

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

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO AERODINÂMICO DE UMA TURBINA EÓLICA
DE PEQUENO PORTE EM ESCALA REAL E MODELO REDUZIDO: INFLUÊNCIA DO
NÚMERO DE REYNOLDS

por

Pedro Garcez Silva

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 2019

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO AERODINÂMICO DE UMA TURBINA EÓLICA
DE PEQUENO PORTE EM ESCALA REAL E MODELO REDUZIDO: INFLUÊNCIA DO
NÚMERO DE REYNOLDS

por

Pedro Garcez Silva

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. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Sérgio Viçosa Möller

Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof. Guilherme Henrique Fiorot

Porto Alegre, 15/07/2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, *Rogério* e *Jaqueline*, e meu irmão, *Leonardo*, pelo apoio durante os anos de curso.

À Professora *Adriane Prisco Petry*, pela excelente orientação e ensinamentos.

Aos colegas do LMF/UFRGS, por todo o auxílio dispendido para a realização deste trabalho.

Silva, P. G. **Estudo Comparativo do Desempenho Aerodinâmico de Uma Turbina Eólica de Pequeno Porte em Escala Real e Modelo Reduzido: Influência do Número de Reynolds.** 2019. 19p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

Este trabalho consiste na comparação do desempenho de duas turbinas eólicas de pequeno porte, uma em modelo reduzido e outra em escala real, que guardam entre si uma relação de proporção de 1:3. O objetivo é quantificar a diferença do desempenho aerodinâmico, avaliada através do coeficiente de potência, para diferentes números de Reynolds, e verificar se é possível utilizar esta diferença como correção para os valores obtidos em escala reduzida. Para tanto, foram realizadas 6 simulações numéricas, 3 para a escala reduzida e 3 para a escala real, sendo cada uma localizada em diferentes pontos da pá da turbina, ou seja, com diferentes valores de corda. O perfil aerodinâmico utilizado é o NACA0012, com um ângulo de ataque de 10°. As simulações foram realizadas através dos softwares do pacote ANSYS: *Designmodeler* para elaboração da geometria, *ICEM CFD* para geração da malha e *Fluent* para a solução das equações governantes. Este trabalho complementa o projeto de pesquisa para desenvolvimento de uma pequena turbina eólica que está sendo realizado no Laboratório de Mecânica dos Fluidos do DEMEC/UFRGS. Os resultados mostram que o coeficiente de potência foi cerca de 11% superior para a turbina em escala real, em todos os pontos da pá considerados, indicando que, para este caso específico, é possível utilizar um fator de correção para os dados obtidos em modelo reduzido.

PALAVRAS-CHAVE: Turbinas Eólicas, Dinâmica dos Fluidos computacional, desempenho, Número de Reynolds.

Silva, P. G. **Comparative Study of the Aerodynamic Performance of a Small Size Wind Turbine in Real Scale and Reduced Model: Reynolds Number Influence.** 2019. 19p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

This work consists in the comparison of the performance of two small size wind turbines, One in reduced model and the other in real scale, that have a proportion ratio of 1:3 between each other. The objective is to quantify the difference in aerodynamic performance, evaluated through the power coefficient, for different Reynolds numbers, and verify if it is possible to utilize this difference as a correction for the values obtained in the reduced scale. Therefore, 6 numerical simulations were carried out, 3 for the reduced scale and 3 for the real scale, each one being located at different points in the turbine blade, that is, with different chord values. The aerodynamic profile utilized is the NACA0012, with an angle of attack of 10°. The simulations were carried out through the ANSYS software package: *Designmodeler* for the elaboration of the geometry, *ICEM CFD* for the mesh generation, and *Fluent* for the solution of the governing equations. This work complements the project for the development of small wind turbine that is being carried out in the Fluid Dynamics Laboratory at DEMEC/UFRGS. The results show that the power coefficient was about 11% higher for the real scale turbine, in every points of the blade considered, indicating that, for this specific case, it is possible to use a correction factor for the data obtained in the small scale model

KEYWORDS: Wind Turbines, Computational Fluid Dynamics, Performance, Reynolds Number

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
4.1 ENERGIA EÓLICA.....	3
4.1.1 TURBINAS DE SUSTENTAÇÃO.....	3
4.1.2 EXTRAÇÃO DA POTÊNCIA DO VENTO.....	4
4.1.3 TEORIA DO ELEMENTO DE PÁ.....	4
5. METODOLOGIA.....	6
5.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	6
5.2 DADOS DAS TURBINAS.....	6
5.3 DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES.....	7
5.3.1 GEOMETRIA E DOMÍNIO COMPUTACIONAL.....	7
5.3.2 SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES.....	8
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
6.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	9
6.2 ANÁLISE CONVERGÊNCIA DE MALHA.....	10
6.3 VALIDAÇÃO DO MODELO DE TURBULÊNCIA.....	11
6.4 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES.....	11
7. CONCLUSÕES.....	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente preocupação com o aquecimento global, gerado em grande parte pela utilização de combustíveis fósseis, a pesquisa e desenvolvimento em tecnologias sustentáveis de geração de energia elétrica é de suma importância, para garantir o suprimento da também crescente demanda energética nos dias futuros.

Frente a este desafio, a energia eólica se coloca como uma das tecnologias mais aptas para este fim, ainda que deva ser utilizada como complemento a outras formas de geração de energia sustentável. O uso de turbinas eólicas de pequeno porte para a geração distribuída de energia elétrica é uma alternativa capaz de contribuir com uma matriz energética mais sustentável, sendo o aprimoramento destes equipamentos fator fundamental para a difusão dos mesmos. Neste sentido, está em andamento um projeto de pesquisa para desenvolvimento de uma pequena turbina eólica no Laboratório de Mecânica dos Fluidos do DEMEC/UFRGS, em colaboração com o DELET/UFRGS e com financiamento do CNPq. Diversos trabalhos acadêmicos foram realizados dentro deste projeto de pesquisa, como o estudo experimental em modelo reduzido de Garré, 2015 e Dias 2018, e numéricos, Fleck, 2012 e Gluz, 2015, sendo o presente trabalho realizado visando contribuir para o entendimento de efeitos de escala entre modelo reduzido e protótipo.

O uso de modelos reduzidos e experimentos em túnel aerodinâmico são amplamente utilizados para avaliar o desempenho de turbinas eólicas (Garré, 2015), contudo, experimentos são realizados em muitos casos sem que seja possível garantir que todos os fatores adimensionais relevantes sejam reproduzidos entre modelo e protótipo. Nos experimentos realizados por Garré, o modelo reduzido apresenta um Número de Reynolds diferente do número de Reynolds do protótipo. A influência deste fator no desempenho aerodinâmico da turbina é estudada a partir de simulações numéricas do escoamento sobre os perfis aerodinâmicos dos elementos das pás da turbina nas diferentes escalas.

Assim, a estratégia amplamente utilizada nos dias de hoje é a simulação computacional, que possibilita soluções aproximadas das equações fundamentais da mecânica dos fluidos, as quais, com o auxílio dos recursos computacionais disponíveis, podem ser obtidas a tempos factíveis.

Este trabalho tem como foco a análise de turbinas eólicas de pequeno porte, que ainda é uma tecnologia relativamente nova no Brasil, mas que possui vantagens como redução do consumo de energia elétrica da rede e menores perdas por transmissão. Diante destas vantagens, existe um interesse do governo na implementação desta tecnologia, o que motiva maiores esforços de pesquisa na área.

2. OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo principal avaliar a influência dos diferentes números de Reynolds característicos do modelo reduzido de uma pequena turbina eólica avaliada experimentalmente no Túnel Aerodinâmico Debi Pada Sadhu (Garré, 2015) e o protótipo em escala real.

Neste contexto, este trabalho se propõe à simulação da turbina concebida por Garré, em escala real e em modelo reduzido, visando observar a influência do número de Reynolds em cada um dos modelos, para estudar a viabilidade de se utilizar os resultados do modelo reduzido com um fator de proporção definido pela diferença dos resultados.

Normalmente, o número de Reynolds é utilizado como parâmetro de similaridade para comparar fenômenos aerodinâmicos de diferentes escalas. Porém, para o caso de turbinas eólicas, é interessante manter a mesma velocidade para as diferentes escalas, de forma que o número de Reynolds é diferente. A razão disso é que em muitos casos, a diferença de escala pode acarretar em uma velocidade do vento grande o suficiente para que o número de Mach exceda o valor de 0,3, tornando o regime de escoamento compressível. (Gash e Twelle, 2012).

Além disso, para este caso específico, os experimentos se tornam inviáveis para velocidades maiores que 30 m/s, pois esta velocidade está além da capacidade do Túnel Aerodinâmico Debi Pada Sadhu. (Dias, 2018).

Assim, pelas duas razões mencionadas, este trabalho se justifica. Observando-se os dados experimentais obtidos no site *Airfoiltools*, temos que os valores de coeficiente de sustentação para os números de Reynolds de 50000 e 20000 foram, respectivamente, de 0,9257 e 1,0422, para o ângulo de ataque de 10°, apresentando uma diferença percentual de 15,4%. A escala entre esses dois números de Reynolds é de 1:4, portanto, os resultados esperados para este estudos são ligeiramente inferiores aos 15,4 % mencionados.

Especificamente, os objetivos deste trabalho são os seguintes:

- Avaliar a influência do número de Reynolds no desempenho aerodinâmico entre experimentos em túnel aerodinâmico com modelo reduzido de uma turbina eólica de pequeno porte desenvolvida no Laboratório de Mecânica dos Fluidos (LMF) e o protótipo em escala real.
- Avaliar a possibilidade se utilizar um fator de correção para aplicar os valores obtidos nos experimentos em modelo reduzido ao protótipo em escala real.
- Realizar a simulação numérica dos perfis aerodinâmicos dos três elementos de pá da turbina eólica em escala real e do modelo em escala reduzida.
- Obter os coeficientes de potência dos elementos de pá estudados e realizar um estudo comparativo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização de métodos computacionais na mecânica dos fluidos (CFD), é hoje uma ferramenta indispensável, tanto na indústria quanto na academia, para a análise destes fenômenos. Desta forma, é natural que existam diversos trabalhos realizados nas diversas áreas da mecânica dos fluidos. Um dos aspectos fundamentais desta metodologia é a validação numérica, ou seja, a verificação da fidelidade do modelo matemático para com o problema físico [Maliska et al.], e é um dos pontos essenciais do presente trabalho.

Na área de energia eólica, já existem diversos estudos numéricos e experimentais investigando as características de desempenho e eficiência em diversas condições de operação. Segundo os trabalhos de Mingwei et al., 2014, o número de Reynolds possui uma forte relação com a eficiência de turbinas eólicas, o que evidencia a importância de estudos cada vez mais aprofundados nesta área. Luz, 2012, realizou um estudo do desempenho aerodinâmico de uma turbina eólica de duas pás, através de simulações numéricas, avaliando dados de empuxo, torque e potência, apresentando boa concordância com os dados experimentais. Outros estudos que avaliam o desempenho aerodinâmico incluem os trabalhos de Talluri et al., 2018 que analisa, através de estudos numéricos, o impacto de diversas modificações de projeto para a razão dos coeficientes de arrasto e sustentação. Benini e Toffolo, 2002, utilizaram a teoria do elemento de pá para a otimização do projeto de turbinas eólicas de eixo horizontal. McTavish et al., 2013, realizaram um estudo experimental da influência do número de Reynolds em turbinas eólicas de pequeno porte, analisando a esteira aerodinâmica e o coeficiente de empuxo de uma turbina de três pás e um modelo reduzido de uma turbina de duas pás já existente, chegando aos resultados de 30 a 60% de redução da esteira aerodinâmica da turbina de duas pás em relação à de três pás, e redução de 25 a 60% do coeficiente de empuxo.

A respeito de turbinas eólicas de pequeno porte, pode-se citar o trabalho de Garré, 2015, que motivou o presente trabalho. Neste estudo, foram realizados experimentos em túnel

de vento em uma turbina eólica de pequeno porte em escala reduzida, no qual se calculou o torque estático e gerou-se a curva de potência da turbina, que aproximaram valores aproximados aos obtidos analiticamente. Complementando este trabalho, foram realizadas simulações computacionais em 3D desta mesma turbina, por Gluz, 2015, no qual avaliou-se também o torque estático, que apresentaram resultados com diferença de cerca de 10,6% em relação ao experimental.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 ENERGIA EÓLICA

Energia eólica, por definição, é a transformação da energia cinética disponível no vento em energia útil, que pode ser desde a o deslocamento de um barco a vela ou a moagem de grãos, até a geração de energia elétrica, como conhecemos hoje.

O uso de moinhos de vento, que são os precursores das turbinas eólicas, remonta de muitos séculos. Há indicativos do uso do vento para moagem de grãos e elevação da água pelos egípcios, por volta de 3000 a.C. Os primeiros registros de uso no acionamento de máquinas foram em torno de 300 a.C na China, e de 200 a.C na antiga Pérsia. (Custódio, 2013)

O uso do vento como fonte para produção de energia elétrica teve grande impulso nos anos 90, por meio de vários programas executados em alguns países, que motivaram investimentos e pesquisas. Isso resultou em um significativo desenvolvimento tecnológico de métodos e equipamentos. Um número expressivo de fabricantes de turbinas eólicas surgiu no mercado e, rapidamente, melhorou a performance e diminuiu os custos das turbinas eólicas. (Custódio, 2013)

As turbinas eólicas possuem diversos critérios de classificação. Podem ser de eixo horizontal ou vertical, de arraste ou de sustentação, de grande ou pequeno porte. Para este estudo, serão consideradas as turbinas de sustentação, de eixo horizontal e pequeno porte.

4.1.1 Turbinas de sustentação

As turbinas de sustentação são aquelas cujas pás possuem perfis similares às asas dos aviões. Um exemplo desse perfil pode ser observado na figura 4.1.

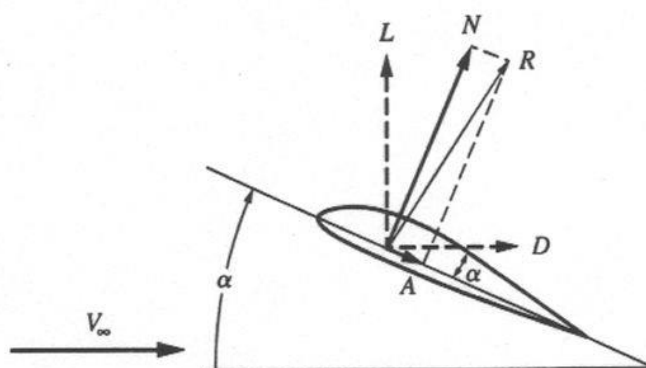


Figura 4.1: Perfil aerodinâmico da pá de uma turbina eólica. [Gash e Twelle, 2012]

Nestas turbinas, o vento, com velocidade v_∞ , incide na pá com um ângulo α , fazendo surgir uma força de empuxo, R . Esta força de empuxo pode ser decomposta em duas parcelas:

A força de sustentação L , responsável pela sustentação aerodinâmica da pá, que incide na direção vertical, e a força de arrasto, D , provocada pela pressão do vento sobre a superfície da pá, agindo na direção horizontal, em sentido contrário à velocidade do vento.

A força de sustentação (L), que é de interesse deste estudo, é dada pela equação 4.1:

$$L = \frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2 C_L A \quad (4.1)$$

Onde:

- L = Força de sustentação [N];
- ρ = Massa específica do ar [kg/m^3];
- v_{∞} = Velocidade do vento [m/s];
- C_L = Coeficiente de sustentação [adimensional];
- A = Área da superfície superior da pá [m^2];

Esta força de sustentação é responsável por gerar um torque no eixo da turbina e, consequentemente, potência mecânica, que é descrita em detalhes no capítulo a seguir.

4.1.2 Extração da Potência do Vento

A figura 4.2 mostra o fluxo de ar através de uma turbina eólica, sendo o círculo A correspondente à área de passagem de ar pela turbina. Pela lei da conservação de massa, a turbina não pode extrair toda a potência disponível no ar, pois a velocidade de saída é nula, ou seja, não haveria fluxo de ar. No tubo de vazão representado na figura 4.2, temos que a vazão através dele deve ser constante, e esta relação pode ser vista na equação 4.2:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 = A v \quad (4.2)$$

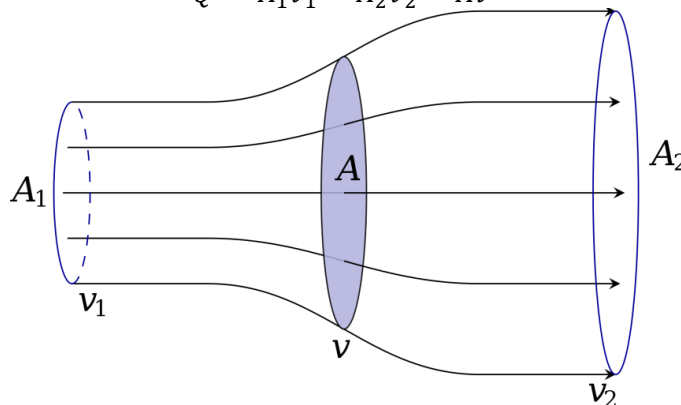


Figura 4.2: Tubo de vazão através de uma turbina eólica.

Assim, existe um máximo de potência que pode ser extraída do ar, que é definido pelo coeficiente de Betz, que é definido como 0,593 (Gash e Twelle, 2012). Multiplicando este coeficiente pela potência total disponível no ar, obtém-se a potência máxima teórica que a turbina pode gerar.

4.1.3 Teoria do Elemento de Pá

A teoria do elemento de pá consiste em realizar a análise de uma parcela infinitesimal de uma pá de turbina. Esta região, como pode ser vista na figura 4.3, possui um elemento de

raio dr , e a partir dela se calculam as forças (infinitesimais) de arrasto e de sustentação, dados pelas equações (4.3) e (4.4), respectivamente:

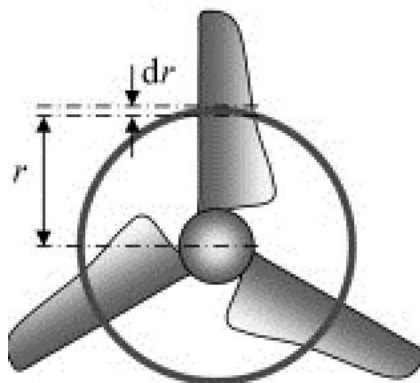


Figura 4.3: Elemento de pá.
[Adaptado de Malki et al., 2012]

$$dL = \frac{\rho}{2} w^2 c dr C_L \quad (4.3)$$

$$dD = \frac{\rho}{2} w^2 c dr C_D \quad (4.4)$$

Onde:

- w : Velocidade aparente do vento [m/s];
- c : Corda do perfil [m];
- C_D : Coeficiente de arrasto [adimensional];
- C_L : Coeficiente de sustentação [adimensional];

A velocidade aparente w é definida segundo a equação (4.5):

$$w = \sqrt{(\omega r)^2 + \left(\frac{2}{3} v_\infty\right)^2} \quad (4.5)$$

Onde ω é a velocidade angular, em rad/s, e v_∞ é a velocidade do vento, em m/s;

Uma vez calculados os coeficientes de arrasto e de sustentação, pode-se obter os valores infinitesimais das forças circunferenciais e axiais, segundo as equações (4.5) e (4.6), respectivamente:

$$dU = dL \cos(\gamma) - dD \sin(\gamma) \quad (4.5)$$

$$dT = dL \sin(\gamma) - dD \cos(\gamma) \quad (4.6)$$

Onde:

- γ : Ângulo de torção da pá.
- dU : Força tangencial infinitesimal. [N]
- dT : Força de empuxo infinitesimal. [N]
- dD : Força de arrasto infinitesimal. [N]
- dL : Força de sustentação infinitesimal. [N]

Segundo Gash e Twele, se temos que $C_L \gg C_D$, o coeficiente de arrasto pode ser desprezado, como é o caso deste estudo. Desta forma, as equações (4.5) e (4.6) reduzem-se a:

$$dU = dL \cos(\gamma) \quad (4.7)$$

$$dT = dL \text{sen}(\gamma) \quad (4.8)$$

Assim, pode-se calcular o torque e, conseqüentemente, a potência, segundo as equações (4.7) e (4.8):

$$dQ = n r dU \quad (4.9)$$

$$dP = \omega dQ \quad (4.10)$$

Onde n é o número de pás da turbina, e dQ e dP são o torque e a potência infinitesimais, respectivamente.

Finalmente, obtém-se, a partir da equação (4.9), o coeficiente de potência, que é a razão entre a potência realmente extraída do vento pela potência total disponível no vento:

$$C_P = \frac{dP}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^3 2\pi r dr} \quad (4.11)$$

Onde o termo $2\pi r dr$ é a área de um anel de raio infinitesimal. Neste estudo, foram realizadas algumas considerações a respeito do método descrito acima. Primeiramente, as forças de arrasto foram desprezadas, pois o valor do coeficiente de arrasto é pequeno se comparado ao coeficiente de sustentação (Gash e Twele, 2012). Além disso, desejou-se calcular C_P em função de C_L , eliminando os termos infinitesimais, o que é possível através de algumas manipulações algébricas, resultando na seguinte expressão (4.12):

$$C_P = \frac{\omega c C_L w^2 \cos(\text{arctg}(\frac{\omega r}{v_\infty}))}{v_\infty^3 2\pi} \quad (4.12)$$

O coeficiente de potência é de suma importância para este estudo, pois é o parâmetro usado para fazer a comparação da potência dos dois modelos, por sua natureza adimensional. A comparação dos modelos a partir da potência em si não seria possível, pois logicamente a turbina maior produzirá maior potência, devido à sua escala. Portanto, este método é assim justificado.

5. METODOLOGIA

5.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Neste estudo, se fez a comparação do coeficiente de potência em duas turbinas eólicas de pequeno porte, uma em escala reduzida e uma em escala real, para a mesma velocidade do vento. Apesar da velocidade do vento ser a mesma, a geometria do modelo varia, de forma que o número de Reynolds é diferente para cada modelo. O objetivo desta comparação é verificar se a diferença dos resultados e avaliar a possibilidade de utilizar um fator de correção para aplicar os resultados do modelo reduzido à escala real.

A análise foi realizada segundo a Teoria do Elemento de Pá (BEM – Blade Element Momentum), e as simulações foram realizadas em 3 seções da pá de cada turbina.

5.2 DADOS DAS TURBINAS

A figura 5.1 mostra o modelo reduzido e a turbina em tamanho real, localizadas no laboratório de mecânica dos fluidos, e a tabela 5.1 mostra os dados geométricos e parâmetros de projeto das turbinas em escala reduzida e escala real.

As simulações foram realizadas em 2D, nos perfis escolhidos em 3 posições da pá, sendo duas delas localizadas aproximadamente em cada extremidade, e uma no ponto médio da pá.

Tabela 5.1: Dados geométricos e parâmetros de projeto das turbinas

	Diâmetro do rotor (m)	Número de pás	Perfil das pás	Ângulo de ataque	Velocidade do vento (m/s)	Relação de velocidade de ponta de pá (λ)	Velocidade angular (rad/s)
Escala reduzida	0,5	5	NACA 0012	10°	10	3	120
Escala real	1,5						40



Figura 5.1 (a): Turbina em modelo reduzido; (b): Turbina em escala real.

Como pode ser visto na tabela 5.1, as turbinas possuem uma relação de 1:3. O ângulo de ataque de 10° é o ângulo ótimo para o desempenho da turbina. (Garré, 2015).

5.3 DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES

As simulações foram todas realizadas através do *ANSYS workbench*, que engloba os softwares *DesignModeler*, para elaboração da geometria, *ICEM CFD*, para a malha, e *Fluent* para a solução das equações.

5.3.1 Geometria e Domínio Computacional

No software *DesignModeler*, foi criado um perfil NACA0012, em 2D, de corda unitária, cujos pontos foram obtidos do site *Airfoiltools*. As dimensões do domínio, que está ilustrado na figura 5.2, são de 25 m a jusante do perfil, na horizontal, e 15 m a montante do perfil. A altura total é de 30 m.

A malha foi gerada no software *ICEM CFD*, utilizando elementos quadriláteros, com 118665 elementos.

Na elaboração da malha foi utilizado o critério y^+ , que define a distância do primeiro elemento à parede, para que haja um refinamento maior na região da camada limite.

Na figura 5.3 é possível ver a maior densidade de elementos próxima à parede.

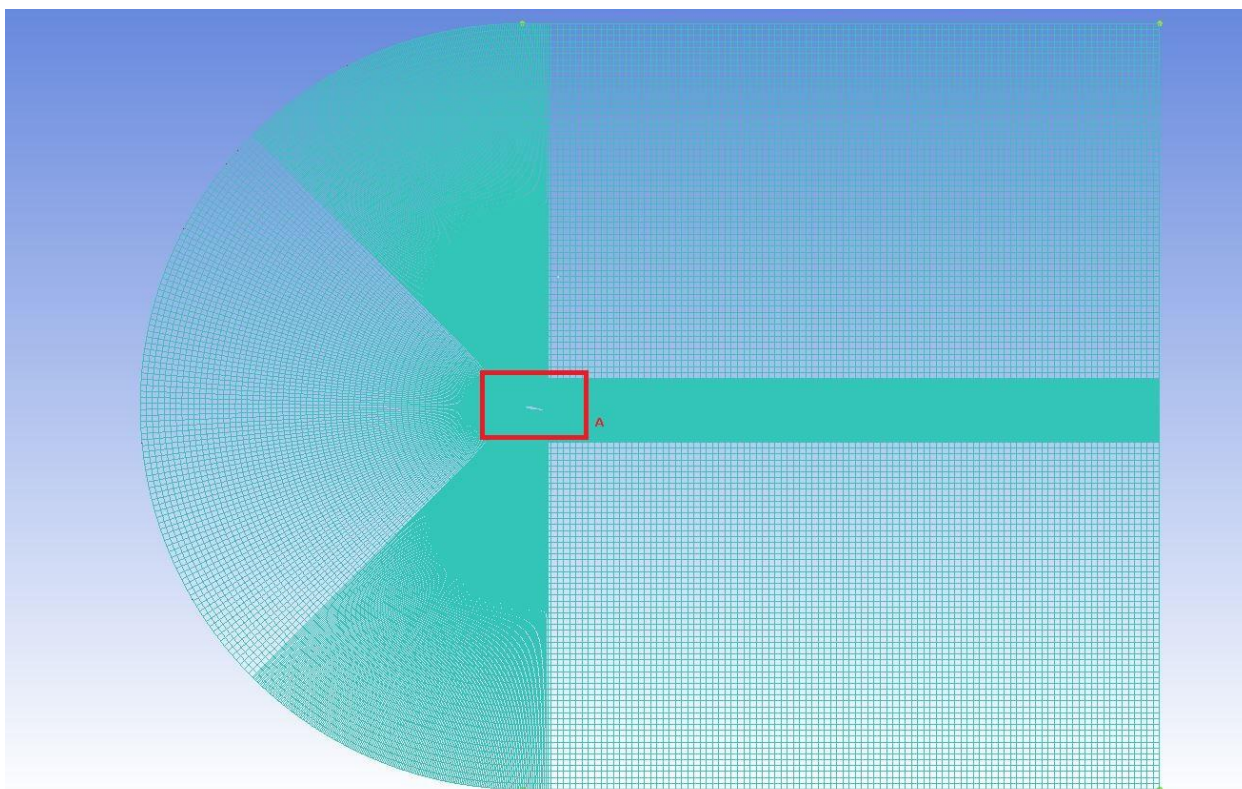


Figura 5.2: Malha utilizada nas simulações.

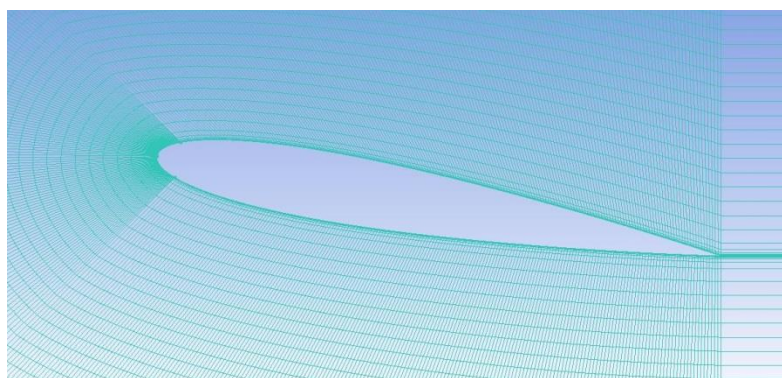


Figura 5.3: Detalhe A: malha próximo à parede do perfil.

5.3.2 Solução das Equações

A solução das equações de conservação foi realizada com utilização software *Fluent*, utilizando o método RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations).

No total, foram realizadas 6 simulações, sendo 3 delas referentes à turbina em escala reduzida e 3 referentes à turbina em escala real. Para cada caso, utilizou-se diferentes valores de corda, localizados em 3 posições do raio de cada turbina, como foi mencionado na seção 5.2. Como o raio também varia para cada perfil, segundo a equação (4.5), mesmo sendo a velocidade do vento constante, a velocidade aparente, w , será diferente para cada perfil, e esta velocidade é a que foi usada como condição de contorno. Variando-se a velocidade e a corda, tem-se portanto um número de Reynolds diferente para cada perfil.

As condições de contorno utilizadas foram velocity inlet para o semicírculo de entrada e para as paredes superior e inferior. Foi possível utilizar esta condição nas paredes pois foi a direção da velocidade foi aplicada somente na direção x. Na extremidade à direita, ou seja, na saída, foi utilizada a condição de pressure-outlet.

A tabela 5.2 mostra os parâmetros da simulação para cada perfil:

Tabela 5.2: Parâmetros das simulações

	r (m)	c (m)	w (m/s)	Re
Modelo reduzido	0,01	0,119	6,77	54569
	0,13	0,047	16,96	54793
	0,25	0,026	30,73	54798
Modelo real	0,03	0,357	6,77	163707
	0,39	0,143	16,96	164379
	0,75	0,078	30,73	164396

Onde o número de Reynolds foi calculado a partir da equação (5.1), utilizando a corda, c , como comprimento característico:

$$Re = \frac{\rho w c}{\mu} \quad (5.1)$$

Onde μ a viscosidade dinâmica do ar. As cordas de cada perfil foram escalonadas no próprio software, para cada simulação, evitando a necessidade de elaborar uma geometria para cada caso.

O modelo de turbulência usado foi o transition k-kl- ω , pois este apresenta um melhor tratamento da zona de transição de escoamento laminar para turbulento, que é característica de escoamentos com Reynolds dessa magnitude. Além disso, o modelo transition k-kl- ω apresentou melhores resultados comparado a modelos como o k- ω SST, que é considerado um dos modelos de turbulência mais utilizados para fenômenos aerodinâmicos (Fluent User Guide, 2013).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Para avaliar a confiabilidade dos resultados, foi feita a comparação com os dados disponíveis no site *airfoiltools*, onde há um amplo banco de dados experimentais referentes a aerofólios. Entre estes dados, inclui-se os valores de coeficientes de sustentação e arrasto para diferentes números de Reynolds e ângulos de ataque. Porém, o site não dispõe de resultados para os números de Reynolds mostrados na tabela 5.2, de forma que foram realizadas simulações para os Reynolds de 50000 e 200000, que constam no site, e que são os mais próximos dos casos deste trabalho. A tabela 6.1 ilustra estes resultados.

Tabela 6.1: Comparação da simulação com dados experimentais.

Re	C_L calculado	C_L experimental	Diferença
50000	0,9337	0,9257	0,86%
200000	1,088	1,0422	4,21%

Os erros obtidos nesta comparação foram considerados adequados para este estudo. Os valores do coeficiente de arrasto C_D , para os Reynolds de 50000 e 200000 foram, respectivamente, 0,112 e 0,029, de forma que a razão C_L/C_D resultou em 8,33 e 37,51, ou seja, em relação ao coeficiente de arrasto, o coeficiente de sustentação é grande o suficiente para que se justifique a simplificação mencionada na seção 4.1.2, que desconsidera as forças de arrasto nos cálculos.

6.2 ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

A qualidade da malha utilizada foi avaliada segundo o método GCI (Grid convergence Index) (Roache, 1994), que compara 3 malhas de diferentes elementos através de uma variável de controle. A análise foi feita utilizando uma malha grosseira, com 36520 elementos, uma malha média, com 67685 elementos, e uma malha refinada, com 118665 elementos. A variável de controle adotada foi o coeficiente de sustentação C_L . O método GCI foi realizado tanto para o caso da turbina em escala reduzida quanto para a escala real. Além disso, foi feita a extrapolação de Richardson (Richardson, 1910), que prevê o valor de C_L para uma malha contínua, ou seja, com um espaçamento nulo entre os elementos. A tabela 6.2 mostra os resultados da análise, e as figuras 6.1 e 6.2 mostram graficamente o valor de C_L correspondente ao espaçamento h entre elementos de cada malha considerada, bem como o valor previsto para o espaçamento zero, para as duas escalas.

Tabela 6.2: Análise de Convergência de malha

Número de Elementos	Espaçamento entre elementos (h)	C_L		GCI	
		Modelo Reduzido	Escala Real	Modelo Reduzido	Escala Real
36520	2.74E-05	1.0431	0.9271	-	-
67685	1.48E-05	1.0586	0.93706	0.48%	0.60%
118665	8.43E-06	1.0658	0.939	0.30%	0.42%
-	0	1.0722	0.93947	-	-

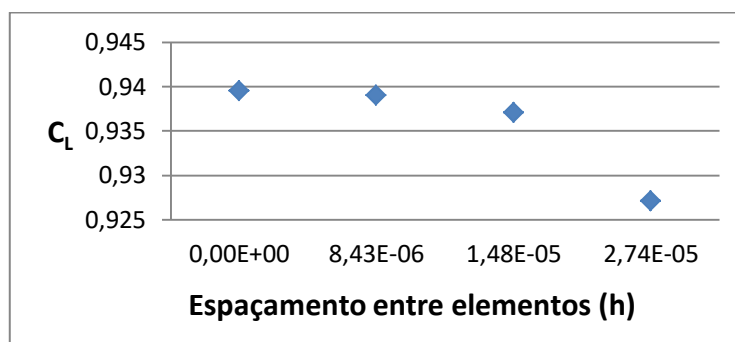


Figura 6.1 Extrapolação de Richardson para a turbina em modelo reduzido.

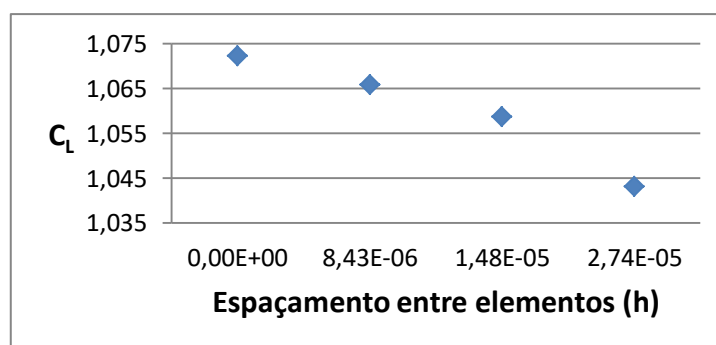


Figura 6.2: Extrapolação de Richardson para a turbina em escala real.

A extrapolação de Richardson para a turbina em escala reduzida mostrou que a malha convergiu para um valor de C_L de aproximadamente 0,939. Porém, observa-se que o valor de C_L Para a turbina em escala real não convergiu satisfatoriamente, apesar de apresentar um valor de GCI aceitável. Isto pode indicar que a malha poderia sofrer um refinamento maior. Porém, como é mostrado na próxima seção, os resultados obtidos estão próximos dos dados experimentais, de forma que a malha foi considerada suficientemente adequada para este estudo.

6.3 VALIDAÇÃO DO MODELO DE TURBULÊNCIA

Para justificar a escolha do modelo transition k-kl-w em detrimento do modelo k-w SST, também foi feita a comparação com os dados experimentais, para os mesmos números de Reynolds mencionados na seção 6.1. A tabela 6.3 ilustra os resultados desta comparação.

Tabela 6.3: Comparação do valor de C_L entre os modelos de turbulência e os dados experimentais.

Modelo	C_L		Diferença	
	Re = 50000	Re = 200000	Re = 50000	Re = 200000
k-w SST	0.7087	0.9852	23.44%	5.47%
Transition k-kl-w	0.9318	1.0884	0.66%	4.43%
Experimental	0.9257	1.0422	-	-

Pode-se observar que, para ambos os casos, modelo transition k-kl-w apresentou resultados mais próximos dos experimentais.

6.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Foram realizadas, no total, 6 simulações, cada uma levou cerca de uma hora e 6600 iterações para convergir, no caso do modelo reduzido, e cerca de 20 minutos e 2000 iterações para a escala real. O critério de convergência utilizado para os resíduos foi da ordem de $1e-5$.

As figuras 6.3 e 6.4 mostram, respectivamente, os campos de velocidade e de pressão, para as duas escalas consideradas.

Os resultados para os coeficientes de sustentação e de potência podem ser vistos na tabela 6.4. O coeficiente de potência foi calculado a partir do coeficiente de sustentação obtido nas simulações e dos demais parâmetros já mencionados, pela equação (4.10).

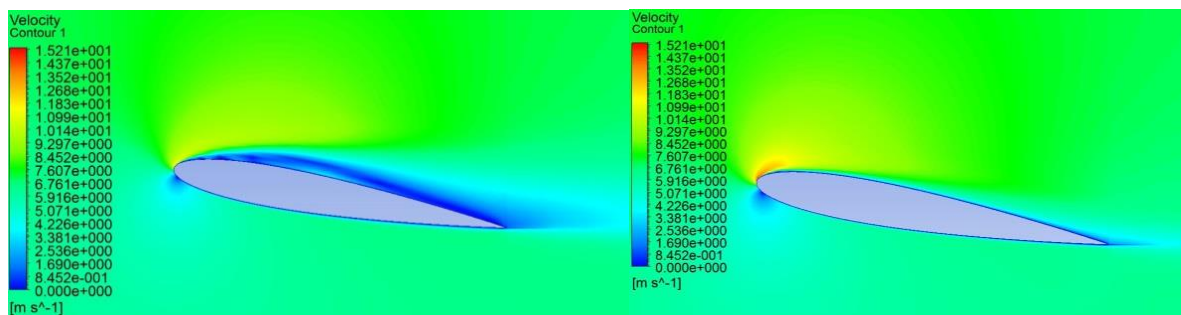


Figura 6.3: Campo de velocidades das seções com cordas de 0,119 m e 0,357 m, respectivamente.

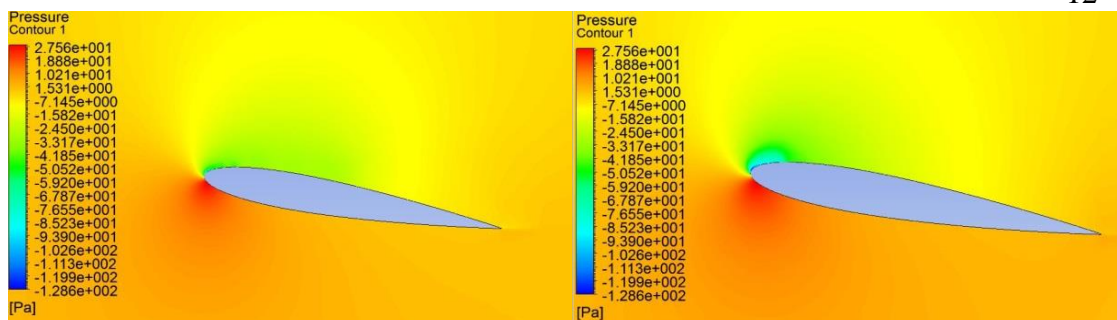


Figura 6.4: Campo de pressões das seções com cordas de 0,119 m e 0,357 m respectivamente.

Tabela 6.4: Resultados para C_l e C_p e a diferença entre os modelos.

Corda [m]		Re		C_l		C_p		Diferença do C_p
Modelo	Real	Modelo	Real	Modelo	Real	Modelo	Real	
0.119	0.357	54569.09	163707.3	0.939005	1.065876	0.481868	0.546974	11.90%
0.047	0.143	54793.02	164379	0.939045	1.052120	0.483865	0.542131	10.75%
0.026	0.079	54798.8	164396.4	0.939448	1.065935	0.484124	0.549307	11.87%

7. CONCLUSÕES

A partir da metodologia e dos resultados obtidos, observou-se que o número de Reynolds guarda aproximadamente a mesma proporção de escala das turbinas, o que é de se esperar, pois a única variante em cada caso foi o comprimento da corda.

Com relação ao desempenho, a turbina em escala real apresentou um coeficiente de potência cerca de 11,9% superior ao do modelo reduzido, para as posições de pá nas extremidades, e 10,75% para o ponto médio da pá, valores que estão de acordo com o esperado, a partir dos dados experimentais. Este resultado indica que os resultados experimentais obtidos na turbina de modelo reduzido podem ser corrigidos por um fator que contemple esta diferença, sendo este fator igual a aproximadamente 1,115, que é a média aritmética das diferenças mostradas na tabela 6.4, o qual é um valor adequado para uma estimativa inicial.

Além disso, os resultados indicam que a metodologia usada neste trabalho pode ser adequada a outros estudos de escala similares, o que motiva trabalhos futuros neste assunto.

Também seria interessante realizar simulações para mais pontos ao longo da pá das turbinas, ou mesmo um modelo em 3D, para aumentar a precisão dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Airfoil Tools, **“Tools to search, compare and plot airfoils”**. <http://www.airfoiltools.com>. Acessado em 19/06/2019.

Ansys. **“Ansys Fluent 15.0 User Guide”**. Ansys, 2013.

Custódio, Ronaldo dos Santos. **“Energia eólica para produção de energia elétrica”**. Rio de Janeiro: Synergia, 2ª ed. 2013.

Dias, Gustavo da Cunha. **“Desenvolvimento de uma microturbina eólica e bancada experimental para análise do desempenho aerodinâmico”**. Tese de Doutorado, UFRGS, 2018.

Fleck, G. D. **“Simulação de Grandes Escalas para Análise Numérica da Esteira Aerodinâmica de Turbina Eólica NREL UAE PHASE VI”**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2012.

Garré, S. **“Avaliação Experimental do Desempenho Aerodinâmico de Pequenas Turbinas Eólicas Confeccionadas em Prototipagem 3D”**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2015.

Gash, R.; Twele, J. **“Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation”**. Springer, 2nd edition, 2012.

Ge, Mingwei & Tian, De & Deng, Ying. **“Reynolds Number Effect on the Optimization of a Wind Turbine Blade for Maximum Aerodynamic Efficiency”**. Journal of Energy Engineering. Vol. 142, 2014.

Gluz, B. P. **“Avaliação do Torque Estático de uma Turbina Eólica de Cinco Pás Via Simulação Numérica do Escoamento.”** 2015, Trabalho de conclusão de curso, UFRGS, 2015.

Luz, J. L. R. **“Análise Numérica do Desempenho da Turbina Eólica de Eixo Horizontal NREL UAE PHASE VI”**. Dissertação de Mestrado, UFRGS,

Maliska, Clovis R. **“Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional”**. Rio de Janeiro: LTC, 2ª ed. 2004.

Malki, R. Williams, A. J. Croft, T. N. Togneri, M. Masters, I. **“A coupled element momentum – Computational fluid dynamics model for evaluating tidal stream turbine performance”**. Applied Mathematical Modelling, Volume 37, pp 3006-3020, 2012.

McTavish, S., Feszty D., Nitsche F. **“Evaluating Reynolds number effects in small-scale wind turbine experiments”**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Volume 120, pp 81-90, 2013.

Richardson, L. F., **“The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations, with an Application to the Stresses in a Masonry Dam.”** Transactions of the Royal Society of London, Series A, Vol. 210, pp. 307-357, 1910.

Roache, P.J.; **“Perspective: a Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies”**. ASME J. Fluids Engineer, vol. 116, pp 405-413, 1994.

Talluri, S. R., Mahapatra, T., Mangavelli, S. C., “**Enhancement of Lift-Drag characteristics of NACA0012**”. Materialstoday: Proceedings. Volume 5, pp 5328-5337, 2018.

Toffolo, A. Benini, E., “**Optimal Design of Horizontal-Axis Wind Turbines Using Blade-Element Theory and Evolutionary Computation**”. Journal of Solar Energy Engineering. Volume 124, pp 357-363, 2002.