

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA ESTEIRA AERODINÂMICA DE TURBINAS EÓLICAS
BASEADA EM SUMIDOURO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO

por

Marco Leonardelli Lovatto

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, julho de 2013



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA ESTEIRA AERODINÂMICA DE TURBINAS EÓLICAS
BASEADA EM SUMIDOURO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO

por

Marco Leonardelli Lovatto

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Sergio Viçosa Möller

Prof. Letícia Jenisch Rodrigues

Porto Alegre, 12 de julho de 2013.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas as pessoas que usufruem da energia elétrica, cujo controle é um dos grandes feitos da humanidade, tanto quanto o controle do fogo. Dedico também aos praticantes de engenharia que fazem seu trabalho com paixão, com o verdadeiro propósito de desenvolvimento tecnológico para a humanidade e em nome do conforto e segurança das outras pessoas, atendendo às necessidades de hoje sem comprometer às de amanhã. Finalmente, dedico especialmente à comunidade de energia eólica, para que esta pesquisa seja base de desenvolvimentos dos quais todos possamos usufruir.

AGRADECIMENTOS

Muito obrigado à minha família, especialmente aos meus pais Ivana Leonardelli e João Batista de Castro Lovatto, pela liberdade oferecida em fazer aquilo que eu acredito.

Muito obrigado também aos professores e colegas do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS que me ofereceram as oportunidades para que eu pudesse construir o meu próprio percurso de aprendizado, especialmente à Profa. Adriane Prisco Petry.

Agradeço a Eduardo R. S. M. Lima pela minha acolhida na Sun Microsystems em 2009, a todos os envolvidos no meu processo de intercâmbio na França em 2010-2012 e aprendizados no *Grenoble Institut National Polytechnique* (em especial a Karine Buguet), bem como na GDF SUEZ, onde adquiri um crescimento profissional determinante em aerodinâmica computacional, em especial a Mathieu Ourliac, meu tutor, e a Erwin George, pelos aprendizados dos mais diversos.

Muito obrigado a Leonardo Barboza Trindade, pela pronta acolhida como estagiário na STE Pesquisa e Desenvolvimento, onde este trabalho foi feito, bem como aos meus colegas André Carlos Contini e Dalmedson Gaúcho Rocha Freitas Filho, pelo convite em estagiar na empresa. Também, aos meus colegas José Leandro Rosales da Luz, Rodrigo Dorado e Ernesto Nadalon, que compuseram finalmente o ambiente de produção e aprendizado de mão dupla na STE. Agradeço especialmente, também, a Gustavo Fleck, que nos ofereceu prontamente a geometria virtual do aerogerador utilizado no presente estudo.

Claro, agradeço a todos os meus amigos e àqueles que participaram do meu processo de graduação, pela paciência, que me permitiu chegar ao diploma de Engenheiro Mecânico.

Obrigado àqueles cidadãos do Brasil que, neste período de efervescência social, caminham sobre os princípios da não agressão em direção àquilo que acreditam.

Finalmente, muito obrigado a todos os pesquisadores que compartilham seu saber de maneira clara, organizada e de acesso irrestrito, quando lhes é dada a oportunidade. Afinal, cada pedacinho de conhecimento que temos é graças a pessoas que decidiram que a informação não ficaria escondida.

“Todos somos aprendizes, fazedores, professores”.

(Richard Bach)

LOVATTO, M. L. **Modelagem Computacional da Esteira Aerodinâmica de Turbinas Eólicas Baseada em Sumidouro de Quantidade de Movimento**. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

O presente estudo apresenta a proposta de um novo modelo para calcular a esteira aerodinâmica de turbinas eólicas de eixo horizontal com o auxílio de CFD, bem como a magnitude e a direção da velocidade de vento incidente sobre cada máquina, sem a necessidade de modificar a discretização do domínio. A nova metodologia baseia-se no modelo de disco atuador descrito por Burton *et al.*, 2001, substituindo o disco por uma região volumétrica esférica, dentro da qual um sumidouro de quantidade de movimento é distribuído, representando a energia extraída pelo aerogerador. O modelo tradicional baseia-se no conhecimento prévio da velocidade de vento incidente sobre a máquina, no que diz respeito à sua magnitude e direção, enquanto o modelo desenvolvido é capaz de determinar tanto a magnitude quanto a direção da velocidade incidente por meio de um cálculo iterativo simples interno a cada iteração do modelo fluidodinâmico. Os resultados obtidos são muito satisfatórios e promissores para o cálculo de parques eólicos, pois se podem alterar as direções do vento global sem modificar a discretização do domínio. Esta característica é especialmente adequada para aplicação em parques eólicos sobre terrenos acidentados onde, para uma mesma magnitude e direção de vento global, o vento local pode tomar direções e velocidades variadas. As aplicações estudadas neste trabalho, no entanto, apresentam resultados e fatores de correção fortemente dependentes do software utilizado e, especialmente, da resolução da malha empregada na discretização do domínio.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Eólica, CFD, Disco Atuador, Quantidade de Movimento.

LOVATTO, M. L. **Computational Modeling of Wind Turbine Wakes Based on Momentum Sink**. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

This study presents the proposal of a new model to calculate the aerodynamic wake of horizontal axis wind turbines with the help of CFD, as well as the magnitude and direction of the wind speed over each machine, without the need to modify the domain discretization. The new model is based on the actuator disc model described by Burton *et al.*, 2001, replacing the disc by a spherical volumetric region where a momentum sink is distributed, representing the energy extracted by the turbine. The traditional model is based on prior knowledge of the wind speed over the machine with respect to its magnitude and direction, while the developed model is able to determine both the magnitude and the direction of the incident wind speed by a simple iterative procedure at each iteration of the fluid-dynamic model. The results are very satisfactory and promising for the calculation of wind farms, as the global wind directions may be changed without changing the domain discretization. This feature is especially suitable for application in wind farms over complex terrain, where one magnitude and direction of the global wind may lead to a wide range of local magnitudes and directions. Applications studied in this work, however, present results and correction factors heavily dependent on the software used, and especially on the mesh resolution used in the domain discretization.

KEYWORDS: Wind Energy, CFD, Actuator Disc, Momentum.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
5. MODELAGEM	5
5.1. Limitações do modelo tradicional de disco atuador	5
5.2. O modelo de esfera atuadora	5
6. CASOS ESTUDADOS	7
6.1. Etapa 1 – Cálculo do rotor completo	7
6.1.1. Descrição do problema	7
6.1.2. Resultados	8
6.2. Etapa 2 – Empuxo imposto	9
6.3. Etapa 3 – Empuxo livre e U_{∞} fixo	12
6.4. Etapa 4 - U_{∞} livre	12
6.5. Etapa 5 – Modelo final e resultados para diferentes velocidades	13
6.6. Etapa 6 – Modificação da direção do vento sobre esferas adjacentes	14
7. CONCLUSÃO	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
Anexo I	16
Anexo II	16
Anexo III	16
Anexo IV	17
Anexo V	17
Anexo VI	18
Anexo VII	19
Anexo VIII	19
Apêndice I	19
Apêndice II	20
Apêndice III	20

1. INTRODUÇÃO

O cálculo do potencial de produção energética previsto para um parque eólico em fase de projeto envolve a modelagem da esteira aerodinâmica dos aerogeradores, em outras palavras, da redução de energia cinética do vento após este atravessar o plano de rotação. Essa esteira, chamada pela comunidade de energia eólica de *sombra*, pode estar incidindo sobre máquinas adjacentes e, portanto, afetando sua produção de energia elétrica.

O foco da presente pesquisa são as turbinas eólicas de eixo horizontal (a exemplo da Fig. 4.1a). Em projetos de pesquisa, costuma-se usar Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para calcular a geometria completa do rotor em rotação e obter a esteira. Contudo, esta abordagem tem um custo computacional muito elevado, conduzindo à necessidade de modelar a esteira sem calcular o rotor. Para isto, existem modelos analíticos ou semi-analíticos, baseados em dados empíricos, muito empregados em programas comerciais de projeto de parques eólicos. Entretanto, tais modelos têm limitações, principalmente quanto ao conhecimento da magnitude da velocidade de vento incidente sobre cada máquina. Também, no caso dos modelos hoje utilizados em conjunto com CFD, a malha utilizada na discretização do domínio precisa ser modificada para lidar com as diferentes direções do vento incidente e, logo, da esteira.

2. OBJETIVO

Para contornar essas limitações, é proposto um novo modelo de esteira fundamentado no modelo de disco atuador descrito por Burton *et al.*, 2001, sendo tal disco uma representação numérica do aerogerador por meio de uma superfície ou volume virtual que tem a função de extrair energia do escoamento.

O novo modelo consiste não mais na utilização de um disco atuador, mas sim de uma *esfera* atuadora. Essa abordagem tem como objetivo sua utilização na simulação numérica de parques eólicos *sem modificar a discretização do domínio*, considerando:

- A necessidade de realizar testes numéricos com ventos vindos de diversas direções.
- A necessidade de se fazer cálculos sobre terrenos complexos onde, para uma mesma magnitude e direção de vento global, o vento local pode tomar direções e velocidades variadas.
- A influência direta da esteira de uma máquina sobre outra máquina.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudos recentes em aerodinâmica de turbinas eólicas têm mostrado grande interesse na reprodução por CFD [Sezer-Uzol e Long, 2006; Ribeiro, 2012; Fleck, 2012] de resultados obtidos experimentalmente [Hand *et al.*, 2001], aproveitando-se do considerável aumento do poder computacional na última década. Outro foco, porém, tem sido a comparação de resultados de esteira obtidos por modelos analíticos e semi-analíticos existentes com os obtidos pela simulação de um rotor completo por CFD, a exemplo de Wenzel, 2010.

Já a aplicação direta de um modelo de esteira trabalhando em conjunto com CFD para o cálculo de um parque eólico, utilizando o modelo de disco atuador descrito por Burton *et al.*, 2001, foi aplicado por Calaf *et al.*, 2010 e Norris *et al.*, 2010. Entretanto, a abordagem utilizada por esses autores consiste na fixação de um parâmetro que, na realidade, não é constante, conforme descrito na Seção 5.1.

Todas as referências citadas utilizam vento incidente de magnitude e direção constantes, enquanto que o presente trabalho desenvolve-se com o propósito de se chegar a um modelo capaz de calcular corretamente todas as variáveis envolvidas na modelagem, incluindo a magnitude e direção da velocidade de vento incidente sobre cada máquina.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um aerogerador é uma turbina que extrai energia cinética do vento para transformar em energia elétrica, de forma que a velocidade à jusante do aparato é menor que à montante [Burton *et al.*, 2001]. Como a massa se conserva e não se comprime, o resultado é um tubo de corrente de maior diâmetro à jusante, conforme mostra a Fig. 4.1a. Vale lembrar que um tubo de corrente é uma fronteira imaginária do escoamento através da qual não há fluxo de massa, e dentro da qual a vazão mássica é constante. A esteira aerodinâmica, ou sombra aerodinâmica, é a região interna ao tubo de corrente e à jusante do rotor. A zona externa ao tubo é dita região de *corrente livre*.

A Fig. 4.1b apresenta, de forma genérica e qualitativa, o comportamento da pressão e da velocidade de vento através do plano de rotação das pás. A energia mecânica do ar disponível numa unidade de volume pode ser definida¹ pela soma da pressão estática (termodinâmica) com a pressão dinâmica, e sua taxa em relação ao tempo é chamada de *potência aerodinâmica*. A diferença entre a potência aerodinâmica disponível à jusante da turbina e a existente à montante é a potência extraída pela máquina.

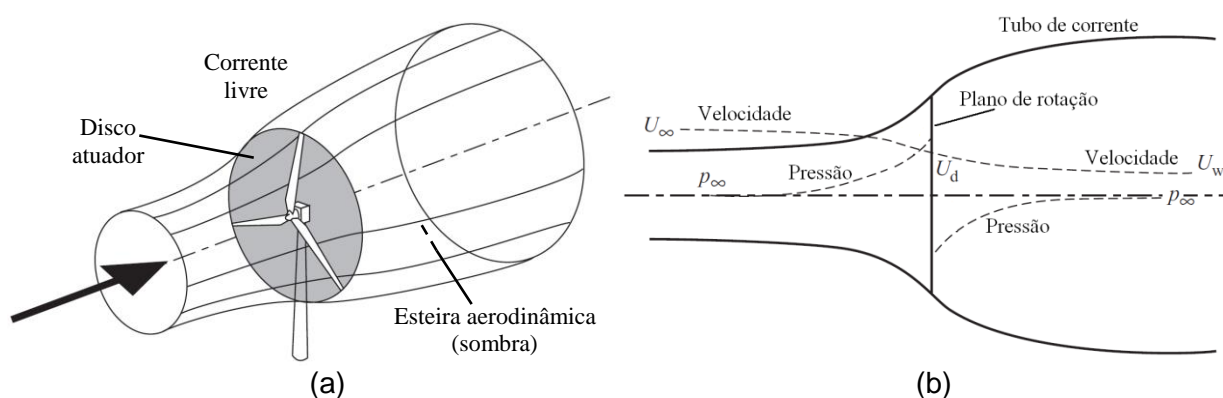


Figura 4.1 – (a) Tubo de corrente representativo do escoamento através de uma turbina eólica de eixo horizontal e (b) variação da pressão e da velocidade [adaptados de Burton *et al.*, 2001].

Disco atuador é a superfície ou o volume virtual representativos do plano de rotação das pás e que tem como função *extrair energia do vento*. O propósito do uso da teoria do disco atuador em simulações numéricas de parques eólicos é modelar a esteira gerada pelo aerogerador para um vento incidente de magnitude U_∞ e direção conhecida, sem a necessidade de modelar o escoamento sobre a geometria completa do rotor de cada turbina eólica. Essa esteira, por sua vez, irá influenciar na velocidade de vento incidente sobre máquinas adjacentes.

Além das forças atuantes no plano de rotação da turbina – e que contribuem para o torque –, o vento também gera uma força sobre a máquina na direção perpendicular a esse plano, chamada pela comunidade de energia eólica de força de *empuxo*. Por reação, a turbina gera a mesma força sobre o ar, no sentido contrário ao do vento incidente, promovendo uma redução da velocidade de corrente livre U_∞ , ou uma redução da energia cinética. Como a energia mecânica se conserva antes do disco, isso ocorre juntamente com um aumento da pressão nessa região.

A energia extraída do vento pelo rotor, e convertida em trabalho de eixo, é energia termodinâmica. Essa redução da energia do vento se manifesta através de uma rápida queda de pressão, sabendo-se que a pressão de um fluido é a sua energia termodinâmica² por

¹ Considerando as hipóteses de escoamento permanente, invíscido, isotérmico, isentrópico e à massa específica constante e uniforme, e também desprezando a energia potencial.

² Considerando as hipóteses de escoamento isotérmico e isentrópico.

unidade de volume. O ar, que ao atravessar o rotor já tinha uma velocidade reduzida (U_d), agora tem também uma pressão reduzida.

A pressão do ar na esteira tende a aumentar novamente para equilíbrio com a pressão atmosférica (p_∞). Como a energia mecânica do ar volta a se conservar nessa região, o aumento de pressão ocorre em detrimento de uma diminuição adicional da energia cinética e, portanto, de velocidade do vento.

Não havendo turbulência e nem viscosidade (hipótese teórica ideal da Fig. 4.1b) a velocidade do vento na esteira manter-se-ia constante e igual a U_w logo após o equilíbrio de pressão. Entretanto, a hipótese de escoamento invíscido da Fig. 4.1b não é mais válida na região da esteira. Como mostrado na Fig. 4.2, a viscosidade e a turbulência geram uma camada de cisalhamento, transferindo quantidade de movimento da região de corrente livre para dentro da esteira. A consequência é uma recuperação gradual da velocidade média do vento na esteira e, logo, da energia cinética.

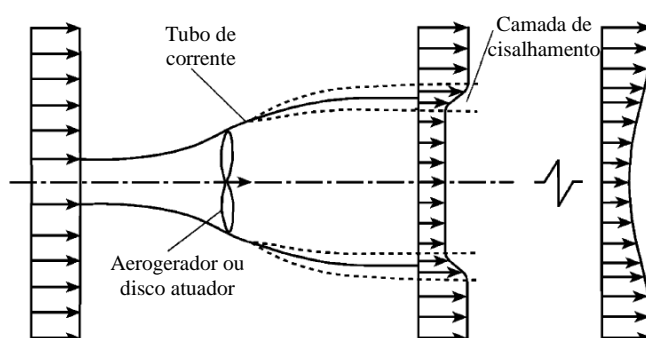


Figura 4.2 – Representação esquemática da recuperação de velocidade na esteira devida à viscosidade e turbulência [adaptado de Gómez-Elvira *et al.*, 2005].

A extração de potência aerodinâmica do ar pelo disco atuador passa pelo conhecimento do empuxo, e pode ocorrer por meio da imposição de um salto de pressão através de uma superfície ou por meio de um sumidouro de quantidade de movimento dentro de uma região volumétrica. A escolha de um ou de outro é dependente das capacidades de modelagem de fenômenos oferecidas pelo software utilizado.

O desafio é descobrir o valor do empuxo para cada velocidade de vento incidente U_∞ . O modelo do disco atuador atende a este desafio e o raciocínio é descrito abaixo, adaptado de Burton *et al.*, 2001.

A potência elétrica (P_{ele}) pode ser dada pela Eq. 4.1:

$$P_{ele} = \eta P_{ext} \quad (4.1)$$

onde P_{ext} é a potência extraída e η é a eficiência da máquina, que depende do modelo de aerogerador, das condições de vento, torque e rotação.

A potência extraída pode ser dada pela Eq. 4.2:

$$P_{ext} = F U_d \quad (4.2)$$

onde U_d é a velocidade do vento que atravessa o disco e F é a força de empuxo, que pode ser calculada por:

$$F = \Delta U \dot{m} \quad (4.3a)$$

onde ΔU é a variação de velocidade do vento antes e depois do rotor e \dot{m} a vazão mássica de ar através do rotor. Ou seja,

$$F = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_d \quad (4.3b)$$

onde U_∞ é a velocidade de corrente livre do vento incidente, U_w a velocidade teórica do vento na esteira, ρ a massa específica do ar e A_d a área varrida pelo rotor.

Burton *et al.*, 2001, define U_d como

$$U_d = U_\infty(1 - a) \quad (4.4)$$

onde a é chamado de fator de indução axial. Essa equação é uma *hipótese* para o modelo, e diz que U_d é igual a U_∞ subtraída de aU_∞ , sendo a sempre menor que a unidade.

Das Eqs. 3.3b e 3.4 tem-se que:

$$F = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_\infty(1 - a) \quad (4.5)$$

Aplicando a equação de Bernoulli antes e depois do plano de rotação (nas duas regiões onde a energia se conserva), Burton *et al.*, 2001, prova que:

$$F = \frac{1}{2}\rho(U_\infty^2 - U_w^2)A_d \quad (4.6)$$

Então, igualando as Eqs. 3.5 e 3.6, chega-se a:

$$U_w = (1 - 2a)U_\infty \quad (4.7)$$

Finalmente, as Eqs. 3.5 e 3.7 fornecem a equação fundamental para a o cálculo da força de empuxo e modelagem da esteira:

$$F = 2\rho A_d U_\infty^2 a(1 - a) \quad (4.8)$$

Daí, das Eqs. 3.2, 3.4 e 3.8, temos que:

$$P_{ext} = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1 - a)^2 \quad (4.9)$$

Mesmo conhecendo-se U_∞ , o fator de indução axial (a) ainda precisa ser determinado. Isso é feito por meio da definição de coeficiente de potência utilizado por Burton *et al.*, 2001:

$$C_p = \frac{P_{ext}}{P_\infty} \quad (4.10)$$

Então, das Eqs. 3.9 e 3.10, e dado que $P_\infty = \frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A_d$, tem-se:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (4.11)$$

A Eq. 4.11 é de terceiro grau, interessando-nos apenas o intervalo $0 < a < 1$, que fornece $C_p > 0$ (vide Fig. 4.3). O valor máximo possível para C_p ocorre quando sua derivada em relação a a é nula, que ocorre para $a = 1/3$, resultando num $C_p = \frac{16}{27} = 0,593$. Tal valor de C_p é conhecido como *máximo de Betz*, e significa que, teoricamente, nenhuma turbina eólica seria capaz de extrair mais de 59,3% da potência aerodinâmica incidente disponível. De fato, nenhum aerogerador conseguiu ultrapassar esse limite até a presente data.

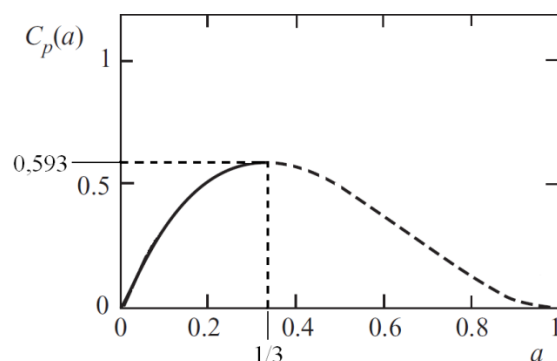


Figura 4.3 – Coeficiente de potência (C_p) em função do fator de indução axial (a). O máximo de Betz ($C_p = 0,593$) ocorre para $a = 1/3$ [adaptado de Burton *et al.*, 2001].

Ressalta-se que o propósito do modelo de disco atuador não é determinar a potência elétrica extraída pela máquina para um vento incidente conhecido, e sim determinar a *potência aerodinâmica extraída do vento* pela máquina, com o objetivo de *avaliar o comportamento da esteira*. Tal modelagem depende do cálculo de F pela Eq. 4.8, que depende do conhecimento de U_∞ e a .

5. MODELAGEM

5.1. Limitações do modelo tradicional de disco atuador

O estudo numérico de um projeto de parque eólico envolve a necessidade do cálculo de ventos vindos de diferentes direções e sentidos. Diferentes direções de U_∞ significam ângulos diferentes dos discos atuadores em seus eixos verticais. Para aplicações de CFD, a alteração do ângulo do disco significa a necessidade de modificar a malha utilizada na discretização. Isso implica uma nova malha para cada nova direção de vento, elevando os custos computacionais ou de trabalho humano.

Mesmo quando o disco e a malha estão adaptados à direção do vento, a esteira de uma máquina pode estar gerando sombra sobre outra máquina adjacente, onde a velocidade de vento incidente acaba sendo inferior àquela de corrente livre. Isso faz com que U_∞ para máquinas sob o efeito de esteira de turbinas próximas seja desconhecida.

A metodologia usualmente empregada para determinação de U_∞ (a ser utilizada na Eq. 4.8 para o cálculo de F), como mostram Calaf *et al.*, 2010 e Norris *et al.*, 2010, tem-se restringido à obtenção de U_d como sendo a velocidade média que atravessa o disco atuador, seguida do cálculo de U_∞ pela Eq. 4.4 e usando-se um valor constante para a , normalmente igual a 0,25. Uma abordagem mais direta poderia ser o monitoramento da velocidade U_∞ por meio de um ponto localizado à montante do disco atuador.

No entanto, além do fator de indução axial a não ser constante na realidade, a utilização de um ponto de monitoramento para determinar a magnitude de U_∞ é uma abordagem que carece de precisão, especialmente para parques eólicos sobre terrenos complexos. Este ponto não garante a captura da velocidade média real que realmente incide sobre a área do rotor, principalmente quando existe influência parcial da esteira de uma máquina próxima, como mostrado na imagem III da Fig. 6.7a.

5.2. O modelo de esfera atuadora

Com o propósito de contornar essas limitações do modelo de disco atuador tradicional, é proposta uma nova abordagem, através de uma *esfera atuadora* representante da máquina, inspirada nas discussões dentro da STE Pesquisa e Desenvolvimento, sob

financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento de Pesquisa (CNPq) no contexto dos editais de inovação RHAE (Recursos Humanos para Áreas Estratégicas).

O modelo proposto tem como objetivos:

- Substituir o disco por uma esfera, eliminando a necessidade de modificar o ângulo de um disco para cada direção de vento incidente e a consequente modificação da malha.
- Calcular corretamente os valores de U_∞ e a antes do cálculo de F .

A abordagem apresentada, com uso de CFD, envolve o acoplamento de dois grupos principais e independentes de equações, ou dois modelos trabalhando em conjunto:

- Modelo fluidodinâmico.
- Modelo de esfera atuadora.

O modelo fluidodinâmico envolve a análise do escoamento turbulento através das equações de conservação de massa, princípio da quantidade de movimento com médias de Reynolds (RANS) e modelo de turbulência $k-\omega$ SST. Estas equações são resolvidas pelos softwares de CFD utilizados, ANSYS CFX 13.0 e ANSYS Fluent 13.0, e não foram alteradas ao longo do trabalho, sendo descritas no Apêndice I.

O ANSYS CFX 13.0, software onde o modelo de esfera atuadora foi testado, é capaz de obter a magnitude da velocidade média dentro de um volume esférico de mesmo diâmetro do rotor. Essa velocidade média, comprovadamente igual à U_d , tem componentes u , v e w relativas às coordenadas espaciais, que também podem ser determinadas. O sumidouro de quantidade de movimento, distribuído no volume esférico, pode ser decomposto em componentes espaciais que respeitam a direção do vento obtida pelas componentes de U_d . Isso torna o modelo de esfera atuadora capaz de lidar com ventos vindos de qualquer direção, sem a necessidade de mudar o ângulo de um disco e modificar a malha para cada direção de vento incidente.

Os dados de entrada fundamentais para a utilização do modelo de esfera atuadora são a *curva de potência* do aerogerador (P_{ele} em função de U_∞), a eficiência η e a área ou o diâmetro do rotor. Os fabricantes de turbinas eólicas seriam capazes de fornecer todos os dados, embora a eficiência η não seja uma informação atualmente disponível no mercado. Portanto, num primeiro momento, η deveria ser estimado de maneira arbitrária. Assim, na presente pesquisa, como dado de entrada escolheu-se trabalhar diretamente com a curva de *coeficiente de potência*, $C_p = f(U_\infty)$, mostrada na Fig. 6.6b. A área ou o diâmetro do rotor servem de base para o tamanho da esfera que, neste trabalho, terá um diâmetro ligeiramente maior que o do rotor e uma seção máxima de área A_d .

O modelo de esfera atuadora começa com a leitura de U_d como sendo a magnitude da velocidade média dentro da esfera, segundo a Eq. 5.1. No início do cálculo, U_d será igual à velocidade com a qual o domínio fluido foi inicializado, e seu valor é atribuído a U_∞ como chute inicial. Em seguida, segue-se o cálculo iterativo descrito a seguir.

$$U_d = \frac{\iiint_{esfera} |U| dV}{V_{esfera}} \quad (5.1)$$

1. Determina-se C_p a partir de U_∞ por meio de uma tabela representativa da curva de coeficiente de potência, $C_p = f(U_\infty)$.
2. Obtém-se a a partir de C_p por meio de uma tabela construída com a Eq. 4.11.
3. Atualiza-se U_∞ pela Eq. 4.4.

Para cada iteração espacial das equações do modelo fluidodinâmico, os três passos acima se repetem num processo iterativo interno até a convergência de C_p , a e U_∞ . Testes apresentados no Anexo I mostram convergência de C_p , a e U_∞ em 10^{-4} após seis iterações. Finalmente, calcula-se a magnitude do empuxo pela Eq. 4.8, que é a taxa de variação da quantidade de movimento extraída pelo sumidouro [ANSYS Inc., 2010] distribuído dentro da esfera.

Essa magnitude do empuxo precisa ser dividida em componentes espaciais correspondentes às componentes de U_d . Com essa finalidade, para cada uma das direções x , y e z do espaço, o empuxo é multiplicado pelos fatores multiplicadores \bar{u}^* , \bar{v}^* e \bar{w}^* , das Eqs. 5.2, abaixo. Tais fatores são as componentes espaciais da velocidade média na esfera (\bar{u} , \bar{v} e \bar{w}) adimensionalizadas pela magnitude da velocidade média na esfera, igual a U_d .

$$\bar{u}^* = \frac{\bar{u}}{U_d} \quad (5.2a)$$

$$\bar{v}^* = \frac{\bar{v}}{U_d} \quad (5.2b)$$

$$\bar{w}^* = \frac{\bar{w}}{U_d} \quad (5.2c)$$

O sumidouro de quantidade de movimento reflete-se no cálculo com um aumento da pressão à montante e diminuição à jusante, o que leva a uma redução da velocidade U_d , que atravessa a esfera. Na iteração espacial seguinte do modelo fluidodinâmico, o valor de U_d será atualizado. O novo U_d de cada iteração do modelo fluidodinâmico é utilizado no passo 3 das iterações do modelo de esfera atuadora. Segue-se, então, um novo processo iterativo da esfera atuadora antes da próxima iteração espacial do modelo fluidodinâmico.

Portanto, a convergência final dos cálculos nessa metodologia ocorre por meio da convergência do modelo de esfera atuadora *para cada iteração* do modelo fluidodinâmico, junto com a convergência posterior do modelo fluidodinâmico.

6. CASOS ESTUDADOS

O estudo do modelo de esfera atuadora foi realizado em seis etapas. Na primeira, a geometria virtual completa de um aerogerador em rotação foi simulada com a finalidade de se obter a força de empuxo. Esta força foi utilizada como referência nas etapas seguintes. Testando-se o modelo por partes, foi possível rastrear os possíveis pontos fracos com maior facilidade e aplicar as correções necessárias.

6.1. Etapa 1 – Cálculo do rotor completo

6.1.1. Descrição do problema

Num primeiro momento, foi calculado, por CFD, um rotor em rotação sob vento incidente, com a finalidade de determinar a força de empuxo (F) e o comportamento da velocidade média do vento em diversas seções da esteira. O propósito é usar o valor calculado da força de empuxo como valor de entrada na Etapa 2, o primeiro teste do modelo de esfera atuadora, e analisar se o comportamento da esteira é semelhante.

Assim, foi reproduzido, por CFD, um dos testes reais [Hand *et al.*, 2001] efetuados em túnel de vento pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) sobre uma turbina eólica de eixo horizontal com rotor de 10m de diâmetro, composto por um cubo (parte central) e duas pás com ângulo de passo de 0° . O aparelho é dotado de um motor-gerador, que mantém a velocidade de rotação constante. Para o cálculo CFD, as condições de teste foram com vento incidente (U_∞) de 7m/s e rotação de 72rpm. Como o objeto de estudo é a esteira aerodinâmica provocada exclusivamente pelo rotor, as outras estruturas presentes na máquina real, como a torre, não foram reproduzidas na geometria virtual.

A Fig. 6.1 mostra as geometrias virtuais do rotor e do túnel. A geometria do rotor foi modelada por Fleck, 2012, a partir dos dados de Hand *et al.*, 2001. O rotor está dentro de um volume esférico (Fig. 6.1a) onde são utilizados modelos de fluido rotativo [ANSYS Inc.,

2009]. Esse volume será chamado de *domínio rotativo*, o qual está dentro de um *domínio estático* (Fig. 6.1b) por onde escoo o vento de corrente livre a 7m/s.

A superfície esférica é uma interface virtual entre o domínio estático e o domínio rotativo, e não deve interferir no escoamento, pois não é uma parede real. Entretanto, para o cálculo utilizando o ANSYS CFX, houve problemas de continuidade da solução nessa interface (Anexo II). Por essa razão, este caso foi recalculado no ANSYS Fluent.

É importante salientar que tal problema não foi motivo suficiente para fazer uma migração completa de ferramenta, do CFX para o Fluent, para as etapas seguintes. Embora o rotor completo tenha sido calculado no Fluent, os testes do modelo de esfera atuadora foram feitos no CFX. O motivo é que o Fluent exige um código escrito em linguagem C para programar o modelo de esfera atuadora. Esse código significaria competências e complexidade adicionais para um primeiro teste; enquanto isso, o CFX permite a inserção de expressões de forma interativa, gráfica, intuitiva e simples. Embora a troca de software de uma etapa para a outra não seja a abordagem científica correta, ela foi considerada inevitável para os primeiros passos de compreensão do novo modelo proposto.

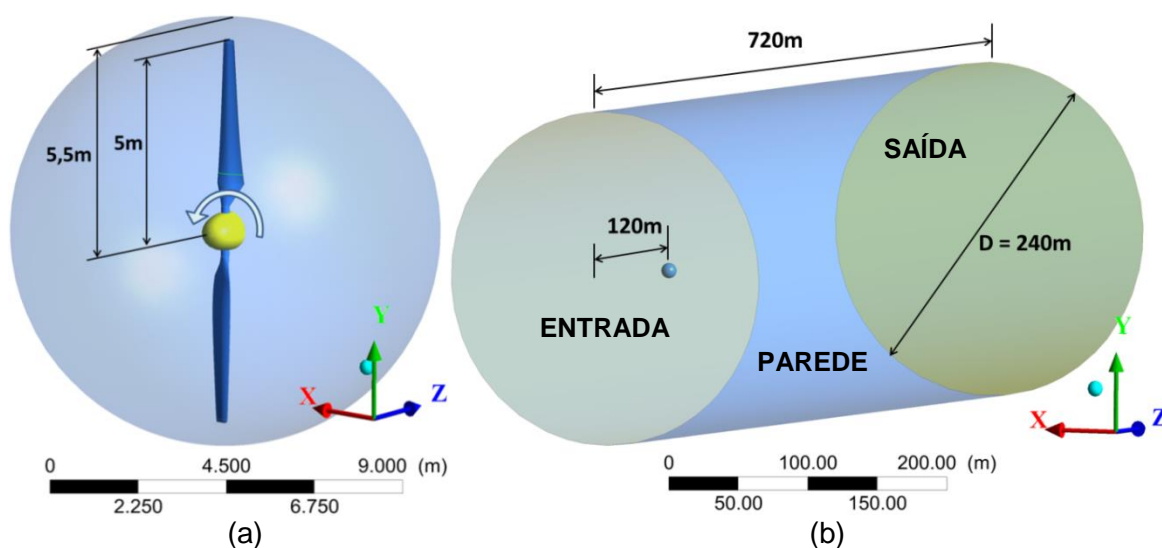


Figura 6.1 – (a) Rotor e seu sentido de rotação, dentro de um domínio rotativo; e (b) domínio estático por onde escoo o vento de corrente livre.

A malha foi criada no software ANSYS ICEM e é mostrada no Anexo III. Somam-se 6,8 milhões de volumes tetraédricos – e prismáticos na região de camada-limite –, onde o menor índice de qualidade é 0,16, e menos de 0,002% destes elementos têm qualidade inferior a 0,25. Os parâmetros de simulação numérica utilizados no ANSYS Fluent são apresentados no Anexo IV.

6.1.2. Resultados

Para o cálculo da camada limite, o modelo de turbulência utilizado, $k-\omega$ SST, exige um y^+ resultante³ próximo de 1 e inferior a 4. A Fig. 6.2 mostra que o campo de y^+ ficou dentro do intervalo esperado. Na mesma figura, a linha vertical representa uma seção de pá a 30% do raio do rotor, de onde foi obtida a curva de coeficiente de pressão⁴ (C_{pr}), apresentada na Fig. 6.3. A curva azul representa os resultados obtidos por este estudo em comparação com

³ Informações sobre y^+ no Apêndice II.

⁴ O sub-índice pr substitui o tradicional p com a finalidade de não confundir com o coeficiente de potência, C_p . A maneira pela qual C_{pr} foi calculado é mostrada no Apêndice III.

os dados experimentais de Hand *et al.*, 2001, e com os resultados numéricos de outros autores [Sezer-Uzol e Long, 2006; Ribeiro, 2012].

O empuxo (F) é o somatório das forças – sobre as pás e o cubo – na direção z positivo, resultando 1255N. Dados adicionais, como a força e torque em cada pá e em outras direções, são apresentados no Anexo V.

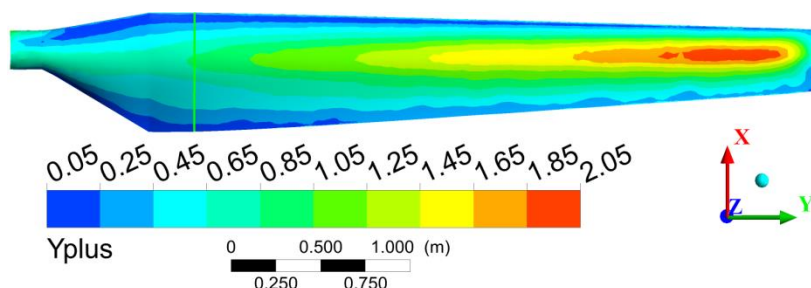


Figura 6.2 – Campo de y^+ sobre o intradorso da pá superior.

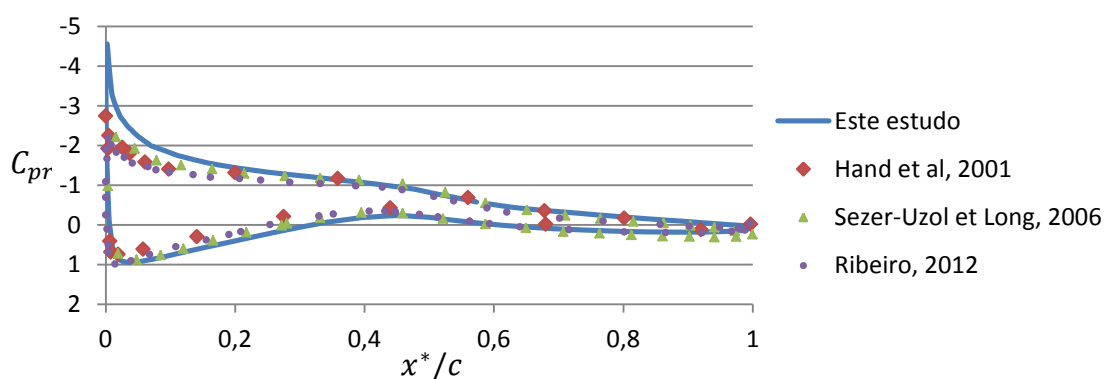


Figura 6.3 – Coeficiente de pressão (C_{pr}) em função da distância a partir do bordo de ataque da pá (x^*) adimensionalizada pela corda (c) numa seção a 30% do raio do rotor.

Por mais afastados das condições reais que os resultados pudessem estar, tal discrepância não influenciaria no propósito do estudo, afinal o objetivo é analisar a esteira obtida com o empuxo obtido, não com o empuxo real. Na próxima etapa, o empuxo calculado será imposto como taxa de variação da quantidade de movimento dentro do domínio esférico sem o rotor, e a mesma esteira deverá ser reproduzida. Assim, o rumo inicial da pesquisa não é a comparação com dados experimentais ou de cálculos feitos por outros autores, e sim a comparação entre duas esteiras aerodinâmicas obtidas por CFD: aquela resultante da presença do rotor em rotação e aquela resultante de um sumidouro de quantidade de movimento *equivalente* ao empuxo sobre o rotor em rotação.

A esteira resultante é apresentada na curva verde contínua da Fig. 6.5, juntamente com os resultados de esteira obtidos pela imposição do empuxo de 1255N por meio de um sumidouro de quantidade de movimento no volume da esfera, para malhas de densidades diferentes.

6.2. Etapa 2 – Empuxo imposto

Nesta etapa, o rotor foi removido do cálculo. Migrando para o ANSYS CFX pelos motivos expostos na seção anterior, agora o empuxo F , igual a 1255N, foi imposto como taxa de variação (negativa) da quantidade de movimento dentro do volume esférico vazio. Com exceção da ausência do rotor, a geometria foi mantida inalterada. As condições físicas também não mudaram, embora os parâmetros que representam tais condições físicas, bem como os

parâmetros numéricos, tenham mudado devido à mudança de software, e estão apresentados no Anexo VI.

Devido à retirada do rotor, a malha acaba sendo simplificada na região da esfera, reduzindo-se drasticamente o número de nós de cálculo.

O mesmo caso foi calculado em seis malhas de densidades diferentes na região da esfera e da esteira, com a finalidade de escolher a densidade que mais fielmente reproduz a esteira resultante do rotor completo. O tamanho inicial dos volumes foi de 3,7m, seguindo-se uma razão de refinamento de 1,3 até a malha mais refinada, com tamanho dos volumes de 1,0m, sendo este igual ao refinamento da esteira no caso do rotor completo.

Tanto para o rotor completo quanto para as etapas de teste do modelo de esfera atuadora, a esteira é calculada sobre o eixo z (eixo paralelo ao vento e que passa pelo centro da esfera). Como ilustrado na Fig. 6.4, foram definidas diversas seções circulares de mesmo diâmetro da esfera, e o valor médio de w (componente da velocidade paralela ao eixo z) foi calculado em cada uma dessas seções. Chamar-se-á tal velocidade de \bar{w}_s (velocidade w média na seção). A esteira (valor de \bar{w}_s ao longo do eixo z) resultante de cada malha é mostrada na Fig. 6.5, juntamente com a esteira do rotor completo obtida na Etapa 1. Os perfis de pressão, obtidos da mesma maneira, são apresentados no Anexo VII.

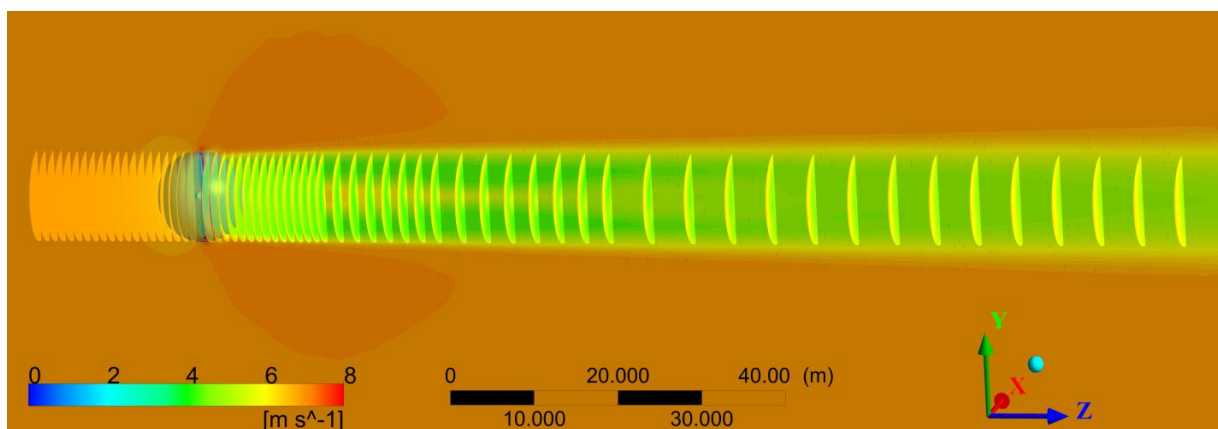


Figura 6.4 – Campos de w do rotor completo sobre diversas seções circulares normais ao eixo z , de mesmo diâmetro da esfera, para $-20m < z < 120m$, bem como sobre um plano YZ , que corta as seções.

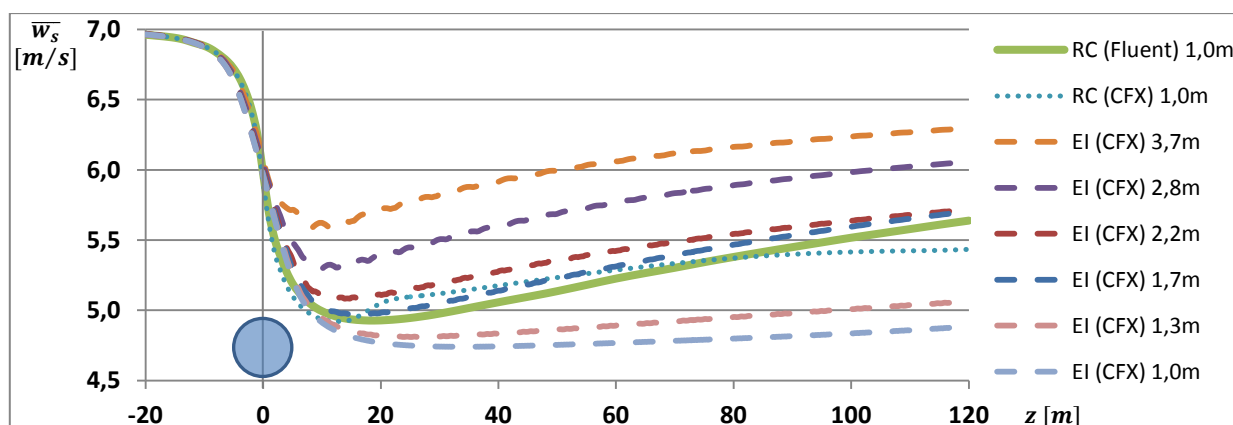


Figura 6.5 – Perfis de esteira obtidos pelo cálculo do rotor completo no Fluent (RC, linha verde contínua) e pelo empuxo imposto no CFX (EI, linhas tracejadas) sobre malhas com volumes de tamanhos diferentes. O perfil de esteira do rotor completo obtido pelo CFX é mostrado pela linha pontilhada apenas a título de informação. O círculo azul representa a dimensão e posição da esfera sobre o eixo z .

Os resultados apresentados na Fig. 6.5 mostram que não há independência de malha com o refinamento na região da esteira. Inclusive, a esteira obtida por empuxo imposto na malha com volumes de 1,0m é visivelmente superestimada (maior queda de velocidade) em relação à esteira obtida pelo rotor completo, cujo tamanho dos volumes, nessa região, é o mesmo. Malhas grosseiras subestimam a esteira (menor queda de velocidade) devido ao excesso de difusão numérica.

Para dar continuidade aos testes do modelo de esfera atuadora propriamente dito, no que diz respeito à capacidade de cálculo da velocidade de vento incidente, foi escolhida a malha com volumes de 1,7m na esteira, cujos resultados foram os mais próximos do rotor completo.

Uma comparação de algumas variáveis-chave entre o rotor completo e o empuxo imposto na malha escolhida é apresentada na Tabela 6.1. Os valores de U_d foram calculados de duas maneiras: pela Eq. 5.1 e pelo valor de \bar{w}_s em $z = 0m$, no plano do rotor. Observa-se que os valores de \bar{w}_s no plano do rotor estão bem próximos entre um caso e outro, e aquele do empuxo imposto é próximo ao valor obtido pela Eq. 5.1. Acredita-se que o valor de U_d do rotor completo obtido pela Eq. 5.1 é inferior ao obtido no plano do rotor devida à força centrífuga, que induz quantidade de movimento na direção radial do rotor. Por essa razão, para o rotor completo, todas as variáveis para a direita da tabela, a partir de C_p , foram calculadas considerando o valor de $U_d = \bar{w}_s(z = 0m)$. Para o empuxo imposto, considerou-se o valor de U_d obtido pela Eq. 5.1, tal qual é feito no modelo proposto. U_{10D} é o valor de \bar{w}_s obtido em $z = 110m$, equivalente a dez diâmetros da esfera. Observa-se também uma grande diferença entre o valor do fator de indução axial a obtido pela Eq. 4.4 e aquele obtido pela Eq. 4.11. Qual dos dois valores deve ser utilizado para o cálculo de F – ou se uma correção em função de ambos deve ser utilizada – é uma pergunta que precisa ser respondida. Tal questão é analisada na Etapa 3.

Tabela 6.1 – Resultados para algumas variáveis-chave do empuxo imposto em comparação com o rotor completo.

Dados de referência				
$U_{\infty 0}$ [m/s]	ρ [kg/m ³]	D [m]	A_d [m ²]	P_{∞} [W]
7	1,185	11	95,03	19313

Variável	F	U_d		P_{ext}		C_p	$a(C_p)$	$a(U_{\infty}, U_d)$	$U_w(U_{\infty}, a)$	U_{10D}
Unidade	[N]	[m/s]		[W]		1	1	1	[m/s]	[m/s]
Obtenção	CFD e imposto	Eq. 5.1	\bar{w}_s ($z = 0m$)	Eq. 4.2 c/ U_d (Eq. 5.1)	Eq. 4.2 c/ \bar{w}_s	Eq. 4.10	Eq. 4.11	Eq. 4.4	Eq. 4.7	CFD
RC (Fluent)	-1255 (CFD)	5,881	5,971	-7381	-7494	0,38215	0,1274	0,1470	4,943	5,579
EI (1,7m)	-1255 (imposto)	6,001	5,981	-7532	-7506	0,38996	0,1283	0,1427	5,002	5,652

Destaca-se novamente que os dados de entrada fundamentais do modelo de esfera atuadora são $P_{ele} = f(U_{\infty})$ e a eficiência η na máquina, além da dimensão da mesma. Com tais dados, pelas Eqs. 3.1 e 3.10 pode-se obter a curva $C_p = f(U_{\infty})$. Já que η é um dado arbitrário neste estudo, escolheu-se trabalhar diretamente com a curva $C_p = f(U_{\infty})$ como dado de entrada. Considerando que U_{∞} ainda é conhecido, igual a 7 m/s, o valor de C_p resultante para o empuxo imposto ($C_p = 0,38996$, na Tabela 6.1) foi utilizado para calibrar uma curva $C_p = f(U_{\infty})$ arbitrária, apresentada na Fig. 6.6b.

6.3. Etapa 3 – Empuxo livre e U_∞ fixo

A questão levantada na análise dos resultados da etapa anterior, sobre qual fator de indução axial oferece o empuxo esperado – se o obtido pela Eq. 4.4 ou pela Eq. 4.11 – precisa ser respondida. Isso foi feito fixando-se em 7m/s o valor de U_∞ do modelo de esfera atuadora, ao invés de deixá-lo calcular, para que apenas o valor de a tivesse influência sobre F obtido pela Eq. 4.8.

O fator de indução axial obtido pela Eq. 4.4 será chamado de a_1 , e aquele obtido pela Eq. 4.11, de a_2 . $F_0 = 1255N$ é o empuxo de referência, considerado no seu valor absoluto. $a_0 = 0,1308$ é o fator de indução axial de referência, aquele que fornece $F_0 = 1255N$ através da Eq. 4.8, considerando os dados de referência da Tabela 6.1.

Primeiramente, foram calculados dois casos por CFD: o Caso 1, com sumidouro de quantidade de movimento utilizando $F(a_1)$; e o Caso 2, utilizando $F(a_2)$. Os resultados para a_1 , a_2 , F e o erro relativo de F são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Influência da escolha de a no cálculo do empuxo, com U_∞ fixo.

	a_1	a_2	a_0	U_∞ [m/s]	U_{∞_0} [m/s]	F [N]	F_0 [N]	Erro relativo (F)
Caso 1	0,4567	0,1283	0,1308	7,00	7,00	$F(a_1) = 2738$	1255	118,17%
Caso 2	0,1399	0,1283	0,1308	7,00	7,00	$F(a_2) = 1234$	1255	-1,67%

Os resultados são conclusivos no que diz respeito à inadequação de a_1 para se calcular o empuxo, afinal o erro resultante é grande. Ainda assim, há um pequeno erro quando o empuxo é calculado por a_2 .

6.4. Etapa 4 - U_∞ livre

Para determinar a influência de U_∞ não fixado sobre esse erro, calculou-se o Caso 3, mostrado na Tabela 6.3. Verificando-se que o erro aumentou, o Caso 4 foi calculado também com U_∞ livre, mas com o objetivo de se determinar fatores de correção que resultassem nos valores de a e U_∞ esperados e, portanto, no valor de F esperado. Para tanto, a cada iteração do modelo fluidodinâmico, as Eqs. 5.1 e 5.2 calculam, respectivamente, os valores corrigidos a^* e U_∞^* . As expressões entre parênteses são fatores multiplicadores que representam o erro de a e U_∞ (relativo ao valor calculado) somado à unidade. Tais fatores são chamados de a' e U_∞' e seus valores convergidos mostrados na Tabela 6.3.

$$a^* = a_2 \left(1 + \frac{a_0 - a_2}{a_2} \right) \quad (5.1)$$

$$U_\infty^* = U_\infty \left(1 + \frac{U_{\infty_0} - U_\infty}{U_\infty} \right) \quad (5.2)$$

Tabela 6.3 – Resultados para U_∞ não fixado (Caso 3) e correções calculadas para a_2 e U_∞ que fornecem os valores esperados (Caso 4).

	a_2	a'	a^*	U_∞ [m/s]	U_∞'	U_∞^* [m/s]	F [N]	Erro relativo (F)
Caso 3	0,12707	-	-	6,9336	-	-	1201	4,30%
Caso 4	0,12580	1,04000	0,13083	6,8648	1,0197	7,0000	1255	0%

Num cálculo seguinte, fixando-se a' e U_∞' ao invés de calculá-los a cada iteração do modelo fluidodinâmico, os resultados foram idênticos aos do Caso 4.

O valor final C_p^* do coeficiente de potência é, então, obtido pela curva de potência com U_∞^* como entrada, resultando também no valor esperado 0,38996. Matematicamente, $C_p^* = C_p(U_\infty^*) = 0,38996$.

Nesta etapa, o modelo de esfera atuadora foi calibrado para o caso específico de velocidade de vento incidente de 7m/s, sendo capaz de determinar tal velocidade, o empuxo e todas as outras variáveis de maneira precisa sem que o modelo soubesse previamente qual velocidade de vento incidia sobre a esfera atuadora. Tal capacidade deve ser visível também para outras velocidades de vento.

6.5. Etapa 5 – Modelo final e resultados para diferentes velocidades

O modelo de esfera atuadora final consiste naquele descrito na Seção 5.2, salvo que os valores finais de a e U_∞ , calculados pelo processo iterativo, são multiplicados pelos fatores $a' = 1,04$ e $U_\infty' = 1,0197$, respectivamente, chegando-se aos valores corrigidos a^* e U_∞^* . O C_p , por sua vez, também não tem como valor final aquele obtido pelo processo iterativo, mas utiliza-se o valor corrigido $C_p^* = C_p(U_\infty^*)$, obtido pela curva de coeficiente de potência, dado de entrada do cálculo e mostrada na Fig. 6.6b. Como os fatores de correção foram calibrados para vento incidente de 7m/s, é natural esperar que os valores finais tenham certo nível de erro para outras velocidades, mas que seja tolerável.

Com o propósito de testar o modelo de esfera atuadora para diferentes velocidades, foram impostos na entrada do domínio os valores de 2, 3, 5, 8, 13 e 21 m/s, arbitrários e pertencentes à série de Fibonacci. O erro da velocidade de vento incidente calculada, U_∞^* , relativo à velocidade imposta, U_{in} , não passa de 2%, como pode ser verificado no Anexo VIII. A Fig. 6.6a mostra a igualdade entre os valores de velocidade forçado e calculado. A curva $C_p(U_\infty)$ utilizada é apresentada na Fig. 6.6b, juntamente com os valores resultantes dos cálculos, também mostrados no Anexo VIII, com a maioria dos erros inferiores a 5%.

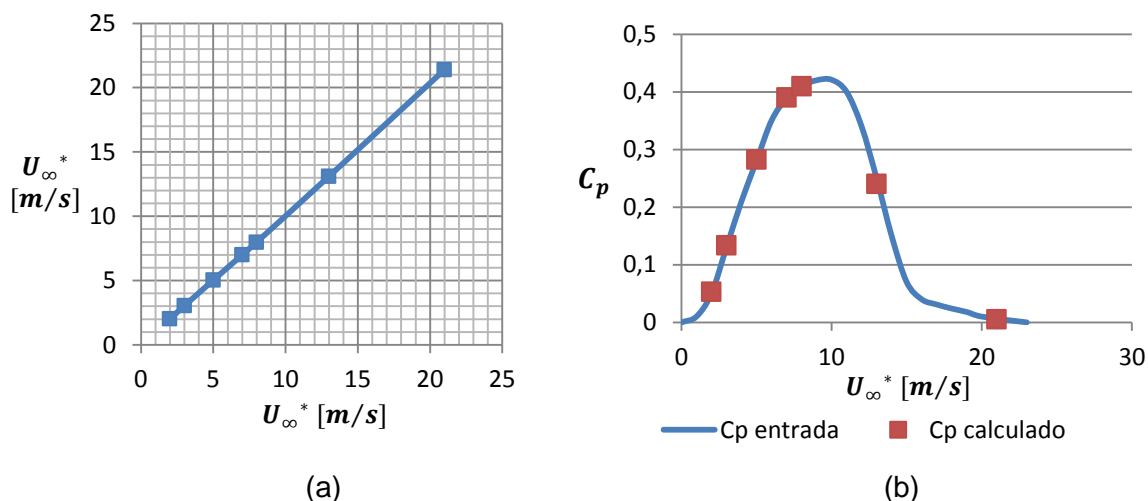


Figura 6.6 – (a) Igualdade entre os valores de velocidade forçada no domínio (U_{in}) e a velocidade incidente calculada pelo modelo (U_∞^*); e (b) a consequente sobreposição do coeficiente de potência calculado (C_p^*) sobre a curva de coeficiente de potência da máquina.

Dado que $P_\infty^* = \frac{1}{2} \rho U_\infty^{*3} A_d$ é a potência aerodinâmica disponível incidente sobre a máquina, com C_p^* pode-se calcular, pela Eq. 4.10, a potência aerodinâmica que cada máquina extraiu (P_{ext}), bem como a potência elétrica (P_{ele}) pela Eq. 4.1, caso a eficiência η seja conhecida.

6.6. Etapa 6 – Modificação da direção do vento sobre esferas adjacentes

A última etapa deste estudo foi referente à capacidade do modelo de trabalhar com mais de uma esfera no domínio de cálculo, bem como à capacidade de lidar com ventos de diferentes direções. A Fig. 6.7a ilustra bem as esteiras geradas por duas esferas espaçadas de quatro diâmetros uma da outra, sob um vento incidente de 7m/s vindo de quatro direções diferentes. Alguns resultados para cada esfera do caso IV são mostrados na Tabela 6.4. Já a Fig. 6.7b mostra o perfil de velocidade \bar{w}_s para o caso IV da Fig. 6.7a. Na Fig. 6.7b, nota-se claramente que a queda de velocidade na região da esfera à direita é menor que a da esfera à esquerda. Isso ocorre pois a potência extraída é menor, afinal a velocidade incidente é menor.

Tabela 6.4 – Resultados para a esfera da esquerda e da direita no caso IV da Fig. 6.7a.

Esfera	U_∞^* [m/s]	C_p^*	U_d [m/s]	F [N]	P_{ext} [W]
Esquerda	7,0350	0,39067	6,0269	1273	7672
Direita	5,8797	0,34158	5,1672	750	3876

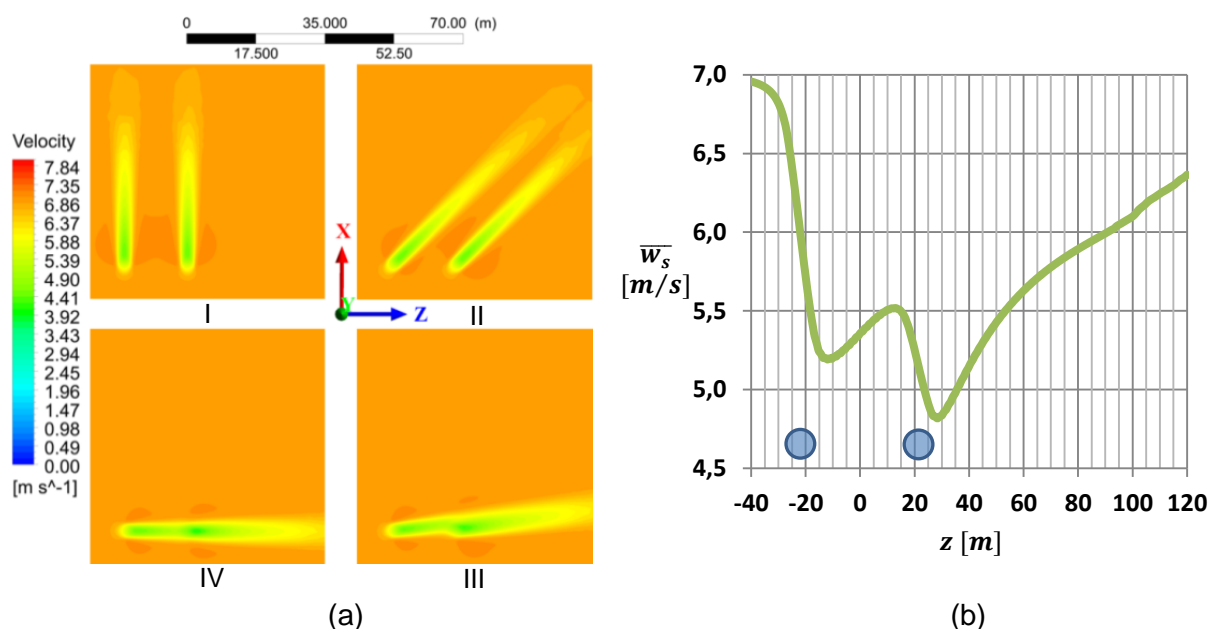


Figura 6.7 – (a) Campos de velocidade para duas esferas adjacentes com vento vindo de quatro direções diferentes e (b) perfil de velocidade \bar{w}_s para o caso IV da Fig. 6.7a. Os círculos azuis representam a dimensão e a posição das esferas sobre o eixo z .

7. CONCLUSÃO

Os objetivos propostos foram atingidos com sucesso. Como pode ser visto na Fig. 6.6, ao contrário dos trabalhos até então publicados e citados no Capítulo 3, o modelo de esfera atuadora desenvolvido é capaz de determinar a velocidade incidente sobre a máquina, bem como o coeficiente de potência resultante. Os resultados mostrados na Fig. 6.7 e na Tabela 6.4 indicam que a substituição do disco por uma esfera atuadora oferece ao modelo a capacidade de lidar com ventos vindos de qualquer direção, destacando-se que não é necessária a modificação da malha para se adaptar às diferentes direções de vento sobre cada máquina.

Os testes do modelo de esfera atuadora, apresentados neste trabalho pela primeira vez, ainda resultam em fatores de correção e esteira fortemente dependentes do software utilizado e, especialmente, da resolução de discretização do domínio (Fig. 6.5).

Suspeita-se que a maior queda de velocidade em malhas refinadas esteja relacionada à turbulência. Alguns testes foram feitos com o objetivo de chegar a uma compreensão; entretanto, os resultados não foram conclusivos. Por outro lado, tanto o problema da resolução da discretização quando dos fatores de correção podem ser foco de pesquisas futuras, objetivando-se o aprimoramento do modelo de esfera atuadora.

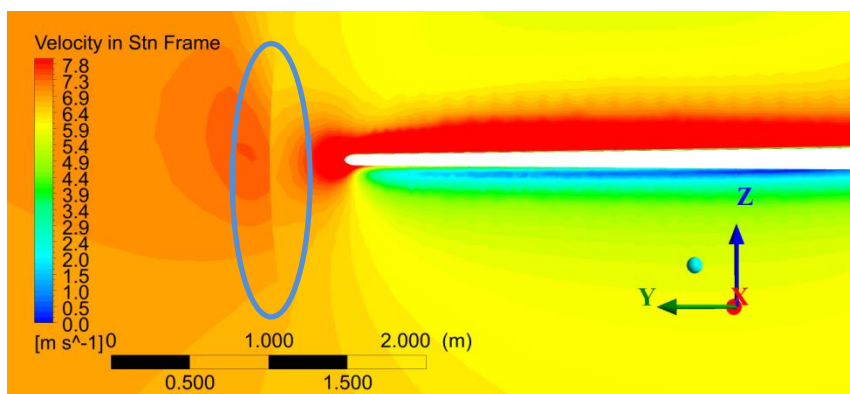
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS Inc.; **ANSYS CFX-Solver Theory Guide**, Release 13.0, 2010.
- ANSYS Inc.; **ANSYS Fluent 12.0 Theory Guide**, 2009.
- Burton, T.; Sharpe, D.; Jenkins, N.; Bossanyi, E.; **Wind Energy Handbook**, Wiley, 2001.
- Calaf, M.; Meneveau, C.; Meyers, J.; **Large Eddy Simulation Study of Fully Developed Wind-Turbine Array Boundary Layers**, Physics of Fluids 22, 015110, 2010.
- Chassaing, P.; **Mécanique des Fluides – Éléments d'un premier parcours**, Cépaduès-Éditions, 3^e edition, 2010.
- Fleck, G. D.; **Simulação de Grandes Escalas para Análise Numérica da Esteira Aerodinâmica da Turbina Eólica NREL UAE Phase VI**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- Gómez-Elvira, R.; Crespo, A.; Migoya E.; Manuel, F.; Hernández, J.; **Anisotropy of Turbulence in Wind Turbine Wakes**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 93, pp. 797 - 814, 2005.
- 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**, NREL, 2001.
- Menter, F.R.; **Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications**, AIAA-Journal, 32(8), pp. 1598 – 1605, 1994.
- NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), **Turbulence Modeling Resource**, <http://turbmodels.larc.nasa.gov/>, acessado em 17/06/2013.
- Norris, S. E.; Cater, J. E.; Stol, K. A.; Unsworth, C. P.; **Wind Turbine Wake Modelling using Large Eddy Simulation**, 17th Australian Fluid Mechanics Conference, 2010.
- Ribeiro, A. F. P.; **Otimização e Dinâmica dos Fluidos Computacional Aplicadas a Turbinas Eólicas**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- Sezer-Uzol, N.; Long, L. N.; **3-D Time-Accurate CFD Simulations of Wind Turbine Rotor Flow Fields**, AIAA-2006-0394.
- Wenzel, G. M.; **Análise Numérica da Esteira de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal: Estudo Comparativo com Modelos Analíticos**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

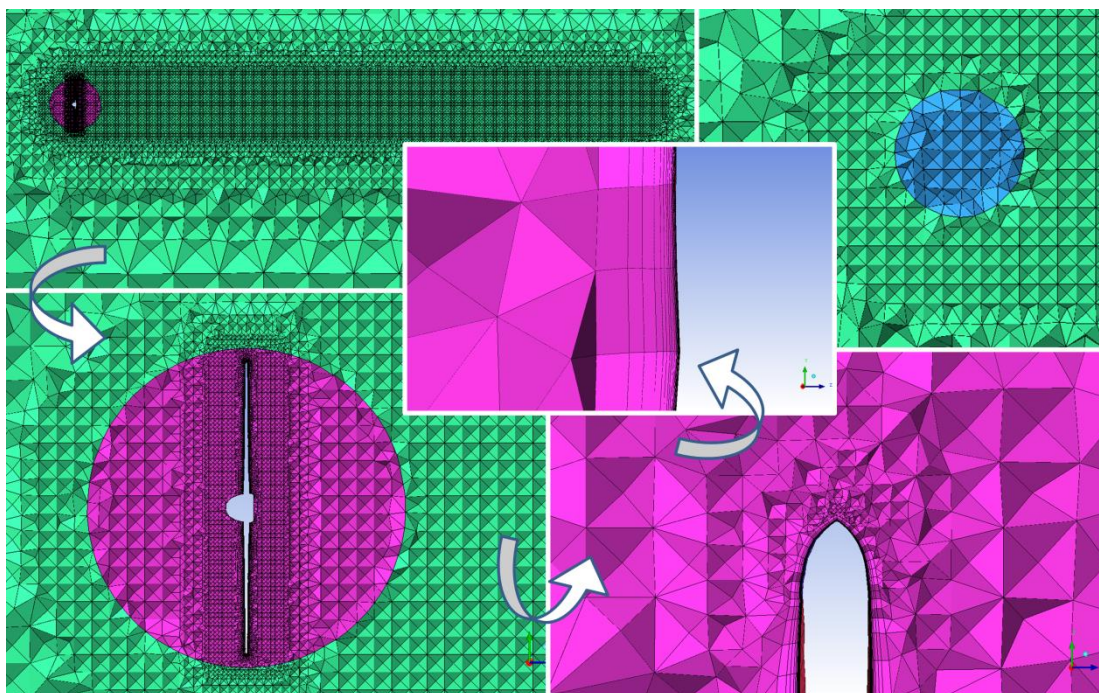
Anexo I: Iterações para variáveis específicas do modelo de esfera atuadora, dentro da primeira iteração do modelo fluidodinâmico para um caso com vento incidente controlado de 7m/s.

Iteração	C_p	a	U_∞
0	0,3521	0,1115	6,8120
1	0,3825	0,1248	6,9158
2	0,3866	0,1267	6,9309
3	0,3872	0,1270	6,9331
4	0,3873	0,1271	6,9334
5	0,3873	0,1271	6,9335
6	0,3873	0,1271	6,9335

Anexo II: Problema de continuidade da solução obtida pelo ANSYS CFX na interface entre o domínio rotativo e o domínio estático, evidenciada pela elipse azul. O plano corta o rotor, cuja pá superior é visível (região branca).



Anexo III: A malha utilizada no caso do rotor completo e na região de camada limite sobre a pá. No canto superior direito, a malha com volumes de 1,7m utilizada nas etapas 2-6.



Anexo IV: Parâmetros de simulação do ANSYS Fluent para o cálculo do rotor completo (Etapa 1). O fluido é ar a 25°C entrando a 7m/s, e o domínio rotativo gira a 72rpm. Parâmetros não citados correspondem aos valores padrão do software.

<i>Viscous model</i>	k-omega SST		
<i>Material</i>	<i>air</i>	$\rho = 1,185 \text{ kg/m}^3$	
		$\mu = 1,831\text{e-}05 \text{ Pa.s}$	
<i>Cell Zone Conditions</i>	Domínio rotativo: <i>Frame motion</i>	Rotation-Axis Direction: (0, 0, 1) Rotational Velocity: -7,53982 rad/s	
	Domínio estático: padrão		
<i>Boundary Conditions</i>	Pás: <i>Wall</i>	<i>No slip</i> (aderência)	
	Cubo: <i>Wall</i>	<i>Specified Shear</i> : (0, 0, 0) (deslizamento)	
	Parede: <i>Wall</i>	<i>Specified Shear</i> : (0, 0, 0) (deslizamento)	
	Esfera: <i>Interior</i>	<i>Interior</i>	
	Entrada: <i>Velocity Inlet</i>	<i>Velocity Magnitude</i> : 7 m/s	
		<i>Turbulent Intensity</i> : 5%	
		<i>Turbulent Length Scale</i> : 1m	
Saída: <i>Pressure Outlet</i>	<i>Backflow Turbulent Intensity</i> : 5%		
	<i>Backflow Turbulent Length Scale</i> : 11m		
<i>Solution Methods</i>	<i>Pressure-Velocity Coupling</i>	SIMPLE	
	<i>Gradient</i>	<i>Green-Gauss Node Based</i>	
	<i>Pressure</i>	<i>Second Order</i>	
	<i>Momentum</i>	<i>Second Order Upwind</i>	
	<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>Second Order Upwind</i>	
	<i>Specific Dissipation Rate</i>	<i>Second Order Upwind</i>	

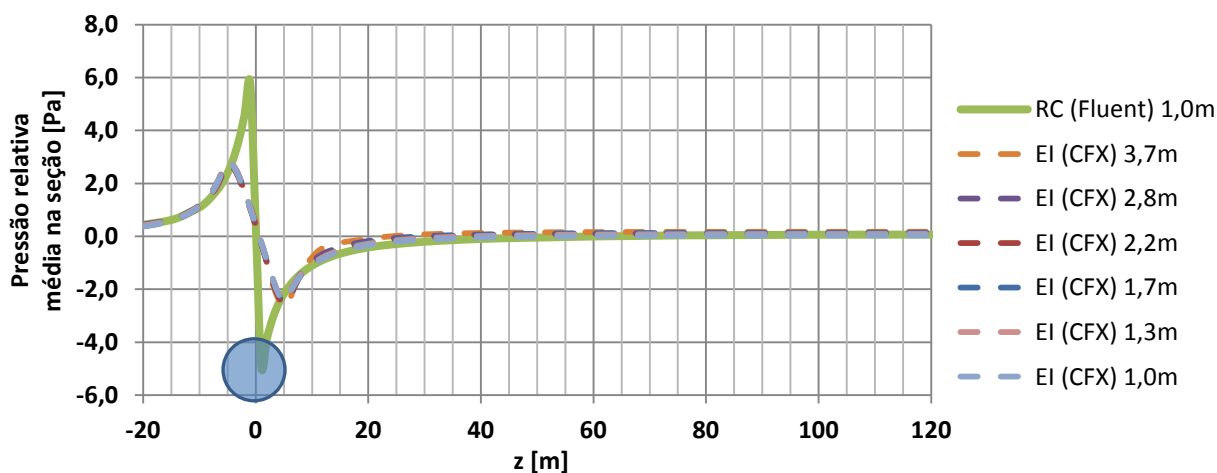
Anexo V: Resultados adicionais obtidos pelo cálculo do rotor completo no ANSYS CFX.

	Torque Z [N.m]	Força X [N]	Força Y [N]	Força Z [N]
Pá inferior	-285,17	-104,46	-12,39	616,94
Pá superior	-288,85	106,59	12,40	621,08
Cubo	0,01	1,57	-0,10	17,31
Total	-574,00	3,71	-0,09	1255,33

Anexo VI: Parâmetros de simulação do ANSYS CFX para o cálculo da esfera atuadora (etapas 2-6). O fluido é ar a 25°C. Parâmetros não citados correspondem aos valores padrão do software.

<i>Domain</i>	<i>Material: air at 25°C</i>		
	<i>Fluid Models</i>	<i>Turbulence: Shear Stress Transport</i>	
<i>Boundary</i>	<i>Entrada: Inlet</i>	<i>Turbulence Option: Intensity and Length Scale</i>	
		<i>Turbulence - Fractional Intensity: 0.05</i>	
		<i>Turbulence Eddy - Length Scale: 1m</i>	
	<i>Saída: Opening</i>	<i>Opening Pressure and Direction</i>	
		<i>Relative Pressure: 0 Pa</i>	
		<i>Turbulence Option: Intensity and Length Scale</i>	
		<i>Turbulence - Fractional Intensity: 0.05</i>	
	<i>Turbulence Eddy - Length Scale: 11m</i>		
<i>Paredes: Wall</i>	<i>Free Slip Wall (deslizamento)</i>		
<i>Subdomain</i>	<i>Domínio da esfera</i>		
	<i>Sources → Momentum Source/Porous Loss → Genral Momentum Source → Cartesian Components</i>	<i>X Component: $\bar{u}^* \times (F/V_{esfera})$</i>	
		<i>Y Component: $\bar{v}^* \times (F/V_{esfera})$</i>	
		<i>Z Component: $\bar{w}^* \times (F/V_{esfera})$</i>	
		<i>Redistribute in Rhie Chow</i>	
	<i>Incl. Coeff. in Rhie Chow</i>		
<i>Interface</i>	<i>Side 1: superfície pertencente ao domínio da esfera</i>		
	<i>Side 2: superfície pertencente ao domínio do túnel virtual</i>		
<i>Solver Control</i>	<i>Advection Scheme: High Resolution</i>		
	<i>Turbulence Numerics: High Resolution</i>		
	<i>Convergence Control</i>	<i>Max. Iterations: 10000000</i>	
		<i>Timescale control: Auto Timescale</i>	
		<i>Residual Target: 1e-08</i>	
<i>Conservation Target: 0.01</i>			
<i>Expert Parameters</i>	<i>Convergence Control</i>	<i>auto turnoff solve eq flag [t]</i>	
	<i>Physical Models</i>	<i>tef numerics option [1]</i>	
<i>Expressions</i>	Aquelas descritas no Capítulo 4 e Seção 5.2		
<i>User Functions</i>	Tabela $C_p = C_p(U_\infty)$		
	Tabela $a = a(C_p)$ (Eq. 4.11)		

Anexo VII: Perfis de pressão relativa média na seção, obtida conforme descrito na Seção 6.2, obtidos pelo cálculo do rotor completo (RC) no Fluent e pelo empuxo imposto (EI) no CFX. O gradiente de pressão na região da esfera ($-5,5m < z < 5,5m$), nos casos de empuxo imposto, é mais suave que no rotor completo já que a extração de energia, por meio do sumidouro de quantidade de movimento, ocorre numa extensão volumétrica maior.



Anexo VIII: Comparação entre a velocidade de vento incidente calculada (U_{∞}^*) e a imposta na entrada do domínio (U_{in}); e entre o coeficiente de potência conhecido como dado de entrada ($C_p(U_{in})$) e aquele obtido pela velocidade calculada (C_p^*).

U_{in} [m/s]	U_{∞}^* [m/s]	Erro	$C_p(U_{in})$	C_p^*	Erro
2	2,034	1,720%	0,05000	0,05275	5,502%
3	3,042	1,387%	0,13000	0,13333	2,562%
5	5,034	0,672%	0,28000	0,28235	0,839%
7	7,000	0,000%	0,38996	0,38996	0,000%
8	7,987	-0,162%	0,41000	0,40974	-0,063%
13	13,100	0,769%	0,25000	0,24001	-3,996%
21	21,397	1,890%	-	0,00534	-

Apêndice I: Modelo Fluidodinâmico

Equação da conservação de massa (em notação indicial):

$$\rho \frac{\partial U_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{AI.1})$$

onde ρ é a massa específica, t o tempo, e U_j o valor médio – dentro de um volume de discretização do domínio – da velocidade do fluido na direção x_j . Todas as variáveis maiúsculas a seguir também representam valores médios *dentro do volume de discretização*.

Equações do princípio da quantidade de movimento no formato RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), nas hipóteses de fluido newtoniano e homogêneo [Chassaing, 2010] e escoamento a isovolume [Chassaing, 2010]:

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2S_{ij}(\mu + \mu_t)] + F_i \quad (\text{AI.2})$$

onde P é a pressão relativa média, F_i um termo fonte (força de campo), S_{ij} o tensor de deformações médias, μ a viscosidade dinâmica e μ_t a viscosidade dinâmica turbulenta. O tensor de deformações médias é definido pela Eq. AI.3:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{AI.3})$$

A viscosidade dinâmica turbulenta μ_t é modelada através de um modelo $k-\omega$, que significa duas equações de conservação adicionais: conservação da energia cinética turbulenta k e conservação da frequência turbulenta ω . Neste estudo, o modelo $k-\omega$ utilizado é o denominado *Shear Stress Transport (SST)*, de Menter, 1994. Tratando-se de um modelo complexo, o leitor é convidado a se referir a NASA, 2013.

As equações diferenciais são integradas na malha pela qual o domínio foi discretizado. Cada um dos softwares utilizados, ANSYS Fluent e ANSYS CFX, tem a sua própria maneira de calcular as equações do modelo fluidodinâmico, também dependentes de diversos parâmetros, sendo aconselhado ao leitor os guias da ANSYS Inc., 2010 e ANSYS Inc., 2009.

Apêndice II: y^+

y^+ é o nome da variável que representa a distância à parede adimensionalizada pela espessura viscosa δ_v , segundo a Eq. AII.1:

$$y^+ = \frac{y}{\delta_v} \quad (\text{AII.1})$$

onde

$$\delta_v = \frac{\nu}{v^*} \quad (\text{AII.2})$$

onde ν é a viscosidade cinemática e v^* a velocidade de atrito, dada por:

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (\text{AII.3})$$

onde ρ é a massa específica e τ_w a tensão de cisalhamento na superfície, dada pelo produto da viscosidade dinâmica com a soma dos gradientes de velocidade cisalhante.

Apêndice III: Cálculo do coeficiente de pressão (C_{pr})

$$C_{pr} = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2} \quad (\text{AIII.1})$$

onde p é a pressão relativa, ρ a massa específica e V_{rel} a velocidade relativa, que é calculada por:

$$V_{rel} = \sqrt{U_\infty^2 + (\Omega r)^2} \quad (\text{AIII.2})$$

onde U_∞ é a velocidade de corrente livre incidente sobre o aerogerador, Ω a rotação do rotor e r a distância da seção da pá ao centro do rotor.