transformação.

Reduzindo-se a velocidade do vento, sua energia cinética é convertida em energia mecânica pelo rotor da turbina. Contudo, não é possível transformar toda esta energia para ser utilizada na turbina. Se o vento perde muita velocidade atrás do rotor, o ar irá desviar das pás do rotor ao invés de atravessá-lo. Devido a isto a máxima potência que pode ser extraída por um aerogerador é obtida quando a velocidade na saída do rotor é igual a 1/3 da velocidade do vento incidente nas pás [Gasch e Twele, 2002]; [Custódio, 2009]. Esta restrição é conhecida como o limite de Betz, resultando em uma fração máxima de potência extraída de 16/27 da potência disponível, ou seja, apenas 59,3% da potência disponível no vento pode ser extraída pela turbina.

A potência disponibilizada pelo vento (P) para a produção de energia é definida considerando-se um fluxo de ar, movendo-se com velocidade U_∞ , que passa pela área referente às pás do rotor. Esta potência pode ser calculada por:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U_\infty^3 \quad (3.1)$$

onde A é a área varrida pelas pás do rotor em movimento.

Segundo Betz, pode-se definir a máxima potência que pode ser extraída do vento por uma turbina ideal como sendo

$$P_{max} = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A U_\infty^3 \right) \quad (3.2)$$

Além deste limite teórico, uma turbina real apresenta diversas perdas de potência em função de fatores como o atrito e perdas aerodinâmicas. Para mensurar o total dessas perdas, o

coeficiente de potência (C_P), que representa a razão entre a potência realmente extraída pelo aerogerador e a potência disponibilizada pelo vento, é definido como

$$C_P = \frac{P_t}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^3} \quad (3.3)$$

onde ρ é a massa específica do ar, A é a área da turbina, U_∞ é a velocidade do vento não perturbada e P_t é a potência extraída pela turbina.

A eficiência aerodinâmica do rotor faz com que o coeficiente de potência de uma máquina varie de acordo com a velocidade do vento incidente, como pode ser visto no gráfico da Figura 3.1, cujo ponto de máximo representa a máxima eficiência da turbina. Os gráficos e dados sobre a potência são fornecidos pelos fabricantes das turbinas.

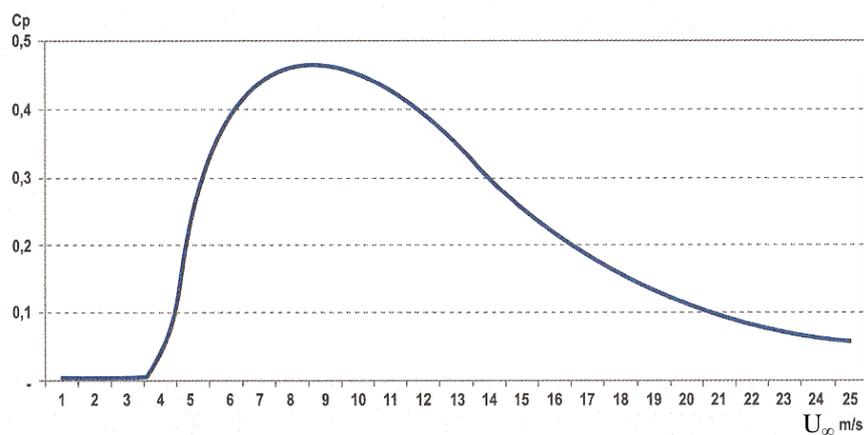


Figura 3.1 – Gráfico de C_p em função da velocidade do vento [Custódio, 2009]

A esteira aerodinâmica de uma turbina está diretamente ligada à quantidade de potência extraída do vento e, portanto, diretamente ligada ao seu coeficiente de potência. Duas máquinas que possuam o mesmo coeficiente de potência extraem, portanto, a mesma energia do vento, causando o mesmo déficit de velocidade na região de esteira.

Diversos modelos de esteira fazem uso do coeficiente de empuxo da turbina, calculado pela Equação (2.5), na estimativa dos efeitos gerados pela turbina no escoamento [Wenzel, 2010]. A Figura 3.2 apresenta o gráfico relacionando os coeficientes de potência C_P e de empuxo C_E utilizados nas estimativas de sombra das turbinas.

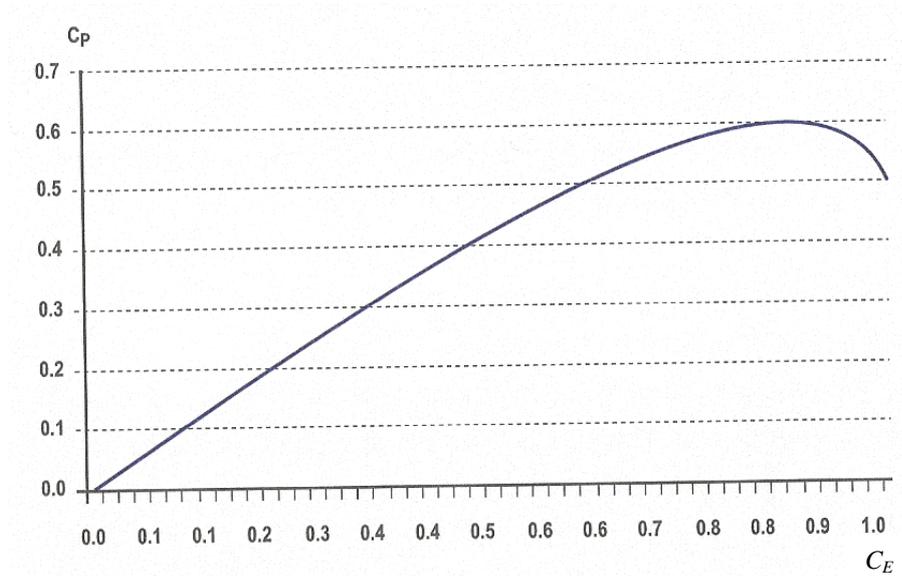


Figura 3.2 – Relação entre coeficientes de potência e de empuxo [Custódio, 2009]

A potência das turbinas é dependente da velocidade do vento. Atualmente as turbinas estão sendo instaladas em alturas aproximadas dos 100 m, ficando dentro da camada limite atmosférica, onde a velocidade do vento é reduzida e afeta diretamente o desempenho dos geradores.

4 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

O conhecimento do terreno é questão fundamental no dimensionamento de um parque eólico. As características topográficas e orográficas do local afetam diretamente o comportamento do vento. A ação da viscosidade do ar, combinada com a condição de não deslizamento junto ao solo, produz uma variação na velocidade do vento chamada de Camada Limite Atmosférica (CLA). A Figura 4.1 ilustra o perfil de velocidades influenciado pelo efeito do solo no escoamento.

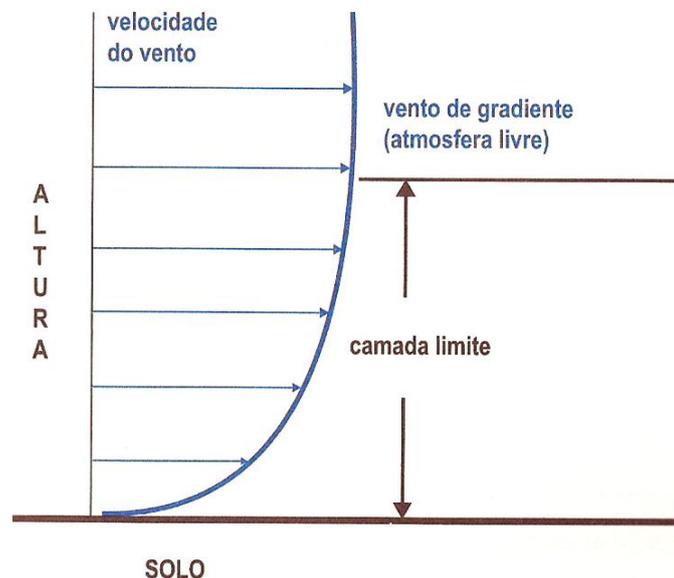


Figura 4.1 – Camada Limite Atmosférica [Custódio, 2009]

Estes efeitos de atrito do solo com o ar reduzem com o aumento da altura, a certa distância da terra, que pode atingir até 2 km, a velocidade do vento não apresenta mais esta redução, sendo chamado de vento de gradiente, ou vento geostrófico. Dentro desta camada limite, em alturas de aproximadamente 150 m, a velocidade do vento pode atingir, sobre uma superfície de terra, até 60% de redução em relação ao vento geostrófico, ou até 30% quando considerado sobre a água [Custódio, 2009].

A variação apresentada na velocidade do vento na CLA em diferentes terrenos é causada pela diferenças na orografia e rugosidade dos terrenos em questão. Cada superfície produz um fator de rugosidade (Z_0) que caracteriza a influência das irregularidades do terreno no

perfil de velocidades. Valores empíricos desta rugosidade são apresentados na Tabela 4.1 para diferentes tipos de terreno divididos em quatro classes.

Tabela 4.1 – Fator de Rugosidade para diferentes tipos de Terrenos

Classificação	Característica do Terreno	Rugosidade Z_0 [m]
Classe 0 Superfícies suaves	Superfícies suaves como lagos, mares	10^{-5}
	Áreas desérticas	3×10^{-4}
	Superfícies nevadas suaves	10^{-3}
Classe 1 Terreno levemente ondulado	Solos descobertos (suaves)	5×10^{-3}
	Áreas gramadas, vegetação rasteira	0,01
	Fazendas com poucas construções, árvores. Áreas de aeroporto com construções e árvores	0,03
Classe 2 Terreno ondulado	Fazendas com aparência aberta	0,05
	Fazendas com aparência fechada	0,1
Classe 3 Terreno bastante ondulado	Muitas árvores e/ou arbustos	0,2
	Florestas, obstáculos próximos	0,3
	Subúrbios, cidades pequenas	0,4

Fonte: [Villar Alé e Pereira, 2002]

Para estimar este perfil de velocidades foram criadas leis que relacionam a velocidade do vento com a altura em relação ao solo. Como as turbinas eólicas são instaladas dentro desta camada limite, é de suma importância que seus efeitos sejam considerados nos cálculos de projeto dos parques eólicos. As leis logarítmica e da potência são comumente empregadas nas estimativas de geração de potência de uma turbina.

Na faixa de interesse para os estudos sobre conversão de energia eólica, na faixa entre 50 e 150 m de altura, observa-se que o perfil comporta-se como uma função logarítmica dada pela expressão abaixo

$$V = \frac{u^*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{h}{Z_0} \right) \right] \quad (4.1)$$

onde V é a velocidade do vento na altura h em relação ao solo, Z_0 é o fator de rugosidade do terreno, u^* é a velocidade de atrito e κ é a constante adimensional de von Karman, usualmente adotada como sendo 0,4.

A velocidade de atrito u^* representa a tensão de cisalhamento da camada sublaminar junto ao solo. Esta velocidade é derivada das equações de mecânica dos fluidos viscosos, definida como

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4.2)$$

onde τ_w é a tensão de cisalhamento na superfície do solo e ρ a massa específica do ar. Como a obtenção da tensão de cisalhamento não é trivial, usa-se a equação original utilizando uma velocidade de referência determinada em uma altura de referência na estimativa, como segue,

$$\frac{u^*}{\kappa} = \frac{V_\infty}{\ln\left(\frac{h}{Z_0}\right)} \quad (4.3)$$

onde V_∞ é a velocidade do vento de referência, não perturbada, medida na altura h em relação ao solo, Z_0 é o fator de rugosidade do terreno e κ é a constante adimensional de von Karman.

A velocidade do vento em uma determinada altura de interesse pode ser estimada usando dados conhecidos de velocidade em outra altura e a rugosidade do terreno conforme a relação de velocidades a seguir

$$\frac{V_{(1)}}{V_{(2)}} = \frac{\ln\left(\frac{h_{(1)}}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{(2)}}{Z_0}\right)} \quad (4.4)$$

onde os índices 1 e 2 representam os diferentes pontos de interesse da velocidade V e da altura h em relação ao solo. A mesma equação pode ser usada na estimativa da rugosidade do terreno quando se tem dados de velocidades em duas diferentes alturas de medição.

De forma similar ao perfil logarítmico de velocidades, a lei da potência, criada por Hellman, no começo do século XX, oferece uma alternativa à modelagem da camada limite atmosférica nas alturas de interesse aos projetos de fazendas eólicas. Conforme a relação de

velocidades a seguir, a lei da potência estima a camada limite através de um perfil exponencial dado por

$$\frac{V_{(2)}}{V_{(1)}} = \left(\frac{h_{(2)}}{h_{(1)}} \right)^\alpha \quad (4.5)$$

onde α é o expoente adimensional do local, V e h são, respectivamente, a velocidade e a altura nos pontos de 1 e 2 de interesse. Diferentemente do fator de rugosidade, o expoente α varia de 0,06 em locais lisos, até 0,6 para locais com alta rugosidade, e nos casos genéricos onde o terreno não é conhecido é usual o uso de 0,14, referente a um terreno plano com poucos arbustos [Custódio, 2009].

Na Tabela 4.2 estão ilustrados alguns valores de referência para fins de comparação entre o fator de rugosidade Z_0 e o expoente de potência α .

Tabela 4.2 – Valores aproximados para Z_0 e α

Terreno	Z_0 [m]	α
Subúrbios	1,5	0,32
Plantações	0,05	0,19
Campos	0,03	0,13
Áreas com Neve	0,003	0,10

Fonte: [Custódio, 2009]

Como está ilustrado na tabela, não há relação direta entre os valores dos parâmetros utilizados nas leis logarítmica e da potência.

5 MODELAGEM NUMÉRICA E MATEMÁTICA

Este trabalho utiliza ferramentas computacionais para a solução das equações do escoamento ao redor de uma turbina eólica. A metodologia aplicada na criação da geometria, bem como na discretização e pré-processamento, do trabalho está descrita neste capítulo.

Para caracterizar o comportamento do vento através de uma turbina eólica utiliza-se a solução numérica das equações de Navier-Stokes, com médias de Reynolds, como ferramenta de trabalho. Para tal, o programa comercial ANSYS CFX 12.0 é empregado. As modelagens numérica e matemática utilizadas são descritas ao longo deste capítulo, procurando-se dar uma visão completa da formulação utilizada.

5.1 Trabalho experimental de referência

Para fins de comparação de resultados, utiliza-se o trabalho experimental realizado por Alfredsson e Dahlberg (1979). Os autores apresentam dados de velocidade média para diferentes distâncias a jusante de uma pequena turbina eólica instalada em um túnel de vento. O modelo de turbina consiste em uma turbina eólica de eixo horizontal com duas pás e diâmetro de 0,25 m.

No experimento foi utilizado o túnel de vento L1 da KTH (*Royal Institute of Technology*), em Estocolmo, Suécia. Trata-se de um túnel com uma seção de testes octogonal com largura e altura de 2,1 m e 1,5 m respectivamente. O comprimento da seção de testes deste túnel é de 6 m.

A intensidade de turbulência livre deste túnel é de 0,6%, considerada como intensidade de turbulência baixa no presente trabalho. As demais intensidades de turbulência foram obtidas através da aplicação de duas grades geradoras de turbulência. A utilização de uma grade fina resultou na intensidade de turbulência de aproximadamente 2%, considerada média no presente trabalho. Por fim, a aplicação de uma grade grosseira juntamente com a grade fina resultou em uma intensidade de turbulência de aproximadamente 6%, considerada como alta no presente estudo.

Além da variação da intensidade de turbulência, é apresentado um estudo com uma Camada Limite Atmosférica incidente sobre a turbina. Esta CLA é criada através da coloca-

ção de uma barreira física, sete geradores de vórtices e de uma superfície rugosa no piso do túnel.

Com base nestes dados é criado um domínio computacional equivalente ao túnel de vento, no qual está inserida uma turbina com diâmetro equivalente àquela utilizada no trabalho experimental.

5.2 Modelo geométrico

Ao longo dos anos foram desenvolvidas diversas metodologias para o dimensionamento de pás de aerogeradores, dentre as quais está o dimensionamento ótimo de Betz. Aplicando a teoria de Betz, uma turbina pode ser dimensionada para extrair a maior quantidade de energia possível do vento. Esta teoria dimensiona as pás do rotor variando a corda e o ângulo relativo de giro dos perfis aerodinâmicos de acordo com o raio da mesma. Esta teoria simplificada considera apenas a queda de energia devido ao formato do rotor, sem considerar sua rotação nem as perdas do perfil utilizado.

Em virtude da falta de dados sobre a geometria da turbina utilizada no experimento de referência, tais como os perfis aerodinâmicos, núcleo do rotor e nacele, o dimensionamento segundo Betz é aplicado. Os coeficientes de potência do experimento e da simulação são próximos, o que indica semelhança entre as esteiras aerodinâmicas.

Existe uma velocidade relativa V_{rel} para cada seção da pá que é determinada por um triângulo de velocidades demonstrado anteriormente. Esta velocidade relativa é calculada pela Equação (2.7) com a velocidade V_2 sendo determinada por Betz como igual a 2/3 da velocidade V_I do vento incidente.

Define-se a razão de velocidade de ponta de pá λ_D como a relação entre a velocidade tangencial da ponta da pá com a velocidade do vento, sendo calculada por

$$\lambda_D = \frac{\Omega r}{U_\infty} \quad (5.1)$$

onde Ω é a velocidade de rotação da turbina, r é o raio local da pá e V_∞ é a velocidade do vento. O valor da velocidade de ponta de pá está relacionado ao número de pás da turbina, usualmente uma turbina de três pás possui λ_D igual a 6 [Gasch e Twele, 2002].

De acordo com a Equação (3.2), existe um limite de potência que pode ser extraída do vento pela turbina. Reescrevendo aquela equação para uma seção infinitesimal ao longo do raio da pá, temos que a potência máxima é dada por

$$dP_{max} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 (2\pi r dr) \quad (5.2)$$

onde dP_{max} é o diferencial de potência máxima extraída na seção de raio r .

A teoria de Betz visa à criação de uma pá otimizada para turbinas de eixo vertical, onde o movimento é gerado pela força de sustentação dos perfis aerodinâmicos. A força de sustentação F_L , calculada pela Equação (2.8), pode ser reescrita para a seção infinitesimal utilizada acima, resultando na equação

$$dF_L = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 C(r) C_L dr \quad (5.3)$$

onde dF_L é o diferencial de força de sustentação e $C(r)$ é a corda do perfil no raio r .

Considerando que o coeficiente de sustentação deva ser muito maior do que o coeficiente de arrasto ($C_L \gg C_D$), tem-se que, para um número B de pás, a potência gerada por um elemento radial seja

$$dP = B dF \Omega r \quad (5.4)$$

onde dF é a componente tangencial da força aerodinâmica, que pode ser definida como

$$dF = dL \cos(\gamma) \quad (5.5)$$

onde dL é relativo à força de sustentação, dada pela Equação (5.3) e γ é o ângulo formado entre a velocidade relativa V_{rel} e a velocidade tangencial de rotação Ωr . Substituindo a Equação (5.3) na Equação (5.5), temos que a componente tangencial da força aerodinâmica seja calculada por

$$dF = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 C(r) C_L \cos(\gamma) dr \quad (5.6)$$

A potência mecânica pode ser então encontrada, a partir da Equação (5.4), como

$$dP = n \Omega r \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c(r) C_L \cos(\gamma) dr \quad (5.7)$$

Quando esta equação é igualada ao diferencial de potência máxima de Betz, dado pela Equação (5.2), podemos isolar a variável referente ao comprimento da corda do perfil variando com o raio da pá, obtido por

$$C(r) = \frac{1}{n} \frac{16}{27} \frac{2\pi r}{C_L} \frac{U_\infty^3}{V_{rel}^2 \Omega r \cos(\gamma)} \quad (5.8)$$

onde $c(r)$ é o comprimento da corda em função do raio local r , n é o número de pás da turbina, C_L o coeficiente de sustentação do perfil naquela seção da pá, V_I a velocidade do vento incidente na turbina, V_{rel} a velocidade relativa na seção da pá e γ o ângulo entre a velocidade do vento V_I e a velocidade tangencial de rotação da pá Ωr .

Segundo Gasch e Twele, 2002, assume-se que a pá dimensionada por esta teoria começa em 15% do raio total da turbina devido ao espaço necessário para o núcleo do rotor.

Em paralelo ao dimensionamento das cordas dos perfis utilizados, o dimensionamento ótimo de Betz fornece o ângulo de giro relativo (β) entre as seções calculadas

$$\beta(r) = \varphi(r) + \alpha_A(r) \quad (5.9)$$

onde α_A é o ângulo de ataque do perfil e φ é a direção do vento relativo, que pode ser estimada por

$$\varphi(r) = \arctan \left(\frac{3}{2} \frac{r}{R} \lambda_D \right) \quad (5.10)$$

onde r é o raio local da seção, R é o raio total da pá e λ_D é a velocidade de ponta de pá.

Esta modelagem requer dados experimentais a respeito dos perfis aerodinâmicos a serem utilizados. O coeficiente de sustentação utilizado no dimensionamento da corda da pá pode ser encontrado em gráficos relacionando o mesmo com o ângulo de ataque. Dados dos perfis bidimensionais podem ser encontrados no site da AID (*Airfoil Investigation Database*).

Na escolha dos perfis que compõem a pá do aerogerador é comum o uso de perfis das séries NACA-44 e NACA-63. Porém, por questões aerodinâmicas e estruturais, é interessante a utilização de diferentes aerofólios ao longo da pá para alcançar a espessura necessária para o acoplamento da pá com o núcleo do rotor.

No presente trabalho optou-se por utilizar cinco perfis ao longo do comprimento da pá como sugerido por Gasch e Twele (2002). Na base é utilizado o perfil FX77 W 343, que possui aspecto arredondado, com espessura elevada, e que possibilita o acoplamento com o núcleo do rotor. Na sequência, utiliza-se o perfil FX77 W 258 como intermediário na ligação com o perfil NACA 4421 utilizado na seção central da pá.

Como a velocidade da pá aumenta conforme o seu raio, é interessante que a espessura do perfil diminua, evitando o peso excessivo na ponta da pá e melhorando a aerodinâmica da mesma. Para tal utilizou-se o perfil NACA 4418 como ligação do perfil utilizado na seção central ao perfil NACA 4415 utilizado na ponta da pá.

Cada um dos perfis possui um ângulo de ataque ótimo para o uso em turbinas eólicas que evita a formação de arrasto e causa um ganho no seu coeficiente de sustentação. Este ângulo é obtido quando a relação entre os coeficientes de sustentação e arrasto (C_L/C_D) é máxima. A Figura 5.1 apresenta os perfis retos e dispostos paralelamente aos vizinhos para a criação da pá do aerogerador.

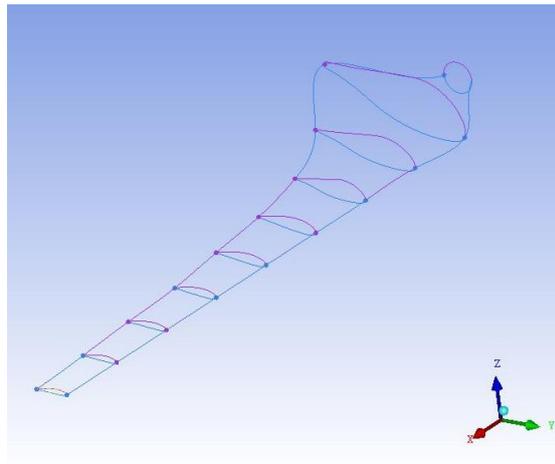


Figura 5.1 – Representação dos perfis aerodinâmicos utilizados na criação da pá

Seguindo a metodologia apresentada, criou-se a pá segundo a metodologia ótima de Betz, para uma turbina com raio total de 12,5 m. A Figura 5.2 ilustra a geometria da pá dimensionada no presente trabalho cujo raio total foi escolhido para reproduzir, em escala, o experimento realizado por [Alfredsson e Dahlberg, 1979]. Na falta de dados referentes à nacele do rotor utilizado no experimento citado, utiliza-se aqueles referentes ao utilizado no projeto NREL-Phase VI da NASA apresentados por [Hand *et al.*, 2001] e modelados computacionalmente por [Wenzel, 2010].

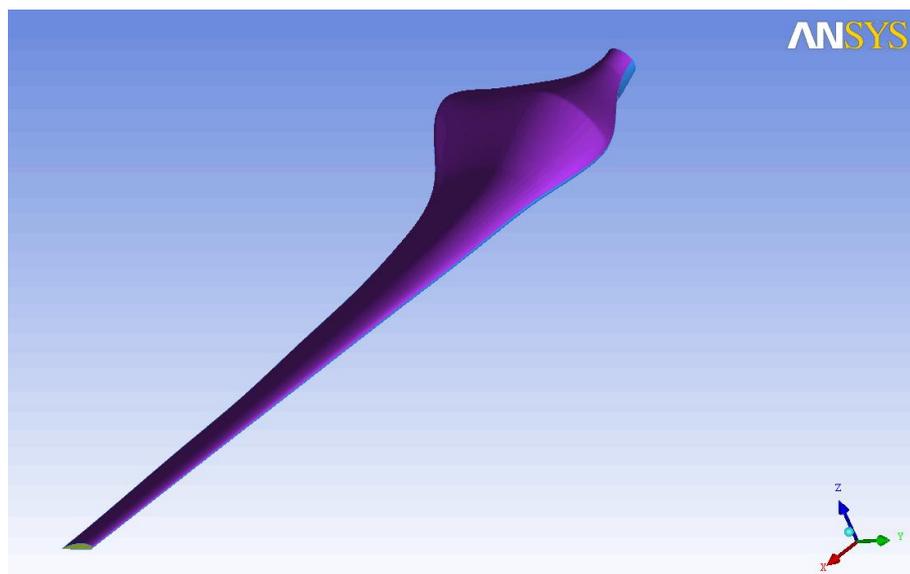


Figura 5.2 – Geometria da pá criada segundo o dimensionamento ótimo de Betz.

O rotor criado é posicionado de forma a manter as características do experimento de referência, cuja altura do núcleo da turbina é posicionada em uma altura equivalente a um diâmetro de altura. Este posicionamento, equivalente a 25 metros de altura, é utilizado para todos os casos em estudo.

5.3 Discretização

Na modelagem completa do rotor utiliza-se uma discretização do domínio computacional em volumes finitos. Para tal utiliza-se o programa comercial ANSYS ICEM CFD 12.0 como ferramenta na criação das malhas a serem utilizada nas simulações.

Esta ferramenta oferece recursos para a criação do desenho da geometria até a sua discretização por elementos hexaédricos ou tetraédricos em múltiplos domínios. Estudos realizados recentemente sobre resultados de malhas não estruturadas tetraédricas, tais como Postdam e Marvriplis, 2009, e Marvriplis, 2007, apontam que resultados gerados com malha não estruturada aproximam-se bem daqueles obtidos com malha estruturada hexaédrica, porém o número de nós necessários para a obtenção dos resultados não pode ser comparado, uma vez que a malha estruturada requer um número muito inferior de volumes.

Em contrapartida ao número de volumes está a capacidade da malha de reproduzir detalhes característicos de geometrias complexas como as encontradas nas pás de uma turbina eólica e em terrenos que abrigam as fazendas eólicas. A discretização em volumes finitos tetraédricos é feita com a possibilidade de refinamento controlado do tamanho dos mesmos pelo programa. É usual que se utilizem camadas prismáticas de volumes em superfícies sólidas nas malhas tetraédricas. Este recurso é utilizado para a captação dos efeitos da camada limite viscosa presente nestas superfícies. Estes prismas aplicados nas superfícies das pás podem ser percebidos sobre o núcleo do rotor ilustrado na Figura 5.3, que demonstra a malha superficial do rotor.

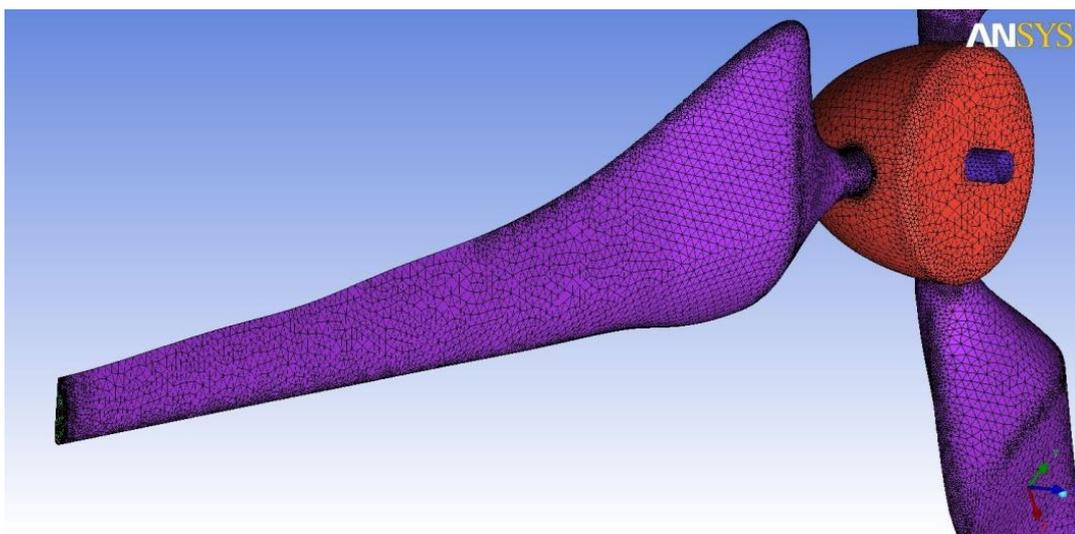


Figura 5.3 – Malha superficial do rotor

Observa-se o refinamento aplicado nas regiões de curvatura acentuada da geometria, bem como na ponta da pá, visando a uma melhor discretização da mesma. A partir desta malha superficial é criada a malha volumétrica do domínio rotacional que está incluído dentro da malha referente ao domínio estático, que contém a nacele e parte do eixo da turbina.

O domínio computacional do trabalho é dividido em duas regiões, conforme apresentado por Ludwig, 2007. Esta divisão possibilita que seja aplicada uma velocidade de rotação no domínio referente ao rotor da turbina. A divisão entre parte rotacional e fixa da geometria ocorre na metade do comprimento do eixo que liga o núcleo do rotor à nacele da turbina. Esta divisão está ilustrada na Figura 5.4, que contém o detalhe do eixo da turbina e do núcleo do rotor.

Na mesma imagem podem-se observar também, sobre a geometria do núcleo do rotor, as oito camadas prismáticas aplicadas sobre as superfícies das pás que, assim como para os tetraedros da malha, foram criadas com uma razão de crescimento linear de 1,2 a partir das superfícies.

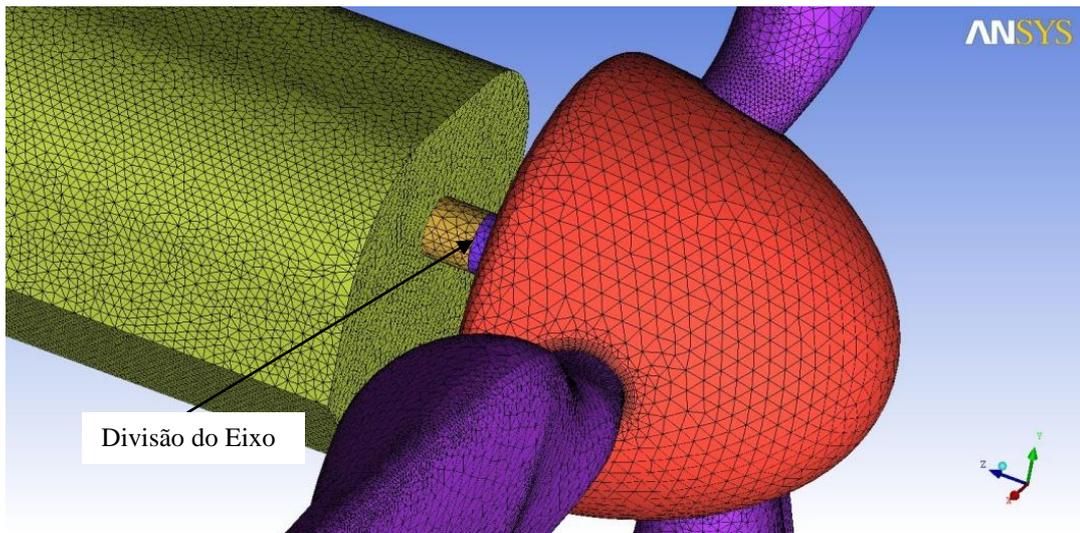


Figura 5.4 – Malha superficial em detalhe do eixo da turbina

A malha do domínio estático reproduz o túnel de vento, no formato octagonal, utilizado no experimento base para este trabalho, e está ilustrada na Figura 5.5, com destaque para a região em que está inserida a região rotacional da turbina.

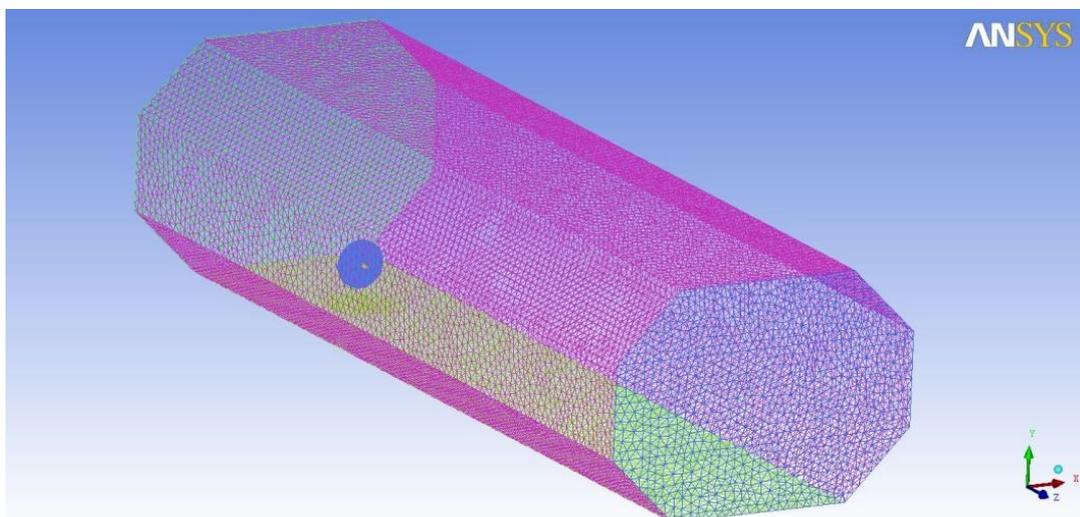


Figura 5.5 – Malha do domínio fixo

Neste domínio não existem volumes no espaço em que será incluído o domínio rotacional. A interface é atribuída através do pré-processamento como uma condição de contorno interna do domínio.

5.4 Simulação numérica

A simulação numérica utilizada neste trabalho visa avaliar o efeito das características ambientais do vento na esteira aerodinâmica provocada pela turbina. A análise numérica computacional é baseada no Método dos Volumes Finitos (MVF) e nas Equações de Navier-Stokes com Média de Reynolds (RANS), onde as mesmas são avaliadas considerando-se a média sobre intervalos de tempo suficientemente grandes para o estudo da turbulência.

Para tal, utiliza-se uma simulação transiente, sem transferência de calor integrada e considerando-se todo o domínio com escoamento incompressível. Esta hipótese é válida para casos em que o número de Mach seja inferior a 0,3, equivalente a uma velocidade de aproximadamente 100 m/s. Alguns autores afirmam que pode haver efeitos compressíveis nas pontas das pás, contudo as velocidades na esteira mantêm-se muito inferiores, tornando a hipótese de incompressibilidade válida para estudos de fazendas eólicas [Sanderse, 2009].

A solução das equações é dada de forma transiente com esquema de advecção *High Resolution* (esquema de advecção de segunda ordem do CFX) [Ansys, 2009], com critério de convergência (RMS) fixado em 1×10^{-6} . Como fluido de trabalho considera-se o ar em temperatura constante de 25°C com a turbulência sendo modelada pelo modelo SST com função de parede automática.

5.4.1 Método dos volumes Finitos

O estudo numérico de escoamentos turbulentos parte das equações básicas da mecânica dos fluidos, que são a equação da conservação de massa e a equação da conservação da quantidade de movimento. Estas equações são deduzidas a partir da hipótese do contínuo, na qual o fluido é considerado uma distribuição contínua da matéria e todas as propriedades do fluido podem ser expressas por funções contínuas das coordenadas espaciais e temporais [Oliveira Jr., 2006].

O método utilizado neste trabalho é baseado em volumes de controle e tem como objetivo a solução das equações diferenciais contínuas de forma discreta para cada ponto de uma malha. Esta técnica de solução consiste na divisão de um domínio contínuo em pequenas sub-

regiões, chamadas de volumes de controle, onde são resolvidas as equações governantes do problema de forma discreta.

O escoamento de fluidos viscosos é governado pelas equações de Navier-Stokes em sua forma conservativa. A equação da continuidade, em notação indicial, resolvida pelo CFX [Ansys, 2009], pode ser expressa por

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (5.11)$$

onde ρ é a massa específica do fluido e V_j a velocidade do escoamento na direção j ($j=1,2,3$).

Da mesma forma o programa resolve as equações da quantidade de movimento, que podem ser calculadas por

$$\frac{\partial(\rho V_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_i V_j - \tau_{ij})}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_M \quad (5.12)$$

onde $i,j=1,2,3$, S_M é o termo fonte de quantidade de movimento, p é a pressão e τ_{ij} é o tensor de tensões viscosas descrito por

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial V_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (5.13)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica, δ_{ij} é o delta de Kronecker ($\delta_{ij}=1$ para $i=j$ e $\delta_{ij}=0$ para $i \neq j$) e s_{ij} é o tensor taxa de deformação, definido por

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.14)$$

Devido a sua complexidade essas equações possuem solução analítica em apenas alguns casos específicos com muitas simplificações aplicadas [Schlichting, 1979], sendo então necessária uma alternativa numérica para a obtenção da solução nos casos de interesse cuja complexidade não permite tais simplificações.

A princípio, as equações de Navier-Stokes descrevem os escoamentos turbulentos sem a necessidade de informações adicionais. Porém, a turbulência encontrada nos casos de interesse possui uma larga faixa de escalas de comprimento e tempo e, geralmente, envolve comprimentos de escala muito inferiores que o tamanho da malha de volumes finitos empregada. A simulação numérica direta (DNS – *Direct Numerical Simulation*) requer uma força computacional inúmeras vezes maior do que a disponível no mercado, inviabilizando a solução direta das equações de Navier-Stokes. A modelagem LES (*Large-Eddy Simulation*), que modela apenas as menores escalas de turbulência e calcula as demais, é uma alternativa ao DNS e é aplicável em inúmeros casos com o uso de supercomputadores [Oliveira Jr, 2006; Petry, 2002].

Para prever os efeitos da turbulência no escoamento, inúmeros pesquisadores focam seu trabalho em metodologias e usos de modelos de turbulência. Em geral, os modelos de turbulência modificam as equações originais aplicando ideias de escoamento médio somado de flutuações, obtendo as equações médias de Reynolds (RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) [Wilcox, 1994], nas quais todas as escalas da turbulência são modeladas, reduzindo consideravelmente os recursos computacionais necessários na simulação.

Com esta hipótese as variáveis temporais podem ser expressas como a soma da média temporal com sua flutuação no tempo, como segue:

$$V_i = \bar{V}_i + v'_i \quad (5.15)$$

Desta forma, a equação da continuidade pode ser expressa por

$$\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5.16)$$

e a equação de conservação de quantidade de movimento para um escoamento incompressível expressa, então, por

$$\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial t} + \bar{V}_j \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} \right) - \overline{v'_i v'_j} \right) \quad (5.17)$$

onde \bar{V}_i é a velocidade média na direção i , t o tempo, x o comprimento, ν a viscosidade e $\overline{v'_i v'_j}$ a perturbação das flutuações, chamado de tensor de tensões de Reynolds.

Este tensor de tensões insere novas incógnitas no equacionamento, resultando no chamado problema de fechamento. Para solucionar o fechamento são utilizados modelos de turbulência que obtêm equações ou aproximações para o tensor de forma a igualar o número de equações ao número de incógnitas do problema, tornando possível a solução.

Existem diversos modelos de turbulência utilizados no fechamento das equações. Estudos realizados por Horn, 2010, Sanderse, 2009 e Réthoré *et al.*, 2010, demonstraram que no caso de estudos sobre a esteira de uma turbina eólica a modelagem SST (*Shear Stress Transport*) empregada pelo CFX apresentou os melhores resultados em relação a outros modelos conhecidos e usados pelo programa.

5.4.2 Modelo de turbulência SST

O modelo SST, também conhecido como $k-\omega$ SST, trata de uma mistura dos modelos $k-\varepsilon$ e $k-\omega$ e nasceu da necessidade de melhoramento no cálculo de modelos aeronáuticos com gradientes adversos de pressão e separação da camada limite. O modelo $k-\varepsilon$ apresenta falhas em camadas limites turbulentas com separação de escoamento, enquanto que nesta região próxima a paredes, o modelo $k-\omega$ é mais preciso, mas continua falhando em escoamentos com separação. Além disto, a equação de ω possui sensibilidade aos valores da frequência de turbulência fora da camada limite. Esta sensibilidade foi o motivo que impede o seu uso em substituição ao modelo $k-\varepsilon$, mesmo com seu desempenho superior na região próxima à parede. Isto motivou o desenvolvimento de novos modelos de fechamento, entre eles o SST [Menter *et al.*, 2003].

A aplicação das médias de Reynolds nas equações resultou no aparecimento do Tensor de Reynolds, ou tensor de tensões turbulentas. Este tensor relaciona as flutuações de velocidades do escoamento nas três direções características. Por analogia com a difusão molecular da quantidade de movimento, a hipótese de Boussinesq relaciona o transporte de quantidade de movimento com gradientes do campo de velocidades média através de uma variável chamada de viscosidade turbulenta [Reddy e Gartling, 1994]. Assim, o problema turbulento é

reduzido a um conjunto de equações diferenciais parciais que especificam como a viscosidade turbulenta varia de acordo com o escoamento.

Este modelo possui um fator de mistura entre os modelos $k-\omega$, nas regiões próximas às paredes, e o modelo $k-\varepsilon$, e nas regiões distantes de superfícies. Esta formulação é independente da interação com o usuário, visto que o zoneamento depende de um fator F_1 que é um para volumes próximos a paredes e zero para volumes distantes da mesma. O cálculo deste distanciamento é feito através da solução da equação de Poisson [Menter *et al.*, 2003].

Neste modelo a energia cinética turbulenta pode ser obtida da seguinte equação:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + V_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \frac{P_k}{\rho} - \beta^* k \omega \quad (5.18)$$

onde k é a energia cinética turbulenta, ν é a viscosidade, ν_t a viscosidade turbulenta, ω é a frequência da turbulência e P_k é definido como

$$P_k = \rho \nu_t \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \rightarrow P_k = \min (P_k, 10\beta^* \rho k \omega) \quad (5.19)$$

Já a frequência de turbulência, ω , pode ser modelada por

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + V_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \alpha S^2 - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (5.20)$$

com o coeficiente α uma variável do modelo dependente da função de interpolação e a função de mistura, F_1 , sendo

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (5.21)$$

onde y é a distância da parede mais próxima e $CD_{k\omega}$ calculado por

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega 2}k\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10}\right) \quad (5.22)$$

Neste modelo a viscosidade turbulenta, ν_t , pode ser calculada por

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (5.23)$$

sendo S a medida invariante do tensor de deformação e F_2 , uma segunda função de mistura definida por

$$F_2 = \tanh\left\{\left\{\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}\right)^2\right\}\right\} \quad (5.24)$$

As demais constantes das equações do modelo são oriundas dos modelos de origem, com algumas alterações. Seus valores são estipulados como

$$\begin{aligned} \beta^* &= 0,09; \\ \alpha_1 &= 5/9; \\ \beta_1 &= 3/40; \\ \sigma_{k1} &= 0,85; \\ \sigma_{\omega 1} &= 0,5; \\ \beta_2 &= 0,0828; \\ \sigma_{k2} &= 1; \\ \sigma_{\omega 2} &= 0,856. \end{aligned} \quad (5.25)$$

Através das funções de mistura F_1 e F_2 variando de zero a um, o modelo altera a formulação das equações de transporte. F_1 é responsável pela variação entre as equações de transporte e F_2 provoca a variação entre as equações de viscosidade turbulenta.

5.5 Condições iniciais e de contorno

As condições iniciais, bem como as de contorno, são responsáveis pelo comportamento do fluido no interior do domínio simulado. A aplicação destas condições em conformidade com a física do problema real é fundamental para a obtenção de bons resultados e deve ser aplicada em todas as superfícies, internas ou externas, existentes no modelo numérico.

A seguir são apresentadas as condições iniciais utilizadas nas simulações, assim como as diversas condições de contorno empregadas, cujas localizações são apresentadas na Figura 5.6, que ilustra o domínio computacional simulado.

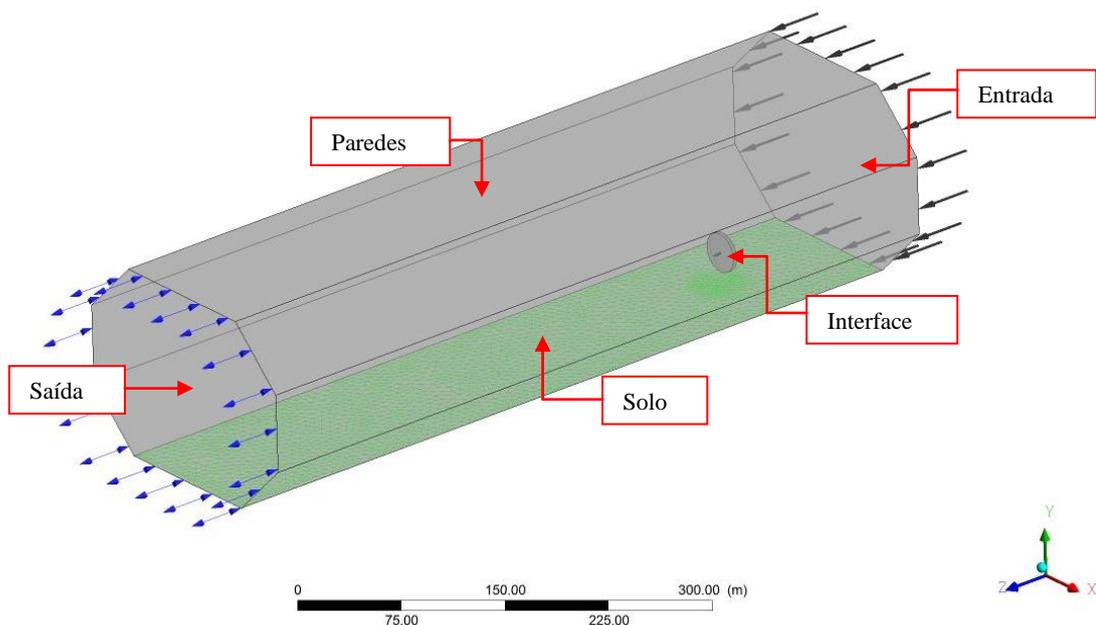


Figura 5.6 – Condições de contorno do problema aplicado a uma geometria semelhante ao túnel de vento de Alfredsson e Dahlberg (1979).

5.5.1 Condições iniciais

Os dados experimentais apresentados por Alfredsson e Dahlberg, 1979, são medidos quando a física do problema está estabilizada. Portanto, não se deve admitir a solução resultada a partir de um campo uniforme para a solução numérica. Porém, a simulação numérica

requer que um campo inicial de velocidades seja prescrito para possibilitar os cálculos, tanto para regime permanente quanto para o transiente.

Visando aproximar as condições encontradas no começo das medições do trabalho experimental, estipula-se um campo inicial de velocidades e pressão, para a simulação em regime transiente, desenvolvido a partir de uma simulação em regime permanente, utilizada no estudo de qualidade de malha apresentado na sequência.

Este campo inicial médio apresenta características de um escoamento plenamente desenvolvido, com a esteira aerodinâmica da turbina caracterizada. Para a obtenção deste resultado preliminar, bem como para o estudo de qualidade de malha, parte-se de um campo uniforme com velocidade prescrita uniforme igual aquela utilizada como condição de entrada do domínio apresentada a seguir.

5.5.2 Condições de entrada

O programa CFX permite a aplicação de diferentes tipos de condição de entrada referentes a velocidades e pressão, bem como a turbulência na entrada do domínio. Esta flexibilidade permite o estudo de diferentes casos de interesse geral da indústria de energia eólica.

Para reproduzir a entrada de um túnel de vento, utiliza-se como condição de entrada a velocidade prescrita nas três direções, sendo que somente em uma direção é diferente de zero. Nas simulações de estudo da camada limite atmosférica, é possível a aplicação de condição de velocidade variável com a altura do domínio. Neste estudo um perfil de velocidades logarítmico foi aplicado através da implementação da Equação (4.1) na condição de velocidade na direção preferencial do escoamento. Para este perfil calculam-se as velocidades com base em uma velocidade de referência igual a 7,9 m/s, a mesma utilizada nos casos em que não há presença de perfil. O perfil pode ser observado na Figura 5.7 como condição de entrada.

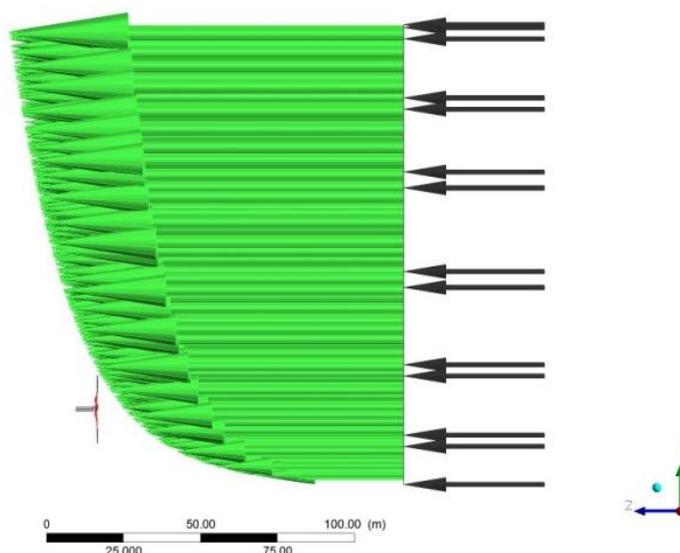


Figura 5.7 – Perfil de velocidades da condição de entrada do domínio

Nestes casos em que não há a presença de camada limite atmosférica, prescreve-se velocidade uniforme de 7,9 m/s em toda a superfície de entrada, havendo, então, a variação na intensidade de turbulência, que relaciona a flutuação da velocidade local com a magnitude da velocidade média na condição de contorno, para os casos em estudo em conformidade com os resultados experimentais.

Para ambas as condições de velocidades prescritas na entrada do domínio variam-se as intensidades de turbulência. São impostas intensidades de turbulência equivalentes a 0,6%, 2% e 6%, totalizando seis condições de entrada que representam situações atmosféricas distintas a serem analisadas.

5.5.3 Condições de saída

Para reproduzir numericamente a saída de um túnel de vento optou-se pela condição aberta (*Opening*) disponibilizada pelo programa. Este tipo de condição permite a recirculação do fluido através da superfície, possibilitando a saída de vórtices do domínio, onde é aplicada uma pressão relativa referente àquela existente no exterior do domínio.

No caso de um túnel de vento esta condição é condizente com a realidade, sendo a pressão relativa nula pelo fato de o escoamento sair para uma região com pressão atmosférica, igual aquela existente no interior do túnel, bem como do domínio computacional.

5.5.4 Condições de parede

A condição de parede (*Wall*) do programa CFX permite a escolha de características como o deslizamento e a rugosidade da mesma. Uma parede com deslizamento impede a passagem de fluido através dela, mas permite que haja velocidade na direção paralela à superfície. Seria a condição existente em uma parede ideal sem rugosidade que não teria atrito com o ar.

Na construção de um túnel de vento procura-se reduzir os efeitos de atrito das paredes com o ar, reduzindo os efeitos das paredes sobre o escoamento interno. A representação das paredes do túnel de vento é feita através da imposição da condição de não deslizamento da parede (*no slip wall*) do CFX com rugosidade prescrita. Para tal, aplicou-se a rugosidade do alumínio encontrada em Fox *et al.*, 2010.

Esta mesma condição é aplicada nas pás, núcleo do rotor, eixo e nacele da turbina. Nestes equipamentos existe o desejo de reduzir os efeitos da rugosidade para aumentar a eficiência aerodinâmica da turbina. No esquema numérico utiliza-se então a condição de parede considerando a rugosidade de uma parede lisa (*Smooth Wall*) existente no pré-processador do programa.

5.5.5 Condições de solo

Da mesma forma que as paredes do túnel de vento, o solo pode ser considerado uma parede como as outras, com a rugosidade do alumínio. Porém no caso de haver camada limite atmosférica esta rugosidade deve ser considerada igual aquela que gerou o perfil de velocidades para que este não se dissipe perdendo as características da atmosfera terrestre.

No experimento em túnel de vento a criação da camada limite atmosférica é feita através da colocação de obstáculos no chão do túnel a montante da turbina, e a manutenção do perfil de velocidades é feita através da aplicação de uma superfície com rugosidade mais ele-

vada. Numericamente a camada limite é imposta como condição inicial e sua manutenção é feita aplicando a rugosidade calculada através da Equação (4.4).

A rugosidade encontrada através das velocidades obtidas dos gráficos de camada limite não perturbada pela turbina apresentados no trabalho experimental de referência é coerente com aquela rugosidade apresentada por Villar Alé e Pereira, 2002.

5.5.6 Condição de interface

A utilização de dois domínios independentes para a aplicação da rotação na turbina requer uma condição de contorno que relacione os volumes de cada um dos domínios. Tal artifício no CFX é chamado de condição de Interface que permite a conexão de malhas não coincidentes. O tratamento dos dados na interface é feito de maneira conservativa para o fluxo de massa e de quantidade de momento, bem como de energia e outras grandezas não envolvidas neste trabalho.

O domínio referente ao rotor da turbina possui rotação constante calculada de acordo com a Equação (5.1) com a velocidade do vento e razão de velocidade na ponta da pá, λ , consideradas na criação das pás segundo a teoria de Betz. Para a presente simulação utilizou-se o modelo de mistura do programa chamado *Frozen Rotor*, que requer a menor carga computacional em relação aos outros disponíveis.

6 RESULTADOS

A avaliação dos resultados das simulações é realizada através do emprego do programa de pós-processamento ANSYS CFD-POST 12.0. Primeiramente é apresentado um estudo da influência da discretização geométrica e temporal do caso. A qualidade da malha de volumes finitos é analisada através de duas variáveis de interesse no caso, o coeficiente de potência e a velocidade média, mesmos valores estudados na análise do passo de tempo utilizado nos cálculos transientes. Os resultados dos campos de velocidades obtidos, para diferentes condições de turbulência e velocidade na entrada do domínio, são comparados com resultados experimentais apresentados por Alfredsson e Dahlberg, 1979, de forma adimensional com foco na esteira distante da turbina. Também é apresentado um estudo sobre a influência da geometria sobre os efeitos na esteira próxima da turbina em simulações numéricas.

Os resultados são divididos em três casos distintos de acordo com a intensidade de turbulência na entrada do domínio. O caso 1 refere-se à turbulência natural do túnel de vento do trabalho, cuja intensidade é de 0,6% e foi utilizada tanto no caso com camada limite atmosférica quanto no caso de velocidade uniforme do trabalho experimental. O caso 2 diz respeito a uma intensidade de turbulência média de 2%. Para este caso, bem como para o terceiro caso, Alfredsson e Dahlberg, 1979, não realizaram medições com camada limite atmosférica. Já o caso 3 é referente a uma intensidade de turbulência de 6%, considerado alto em relação aos demais valores, e é o caso que mais se aproxima da intensidade de turbulência encontrada em fazendas eólicas.

A estimativa da diferença entre os resultados numéricos e experimentais é feita através do cálculo da variação relativa observada entre as velocidades médias dos dois perfis, numérico e experimental. O valor da velocidade média é calculado para as velocidades adimensionais na região em torno do eixo da turbina, entre -0,5 até 0,5 de altura adimensional (adimensionalizado pelo diâmetro do rotor), para cada uma das distâncias analisadas a jusante da turbina. A diferença relativa é obtida pela divisão do resultado pela velocidade média do trabalho numérico.

Detalhes da geometria da turbina experimental não são publicados pelo autor. Por esta razão a máquina simulada foi projetada (conforme descrito na seção 5.2) visando obter um coeficiente de potência semelhante ao experimental, e, conseqüentemente, esteiras semelhan-

tes, contudo a esteira próxima depende mais da geometria da máquina. Por esta razão, a análise da esteira próxima é feita com base nos resultados obtidos por Horn, 2010. Nesta região está ilustrada a influência da geometria do rotor nos perfis de velocidades como citado na literatura e apresentado na seção 2.2.1 deste trabalho.

Uma análise dos recursos computacionais utilizados e o tempo computacional necessário para cada uma das simulações é apresentada no Anexo 1 do presente trabalho.

6.1 Avaliação da qualidade da malha

Os resultados obtidos em estudos numéricos de escoamentos turbulentos estão relacionados diretamente com a qualidade da malha utilizada na discretização do domínio de cálculo. O estudo da qualidade da malha visa minimizar os efeitos desta dependência nos resultados da simulação.

Para tal estudo utilizam-se simulações em regime permanente das equações governantes em um total de cinco malhas com número de volumes total variando de aproximadamente dois milhões e meio até mais de cinco milhões e meio de volumes. Este regime permanente da simulação evita o efeito do passo de tempo, do regime transiente, nos resultados. Além disso, o campo de velocidades e pressão obtido neste estudo é utilizado como condição inicial dos estudos em regime transiente por ser considerado desenvolvido.

A qualidade da malha é avaliada com a análise dos resultados de duas variáveis de interesse no problema, o coeficiente de potência, calculado pela Equação (3.3), e pela velocidade média a uma distância de quatro vezes o diâmetro da turbina. Esta distância de quatro diâmetros a jusante da turbina é considerada como na região de transição entre a esteira próxima e a distante e de interesse por ser condição de entrada da esteira distante.

Os resultados obtidos nas simulações são apresentados na forma da Tabela 6.1 e a velocidade média analisada é ilustrada no gráfico da Figura 6.1. A variação dos valores das variáveis analisadas é calculada pela diferença entre a malha anterior e a presente, adimensionalizada pelo valor da malha anterior.

Tabela 6.1 – Avaliação das malhas do domínio

	Total de Volumes	C_p	Variação [%]	V_{med} [m/s]	Variação [%]
Malha 1	2455203	0,3506		7,4558	
Malha 2	2786019	0,3503	-0,073	7,3630	-1,245
Malha 3	3270318	0,3488	-0,436	7,2446	-1,608
Malha 4	4485927	0,3592	2,995	7,2416	-0,041
Malha 5	5754452	0,3588	-0,118	7,2431	0,021

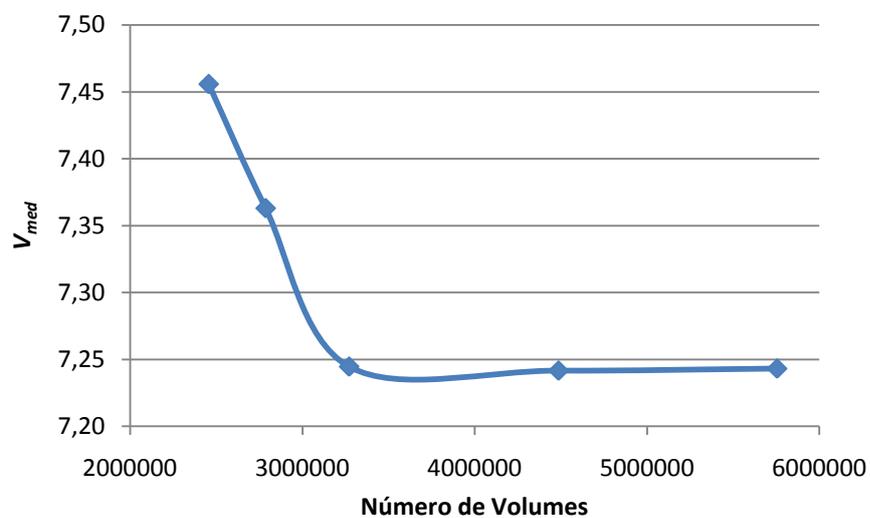


Figura 6.1 – Velocidade média obtida com as malhas analisadas

Com base nos resultados encontrados para as diferentes malhas, opta-se pela continuação do trabalho com a Malha 5, com a qual as duas variáveis analisadas apresentam variação inferior a 0,2% em relação ao resultado obtido com a malha anterior. Os quase seis milhões de elementos estão divididos de forma a discretizar o domínio do rotor com aproximadamente 2,85 milhões e o domínio fixo com aproximadamente 2,91 milhões de elementos.

6.2 Análise de influência de passo de tempo

Assim como a malha de volumes finitos pode influenciar no resultado da simulação, a discretização temporal pode causar efeitos similares aos da malha geométrica apresentada

acima. Para avaliar esta influência são analisados três passos de tempo durante quatro segundos de simulação. As variáveis analisadas são as mesmas estudadas na malha geométrica.

A Tabela 6.2 apresenta os resultados obtidos através da simulação transiente da malha selecionada para o trabalho. Para esta análise o campo inicial de velocidades e pressão utilizado é aquele resultante da simulação em regime permanente realizada no estudo anterior. A variação relativa entre os casos analisados é calculada pela diferença entre o valor obtido com o passo de tempo atual e o passo de tempo anterior, sendo adimensionalizada pela divisão da diferença pelo valor do passo de tempo anterior. Esta variação se manteve inferior a 0,1% para todos os casos analisados.

Observando-se a variação inferior a 0,1% entre os valores obtidos para as variáveis analisadas deste caso, optou-se pelo valor intermediário, de 0,05s, cuja convergência requer o menor número de iterações por passo de tempo.

Tabela 6.2 – Influência do passo de tempo na solução

Tempo Simulado [s]	Passo de Tempo	C_p	V_{med} [m/s]
1	0,1	0,359	7,243
	0,05	0,359	7,243
	0,01	0,358	7,243
2	0,1	0,388	7,243
	0,05	0,358	7,243
	0,01	0,358	7,243
3	0,1	0,358	7,243
	0,05	0,358	7,243
	0,01	0,358	7,243
4	0,1	0,358	7,243
	0,05	0,358	7,243
	0,01	0,358	7,243

6.3 escoamento com perfil uniforme de velocidades

O estudo do desenvolvimento da esteira aerodinâmica de uma turbina eólica exposta a um escoamento uniforme de velocidades é feito através da análise dos perfis de velocidades a diferentes distâncias a jusante do rotor. A velocidade de 7,9 m/s é adotada em toda a superfí-

cie de entrada do domínio em que foram estudados os efeitos da turbulência para os casos que seguem sem a presença do perfil logarítmico que representa a Camada Limite Atmosférica (CLA).

A Figura 6.2 demonstra o campo de velocidades, em um corte transversal no centro do domínio, em que está ilustrada a região afetada pela esteira aerodinâmica da turbina sem a influência de camada limite. Percebe-se a redução da velocidade do vento causada pelo rotor, bem como a presença de uma região com velocidade elevada na ponta da pá. Esta aceleração é devida à formação pelos vórtices menores gerados nas pontas das pás, conforme ilustrado na Figura 2.6, que separa a velocidade não perturbada da região que cede energia para o movimento da turbina.

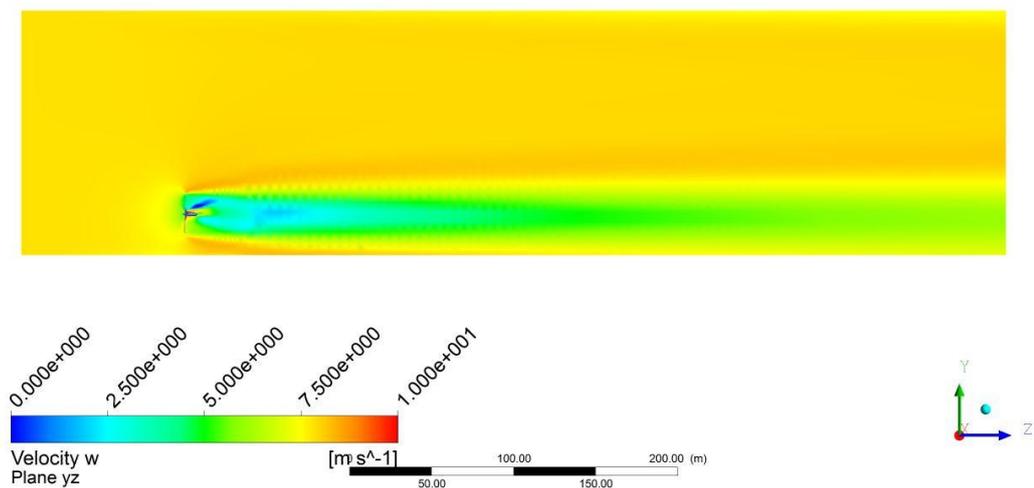


Figura 6.2 – Campo de velocidades no plano YZ com perfil uniforme de velocidades na entrada do domínio.

O campo de velocidades no plano do rotor está ilustrado na Figura 6.3. As pás giram no sentido horário provocando o giro da massa de ar que cruza o rotor. Percebe-se a redução de velocidade, causada pela passagem das pás, que geram a esteira aerodinâmica em estudo.

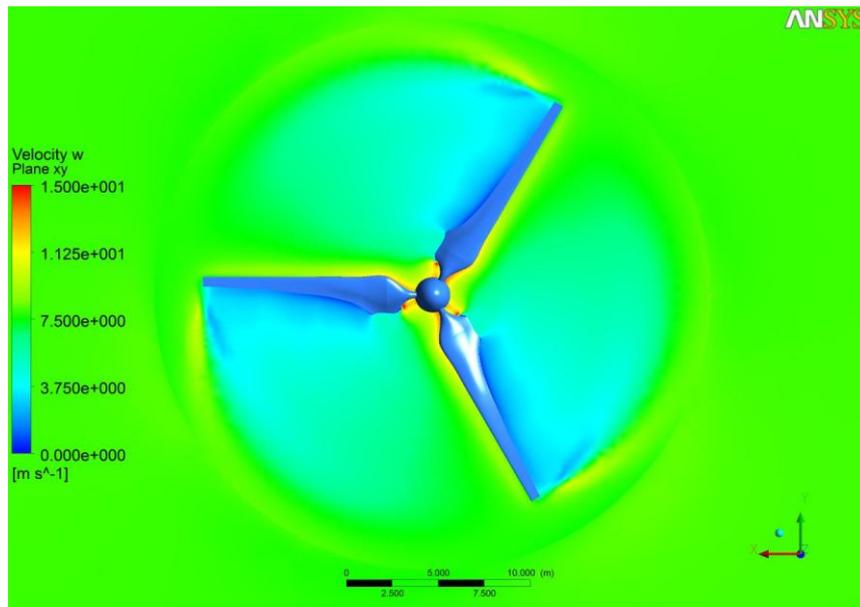


Figura 6.3 – Campo de velocidades no plano XY com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio.

Pode-se averiguar novamente a presença do efeito causado pela ponta das pás, a Figura 6.4 que detalha a ponta de uma das pás da turbina. Observa-se pela figura que mesmo na ponta da pá, onde as velocidades são mais elevadas, a mesma não atinge os 100 m/s apresentados no item 5.4 do trabalho, tornando válida a hipótese de incompressibilidade para o caso.

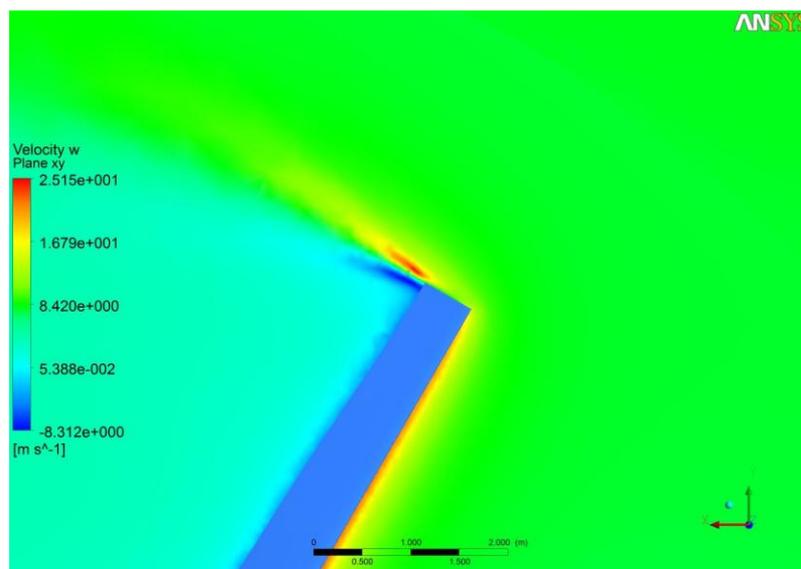


Figura 6.4 – Campo de velocidades em detalhe da ponta da pá do rotor

As linhas de corrente apresentadas na Figura 6.5 ilustram o efeito da rotação causado na massa de ar que cruza o rotor caracterizado na cor vermelha.

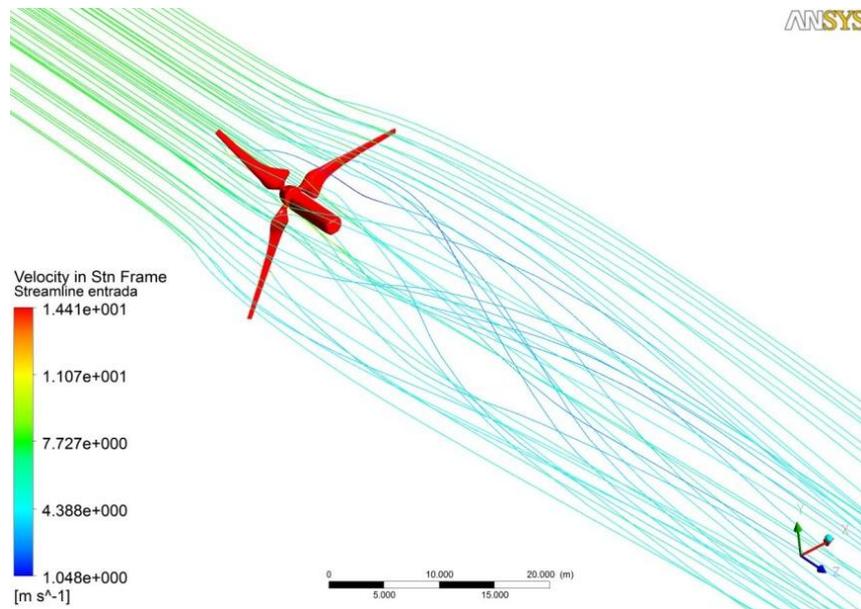


Figura 6.5 – Linhas de corrente cruzando o rotor

O giro de uma turbina eólica é devido à força de sustentação dos perfis aerodinâmicos empregados no dimensionamento das pás. A diferença de pressão que provoca esta força sobre a pá está ilustrada na Figura 6.6 através de um corte em uma seção da pá. Na parte inferior do perfil localiza-se a região com alta pressão, causada pela baixa velocidade do fluido. Na região no dorso do perfil, com pressões negativas, localizam-se as altas velocidades causadas pela aceleração do fluido pelo perfil.

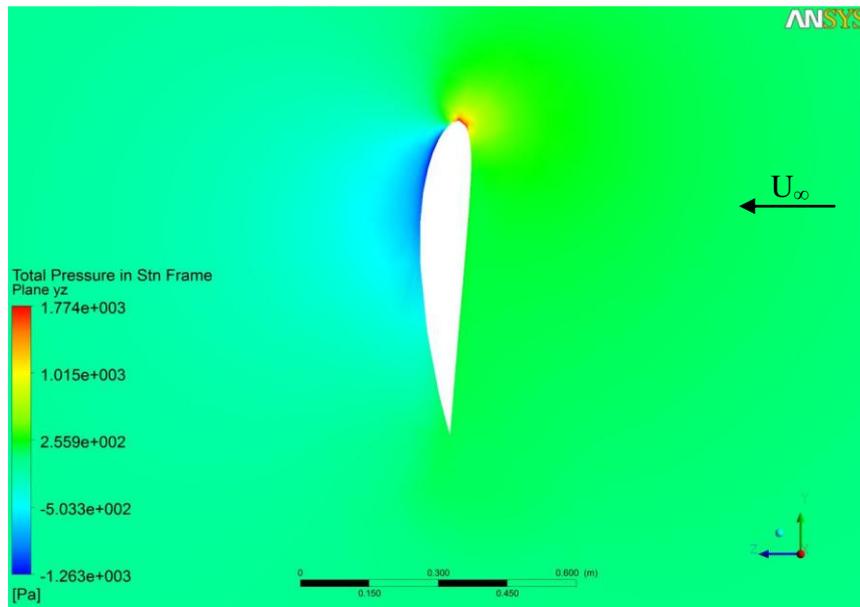


Figura 6.6 – Campo de pressões sobre uma seção da pá a 10 m de raio.

Para fins de comparação de resultados, para os três casos em estudo, os dados são dispostos em gráficos onde as linhas cheias são referentes ao trabalho numérico e as linhas pontilhadas referem-se ao trabalho experimental de Alfredsson e Dahlberg, 1979.

Cada caso é apresentado de forma independente e os resultados são apresentados graficamente de forma adimensional com foco principal na esteira distante da turbina. As variáveis de comprimento são adimensionalizadas pelo diâmetro total da turbina (D) e as variáveis de velocidade, no caso em que há perfil uniforme de velocidades, são adimensionalizadas pela velocidade de entrada (V_0). Desta forma a falta de informações a respeito do experimento realizado não impede a comparação dos resultados.

6.3.1 Caso 1 – intensidade de turbulência baixa

O primeiro caso em estudo refere-se a um escoamento sem a influência de geradores de turbulência em um túnel de vento e com velocidade uniforme prescrita na entrada do domínio. A Figura 6.7 apresenta a evolução da velocidade nas posições equivalentes a seis e oito diâmetros a jusante da turbina. As linhas tracejadas são referentes ao trabalho experimental e as linhas contínuas referentes ao presente trabalho numérico realizado com intensidade de turbulência de 0,6% na entrada do domínio.

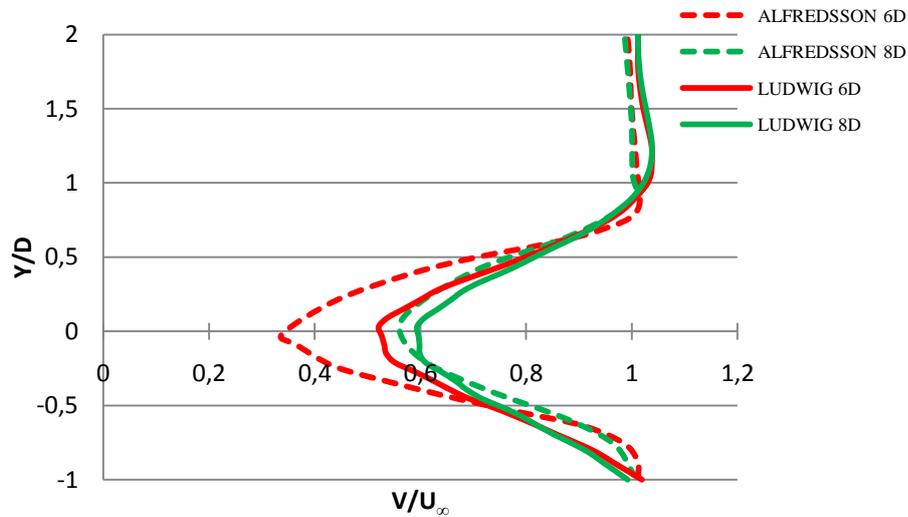


Figura 6.7 – Perfis de velocidades para 6 e 8 diâmetros com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio, caso 1.

Observa-se na Figura 6.7 uma boa coerência dos resultados numéricos com os experimentais a uma distância de oito vezes o diâmetro da turbina. A velocidade média na região da turbina (-0,5 até 0,5 na altura adimensional) apresentou uma variação menor que 3%. A diferença observada nos perfis a seis diâmetros, com variação superior a 12% nos valores de velocidade média na turbina, é atribuída ao efeito da diferença da geometria do rotor, uma vez que a esteira próxima pode se estender até esta distância considerada de transição.

A esteira distante apresentada na Figura 6.8 para as distâncias referentes a 10, 12 e 16 diâmetros a jusante da turbina não apresenta nenhum efeito da geometria da turbina.

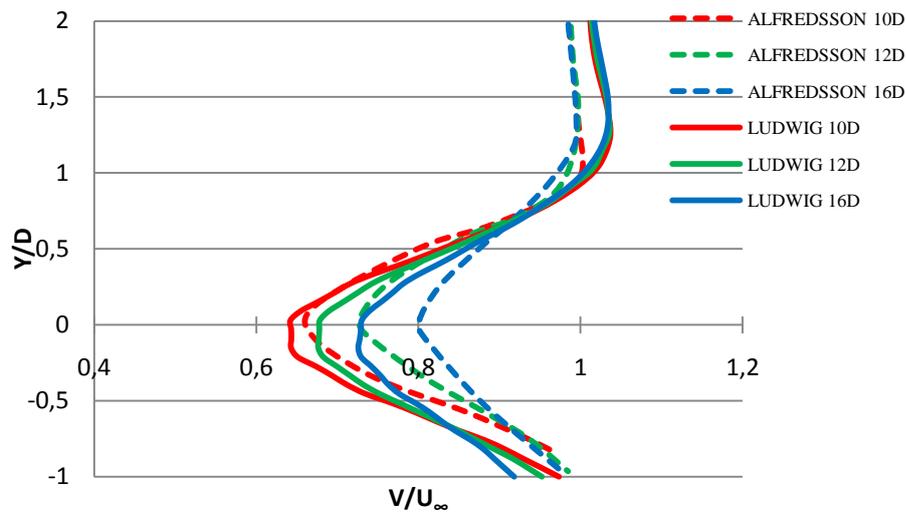


Figura 6.8 – Perfis de velocidades para 10, 12 e 16 diâmetros com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio, caso 1.

A maior queda de velocidades na região próxima a zero, referente ao centro do rotor na Figura 6.8, foi igualmente obtida no estudo numérico de Horn, 2010, que analisou a influência do modelo de turbulência. Esta diferença observada, para as maiores distâncias analisadas, pode ser causada pela modelagem RANS, que requer a modelagem de todas as escalas da turbulência envolvidas no caso. Para estas distâncias analisadas a diferença relativa ficou abaixo dos 10% nas maiores distâncias, sendo, a 10 diâmetros, encontrada uma diferença de aproximadamente 5%.

Mesmo com a turbulência sendo modelada nesta metodologia de trabalho, a boa aproximação dos resultados numéricos em relação aos experimentais demonstram que o método é capaz de prever a esteira aerodinâmica da turbina mesmo nos casos com condições extremamente controladas nos experimentos de túnel de vento.

6.3.2 Caso 2 – intensidade de turbulência média

Este caso referente a uma intensidade de turbulência na entrada do domínio numérico equivalente a 2%. No trabalho experimental esta turbulência é gerada por uma grade instalada na região de contração do túnel de vento, sendo o valor obtido experimentalmente entre 1,7 e 2,7% de intensidade de turbulência e não é mantida ao longo do túnel.

A Figura 6.9 apresenta o resultado obtido experimentalmente a oito diâmetros em comparação com o numérico na mesma distância. Também é apresentado o resultado do presente trabalho a seis diâmetros a jusante da turbina.

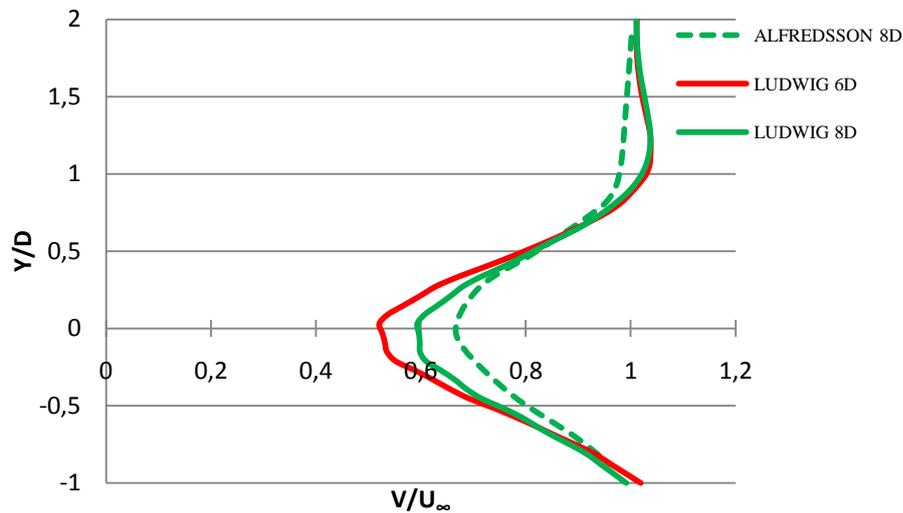


Figura 6.9 – Perfis de Velocidades para 6 e 8 diâmetros com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio, caso 2

Novamente é observada, na Figura 6.9, uma boa concordância entre os resultados a oito diâmetros. Houve um breve aumento na diferença entre os resultados em comparação com o caso anterior. Nesta simulação a diferença relativa aumentou para 8%. Uma das hipóteses é que esta diferença é devida ao modelo SST. No trabalho experimental não constam dados referentes a seis diâmetros para fins de comparação. Da mesma forma o trabalho não apresenta os resultados para 10 e 12 diâmetros, sendo o resultado a 16 diâmetros apresentado juntamente com os dados numéricos do presente trabalho para as três distâncias, na Figura 6.10.

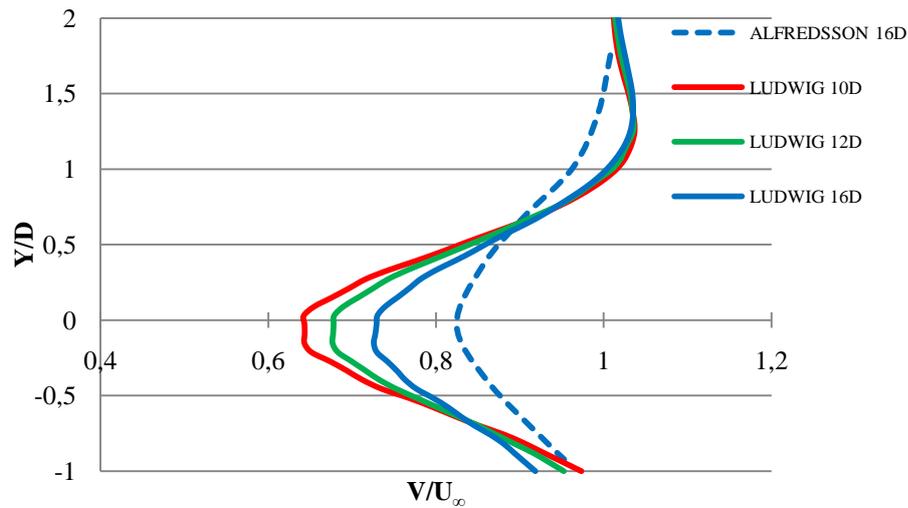


Figura 6.10 – Perfis de Velocidades para 10, 12 e 16 diâmetros com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio, caso 2.

Como aconteceu para a distância equivalente a oito diâmetros, na maior distância analisada, o aumento na intensidade de turbulência na entrada do domínio causou aumento na diferença dos resultados experimentais e numéricos que elevou a variação relativa de 9% para 13%. O aumento de 4% na diferença para ambas as distâncias analisadas é supostamente devido ao modelo de turbulência aplicado.

6.3.3 Caso 3 – intensidade de turbulência alta

A intensidade de turbulência obtida no trabalho experimental através de duas grades geradoras ficou em torno dos 6%. Este valor é utilizado na condição de entrada para a simulação numérica de forma a possibilitar a comparação e análise dos resultados.

A Figura 6.11 apresenta os resultados obtidos para este caso nas distâncias referentes a seis e oito diâmetros, sendo observado um aumento considerável na diferença entre os valores obtidos na simulação. Os resultados apresentaram pouca variação no perfil de velocidades em relação aos casos anteriores, diferentemente dos resultados experimentais cuja diferença relativa aumentou em mais de 10% em relação ao caso 2, atingindo aproximadamente 18% de variação da velocidade média.

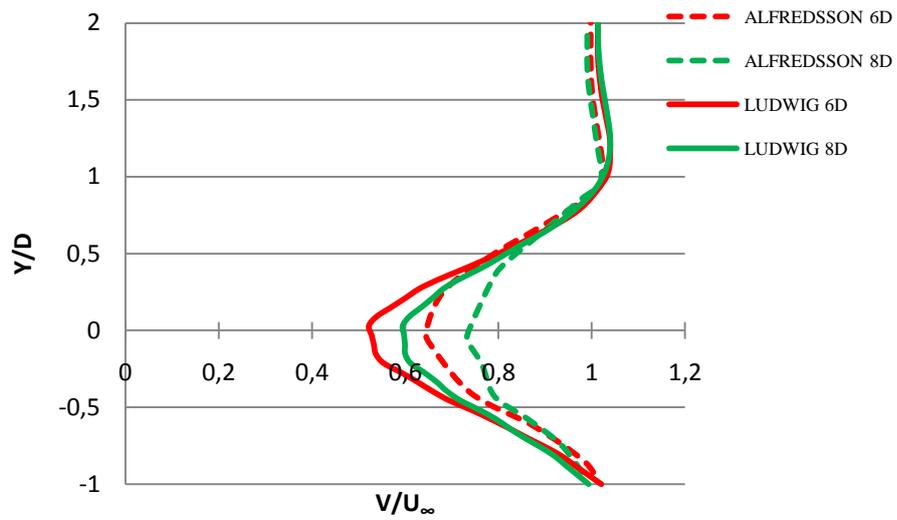


Figura 6.11 – Perfil de Velocidades para 6 e 8 diâmetros com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio, caso 3.

Para os perfis mais distantes são apresentados valores experimentais para 10 e 12 diâmetros a jusante da turbina. A comparação destes resultados é apresentada na Figura 6.12 de forma adimensional.

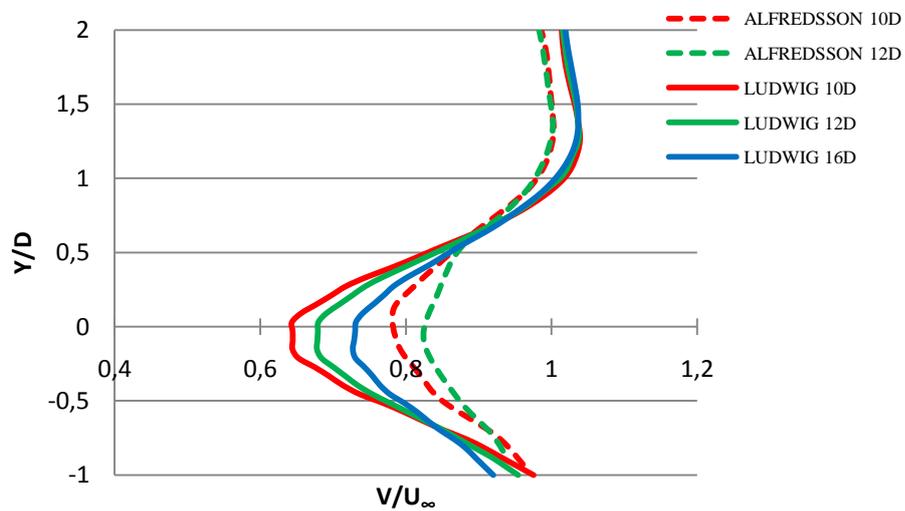


Figura 6.12 – Perfil de Velocidades para 10, 12 e 16 diâmetros com perfil uniforme de velocidade na entrada do domínio, caso 3.

A diferença relativa para estes perfis manteve-se na casa dos 16% para as distâncias de 10 e 12 diâmetros. O trabalho experimental não apresenta medições para distâncias acima dos 12 diâmetros.

6.3.4 Comparação de casos

A análise comparativa das três intensidades de turbulência ao longo do domínio é feita através da comparação dos valores de velocidade média na altura do núcleo do rotor. A Figura 6.13 mostra estas velocidades para diferentes distâncias a jusante da turbina nos três casos analisados.

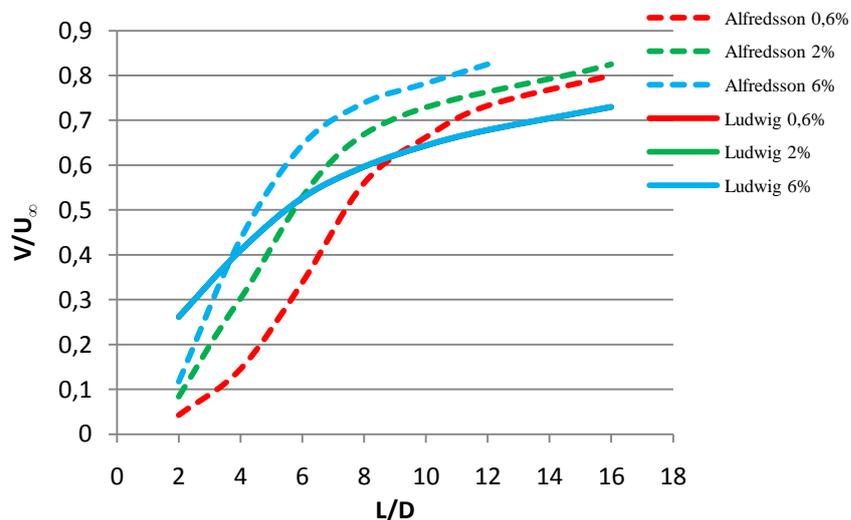


Figura 6.13 – Velocidade média no núcleo do rotor ao longo do domínio para diferentes intensidades de turbulência.

Observa-se que a variação apresentada pelos autores no trabalho experimental não se manteve no presente trabalho numérico. As três séries de resultados numéricos apresentam os mesmos valores, ficando sobrepostas no gráfico da Figura 6.13. Uma das hipóteses para esta não variação de resultados está no equacionamento com médias de Reynolds, que requer a modelagem de todas as escalas da turbulência.

6.4 Escoamento com influência de Camada Limite Atmosférica

As turbinas eólicas instaladas nos mais diversos países estão todas na região de influência da camada limite atmosférica. Da mesma forma que o estudo com perfil uniforme de velocidades, o efeito da turbina neste regime de vento é feito através de perfis de velocidades ao longo do domínio a jusante do rotor.

A Figura 6.14 mostra o campo de velocidades formado pela turbina imersa em um escoamento com perfil logarítmico de velocidades. Percebe-se a grande diferença no campo em relação ao resultado anterior em que não havia a presença de camada limite. A aceleração devido à formação de vórtices nas pontas das pás é menos evidente devido à velocidade reduzida pelo perfil logarítmico. Porém, da mesma forma que no caso anterior, a esteira aerodinâmica fica bem caracterizada pelas velocidades reduzidas a jusante da turbina.

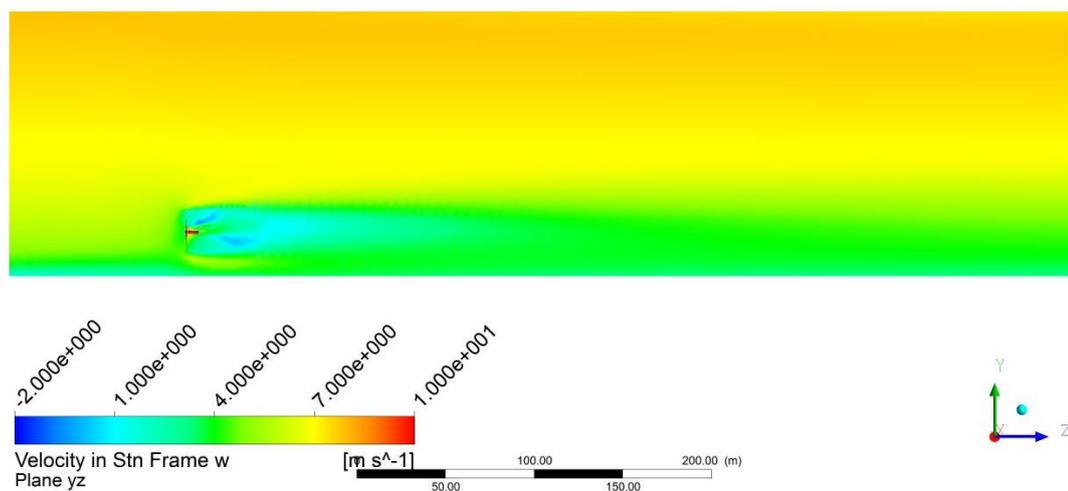


Figura 6.14 – Campo de velocidades no plano YZ com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio computacional.

A região de fluido acelerado pela ponta de pá, que não ficou bem caracterizada na análise da Figura 6.14, está visível na Figura 6.15, que apresenta um corte no plano do rotor. Percebe-se também a presença da variação de velocidades devido à camada limite, o que demonstra que a aplicação da rugosidade de referência como condição de contorno surtiu efeito impedindo a dissipação do perfil aplicado na entrada do domínio.

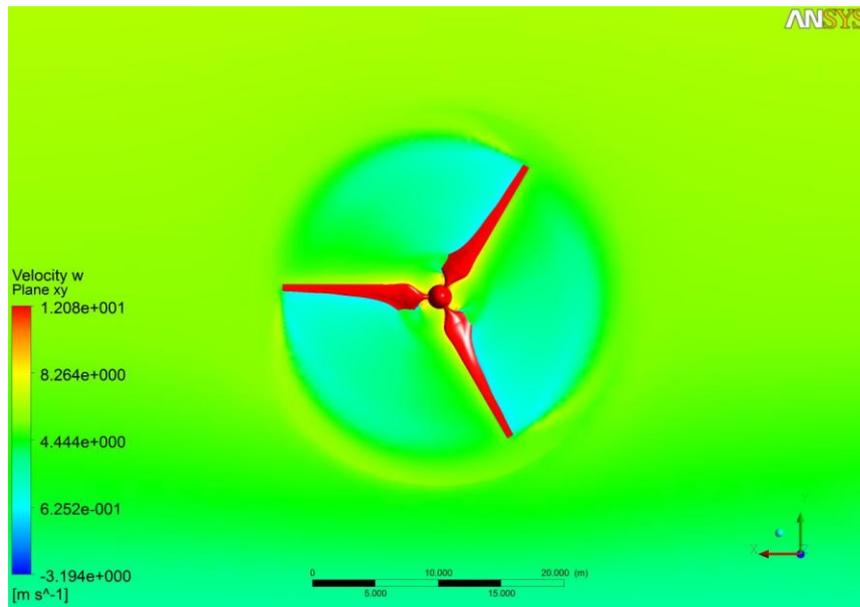


Figura 6.15 – Campo de Velocidades no plano do Rotor com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio.

Os resultados são apresentados graficamente de forma adimensional com foco principal na esteira distante da turbina. As variáveis de comprimento são novamente adimensionalizadas pelo diâmetro total da turbina (D) e as variáveis de velocidade, nos casos em que há perfil logarítmico de velocidades, são adimensionalizadas pela velocidade média do escoamento a dois diâmetros a montante da turbina, onde o perfil não está perturbado pela turbina.

Para os casos 2 e 3, com turbulência média e alta respectivamente, não foram apresentados pelos autores os resultados do experimento de referência, porém a influência da turbulência nestas condições é de grande interesse por se aproximar das condições encontradas nos parques eólicos em operação.

6.4.1 Caso 1 com CLA – intensidade de turbulência baixa

No primeiro caso com Camada Limite Atmosférica, em que não há influência de geradores de turbulência, os resultados experimentais foram apresentados com foco principal na esteira próxima da turbina e serão apresentados na seção referente a esta região do domínio. O trabalho experimental fornece apenas valores referentes ao perfil de camada limite não perturbado e ao perfil a uma distância de oito diâmetros a jusante da turbina.

A Figura 6.16 apresenta a comparação dos resultados de velocidades nestas regiões. Os valores numéricos do perfil não perturbado foram obtidos em uma linha localizada a dois diâmetros a montante da turbina. A diferença reduzida entre os perfis das CLAs não perturbadas demonstram que o perfil logarítmico aplicado aproxima-se do obtido através da imposição de obstáculos no solo do túnel de vento a montante da turbina. Na distância equivalente a oito diâmetros o estudo numérico apresentou comportamento similar ao obtido experimentalmente, porém com maior queda de velocidade na região central da turbina, o que resultou em uma variação relativa considerada alta, atingindo aproximadamente 20%. As velocidades encontradas fora da área de esteira mantiveram o perfil de velocidades aplicado como condição de entrada do domínio.

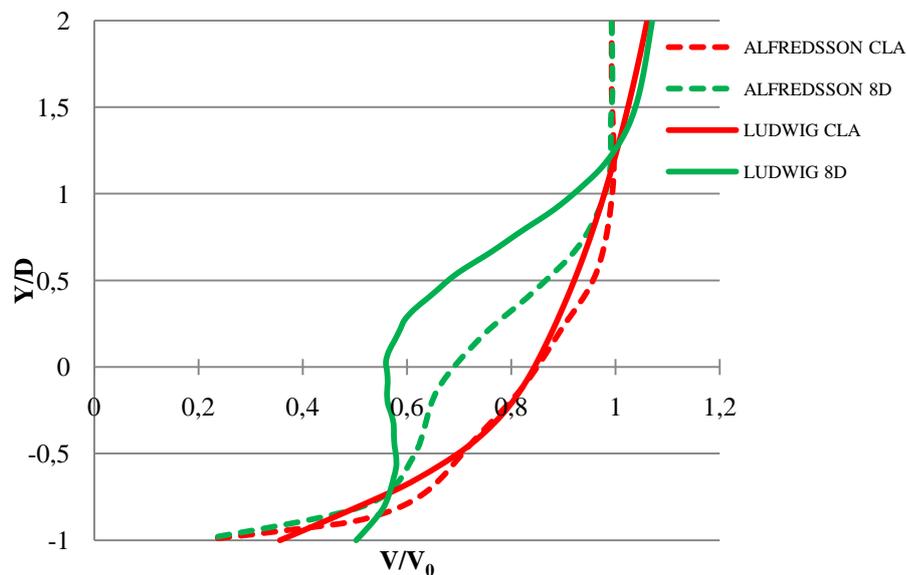


Figura 6.16 – Perfil de velocidades não perturbada e a 8 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio, caso 1.

Observa-se ainda, na Figura 6.16, que o ponto de encontro do perfil a oito diâmetros com o perfil não perturbado na região acima da turbina é próximo do ponto observado no experimento. Este ponto, localizado aproximadamente na altura adimensional de 1,2, refere-se à altura na qual existe a influência da camada limite. Acima dele, o escoamento não está perturbado e apresenta as mesmas características do escoamento de entrada. Isto demonstra que o

método apresenta uma boa aproximação para a abertura da esteira na presença da camada limite.

Os perfis referentes às distâncias de 10, 12 e 16 diâmetros são ilustrados na Figura 6.17, onde é observada pouca variação de uma posição para a outra do domínio. A menor diferença entre um perfil e outro em relação ao caso com velocidade uniforme, apresentado na Figura 6.8, deve-se ao fato de que no interior da camada limite são observadas velocidades menores, sendo o escoamento original recuperado mais rapidamente.

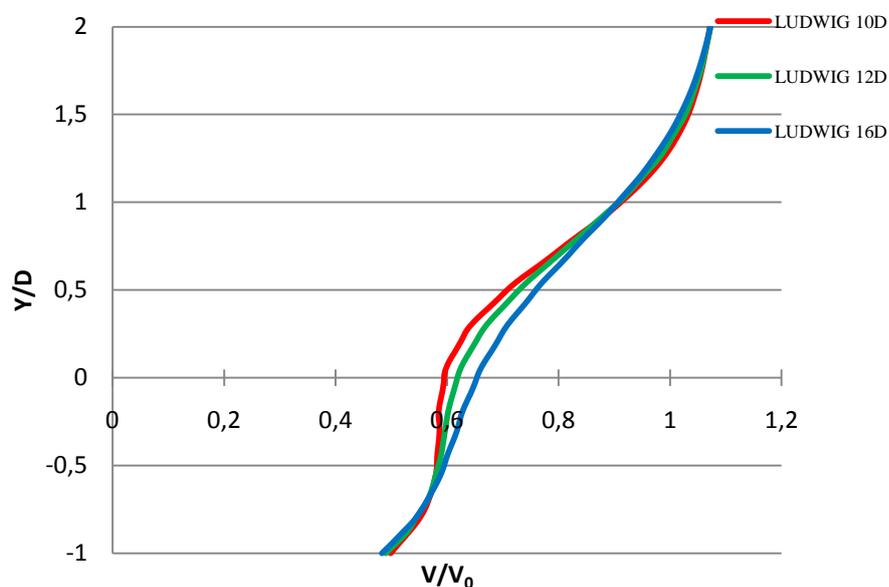


Figura 6.17 – Perfis de velocidades para 10, 12 e 16 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio, caso 1.

Em virtude da redução da velocidade média do escoamento incidente sobre o rotor, é esperada uma queda no coeficiente de potência da turbina. O coeficiente apresentado no estudo de análise de influência de passo de tempo, seção 6.2 do trabalho, estabilizou em 0,35 para o caso com perfil uniforme de velocidades e intensidade de turbulência de 0,6%. Para a mesma intensidade de turbulência, porém com a CLA como condição de entrada, este coeficiente, calculado através do torque médio sobre as pás do rotor, é estipulado segundo a Equação (3.3) com a velocidade V_1 sendo a média do perfil de entrada na altura referente ao eixo do rotor. Nestas condições o coeficiente caiu para 0,18, deixando clara a grande influência da camada limite no desempenho de uma turbina. Esta queda acentuada de desempenho deve-se possi-

velmente ao fato de que a turbina é dimensionada para uma velocidade do vento. Sua queda vai afetar negativamente o desempenho aerodinâmico da turbina.

6.4.2 Caso 2 com CLA – intensidade de turbulência média

O caso referente a uma intensidade de turbulência na entrada do domínio numérico equivalente a 2% em um perfil logarítmico de velocidades não possui dados experimentais para fins de comparação.

A Figura 6.18 apresenta os resultados para o perfil não perturbado da camada limite juntamente com os efeitos da esteira aerodinâmica a seis e oito diâmetros a jusante da turbina. Observa-se o mesmo comportamento apresentado no primeiro caso com menor intensidade de turbulência.

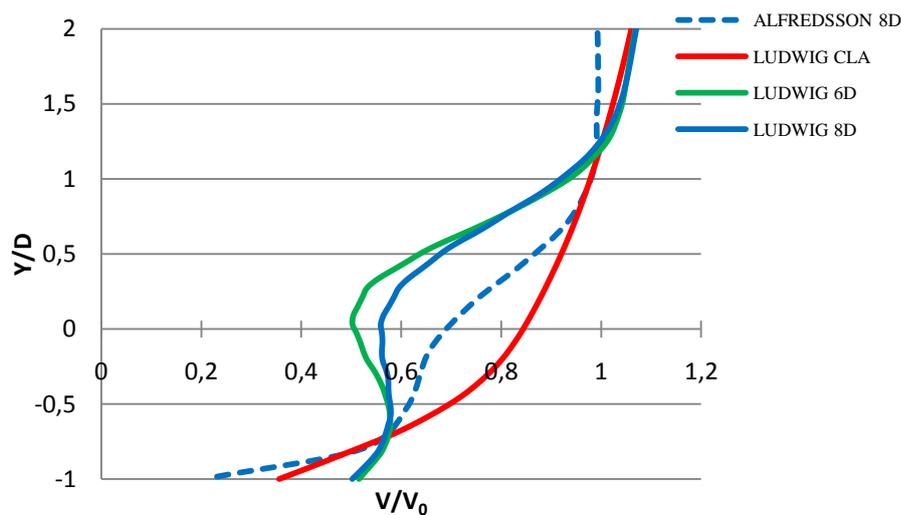


Figura 6.18 – Perfis de velocidades para 6 e 8 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio, caso 2.

Os perfis referentes a 10, 12 e 16 diâmetros a jusante da turbina são apresentados na Figura 6.19 onde não é observada grande influência da turbulência quando estes resultados são comparados com aqueles obtidos nos casos 1 e 3 deste trabalho.

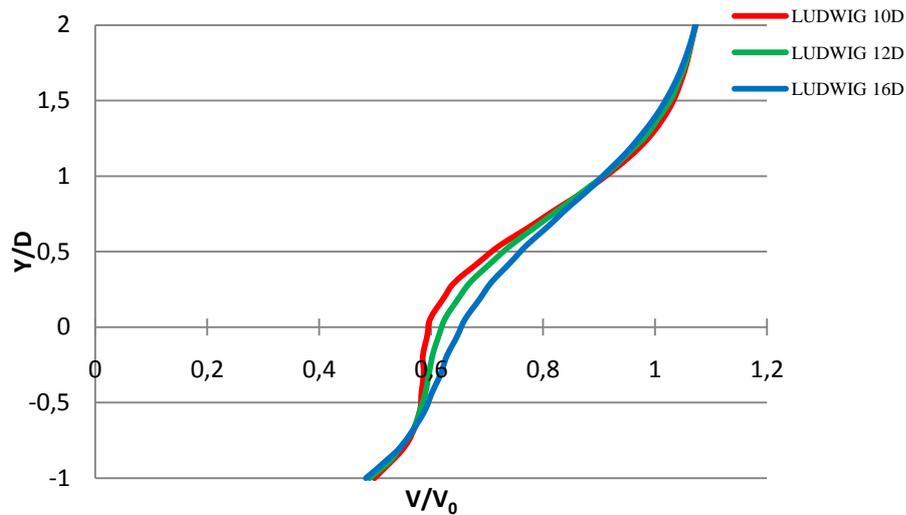


Figura 6.19 – Perfis de velocidades para 10,12 e 16 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio, caso 2.

A variação na intensidade de turbulência não causou efeitos consideráveis nos perfis de velocidades da esteira. O mesmo ocorreu quando o coeficiente de potência do rotor é analisado. O torque obtido na simulação do caso 2 teve variação desprezível em relação ao caso 1, resultando o mesmo C_p de 18%.

6.4.3 Caso 3 com CLA – intensidade de turbulência alta

Com intensidade de turbulência considerada alta em relação às demais utilizadas no trabalho, a influência dos 6% na entrada do domínio computacional não apresentou variação considerável no comportamento da esteira aerodinâmica da turbina.

Os resultados ilustrados na Figura 6.20 apontam para os mesmos perfis de velocidades, nas distâncias equivalentes a seis e oito diâmetros a jusante da turbina, em relação aos casos anteriores com intensidade de turbulência mais baixas.

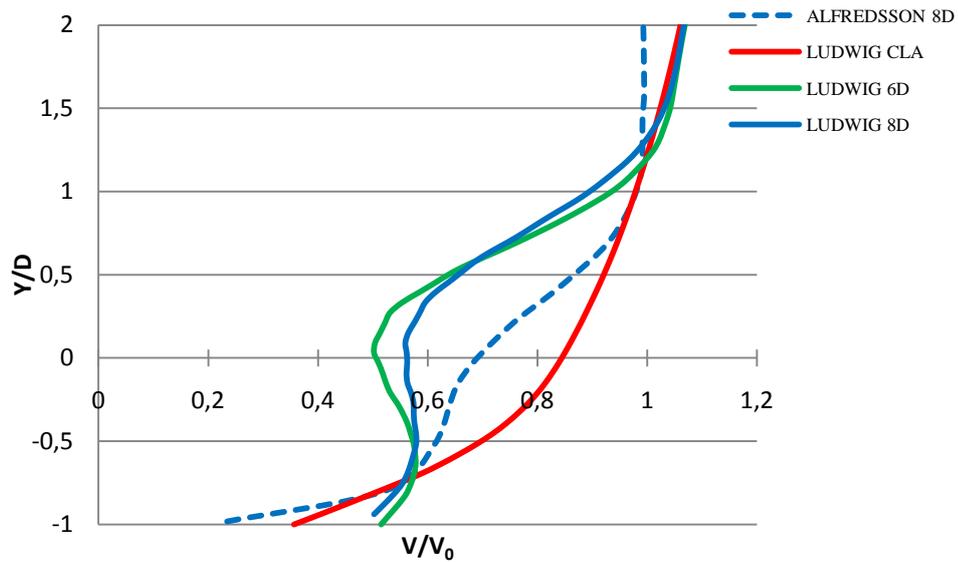


Figura 6.20 – Perfis de Velocidades para 6 e 8 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio, caso 3.

O mesmo pode ser observado na Figura 6.21 com os perfis referentes a 10, 12 e 16 diâmetros a jusante da turbina.

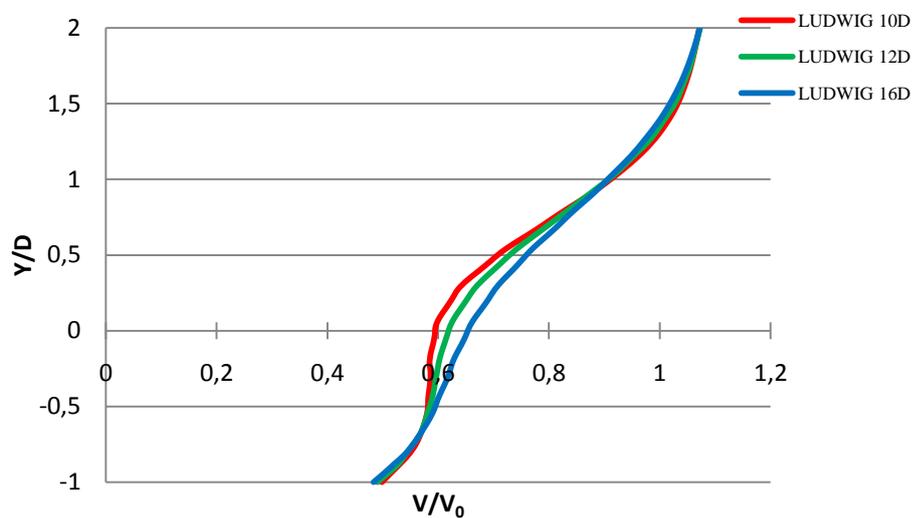


Figura 6.21 – Perfis de velocidades para 10, 12 e 16 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio, caso 3.

A não variação na queda de velocidades após a turbina observada com a variação da intensidade de turbulência, bem como a obtenção do mesmo coeficiente de potência, demons-

tram que a hipótese de que máquinas com o mesmo C_p possuem a mesma esteira aerodinâmica para as condições do escoamento estudadas no presente trabalho.

6.5 Estudo de esteira próxima

A esteira aerodinâmica na região próxima à turbina apresenta influência da geometria do rotor na queda de velocidades, diferente daqueles perfis observados na esteira distante. O trabalho apresentado por Horn, 2010, utiliza a mesma técnica de dimensionamento das pás que o presente trabalho. A diferença no uso de vários perfis aerodinâmicos na construção da pá, bem como a alteração do núcleo do rotor de forma a aproximá-lo aos rotores instalados atualmente, causa uma alteração considerável nos efeitos da esteira próxima.

Os resultados de Horn, 2010, foram obtidos com a mesma técnica numérica que o presente trabalho com escoamento uniforme na entrada do domínio. A Figura 6.22 apresenta a comparação dos resultados para dois e quatro diâmetros a jusante da turbina.

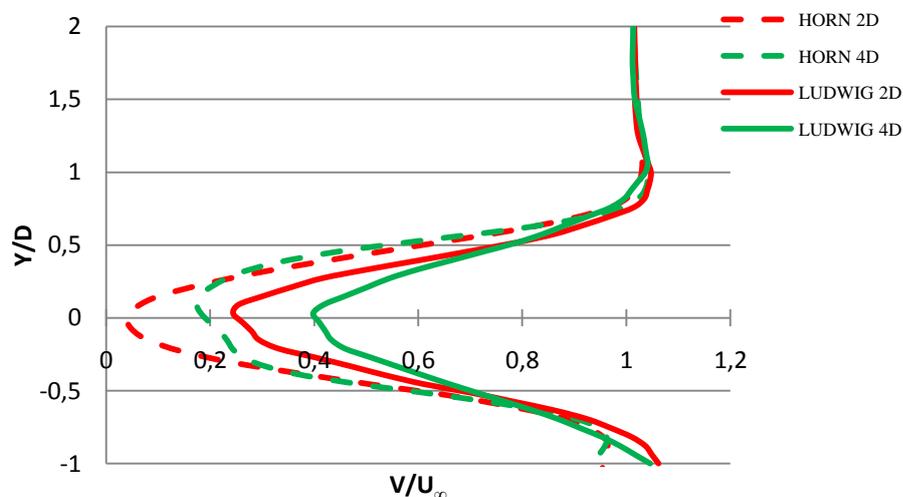


Figura 6.22 – Perfis de velocidades para 2 e 4 diâmetros com perfil logarítmico de CLA na entrada do domínio.

Observa-se ainda, na Figura 6.22, a grande diferença na menor velocidade para as duas distâncias analisadas. Estima-se que esta variação é causada principalmente pela diferença entre as faces frontais do núcleo do rotor, que no presente trabalho é criada com perfil aerodi-

nâmico e no trabalho numérico comparado é uma face plana, que causa uma estagnação no fluido.

Apesar de Horn, 2010, não ter obtido o coeficiente de potência da turbina simulada, a utilização do dimensionamento ótimo de Betz torna possível a estimativa de que o coeficiente daquela turbina não diferencie em grande escala do obtido no presente trabalho. Com esta hipótese de similaridade de coeficientes, a esteira distante das diferentes turbinas é ilustrada na Figura 6.23 para as distâncias de 8, 10 e 12 diâmetros a jusante da turbina. Observa-se uma boa coerência entre as esteiras obtidas, validando a hipótese de que turbinas com o mesmo coeficiente de potência possuem uma esteira aerodinâmica similar, com 9,2% de variação relativa na diferença entre as velocidades obtidas a 10 diâmetros, 3,2% a 12 e 6,5% a 16 diâmetros a jusante da turbina.

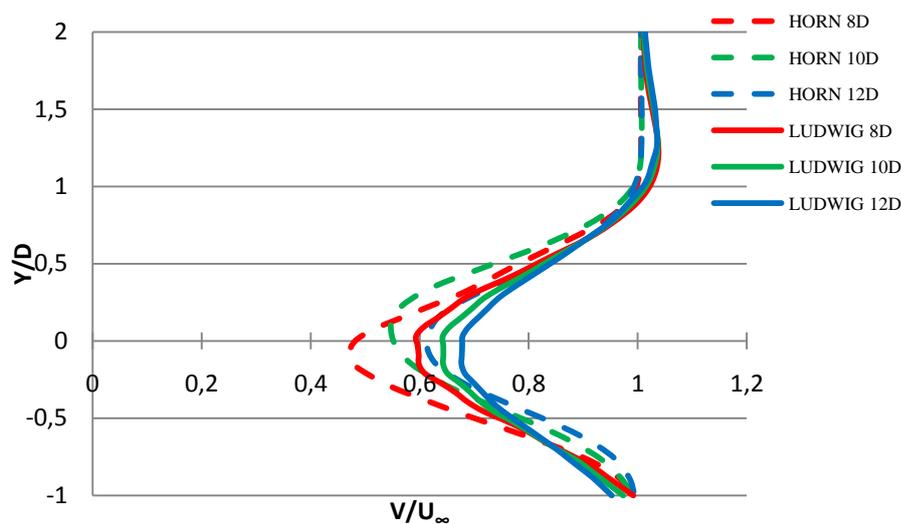


Figura 6.23 – Perfis de Velocidades para 8, 10 e 12 diâmetros.

A influência da CLA na esteira próxima também é captada pelo método numérico empregado no presente trabalho. A Figura 6.24 apresenta a comparação entre o trabalho experimental de Alfredsson e Dahlberg, 1979, e o presente trabalho para as distâncias de dois e quatro diâmetros.

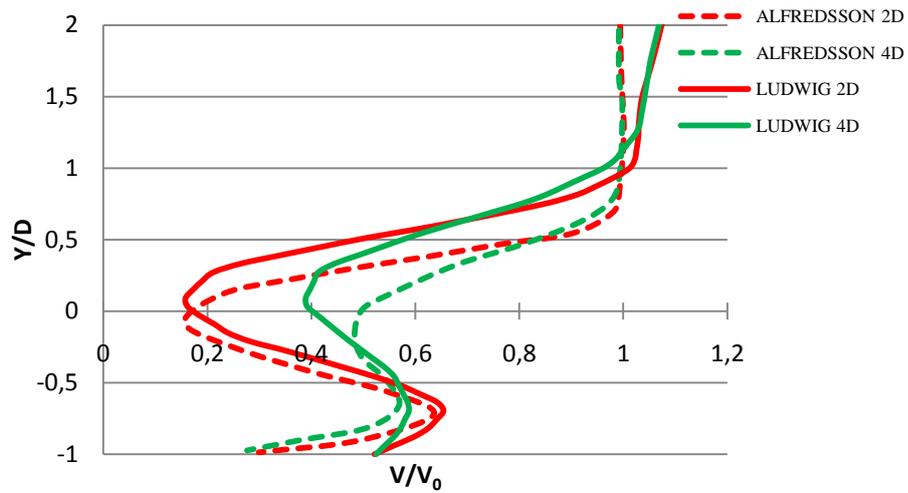


Figura 6.24 – Perfis de velocidades para 2 e 4 com CLA.

A diferença nos perfis de esteira próxima observada na Figura 6.24 não é considerada grande, porém a falta de informações a respeito da geometria do rotor utilizado no experimento, tais como o perfil aerodinâmico utilizado e geometria da nacele e do núcleo do rotor, não possibilita a comparação quantitativa dos resultados. Qualitativamente observa-se que os perfis possuem o mesmo comportamento característico, demonstrando que o método aplicado resulta em dados coerentes sobre a esteira aerodinâmica na região próxima à turbina.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo sobre a influência de fatores atmosféricos no desenvolvimento de esteiras aerodinâmicas de turbinas eólicas de eixo horizontal. A metodologia empregada na análise mostra-se eficiente na simulação dos efeitos de uma turbina eólica no campo de velocidades do domínio. O emprego da dinâmica dos fluidos computacional através do método dos volumes finitos permite uma aproximação dos resultados de esteira com boa aproximação aos resultados experimentais com exigência de recursos computacionais considerados baixos na atual conjuntura.

O emprego da metodologia de Betz no dimensionamento das pás da turbina atende às expectativas iniciais no momento que se obtém coeficientes de potência equivalentes aos que caracterizam as turbinas em funcionamento nos parques atuais.

Para distâncias de 8 a 12 vezes o diâmetro do rotor a jusante da turbina a metodologia apresenta os resultados mais próximos aos do trabalho experimental, com diferenças relativas da ordem de 3%. As maiores diferenças são observadas na esteira próxima e na região após os 12 diâmetros de distância. Na esteira próxima as maiores diferenças eram esperadas devido às diferenças na geometria das turbinas. Para a esteira distante é necessário um estudo da modelagem da turbulência específica para a região.

Os perfis de velocidades obtidos computacionalmente apresentam valores coerentes com os dados experimentais, com erro relativo abaixo de 10% na região de esteira distante, demonstrando a empregabilidade da modelagem numérica como alternativa aos modelos analíticos usados com fortes hipóteses simplificativas e que não permite a análise de terrenos complexos e perfis de velocidades como condições de projeto.

Verifica-se que a presença de ventos caracterizados por uma camada limite atmosférica no escoamento influencia diretamente no comportamento da esteira aerodinâmica. A queda no coeficiente de potência da turbina, de 35% para 18%, submetida aos efeitos de camada limite caracteriza um efeito que não pode ser desprezado no dimensionamento de uma turbina eólica. A instalação da mesma em uma localidade com rugosidade aparente elevada causa uma queda de velocidade na altura do núcleo do rotor, que poderá causar uma queda considerável de rendimento.

Neste trabalho, o uso da metodologia de média de Reynolds como simplificação na solução das equações de Navier-Stokes possibilitou a obtenção dos resultados sem a necessidade de supercomputadores ou clusters. Porém, esta hipótese que necessita a modelagem de todas as escalas da turbulência apresentou dificuldades na predição da esteira dos casos com diferentes intensidades de turbulência, cuja variação não acompanhou aquelas apresentadas do trabalho experimental. Como sugestão para um trabalho futuro está a utilização da metodologia de Simulações de Grandes Escalas (*LES – Large Edge Simulation*) na solução das equações governantes que se torna viável com o avanço dos recursos computacionais.

A possibilidade de estimar-se o coeficiente de potência de uma turbina, submetida a escoamento com perfil não uniforme de velocidades, com a modelagem numérica completa do rotor permite uma otimização do posicionamento das torres de uma fazenda eólica de forma a aumentar a produção do parque. É possível ainda aliar diferentes técnicas de predição da esteira aerodinâmica para reduzir a carga computacional do problema. Assim como o uso de LES, fica como sugestão para trabalhos futuros a utilização de técnicas como a da linha atuadora como modelo gerador da esteira de vórtices que atinge uma turbina, modelada como no presente trabalho, possibilitando a análise do efeito da esteira diretamente no coeficiente de potência do rotor.

Tendo em vista o reduzido número de estudos experimentais publicados a respeito da queda de velocidade na região de esteira aerodinâmica de um aerogerador, ressalta-se a importância de trabalhos futuros com novos experimentos na área, relacionando a velocidade na região de esteira distante com os fatores atmosféricos existentes nas instalações de parques eólicos.

O principal objetivo deste trabalho, de avaliar a influência de fatores atmosféricos como o perfil logarítmico de camada limite na esteira aerodinâmica de uma turbina eólica, foi alcançado. Na modelagem completa do rotor, com a possibilidade de estimar-se características de desempenho da turbina em funcionamento, foram obtidos valores de velocidades com diferença inferior a 3%, em relação ao trabalho experimental, no caso da esteira distante com intensidade de turbulência baixa e com perfil uniforme de velocidades na entrada do domínio.

8 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS DO AUTOR

Horn, D. A.; Ludwig, D. E.; Petry, A. P. **Numerical Analysis of Wind Turbine Wake Aerodynamics**. COBEM, 2009, Gramado-RS. Proceedings of COBEM2009: Engineering for the future, 2009.

Ludwig, D. E.; Horn, D. A.; Petry, A. P. **RANS Solutions of Wind Turbine Wakes**. ENCIT - 13rd Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2010, Uberlândia. RANS Solutions of Wind Turbine Wakes, 2010.

Petry, A. P.; Ludwig, D. E.; de Freitas Filho, D. G. R. **Turbulence Models in CFD Simulations of Wind Turbine Wake**. DEWEK - German Wind Energy Conference, 2010, Bremen. Turbulence Models in CFD Simulations of Wind Turbine Wake. Osnabrück : Steinbacher Druck GmbH, 2010.

8.1 Artigos aceitos para publicação

Ludwig, D.E.; Fleck, G.D.; Petry, A.P. **Effects of atmospheric boundary layer in numerical analysis of wind turbine wake aerodynamics**. COBEM – Brazilian Congress of Mechanical Engineering 2011, Natal-RN, 2011.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aeolus. **Technical Report**. Disponível em <<http://ict-aeolus.eu/about.html>>. Acesso em: 20 Janeiro 2011.

AID. **Airfoil Investigation Database**. Disponível em: <<http://ict-aeolus.eu/about.html>>. Acesso em: 20 Janeiro 2011.

Alfredsson, P.-H.; Dahlberg, J.-A. **A preliminary wind tunnel study of windmill wake dispersion in various flow conditions**. FFA - The Aeronautical Research Institute of Sweden. Stockholm. 1979.

Amarante, O. C. **Atlas do Potencial Eólico do Brasil**. Brasília, 2001.

ANSYS, I. **ANSYS CFX - Solver Theory Guide**. v. V.12, 2009.

Barthelmie, R.J.; Folkerts, L.; Ormel, F.T.; Sanderhoff, P.; Eecen, P.J.; Stobbe, O.; Nielsen, N.M. **Offshore wind turbine wakes measured by sodar**. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2002.

Barthelmie, R.J.; Folkerts, L.; Larsen, G.C.; Rados, K.; Pryor, S.C.; Frandsen, S.T.; Lange, B.; Schepers, G. **Comparision of wake model simulations with offshore wind turbine wakes profiles measured by sodar**. Journal of Atmospheric and Oceanic Thecnology, EUA, 2006.

Brasil, M. D. M. E. E. **Matriz Energética Nacional 2030**. Brasília: Gráfica da Eletrobrás, 2007.

Capeletto, G. J.; Zanchi de Moura, G. H. **Balanço Energético do Rio Grande do Sul 2010: Ano base 2009**. Porto Alegre: Grupo CEEE, 2010.

Crespo, A.; Gómez-Elvira, R.; Migoya, E.; Manuel, F.; Hernández, J. **Anisotropy of turbulence in wind turbine wakes**. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, v. 93, p. 797-814, 2005.

Custódio, R. D. S. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.

Fox, R. W.; Pritchard, P. J.; McDonald, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Sétima edição. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

Gasch, R.; Twele, J. **Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation**. Berlin: Solarpraxis AG, 2002.

Geller, H. S. **Revolução Energética: Políticas para um futuro sustentável**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2003.

Hand, M.M.; Simms, D.A.; Fingersh, L.J.; Jager, D.W.; Cotrell, J.R.; Schreck, S.; Larwood, S.M. **Unsteady aerodynamics experiment phase VI: Wind tunnel test configurations and available data campaigns**. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Colorado. 2001.

Hansen, M.O.L.; Sørensen, J.N.; Voutsinas, S.; Sørensen, N.; Madsen, H.Aa. **State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity**. Progress in Aerospace Sciences, v. 42, p. 285-330, 2006.

Hau, E. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. Berlin: Springer, 2006.

Horn, D. A. **Análise numérica da esteira aerodinâmica formada por uma turbina eólica com dimensionamento ótimo de Betz**. Dissertação de Mestrado no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – UFRGS. Porto Alegre, 2010.

Ivanell, S. S. A. **Numerical Computations of Wind Turbine Wakes**. Gotland University. Stockholm. 2009.

Jiménez, Á.; Crespo, A.; Migoya, E. **Application of a LES technique to characterize the wake deflection of a wind turbine in yaw**. Wind energy, 2009.

Ludwig, D. E. **Avaliação da influência de uma turbina eólica no escoamento dos ventos utilizando a dinâmica dos fluidos computacional**. Trabalho de Conclusão de Curso do Departamento de Engenharia Mecânica - UFRGS. Porto Alegre. 2007.

Magnusson, M.; Smedman, A.-S. **Air flow behind wind turbines**. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1999. 169-189.

Mavriplis, D. J. **Unstructured mesh discretizations and solvers for computational aerodynamics**. 18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Miami, June 2007.

Menter, F. R.; Kuntz, M.; Langtry, R. **Ten years of industrial experience with the SST turbulence model**. Turbulence Heat and Mass Transfer, v. 4, 2003.

Mikkelsen, R. **Actuator disk methods applied to wind turbines**. Technical University of Denmark. Lyngby. 2003.

Moriarty, P. J.; Hansen, A. C. **AeroDyn theory manual**. NREL. Golden. 2005.

Oliveira JR., J. A. A. **Desenvolvimento de um sistema de dinâmica dos fluidos computacional empregando o método elementos finitos e técnicas de alto desempenho.** Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFRGS. Porto Alegre. 2006.

Petry, A.P., **Análise numérica de escoamentos turbulentos tridimensionais empregando o método de elementos finitos e simulação de grandes escalas.** Tese de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFRGS. Porto Alegre, 2002.

Postdam, M. A.; Marvriplis, D. J. **Unstructured mesh CFD aerodynamic analysis of the NREL phase IV rotor.** 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, January 2009.

Rados, K.G.; Prospathopoulos, J.M.; Stefanatos, N.Ch.; Politis, E.S.; Chaviaropoulos, P.K.; Zervos, A. **CFD modeling issues of wind turbine wakes under stable atmospheric conditions.** EWEC, Marceille, 2009.

Rathmann, O.; Barthelmie, R.; Frandsen, S. **Turbine wake model for wind resource software.** EWEC, Athens, 2006.

Reddy, J. N.; Gartling, D. K. **The Finite element method in heat transfer and fluid dynamics.** Florida: CRC Press, 1994.

Réthoré, P. E.; Sørensen, N. N.; Zahle, F. **Validation of an actuator disc model.** EWEC, Warsaw, April 2010.

Réthoré, P.-E. **Wind turbine wake in atmospheric turbulence.** Aalborg University. Roskilde. 2009.

Sanderse, B. **Aerodynamics of wind wakes - Literature Review.** Energy Research Center of the Netherlands. 2009. (ECN-E-09-016).

Schlichting, H. **Boundary layer theory.** 7. ed. McGraw-Hill, 1979.

Schreck, S. **The NREL full-scale wind tunnel experiment. Introduction to the special issue.** Wind Energy, 2002.

Silveira Neto, A. **Fundamentos da Turbulência nos Fluidos.** Rio de Janeiro: ABCM, 2002.

Simms, D.A.; Hand, M.M.; Fingersh, L.J.; Jager, D.W. **Unsteady aerodynamics experiments phases II-IV test configurations and available data campaigns.** Golden: NREL, 1999.

Snel, H.; Schepers, J. G.; Montgomerie, B. **The MEXICO project (Model Experiments in Controlled Conditions): The database and first results of data processing and interpretation.** Journal of Physics, 2007.

Sørensen, J. N.; Myken, A. **Unsteady actuator disc model for horizontal axis wind turbine.** Journal of wind engineering and industry aerodynamics, Amsterdam, v. 39, p. 139-149, 1992.

Sørensen, J. N.; Shen, W. Z. **Computation of Wind Turbine Wakes using Combined Navier-Stokes/Actuator-line Methodology.** EWEC, Nice, 1999.

Stangroom, P. **CFD modeling of wind flow over terrain.** Nottingham, 2004.

Troldborg, N. **Actuator line modeling of wind turbine wakes.** Lyngby: Technical University of Denmark, 2008.

Troldborg, N.; Sørensen, J. N.; Mikkelsen, R. **Actuator line simulation of wake of wind turbine operating in turbulent inflow.** Journal of Physics, 2007.

Vermeer, L. J.; Sørensen, J. N.; Crespo, A. **Wind Turbine Wake Aerodynamics.** Progress in Aerospace Sciences, v. 39, p. 467-510, 2003.

Villar Alé, J. A.; Pereira A. D. L. **Taller de energia eólica.** Guatemala. 2002.

Wenzel, G. M. **Análise numérica da esteira de turbinas eólicas de eixo horizontal: Estudo comparativo com modelos analíticos.** Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFRGS. Porto Alegre. 2010.

Werle, M. J. **A new analytical model for wind turbine wakes.** USA: Flodesign Inc., 2008.

Wessel, A.; Lange, B. **A new approach to calculate the turbulence intensity inside a wind farm.** EWEC, London, 2004.

Wilcox, D. C. **Turbulence modeling for CFD.** La Cañada: DCW Industries, 1994.

Anexo 1

A análise numérica através da solução das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds é realizada com o programa ANSYS CFX12.0 com processamento paralelo. O computador utilizado é comprado no comércio local e possui a seguinte configuração:

- Processador Intel I7 930;
- Memória RAM 12Gb DDR3;
- HD 1Tb 7200RMP;
- Placa de vídeo GeForce GTS250 1Gb.

O processador possui quatro núcleos e oferece recurso de multitarefa em 8 (oito) vias, possibilitando a paralelização da simulação pelo programa.

Com estas configurações, o tempo de processamento, dos casos transientes com velocidade prescrita na entrada do domínio, manteve-se em aproximadamente 7 (sete) dias ininterruptos, com gravações periódicas de *backup* a cada 0,5s simulados. Já as simulações com perfil de velocidades logarítmico na entrada do domínio manteve-se em aproximadamente 5 (cinco) dias ininterruptos, com *backups* feitos a cada 0,5s simulados.