

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

LUANA LEMOS AMARAL

METODOLOGIA PARA GARANTIR A CONVERGÊNCIA DE
MODELOS *BEM* APLICADOS À SIMULAÇÃO DE TURBINAS
EÓLICAS DE EIXO VERTICAL

MARACANAÚ, CEARÁ

2016

LUANA LEMOS AMARAL

METODOLOGIA PARA GARANTIR A CONVERGÊNCIA DE
MODELOS *BEM* APLICADOS À SIMULAÇÃO DE TURBINAS
EÓLICAS DE EIXO VERTICAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis. Área de concentração: Mecânica Aplicada.

Orientador: Prof. Francisco Frederico dos Santos Matos, Dr.

MARACANAÚ, CEARÁ

2016

Catálogo na Fonte

A485 Amaral, Luana Lemos.
 Metodologia para garantir a convergência de
modelos BEM aplicados à simulação de turbinas
 eólicas de eixo vertical / Luana Lemos Amaral --
 2017.
 80 f.

Dissertação (Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis) -- Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, campus Maracanaú, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Frederico dos Santos Matos.

1. TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL. 2.SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL. 3.ENERGIA EÓLICA I.Título.

621.312136

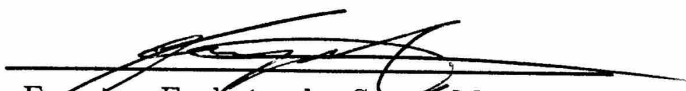
Sistema AutoCata(Desenvolvido por Cledson Oliveira)
SIBI/PROEN - Biblioteca Rachel de Queiroz - IFCE-Maracanaú

LUANA LEMOS AMARAL

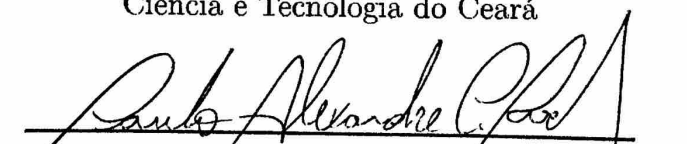
**METODOLOGIA PARA GARANTIR A CONVERGÊNCIA
DE MODELOS *BEM* APLICADOS À SIMULAÇÃO DE
TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis. Área de concentração: Mecânica Aplicada.

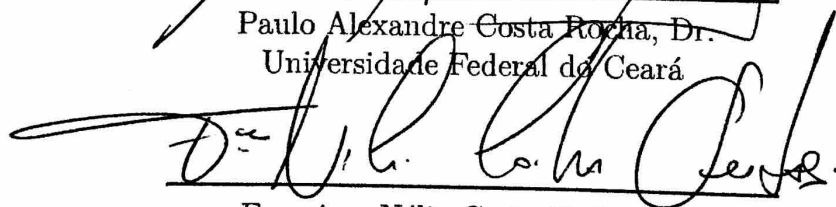
Aprovado em 20 de outubro de 2016:



Francisco Frederico dos Santos Matos, Dr.
Orientador - Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Ceará



Paulo Alexandre Costa Rocha, Dr.
Universidade Federal do Ceará



Francisco Nélcio Costa Freitas, Dr.
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Ceará

MARACANAÚ, CEARÁ

2016

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, irmão, amigos, professores e todos aqueles que ajudaram direta e indiretamente a concluir este trabalho. Em especial, agradeço ao professor e orientador Francisco Frederico dos Santos Matos pela compreensão, paciência e auxílio que foram de suma importância na elaboração deste trabalho.

Resumo

AMARAL, L. L. *Metodologia para garantir a convergência de modelos BEM aplicados à simulação de Turbinas Eólicas de Eixo Vertical*. 2016. 80 f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Maracanaú. 2016.

Com o intuito de suprir uma demanda mundial crescente por energia elétrica, as fontes renováveis vêm sendo inseridas como formas alternativas de geração de energia. Neste contexto, a energia eólica tem ganhado destaque e vários parques de turbinas eólicas vêm sendo implantados. A energia eólica é produzida, geralmente, em parques com turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) de grande porte. Porém, nos últimos anos, as turbinas de menor porte têm sido inseridas em ambientes urbanos. Para esse tipo de aplicação, as turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) se mostram mais adequadas por serem mais silenciosas, estáveis e simples do ponto de vista da manutenção. Para o desenvolvimento de turbinas eficientes, na fase de projeto das TEEV, deve-se escolher o perfil de pá mais adequado para cada aplicação. Portanto, a realização de simulações computacionais para prever qual formato de pá resulta no melhor desempenho da turbina é uma boa alternativa à confecção de várias pás diferentes para realização de testes experimentais em túnel de vento. Existem, atualmente, diversos modelos computacionais baseados no *Blade Element Momentum* (BEM) que são capazes de prever o desempenho aerodinâmico das TEEV com certa precisão, porém os mesmos podem apresentar problemas de convergência. O presente trabalho trata do desenvolvimento de uma metodologia para garantir a convergência de modelos BEM aplicados à simulação de TEEV. Foi criado um programa em Fortran, chamado FASTEEVSIM, em que a metodologia foi aplicada. O programa baseia-se no modelo *Double Multiple Stream Tube* e usa a execução automática do programa XFOIL para obter as características aerodinâmicas dos perfis. O programa criado foi usado para testar uma TEEV do tipo Darrieus com dois perfis de pás diferentes: o NACA0018 e o DU06W200. Uma série de resultados foram gerados e depois comparados com dados experimentais para a validação do método. É apresentada, também, uma análise comparativa entre os perfis simulados. Os resultados obtidos demonstraram que a metodologia desenvolvida pode auxiliar de maneira eficaz na convergência das simulações e que o programa FASTEEVSIM é capaz de simular a turbina gerando resultados próximos aos valores experimentais de forma simples e rápida.

Palavras-chaves: Turbina Eólica de Eixo Vertical; Simulação de Perfis Aerodinâmicos; Curva de Coeficiente de Potência.

Abstract

AMARAL, L. L. *Methodology to ensure the convergence of BEM models applied to Vertical Axis Wind Turbines simulations*. 2016. 80 f. Master Thesis (Master in Renewable Energy) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Maracanaú. 2016.

In order to meet rising global demand for electric power, renewable sources are being used as alternative forms of power generation. In this context, wind power has received increasingly attention and several wind farms are being set. For the wind power generation, large scale horizontal axis wind turbines (HAWT) are usually used. However, in recent years, smaller turbines are being set in urban environments. For this kind of application, the vertical axis wind turbines (VAWT) are more suitable for being quieter, more stable and having simpler maintenance. In order to design efficient turbines, the most appropriate blade profile for each application must be chosen. Therefore, it is important to carry out computer simulations to predict which kind of blade profile results in the best performance of the turbine, since manufacturing several different blades to perform experimental tests in a wind tunnel is not a feasible option due to the long time and the high cost it takes. Currently, there are several computer models based on the Blade Element Momentum (BEM) model that are able to predict the aerodynamic performance of VAWT with some precision, however they may present convergence problems. This work presents the development of a methodology to ensure the convergence of BEM models applied to simulations of VAWT. A program written in Fortran called FASTEEVSIM applying this methodology was created. The program is based on the Double Multiple Stream Tube Model and uses the XFOIL program in order to obtain the blade profile aerodynamic characteristics. The program was used to test a Darrieus type VAWT with two different blade profiles: the NACA0018 and the DU06W200. The results were generated and then compared to experimental data for validation of the method. A comparative analysis between the simulated profiles is also presented. The results showed that this methodology can assist effectively the convergence of the simulations and the FASTEEVSIM program is able to simulate turbines and provide data close to the experimental values in a simple and fast way.

Key-words: Vertical Axis Wind Turbine; Aerodynamic Profile Simulations; Power Coefficient Curve

Lista de ilustrações

Figura 1 – Turbina eólica de eixo horizontal.	17
Figura 2 – Turbina eólica de eixo vertical do tipo Darrieus.	18
Figura 3 – Turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius.	18
Figura 4 – Representação das forças de arrasto e de sustentação atuando sobre a pá.	20
Figura 5 – TEEV do tipo H-Darrieus de três pás.	21
Figura 6 – Ilustração do coeficiente de potência para diversos tipos de turbina.	22
Figura 7 – Disco atuador.	24
Figura 8 – <i>Single Streamtube</i>	26
Figura 9 – Modelo <i>Multiple Streamtubes</i>	27
Figura 10 – Esquema de velocidades.	28
Figura 11 – Visão esquemática do modelo <i>Double Multiple Streamtubes</i>	30
Figura 12 – Protótipo de TEEV, (Turby).	33
Figura 13 – Curvas do coeficiente de potência.	34
Figura 14 – Curva do coeficiente de potência para o perfil S-1046 para vários valores de corda.	36
Figura 15 – Esquema de forças e ângulos em uma TEEV vista de cima.	41
Figura 16 – Fluxograma do esquema de funcionamento do programa para execução automática do XFOIL.	44
Figura 17 – Estrutura do perfil antes e após a modificação dos parâmetros do XFOIL.	45
Figura 18 – Fluxograma de funcionamento do FASTEEVSIM.	47
Figura 19 – Fluxograma para garantir a convergência da simulação.	48
Figura 20 – Resultado de simulação no XFOIL.	49
Figura 21 – Gráfico do fator de interferência.	49
Figura 22 – Gráfico da força resultante.	50
Figura 23 – Ângulo de ataque versus teta.	50
Figura 24 – Gráfico do Fator de Interferência.	51
Figura 25 – Aerofólio NACA0018.	53
Figura 26 – Aerofólio DU 06-W-200.	53
Figura 27 – Coeficiente de sustentação versus coeficiente de arrasto e Coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque para o perfil NACA 0018 e Reynolds = 300.000.	56
Figura 28 – Coeficiente de sustentação versus coeficiente de arrasto e Coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque para o perfil NACA 0018 e Reynolds= 500.000.	57

Figura 29 – Coeficiente de sustentação versus coeficiente de arrasto e Coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque para o perfil NACA 0018 e Reynolds= 700.000.	58
Figura 30 – Coeficiente de sustentação versus coeficiente de arrasto e Coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque para o perfil DU06W200 e Reynolds= 300.000.	59
Figura 31 – Coeficiente de sustentação versus coeficiente de arrasto e Coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque para o perfil DU06W200 e Reynolds= 500.000.	59
Figura 32 – Coeficiente de sustentação versus coeficiente de arrasto e Coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque para o perfil DU06W200 e Reynolds= 700.000.	60
Figura 33 – Comparação entre as curvas de potência do perfil NACA0018 obtidas pelo FASTEEVSIM e CLAESSENS.	61
Figura 34 – Comparação entre as curvas de potência do perfil DU06W200 obtidas pelo FASTEEVSIM e CLAESSENS.	62
Figura 35 – Coeficientes de sustentação versus coeficientes de arrasto e coeficientes de sustentação versus ângulos de ataque para os perfis NACA0018 e DU 06-W-200 para um número de Reynolds=300.000.	64
Figura 36 – Coeficientes de sustentação versus coeficientes de arrasto e coeficientes de sustentação versus ângulos de ataque para os perfis NACA0018 e DU06W200 para um número de Reynolds=500.000.	64
Figura 37 – Coeficientes de sustentação versus coeficientes de arrasto e coeficientes de sustentação versus ângulos de ataque para os perfis NACA0018 e DU06W200 para um número de Reynolds=700.000.	65
Figura 38 – Coeficiente de potência da TEEV usando o perfil NACA0018 para diferentes velocidades do vento.	66
Figura 39 – Coeficiente de potência da TEEV usando o perfil DU06W20 para diferentes velocidades do vento.	67
Figura 40 – Gráfico da curva de potência dos perfis NACA0018 e DU06W200 para velocidade do vento de 5 m/s.	67
Figura 41 – Gráfico da curva de potência dos perfis NACA0018 e DU06W200 para velocidade do vento de 7,5 m/s.	68
Figura 42 – Gráfico da curva de potência dos perfis NACA0018 e DU06W200 para velocidade do vento de 10 m/s.	68
Figura 43 – Gráfico da curva de potência dos perfis NACA0018 e DU06W200 para velocidade do vento de 12,5 m/s.	69
Figura 44 – Simulação no XFOIL	78
Figura 45 – Perfil NACA0018 no XFOIL	78

Figura 46 – Simulação no XFOIL	79
--	----

Lista de tabelas

Tabela 1 – Modificação dos parâmetros do XFOIL.	45
Tabela 2 – Especificações da geometria e operação da turbina.	52
Tabela 3 – Valores de N_{crit}	56

Lista de abreviaturas e siglas

BEM	<i>Blade Element Momentum</i>
CFD	<i>Computacional Fluid Dynamics</i>
DMST	<i>Double Multiple Streamtubes</i>
HAWT	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>
SI	Sistema Internacional
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
TEEV	Turbina Eólica de Eixo Vertical
VAWT	<i>Vertical Axis Wind Turbine</i>

Lista de símbolos

A	área transversal
c	corda do aerofólio
C_D	coeficiente de arrasto
C_L	coeficiente de sustentação
C_n	coeficiente normal
C_P	coeficiente de potência
C_t	coeficiente tangencial
D	diâmetro da turbina
E_c	energia cinética
FC	fator de compensação
F_D	força de arrasto
F_L	força de sustentação
F_n	força normal
F_R	força resultante
F_t	força tangencial
F_y	força do ar sobre a turbina
H	altura da turbina
m	massa do ar
$\dot{m}$	fluxo de massa
$Mach$	número de Mach
N	número de pás
N_θ	número de tubos de corrente
p	pressão específica
$P_{extraída}$	potência extraída

P_{vento}	potência do vento
R	raio
Re	número de Reynolds
u	fator de interferência
V	velocidade
$\dot{V}$	fluxo volumétrico
V_{inf}	velocidade do vento
V_l	velocidade local
V_{out}	velocidade de saída
W	velocidade relativa
θ	posição angular da pá
λ	velocidade de ponta de pá
μ	viscosidade
ρ	densidade
σ	solidez
ω	frequência angular

Em todo o trabalho, foram utilizadas unidades de medidas do Sistema Internacional (SI).

Sumário

	Lista de ilustrações	7
	Lista de tabelas	10
	Sumário	14
1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Tipos de Turbinas Eólicas	17
1.1.1	Forças de Sustentação e Arrasto	19
1.1.2	Eficiência	21
1.2	Revisão Bibliográfica	23
1.2.1	Trabalhos no Período de 1970 a 1979	24
1.2.2	Trabalhos no Período de 1980 a 1989	29
1.2.3	Trabalhos no Período de 1990 a 1999	32
1.2.4	Trabalhos no Período de 2000 a 2009	32
1.2.5	Trabalhos no Período de 2010 a 2015	35
1.3	Objetivos	37
1.3.1	Objetivo Geral	38
1.3.2	Objetivos Específicos	38
1.3.3	Escopo do Trabalho	38
2	MATERIAIS E MÉTODOS	39
2.1	Introdução	39
2.1.1	Potência do Vento	39
2.1.2	Aerodinâmica do Rotor	40
2.2	Programa FASTEEVSIM para Variação do Ângulo de Ataque	43
2.3	Programa FASTEEVSIM para Análise Aerodinâmica de TEEV	45
2.3.1	Metodologia para Garantir a Convergência da Simulação	48
2.3.2	Definição do Número de <i>Streamtubes</i>	52
2.3.3	Escolha dos Perfis Aerofólios para Simulações	52
2.4	Considerações Finais	53
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
3.1	Introdução	55
3.2	Validação do FASTEEVSIM para Variação do Ângulo de Ataque	55
3.2.1	Variação do ângulo de ataque para o perfil NACA0018	56
3.2.2	Variação do ângulo de ataque para o perfil DU06W200	58

3.3	Validação do FASTEEVSIM para Análise Aerodinâmica de TEEV	60
3.3.1	TEEV usando o perfil NACA 0018	61
3.3.2	TEEV usando o perfil DU06W200	62
3.4	Análise Comparativa entre os Perfis NACA0018 e DU06W200	63
3.5	Cosiderações Finais	69
4	CONCLUSÕES	71
4.1	Considerações Preliminares	71
4.2	Validação do FASTEEVSIM para variação do ângulo de ataque	72
4.3	Validação do FASTEEVSIM para análise aerodinâmica de TEEV	72
4.4	Análise Comparativa entre os perfis NACA0018 e DU06W200	72
4.5	Sugestões para Trabalhos Futuros	73
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A – XFOIL	77

1 Introdução

A quantidade de energia elétrica produzida por ano vem crescendo de maneira significativa em todo o globo. Entre os anos de 1980 e 2010, a média de crescimento por ano foi de 407 bilhões de kWh ([BRINCK; JEREMEJEFF, 2013](#)). Esse aumento, associado a fatores como a possível escassez de fontes fósseis de energia e as estiagens de chuvas, fazem com que a segurança no suprimento de energia seja uma das maiores preocupações das economias mundiais.

Toda conversão de energia gera um certo impacto no meio ambiente, sendo assim, deve-se procurar as que causem menos danos. As fontes renováveis de energia, além de ter baixo impacto ambiental, podem ser usadas como formas de reduzir os problemas com o aumento dos preços dos combustíveis fósseis e com a diminuição de geração das usinas hidrelétricas nos períodos de pouca chuva. Dentre as fontes de energias limpas e inesgotáveis, a energia eólica vem se destacando e demonstra ter grande potencial para suprir as necessidades de fornecimento energético com segurança, custos acessíveis e sustentabilidade ambiental ([MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008](#)).

Segundo [Alves \(2010\)](#), a energia eólica é o aproveitamento da energia proveniente do vento. A energia cinética contida nas massas de ar em movimento pode ser aproveitada por meio da conversão da energia cinética dos ventos em energia mecânica através de turbinas eólicas. Na sequência, essa energia pode ser transformada em eletricidade com o uso de geradores.

A utilização da energia eólica para a geração de eletricidade vem sendo estudada desde o final do século XIX, quando aconteceu a crise petrolífera. O aumento do custo de energia elétrica, na época, motivou os EUA a incentivar a pesquisa e desenvolvimento da energia eólica. Com o amadurecimento da tecnologia, houve um aumento significativo no número de instalações de turbinas eólicas nos EUA e na Europa no período de 1980 a 1990. Desde então, a geração de energia provinda dos ventos teve seu mercado diversificado pelo mundo e, atualmente, contribui para a produção elétrica de forma competitiva ([TOLMASQUIM, 2016](#)).

Apesar do grande crescimento, a energia eólica ainda representa uma pequena parte da geração de energia elétrica mundial, cerca de 3% em 2014. Alguns países, contudo, apresentam números bem mais expressivos, como é o caso da Dinamarca, onde a energia eólica representa 39% da sua produção total. Atualmente, os três maiores países em termos de capacidade instalada são a China (31%), os Estados Unidos (18%) e a Alemanha (10%). O Brasil está em décimo lugar e representa 1,6% da capacidade instalada mundial que é de mais de 350.000 MW ([GWEC, 2015](#)).

O aumento da representatividade da energia eólica na geração de energia elétrica mundial foi possível, principalmente, por conta do desenvolvimento tecnológico dos meios de geração. A criação de turbinas cada vez mais eficientes melhorou seu custo-benefício e fez com que a energia eólica se tornasse competitiva com outras fontes (TOLMASQUIM, 2016).

1.1 Tipos de Turbinas Eólicas

As turbinas eólicas modernas podem ser classificadas em turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) (Figura 1) e turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV). As TEEV podem ser do tipo Savonius (Figura 2) ou Darrieus (Figura 3) (HOWELL et al., 2010).

Figura 1 – Turbina eólica de eixo horizontal.



Fonte: IMA (2009)

As turbinas podem possuir variados números de pás. As TEEH possuem, em sua maioria, três pás que giram ao redor de um eixo horizontal que deve ficar alinhado com a direção do vento. O posicionamento dos rotores pode ser projetado para ficar contra o vento (*upwind*) ou a favor do vento (*downwind*). No primeiro caso, é necessário haver um mecanismo para direcionar a turbina na direção do vento (sistema de *yaw*). As TEEV possuem seu eixo de rotação perpendicular à direção do vento e operam recebendo vento de qualquer direção, dispensando mecanismos de direcionamento (TOLMASQUIM, 2016).

Figura 2 – Turbina eólica de eixo vertical do tipo Darrieus.



Fonte: [WordPress](#) (2012)

Figura 3 – Turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius.



Fonte: [Freeliff](#) (2016)

As TEEH são largamente desenvolvidas e instaladas hoje até na superfície dos oceanos. Por outro lado, as TEEV, por problemas de vibração excessiva, tiveram o seu desenvolvimento interrompido em meados da década de 80. Além disso, as TEEH fabricadas na época tiveram um impulso de produção devido à maior eficiência na faixa de alta

potência (aproximadamente 500kW na época). No entanto, nunca foi mostrado que as TEEH eram mais eficientes que as TEEV no aspecto da aerodinâmica. Ainda mais que, para potências muito altas (+10MW), as TEEV eram mais adequadas, pois as TEEH apresentavam limitações físicas com a ação da força da gravidade, onde o comprimento elevado das pás nessa faixa de potência inviabilizava o projeto devido à flexão excessiva. As principais vantagens apresentadas pelas TEEV são, segundo [Howell et al. \(2010\)](#):

- As TEEV não têm necessidade de sistemas (*yaw*) paralelos para orientar a turbina na direção do vento, resultando em menos perdas energéticas;
- Devido ao perfil da pá da TEEV ser constante ao longo do seu comprimento, o custo de fabricação é bem menor quando comparado ao custo da complexa forma tridimensional das pás das TEEH;
- Devido à menor velocidade da ponta da pá, as TEEV são mais silenciosas;
- A TEEV em funcionamento absorve melhor as perdas de sustentação da pá quando submetida aos ventos mais fortes, oferecendo uma vantagem operacional de segurança durante as rajadas de vento.

As vantagens apresentadas pelas turbinas de eixo vertical podem torná-las mais adequadas para determinadas aplicações. Na instalação em prédios, por exemplo, as TEEV são indicadas por serem mais silenciosas e mais estáveis. Ainda assim, um dos principais aspectos na escolha da turbina para qualquer aplicação é a potência que a turbina é capaz de extrair do vento.

A potência que pode ser extraída do vento depende do tipo de conversor utilizado. Alguns tipos de turbinas são capazes de converter uma maior porcentagem de energia que outros. Um dos aspectos que influencia na diferença entre a capacidade de produção de energia mecânica é qual força aerodinâmica é utilizada: arrasto ou sustentação ([HAU, 2000](#)).

1.1.1 Forças de Sustentação e Arrasto

As TEEV podem ser classificadas em relação às forças aerodinâmicas utilizadas. As turbinas de eixo vertical do tipo Savonius geram energia através da transferência de quantidade de movimento usando a força de arrasto (força aerodinâmica na direção do vento). As turbinas do tipo Darrieus usam a força de sustentação (força aerodinâmica na direção ortogonal ao vento) ([TOLMASQUIM, 2016](#)).

Segundo [Fox, Pritchard e McDonald \(2000a\)](#), sempre que houver movimento relativo entre um fluido e um corpo sólido, uma força resultante do atrito e do deslocamento do fluido vai agir sobre o mesmo. A magnitude desta força vai depender da velocidade relativa

(W) entre o fluido e o corpo, da forma e tamanho do corpo e das propriedades do fluido. Essa força resultante pode ser dividida em duas componentes principais, a força de arrasto (F_D) e a força de sustentação (F_L). A força de arrasto atua sobre o corpo paralelamente à direção da velocidade relativa. A força de sustentação é a componente que atua sobre a pá perpendicularmente à direção da velocidade relativa.

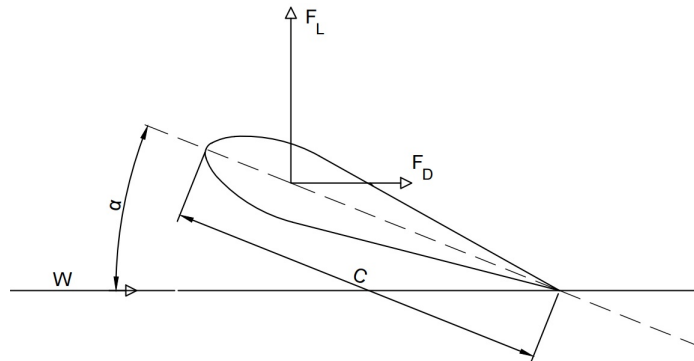
Sabe-se que as forças de arrasto (F_D) e sustentação (F_L) seguem as seguintes relações:

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho W^2 A \quad (1.1)$$

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho W^2 A \quad (1.2)$$

Onde ρ é a densidade do fluido, A é a área varrida e (C_D) e (C_L) são os coeficientes de arrasto e de sustentação, respectivamente. O ângulo no qual o vento atinge a pá é chamado de ângulo de ataque (α) e o comprimento máximo do perfil da pá é chamado de corda (c), ver Figura 4.

Figura 4 – Representação das forças de arrasto e de sustentação atuando sobre a pá.



Fonte: o Autor (2016).

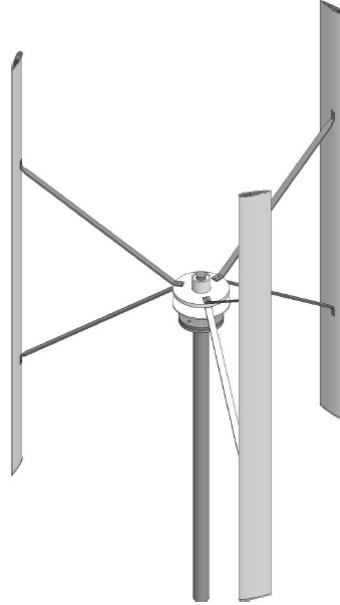
As turbinas eólicas que utilizam a força de sustentação apresentam maior eficiência quando comparadas às que utilizam a força de arrasto. As turbinas do tipo Savonius, por exemplo, utilizam a força de arrasto e são menos eficientes que as outras TEEV que usam a força de sustentação (TOLMASQUIM, 2016).

As TEEV do tipo Darrieus utilizam a força de sustentação e podem possuir pás curvadas ou retas. Essas pás possuem formato de um perfil aerodinâmico. As turbinas Darrieus de pás retas também são chamadas de H-Darrieus.

As turbinas do tipo H-Darrieus (Figura 5) utilizam a força de sustentação e podem ter variados números de pás, sendo mais comum de duas ou três pás. Por se tratar de uma TEEV, a H-Darrieus possui todas as vantagens mencionadas na seção 1.1. Além disso, é

mais indicada em condições extremas de vento e sua eficiência é tão alta quanto a das TEEH, quando instalada em torres de prédios (GUPTA; BISWAS, 2013).

Figura 5 – TEEV do tipo H-Darrieus de três pás.



Fonte: o Autor (2016).

1.1.2 Eficiência

O desempenho de qualquer turbina pode ser avaliada através do coeficiente de potência C_p , descrito na Equação 1.3.

$$C_P = \frac{P_{extraida}}{P_{vento}} = \frac{P_{extraida}}{\frac{1}{2}\rho AV_{inf}^3} \quad (1.3)$$

Em que (V_{inf}) é a velocidade do vento não perturbado e A é a área do rotor da turbina.

O coeficiente de potência é a razão entre a potência extraída ($P_{extraida}$) pela turbina e a potência disponível no vento (P_{vento}), ou seja, o quanto que a turbina consegue aproveitar da energia contida no vento. A potência extraída pode ser medida através de instrumentos ou obtida com uso de modelos matemáticos.

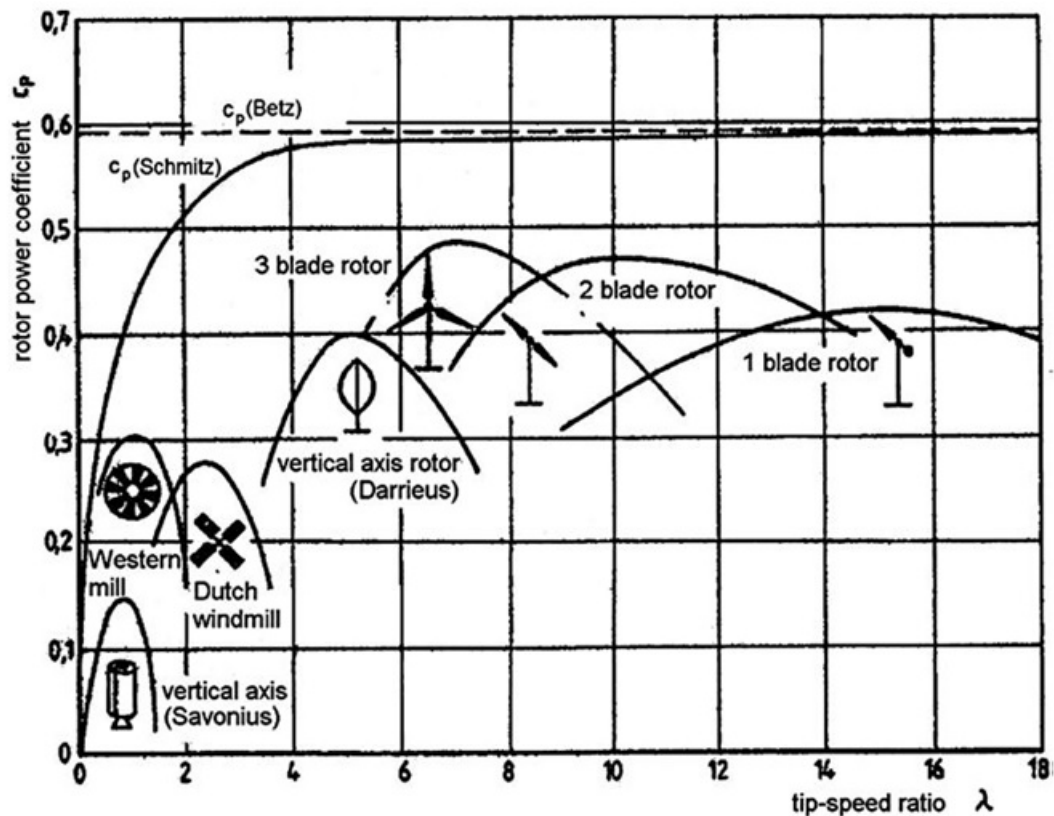
Como a potência extraída pela turbina ($P_{extraida}$) é uma função da rotação da turbina, o coeficiente de potência pode ser escrito em função do “*Tip Speed Ratio*” (TSR) ou velocidade específica na ponta da pá, (λ), definido pela relação entre a velocidade linear na ponta da pá (com ($R\omega$), com (ω) em rad/s e R o raio da turbina) e a velocidade do vento não perturbado, V_{inf} , resultando em:

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_{inf}} \quad (1.4)$$

A velocidade de ponta de pá define o quão rápido a periferia da turbina está girando em relação à velocidade do vento.

Uma ilustração do coeficiente de potência versus velocidade específica para vários tipos de turbina é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Ilustração do coeficiente de potência para diversos tipos de turbina.



Fonte: Stiebler (2008).

As TEEH, por apresentarem maior eficiência, sempre receberam maior atenção dos pesquisadores. Porém, nos últimos anos, com um aumento na demanda de estações de força descentralizadas, o interesse nas TEEV foi resgatado. Para tanto, algumas universidades e institutos de pesquisa têm realizado estudos e desenvolvido uma série de perfis baseados em modelos aerodinâmicos computacionais voltados ao estudo das TEEV.

No que segue, alguns trabalhos e modelos no contexto de turbinas eólicas de eixo vertical são descritos, representando a revisão bibliográfica realizada para o desenvolvimento do presente trabalho.

1.2 Revisão Bibliográfica

A turbina eólica de eixo vertical (TEEV) tem um funcionamento simples. Entretanto, a descrição matemática completa do seu comportamento é bastante complexa, exigindo que sejam adotadas uma série de simplificações. O mérito de qualquer modelo de turbina eólica depende de sua habilidade em descrever os eventos reais de forma simplificada, mas com suficiente exatidão. Por esse motivo, a validação do modelo teórico requer comparações com dados experimentais. Neste contexto, alguns trabalhos vêm sendo dedicados ao desenvolvimento de modelos matemáticos e experimentais no sentido de aprimorar técnicas a serem utilizadas como ferramenta de projeto. Segundo [Howell et al. \(2010\)](#), a maior parte dos trabalhos relacionados ao projeto de turbinas eólicas de eixo vertical foi feita até o final da década de 70 e começo dos anos 80, notavelmente no Departamento de Energia, nos Laboratórios Nacionais de Sandia, Estados Unidos (([DODD et al., 1989](#)), ([DODD, 1989](#)), ([BERG; KLIMAS; STEPHENSON, 1990](#))). No Reino Unido, a Universidade de Reading Sir Robert McAlpine and Sons Ltd ergueu vários protótipos de TEEV, incluindo uma versão de 500 kW em Carmarthen Bay, ([PRICE, 2006](#)). Esse trabalho mostrou que as turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) eram mais eficientes que as turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) em aplicações de grande porte. Logo o interesse pelo projeto das TEEV foi perdido e, desde então, o projeto das TEEH têm sido predominante. Portanto, não é surpreendente que um número menor de trabalhos relacionados às TEEV possam ser encontrados na literatura nos últimos anos. Antes disso, algumas teorias e modelos matemáticos têm sido usados no desenvolvimento de TEEV.

Os modelos “*Blade Element Momentum*” (BEM) combinam a Teoria do Momento com a Teoria do Elemento da Pá, estudando o comportamento do escoamento de vento nas pás e as forças envolvidas. Os modelos BEM podem ser subdivididos nos modelos *Single Streamtube*, *Multiple Streamtube* e *Double Multiple Streamtube*.

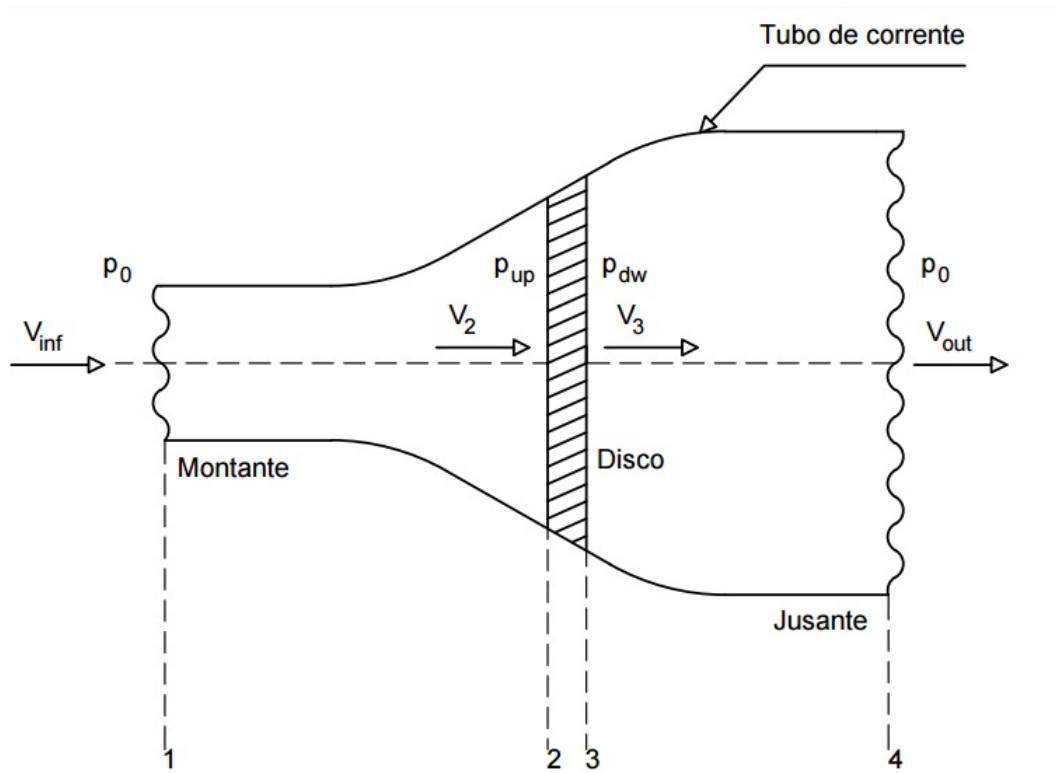
O Modelo BEM, originalmente apresentado por [Templin \(1974\)](#) e desenvolvido por [Strickland \(1975\)](#) adaptou a aproximação de disco atuador para estimar o desempenho de turbinas do tipo Darrieus. O modelo foi melhorado durante anos por vários autores, [Paraschivoiu \(1981\)](#), [Paraschivoiu e Delclaux \(1983\)](#), [Paraschivoiu et al. \(1983\)](#), [Paraschivoiu, Fraunie e Beguier \(1985\)](#), para levar em consideração a perda de sustentação “*stall*” e os efeitos secundários do escoamento.

A seguir, os trabalhos mais relevantes na área de desenvolvimento das TEEV serão apresentados em ordem cronológica. As principais teorias e fundamentos a respeito das TEEV também serão apresentados e explicados neste capítulo.

1.2.1 Trabalhos no Período de 1970 a 1979

Templin (1974) propôs a teoria *Single Streamtube*, que é a primeira e mais simples teoria para o cálculo do desempenho das TEEV. Para entendê-la, é preciso conhecer a teoria do disco atuador que é a teoria na qual a turbina é vista como um disco com um número infinito de pás em um fluxo de ar livre. A parte do fluxo que é afetada pelo disco é conhecida como tubo de corrente (*streamtube*) e é definida a jusante (*downwind*) e a montante (*upwind*) do disco (ver Figura 7). Apenas o fluido que entra na *streamtube* é considerado, sendo assim, admite-se que não existe interação com o fluido ao redor e apenas a velocidade normal do fluido em relação ao eixo de rotação da turbina é considerada.

Figura 7 – Disco atuador.



Fonte: o Autor (2016).

Assume-se, então, que a velocidade do fluido é constante ao atravessar o disco e que a velocidade antes e depois do disco são iguais, ou seja:

$$V_2 = V_3 = V_l \quad (1.5)$$

Como não há trabalho sendo realizado em nenhum dos lados do rotor, nem de (1) para (2) e nem de (3) para (4) (Figura 7), usando a equação de Bernoulli, tem-se:

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho V_{inf}^2 = p_{up} + \frac{1}{2}\rho V_l^2 \quad (1.6)$$

$$p_{dw} + \frac{1}{2}\rho V_l^2 = p_0 + \frac{1}{2}\rho V_{out}^2 \quad (1.7)$$

O impulso agindo no rotor em termos da pressão total é representado pela Equação 1.8, em que A é a área do disco.

$$F_y = A(p_{up} - p_{dw}) \quad (1.8)$$

Combinando as Equações 1.6, 1.7 e 1.8, o impulso pode ser expresso como:

$$F_y = \frac{1}{2}\rho A (V_{inf}^2 - V_{out}^2) \quad (1.9)$$

Conforme comprovado por Fox, Pritchard e McDonald (2000b), a velocidade V_l é representada como uma média entre as velocidades V_{inf} e V_{out} (Equação 1.10).

$$V_l = \frac{V_{inf} + V_{out}}{2} \quad (1.10)$$

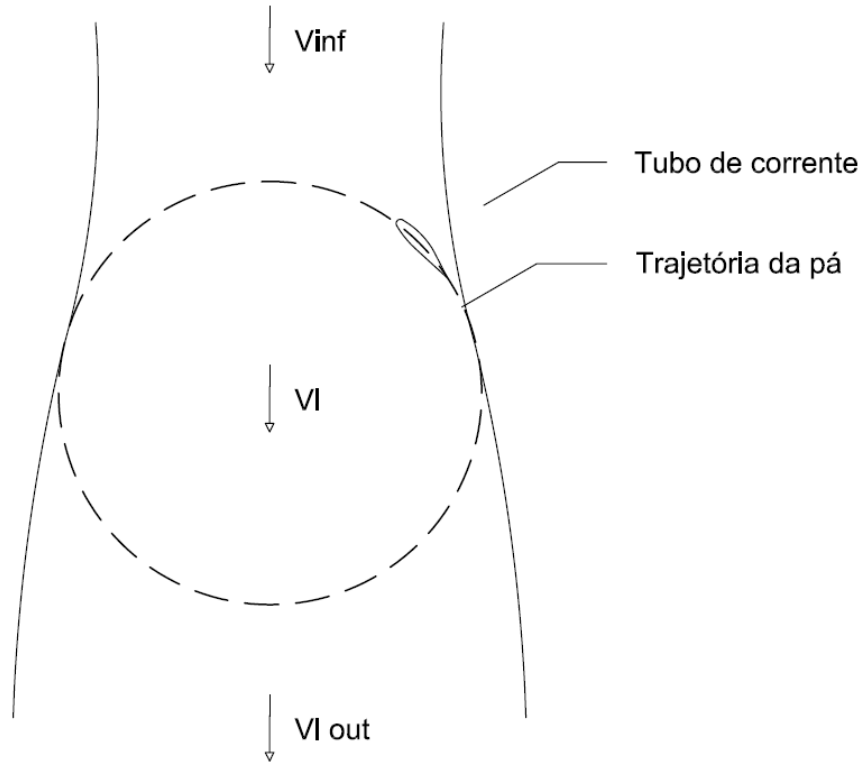
No modelo *Single Streamtube* a turbina é englobada por um único tubo de corrente, como mostrado na Figura 8. Para que se possa entender como a turbina interage com o fluido e para prever o desempenho da turbina, procura-se estimar as velocidades do fluido no rotor (V_l) e a jusante (V_{out}), quando o ar deixa o volume de controle. Uma vez que a turbina extrai energia cinética do fluido e o modelo considera apenas o fluido que entra e sai na mesma direção do fluxo, as velocidades no rotor (V_l) e na saída (V_{out}) devem ser menores que a velocidade do vento (V_{inf}).

No modelo *Single Streamtube* o aerogerador é colocado dentro de um tubo de corrente simples (*Single Streamtube*) e as pás durante as suas revoluções são descritas por um disco atuador. São desconsiderados neste modelo os efeitos do exterior para com o interior do tubo de corrente.

Este modelo apresenta pouca precisão na avaliação de desempenho, resultante das considerações feitas, oferecendo valores acima dos valores reais. Poucas são as configurações de aerogeradores em que este modelo apresenta valores mais próximos do real.

O modelo considera apenas uma velocidade de vento ao atravessar a turbina e o admite constante em toda sua dimensão. Isso, porém, não acontece na realidade. As pás interagem com o fluido de maneira diferente de acordo com sua posição.

Strickland (1975) desenvolveu o modelo *Multiple Streamtubes*. Neste modelo, ao invés de um único tubo de corrente englobar toda a turbina, vários tubos são colocados em paralelo. Além disso, esse modelo considera a interferência da pá na velocidade do vento fazendo com que a mesma seja reduzida.

Figura 8 – *Single Streamtube*.

Fonte: o Autor (2016).

A fração pela qual a velocidade é reduzida é chamada de fator de interferência. A velocidade no rotor em função da interferência sofrida (u) e da velocidade do vento é representada pela Equação 1.11 (BRINCK; JEREMEJEFF, 2013).

$$V_l = uV_{inf} \quad (1.11)$$

Em que:

$$0 < u < 1 \quad (1.12)$$

A velocidade de saída pode ser expressa como:

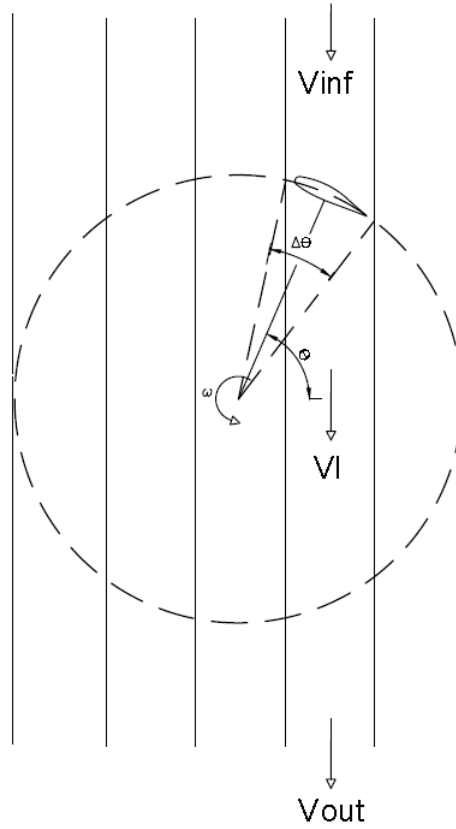
$$V_{out} = (2u - 1)V_{inf} \quad (1.13)$$

Realizando as devidas substituições das Equações 1.11 e 1.13 na Equação 1.9, pode-se obter o impulso em função da interferência (u) e de (V_{out}).

$$F_y = 2\rho Au(1 - u)V_{inf}^2 \quad (1.14)$$

O modelo permite o cálculo de diferentes valores de interferência pois resolve as equações de momento em cada *streamtube* separadamente para cada posição θ da turbina, Figura 9.

Figura 9 – Modelo *Multiple Streamtubes*.



Fonte: o Autor (2016).

A área total varrida pela turbina é dividida em várias áreas menores, o que proporciona maior precisão ao modelo. A área é separada em partes iguais. O número de tubos de corrente (N_θ) é definido por:

$$N_\theta = \frac{360^\circ}{\Delta\theta} \quad (1.15)$$

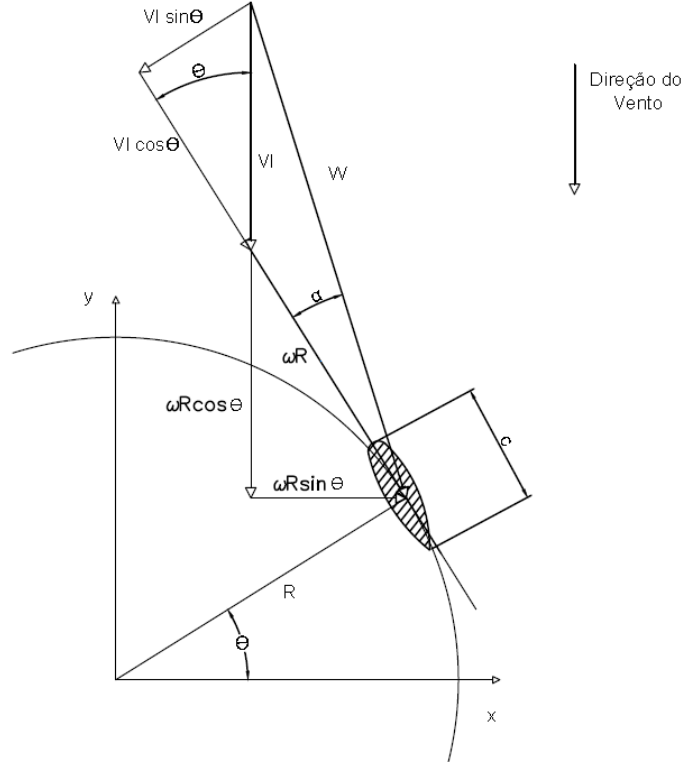
O valor médio da força aerodinâmica agindo sobre um número (N) de pás que passam por uma *streamtube* é (PONTA; SEMINARA; OTERO, 2007):

$$F_y = N \frac{\Delta\theta}{\pi} \frac{1}{2} \rho c H W^2 C_y \quad (1.16)$$

Em que H é a altura da pá e C_y é a fração dos coeficientes das forças normais C_n e tangenciais C_t na pá que age na direção da rotação (Equação 2.13). C_n e C_t , por sua vez,

são encontrados a partir dos valores dos coeficientes das forças de arrasto e sustentação agindo na pá. As equações que representam tais coeficientes são detalhadas no Capítulo 2.

Figura 10 – Esquema de velocidades.



Fonte: o Autor (2016).

Da geometria (Figura 10), obtém-se:

$$\left(\frac{W}{V_l}\right)^2 = [\lambda + \cos(\theta)]^2 + \sin(\theta)^2 \quad (1.17)$$

A área de cada tubo de corrente é definida pela seguinte equação:

$$A = RH \sin(\theta) \Delta\theta \quad (1.18)$$

Equacionando as expressões 1.14 e 1.16, obtém-se a expressão geral do fator de interferência para cada tubo de corrente.

$$\left(\frac{1-u}{u}\right) = \frac{Nd\theta cH}{4\pi A} C_y \left(\frac{W}{V_l}\right)^2 \quad (1.19)$$

Combinando as Equações 1.19, 1.17 e 1.18, chega-se à seguinte função:

$$\left(\frac{1-u}{u}\right) = \frac{Nc}{4\pi R \sin(\theta)} C_y (\lambda + 2\lambda \cos(\theta) + 1) \quad (1.20)$$

O modelo *Multiple Streamtubes* é uma variação do modelo *Single Streamtube*, em que o tubo de corrente é subdividido em vários tubos de corrente adjacentes que são independentes entre si e com as suas características aerodinâmicas próprias. Este modelo contempla as variações aerodinâmicas ao longo do rotor.

O procedimento de cálculo usando o modelo é de encontrar as velocidades e as forças que agem sobre a pá aplicando a teoria do disco para cada tubo de corrente. Ao final, obtém-se um valor médio e calcula-se a potência da turbina.

O método utilizado para a obtenção do valor de C_y era através dos coeficientes de arrasto e sustentação. Tais coeficientes eram encontrados em tabelas com valores experimentais.

De forma geral, os trabalhos desta década demonstram a procura por desenvolver modelos simples que fossem capazes de prever o desempenho das turbinas eólicas de eixo vertical. A criação desses modelos foi de grande importância, principalmente para auxiliar no projeto e otimização das turbinas.

1.2.2 Trabalhos no Período de 1980 a 1989

No modelo *Multiple Streamtubes*, mostrado na seção anterior, o campo de velocidade é calculado apenas uma vez para cada tubo de corrente por toda a turbina. Contudo, a pá passa pelo mesmo tubo duas vezes por volta. De fato, a velocidade do vento sofre uma redução ao passar da primeira metade da turbina (BRINCK; JEREMEJEFF, 2013).

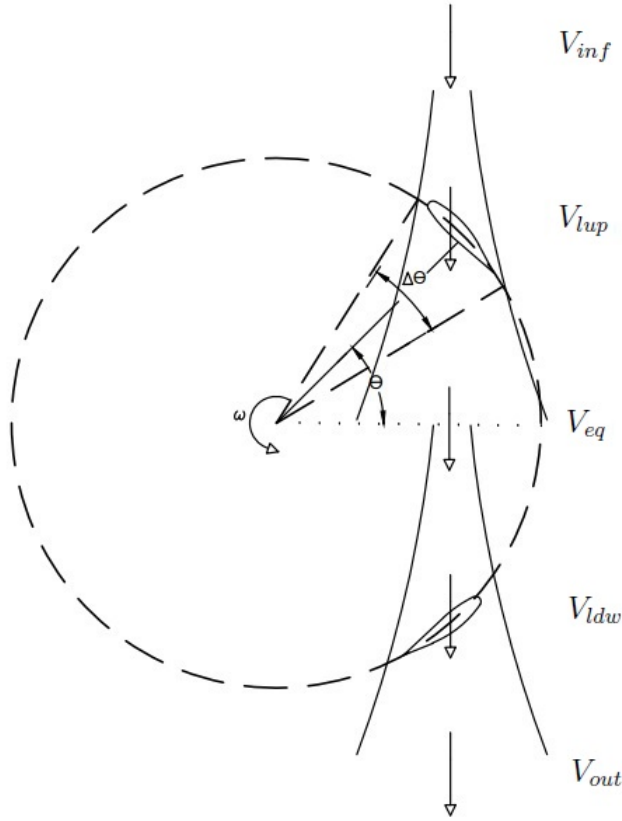
Paraschivoiu (1981) apresentou o modelo *Double Multiple Streamtubes* que incorpora a ideia da teoria do disco duplo no qual cada passagem da pá pelo tubo é tratada individualmente (Figura 11).

O modelo *Double Multiple Streamtubes* é uma variação do modelo *Multiple Streamtubes*, em que o disco atuador é dividido em dois discos atuadores em sequência, representando o lado a montante e o lado a jusante do rotor. As pás ao passarem no lado a montante do rotor influenciam o escoamento de vento no lado a jusante do rotor. Os cálculos são feitos separadamente nas duas metades do rotor a jusante e a montante do tubo de corrente.

Do esquema mostrado na Figura 11, temos a seguinte relação de magnitude para a velocidade ao longo do tubo de corrente duplo:

$$V_{inf} > V_{lup} > V_{eq} > V_{ldw} > V_{out} \quad (1.21)$$

Onde (V_{inf}) é a velocidade do vento, (V_{lup}) e (V_{ldw}) são as velocidades locais do vento ao passar pela pá na primeira e na segunda metade do rotor, (V_{eq}) é a velocidade de equilíbrio que acopla ambas *streamtubes*, e (V_{out}) é a velocidade do fluido ao deixar as *streamtubes* (PONTA; SEMINARA; OTERO, 2007).

Figura 11 – Visão esquemática do modelo *Double Multiple Streamtubes*.

Fonte: o Autor (2016).

As velocidades locais em cada metade do rotor podem ser expressas por:

$$V_{lup} = u_{up} V_{inf} \quad (1.22)$$

$$V_{ldw} = u_{dw} V_{eq} \quad (1.23)$$

Aplicando a Equação 1.10 provinda da teoria do disco atuador apresentada na seção 1.2.1, tem-se:

$$V_{lup} = \frac{V_{inf} + V_{eq}}{2} \quad (1.24)$$

O que dá:

$$V_{eq} = (2u_{up} - 1) V_{inf} \quad (1.25)$$

Os fatores de interferência nos dois lados podem ser escritos como:

$$u_{up} = \frac{V_{lup}}{V_{inf}} \quad (1.26)$$

$$u_{dw} = \frac{V_{ldw}}{(2u_{up} - 1) V_{inf}} \quad (1.27)$$

Para facilitar os cálculos, optou-se por chamar $(2u_{up} - 1)$ de fator de compensação (FC). Onde, para $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$:

$$FC = 1 \quad (1.28)$$

E para $180^\circ < \theta < 360^\circ$:

$$FC = (2u_{up} - 1) \quad (1.29)$$

Agora pode-se escrever a velocidade local como mostrado na Equação 1.30.

$$V_l = u V_{inf} FC \quad (1.30)$$

A expressão do fator de interferência fica como mostrado a seguir (PONTA; SEMINARA; OTERO, 2007):

$$(1 - u) u = \frac{Nc}{4\pi R \sin\theta} C_y \left(\left(\frac{\lambda_0}{FC} \right)^2 + 2u \left(\frac{\lambda_0}{FC} \right) \cos(\theta) + u^2 \right) \quad (1.31)$$

Onde λ_0 é a velocidade de ponta de pá inicial.

O procedimento de cálculo usando o modelo acima é de encontrar as velocidades e as forças que agem sobre a pá aplicando a teoria do disco para cada tubo de corrente a jusante e a montante. Ao final, obtém-se um valor médio e calcula-se a potência da turbina. Para encontrar os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação que determinam C_y são usadas tabelas ou programas de simulação computacional.

Drela (1989), em seu trabalho, criou um programa interativo para o projeto e análise de aerofólios subsônicos isolados. O programa, chamado de XFOIL, usa como entrada as coordenadas¹ que especificam o formato do perfil do aerofólio em 2D, o número de Reynolds e o número de Mach, que serão detalhados mais adiante. O XFOIL calcula a distribuição da pressão sobre o perfil em diversas condições, além disso, ele fornece as características das forças que agem sobre o aerofólio (arrasto e sustentação).

¹ As coordenadas para os perfis de aerofólios estão disponíveis em: < <http://airfoiltools.com/> >. Acesso em: 20 mar. 2015.

O programa também é capaz de fazer o projeto inverso. É possível informar os parâmetros desejados e obter as variações no formato do perfil. Essa é uma importante ferramenta para previsão das características aerodinâmicas dos aerofólios e pode ser utilizada para projeto e estudo de aeronaves e turbinas. No presente trabalho, o XFOIL foi utilizado para obter os coeficientes das forças de arrasto e sustentação sobre os perfis das pás.

Com base na revisão dos trabalhos na década de 80, percebe-se a busca por maior precisão e aproximação da realidade física, como consequência houve um aumento na complexidade dos modelos matemáticos. Nota-se, também, o surgimento de programas computacionais que facilitam a aplicação dos modelos.

1.2.3 Trabalhos no Período de 1990 a 1999

No trabalho de [Marini, Massardo e Satta \(1992\)](#) é apresentada uma comparação do desempenho aerodinâmico de tipos diferentes de turbinas eólicas de eixo vertical. Para realizar a análise de desempenho das turbinas, foram utilizados dois modelos diferentes: o modelo de *Single Streamtube* e o modelo de Vortex. Os resultados obtidos com modelo de Vortex se mostraram mais confiáveis, porém os testes usando esse modelo levam um maior tempo de simulação o que o torna menos viável para a análise de um número muito grande de turbinas diferentes. As curvas de coeficiente de potência (C_P) versus velocidade de ponta de pá (λ) obtidas através do modelo *Single Streamtube* se mostraram confiáveis para baixa solidez (σ), mas apresentaram valores mais altos que os reais para valores altos de solidez. Para valores médios de solidez e $\lambda > 3,5$, o modelo apresentou resultados imprecisos e inconsistentes.

Na década de 90, houve uma diminuição no número de pesquisas realizadas na área do desenvolvimento de TEEV. Porém alguns trabalhos voltados à utilização de modelos teróricos para análise de TEEV continuaram a ser realizados.

1.2.4 Trabalhos no Período de 2000 a 2009

[Bussel, Polinder e Sidler \(2004\)](#) desenvolveram um protótipo de TEEV com pás helicoidais, assim como um rotor de baixa rotação, para uso no topo de edificações, conforme ilustrado na Figura 12. Por se tratar de uma aplicação em ambiente urbano, o ruído produzido deve ser mínimo. Sendo assim, houve um esforço em reduzir o máximo possível a rotação da turbina em relação à velocidade do vento, sem perdas significativas em sua potência. Usando a conservação da quantidade de movimento para o modelo matemático e um túnel de vento com algumas adaptações para baixas velocidades, vários modelos de TEEV foram criados e testados. Baseado nos resultados do túnel de vento, um rotor de 3 m de altura e com 2 m de diâmetro conectado a um gerador elétrico de 2,5 kW

foi desenvolvido como produto final. A aparência estética da turbina, o bom desempenho e um baixo índice de ruído se mostraram ideais para a aplicação em regiões urbanas. Os primeiros testes alcançaram um índice de aproveitamento de 30% da energia do vento até a rede de distribuição de energia elétrica.

Figura 12 – Protótipo de TEEV, (Turby).

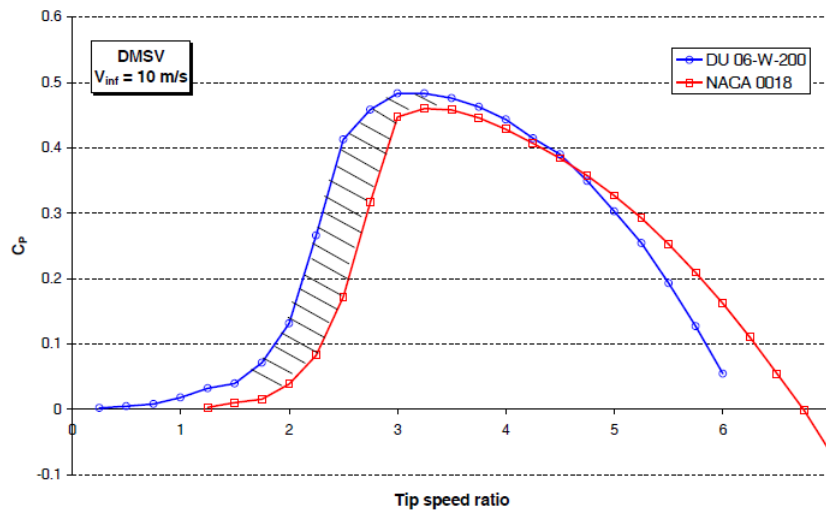


Fonte: [Bussel, Polinder e Sidler \(2004\)](#).

No estudo de [Claessens \(2006\)](#), foi apresentado um processo para o projeto de pás de TEEV. Durante o trabalho, foi proposta uma melhoria em um perfil de aerofólio comumente usado em turbinas de eixo vertical: o NACA0018. O perfil foi usado como referência para otimização das características aerodinâmicas. O programa RFOIL foi utilizado para obter as propriedades dos perfis das pás em 2D. O RFOIL é baseado no programa XFOIL e tem um funcionamento semelhante ao mesmo. O programa de simulação foi escrito em Matlab para calcular a potência da TEEV usando os dados dos perfis bidimensionais. Este programa permite ajustar a geometria das turbinas e escolher o aerofólio a ser usado. As características dos perfis a serem usadas na simulação podem ser tiradas do RFOIL ou de testes experimentais em túnel de vento. O modelo de simulação escolhido para ser utilizado no programa foi o “*Double Multiple Streamtubes*”. A TEEV usada no trabalho foi a do tipo Darrieus com três pás retas. Vários perfis foram simulados na fase de validação do programa. As melhorias realizadas no perfil NACA0018 durante o processo resultaram em uma geometria final de aerofólio, o novo perfil foi chamado DU 06-W-200. Para comparar os perfis e comprovar a melhoria em seu desempenho, foram realizados testes de medição em túnel de vento. Nos resultados dos testes, o novo perfil de aerofólio mostrou ser mais resistente e apresentou um melhor desempenho. A Figura 13 mostra o resultado da simulação para os dois perfis usando os resultados medidos em túnel de vento. Apenas dados experimentais dos coeficientes de sustentação e arrasto foram

usados para alimentar o programa de simulação do coeficiente de potência. Não foram apresentados resultados dessa natureza provenientes das simulações do programa RFOIL.

Figura 13 – Curvas do coeficiente de potência.



Fonte: Claessens (2006).

No trabalho realizado por [Ponta, Seminara e Otero \(2007\)](#), um novo modelo computacional para a análise aerodinâmica de turbinas de eixo vertical foi apresentado. Este é baseado em um dos modelos de momento, o “*Double Multiple Streamtube*” (DMST). A novidade é que o modelo incorpora a capacidade de lidar com pás que seguem trajetórias ovais. Ao invés de a pá ficar acoplada a um rotor e girar ao redor de um eixo central sem variação do raio, como nas turbinas convencionais, aqui, as pás deslizam sobre trilhos, parecidos com os trilhos de trem, realizando uma trajetória oval. No trabalho, é realizada uma descrição matemática completa mostrando as modificações em relação aos modelos anteriores. Devido a geometria especial da turbina, três novos parâmetros adimensionais foram propostos para calcular a potência em diferentes condições de vento. O modelo apresentado é capaz de simular ambos rotores Darrieus convencionais e com trajetórias ovais. Essa capacidade o torna mais versátil e abrangente que os modelos já existentes e expande as possibilidades para a análise de turbinas do tipo Darrieus.

[GARCIA et al. \(2007\)](#) apresentaram um projeto de desenvolvimento de TEEV de pequeno porte, em que o objetivo foi a criação de máquinas com características aerodinâmicas modernas, eficientes, com alta robustez e capacidade para gerar entre 200W e 250W de potência nominal. As atividades do trabalho foram relacionadas com o desenvolvimento de protótipos e testes em laboratório, sendo analisado em paralelo o modelo matemático do sistema através de aplicativos computacionais. A principal conclusão do trabalho foi que o protótipo com maior solidez (maior área preenchida com as pás da turbina) e com o perfil de pá NACA 8628 resultou em uma melhor eficiência energética.

Howell et al. (2010) apresentaram um estudo experimental e computacional para a avaliação da eficiência aerodinâmica de pequenas turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV). Testes em túnel de vento foram realizados para verificar a performance geral (ou macro) da turbina. Dois modelos baseados no método dos volumes finitos foram criados, um bi e um tridimensional, para auxiliar a compreensão do desempenho aerodinâmico da turbina. Os resultados do túnel de vento foram apresentados para casos de diferentes velocidades do vento, razão de velocidade da ponta da pá e solidez da turbina, assim como para diferentes acabamentos (rugosidades) da superfície das pás. Foi mostrado experimentalmente que o acabamento superficial das pás da turbina tem um efeito significativo no desempenho das mesmas. Abaixo de um número crítico de velocidade do vento (Reynolds de 30.000), o desempenho da turbina é degradado por um acabamento superficial suave, enquanto que acima desta velocidade crítica o desempenho é melhorado com esse mesmo acabamento. Para a faixa de operação da turbina, ambos os modelos de turbina com duas e três pás foram simulados. Foi observado um ganho significativo no desempenho da turbina com três pás ou maior solidez. A falta de sustentação aerodinâmica (*stalling*) ou falha foi evidenciada nos resultados, sendo apontada como a causa principal a variação do ângulo de ataque das pás do rotor durante a rotação. Como era esperado, a variação do ângulo de ataque das pás causou uma perda significativa de eficiência da turbina. O coeficiente de performance estimado pelo modelo bidimensional foi efetivamente maior que os obtidos pelos resultados experimentais e pelo modelo tridimensional.

Nessa década, percebe-se um aumento significativo no número de trabalhos. Existe uma busca pela estimação do desempenho das turbinas, sempre com o intuito de auxiliar no desenvolvimento de turbinas cada vez mais eficientes. Observa-se que os trabalhos conseguem obter resultados de simulações com sucesso, porém com alguma limitação de estar sempre usando dados experimentais.

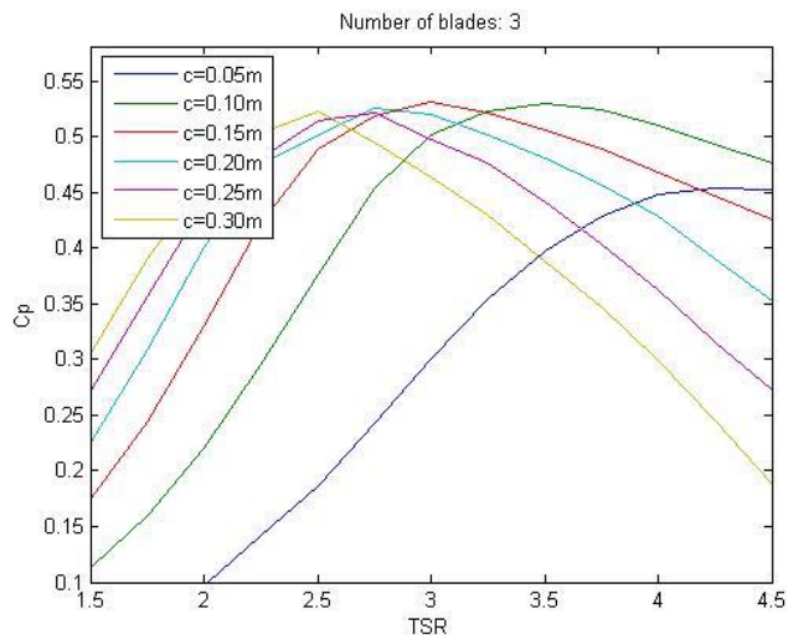
1.2.5 Trabalhos no Período de 2010 a 2015

Biadgo et al. (2013) realizou uma pesquisa sobre o progresso alcançado no desenvolvimento dos modelos aerodinâmicos para o estudo de turbinas eólicas de eixo vertical, com maior ênfase sobre as aproximações que usam “*Streamtubes*”. Foi feita uma investigação numérica e analítica em uma TEEV de pás retas usando o perfil NACA0012. A simulação numérica foi realizada para um modelo bidimensional da mesma turbina usando programa o ANSYS FLUENT. Por fim, foi realizada uma comparação entre os resultados analíticos obtidos usando o “*Double Multiple Streamtube*” e o resultado numérico da Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC). Ambos resultados mostraram potências negativas ou muito pequenas para baixas rotações, o que implica que o perfil NACA0012 é incapaz de iniciar o giro por si só.

Brinck e Jeremejeff (2013), desenvolveram uma turbina de eixo vertical para ser

aplicada em correntes marítimas. O trabalho propôs o projeto de uma TEEV do tipo Darrieus de pás retas com dois metros de diâmetro e quatro metros de altura. Foi criado um programa em Matlab para testar e realizar o processo de otimização. No programa, foi aplicado o modelo “*Double Multiple Streamtubes*”. Os dados das características dos hidrofólios utilizados nas simulações foram retirados de tabelas disponíveis no *Airfoil Tools*, que é uma base de dados online e contém dados de mais de 1600 perfis diferentes que são produzidos usando o software XFOIL ([AIRFOILTOOLS, 2016b](#)). O estudo inclui a realização de simulações de quatro hidrofólios: NACA0012, S1046, S1210 e E216 sendo que os dois primeiros são simétricos e os dois últimos assimétricos. Vários parâmetros foram estudados para cada um dos quatro perfis e diferentes números de pás. As simulações com turbinas de duas pás e com o perfil S1046 foram as que mostraram os maiores valores de potência, porém não apresentaram bons resultados quando havia torques negativos. Sendo assim, a condição considerada ideal foi atingida com a simulação de turbina de três pás e hidrofólio S1046. As simulações do programa apresentaram bons resultados para os perfis simétricos, porém falhou a convergência para os perfis assimétricos. A Figura 14 mostra os resultados obtidos na simulação para o perfil S-1046 para uma turbina de três pás.

Figura 14 – Curva do coeficiente de potência para o perfil S-1046 para vários valores de corda.



Fonte: [Brinck e Jeremejeff \(2013\)](#).

No trabalho de [Bianchini, Ferrara e Ferrari \(2015\)](#), são apresentadas diretrizes para otimizar o projeto de TEEV do tipo Darrieus com o objetivo de obter um maior rendimento anual. Com um aumento na popularidade das TEEV no mercado da energia eólica, os fabricantes estão sempre procurando formas de aumentar a potência máxima produzida pelas turbinas para promover suas vendas. Porém, as condições reais de operação das

turbinas podem variar durante o ano e a potência depende de onde a turbina é instalada. Tendo isso em mente, uma otimização orientada para uma maior geração de energia anual seria mais interessante que para a potência máxima. O trabalho mostra o teste de 21.600 rotores do tipo Darrieus comparando suas capacidades de produções anuais. As distribuições dos ventos foram combinadas com as previsões de potência dos rotores obtidos com um programa desenvolvido com base no modelo “*Blade Element Momentum*”. A análise mostrou quais configurações aerodinâmicas eram capazes de fornecer a maior produção anual de energia.

Elkhoury, Kiwata e Aoun (2015) realizaram uma avaliação numérica e experimental de uma turbina de eixo vertical do tipo Darrieus de pás retas com passo variável. O estudo mostrou a combinação de uma investigação numérica e experimental da potência de turbinas pequenas. Foram realizadas simulações numéricas tridimensionais e testes em túnel de vento. Os efeitos da velocidade do vento, intensidade da turbulência e formato do aerofólio foram examinados, assim como a precisão dos modelos.

Nessa década, houve uma continuação na pesquisa e estimativa do desempenho das turbinas eólicas de eixo vertical. Nota-se que os trabalhos conseguem obter resultados de simulações com sucesso não apenas usando dados experimentais, mas também dados obtidos por simulações. Observa-se, porém, que existem problemas de convergência em algumas das simulações.

1.3 Objetivos

Com base na Revisão Bibliográfica realizada, observa-se que existe uma forte inclinação aos trabalhos numéricos ou ferramentas de projetos que sejam embasados em trabalhos experimentais ou modelos experimentais de verificação e validação. Por meio da mesma, verifica-se que:

- Ainda são poucos os trabalhos publicados na área das TEEV;
- Modelos computacionais, baseados no método dos volumes finitos, e medições experimentais em túnel de vento podem ser demorados e de alto custo, sendo que rapidez e robustez na avaliação de desempenho são um dos principais itens requeridos para procedimentos eficazes no projeto de turbinas
- Alguns trabalhos, apesar de obter bons resultados usando modelos baseados na teoria *Blade Element Momentum*, apresentaram problemas de convergência nas simulações;

Com base nos pontos mencionados acima, são apresentados a seguir os objetivos gerais e específicos do trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma metodologia que garanta a convergência de simulações utilizando o modelo *Blade Element Momentum* aplicados à análise de desempenho de Turbinas Eólicas de Eixo Vertical .

1.3.2 Objetivos Específicos

Foram definidos os seguintes objetivos específicos para o presente trabalho:

- Desenvolver um programa computacional, FASTEEVSIM, escrito em FORTRAN para avaliação do desempenho de TEEV com diferentes perfis de aerofólios, usando o modelo *Double Multiple Streamtube* e usando o programa XFOIL para obter as características aerodinâmicas dos perfis aerofólios;
- Desenvolver metodologia para garantir a convergência nas simulações das TEEV usando o programa FASTEEVSIM descrito acima, com o intuito de reduzir os problemas de convergência encontrados nas simulações computacionais de turbinas eólicas de eixo vertical;

1.3.3 Escopo do Trabalho

No próximo capítulo, o desenvolvimento do programa FASTEEVSIM é apresentado. Primeiramente é mostrada a configuração do programa para variação do ângulo de ataque dos perfis aerofólios. Em seguida, é mostrado o desenvolvimento do programa para análise aerodinâmica das TEEV, assim como a metodologia criada para garantir a convergência das simulações. Os aspectos que levaram à elaboração da metodologia da garantia de convergência das simulações também são abordados no Capítulo 2.

No Capítulo 3, a validação dos resultados obtidos com o FASTEEVSIM através da comparação com resultados experimentais de fontes da literatura e a discussão sobre os mesmos é apresentada. Testes de uma TEEV do tipo H-Darrieus com três pás retas para dois perfis aerofólios diferentes usando o programa desenvolvido são apresentados. Para validar os resultados, os dados obtidos com o FASTEEVSIM foram comparados com dados obtidos experimentalmente em túnel de vento, mostrando que o programa é rápido e robusto na obtenção dos resultados. É mostrada, também, uma análise comparativa entre os dois perfis simulados: NACA0018 e DU06W200.

Por último, no Capítulo 4, as conclusões do trabalho são apresentadas. Neste capítulo são apontados os pontos positivos do programa e da metodologia de garantia de convergência desenvolvida e o que deve ser melhorado. São apresentadas, também, as sugestões para os trabalhos futuros.

2 Materiais e Métodos

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento do presente trabalho, assim como o equacionamento aplicado.

Como apresentado na revisão bibliográfica, o modelo BEM teve origem a partir da teoria do Elemento de Pá, inicialmente desenvolvida por William Froude. O modelo calcula a potência da turbina através de uma estimativa do momento que é transferido do fluido para a pá enquanto o fluido atravessa a turbina. As teorias de estimativa de como a turbina afeta o fluido e de como o fluido afeta a turbina podem ser combinadas para criar uma solução através de um processo iterativo (BRINCK; JEREMEJEFF, 2013).

O modelo “*Blade Element Momentum*”, usado no presente trabalho, foi resultado de uma evolução de teorias durante os anos. Essa evolução permitiu um aumento na precisão dos resultados. Assim, teorias apresentadas nos trabalhos de Claessens (2006), Ponta, Seminara e Otero (2007), Brinck e Jeremejeff (2013), Biadgo et al. (2013) foram utilizadas como base para as simulações realizadas.

2.1.1 Potência do Vento

O desempenho de uma turbina eólica é determinado pela quantidade de energia que ela consegue extrair do vento. E para que seja possível calcular esse desempenho, é preciso descobrir a quantidade de energia disponível no vento.

A energia cinética de uma massa de ar (m) se movendo a uma velocidade (V) pode ser expressa como:

$$E_c = \frac{1}{2}mV^2 \quad (2.1)$$

Considerando a área transversal da turbina (A), pela qual uma massa de ar passa com uma velocidade V por um certo tempo, chamado fluxo de massa ($\dot{m}$), é dado pela Equação 2.2.

$$\dot{m} = \rho VA \quad (2.2)$$

Em que ρ é a densidade do ar.

A energia cinética contida nessa massa de ar por unidade de tempo é fisicamente igual a potência. Sendo assim, a potência do vento disponível em uma seção transversal de área A é:

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.3)$$

A eficiência da turbina, como mostrado na seção 1.1.2, pode ser avaliada através do coeficiente de potência C_p (Equação 1.3), que é a razão entre potência que a turbina consegue extrair do vento e a potência do vento.

2.1.2 Aerodinâmica do Rotor

Como mostrado na revisão bibliográfica, a teoria BEM é capaz de descrever a dinâmica do escoamento de ar pela turbina. Além disso, é importante saber como a interação entre o fluido e a turbina afetam a estrutura e os componentes da mesma.

Apesar de serem construtivamente mais simples, as pás das TEEV possuem uma interação complexa com o vento quando comparadas às TEEH. Isso se deve às grandes variações do ângulo de ataque da pá em funcionamento, ver Figura 15, fazendo com que cada pá receba o vento de forma diferente para cada instante de tempo, o que não acontece nas TEEH.

O valor da velocidade relativa (W), assim como do ângulo de ataque (α) (ângulo formado entre a velocidade relativa (W) e a linha central da pá) podem ser obtidos facilmente em função do ângulo (θ), através da soma dos vetores da velocidade (V_l) e da velocidade de rotação ($R\omega$).

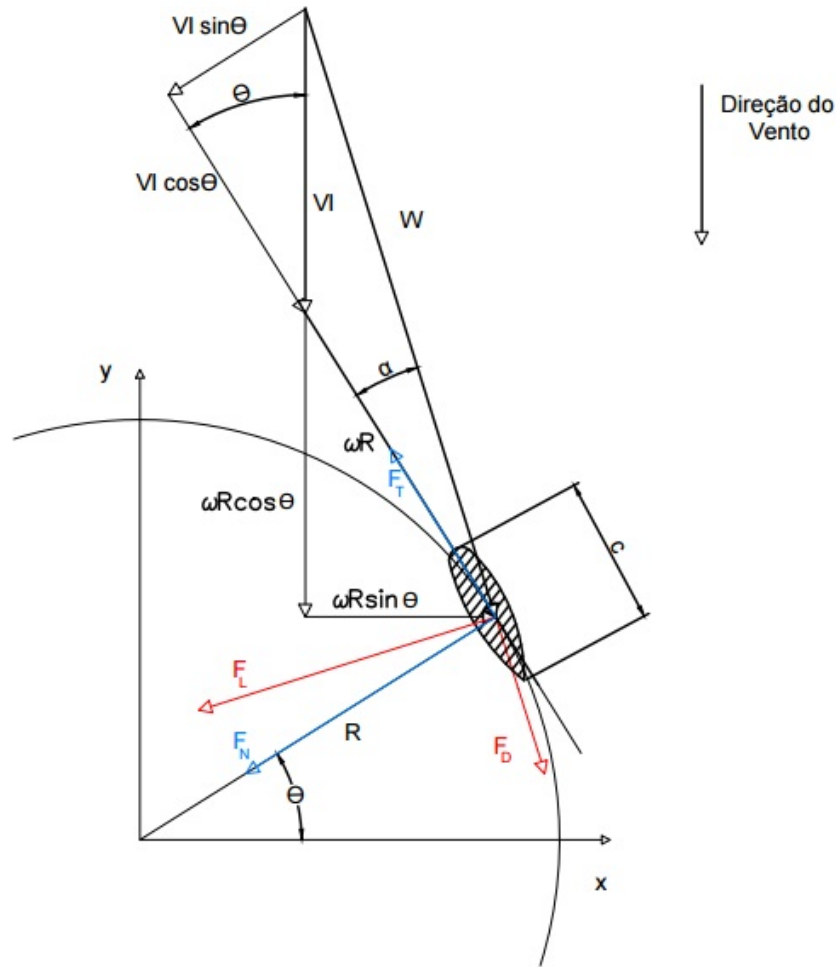
Um dos maiores desafios das TEEV é a grande variação do ângulo de ataque, a qual a pá é submetida. Para pequenas rotações, o valor máximo de ângulo de ataque alcançado é muito elevado. Grandes ângulos de ataque resultam em perda de sustentação e, por conseguinte, perda de torque. Com o aumento da velocidade de rotação, o ângulo de ataque máximo diminui. Assim, quanto maior for a velocidade específica na ponta da pá (λ), menor será a variação do ângulo de ataque, resultando em um maior torque. Portanto, a turbina, ao começar a sua rotação, experimenta grandes variações do ângulo de ataque e, consequentemente, pequenos torques iniciais serão conseguidos.

O ângulo de ataque (α) e a velocidade relativa (W) são dados, respectivamente, por:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta) + \lambda} \right) \quad (2.4)$$

$$W = \sqrt{(V_l \sin(\theta))^2 + (V_l \cos(\theta) + \omega R)^2} \quad (2.5)$$

Figura 15 – Esquema de forças e ângulos em uma TEEV vista de cima.



Fonte: o Autor (2016).

As forças geradas pelo escoamento, assim como a totalidade dos escoamentos sobre o aerofólio, em mecânica dos fluidos dependem do número de Reynolds. O número de Reynolds é um número adimensional usado para caracterizar o regime de escoamento, sendo ele laminar ou turbulento, escrito como:

$$Re = \frac{\rho W c}{\mu} \quad (2.6)$$

Já o Número de Mach é um número adimensional definido como a razão entre a velocidade do escoamento e a velocidade do som no meio, nesse caso de 340m/s, em que:

$$Mach = \frac{W}{340} \quad (2.7)$$

Da Figura 15, os coeficientes das forças tangenciais e normais que agem sobre a pá são expressas como:

$$C_t = C_L \sin(\alpha) - C_D \cos(\alpha) \quad (2.8)$$

$$C_n = C_L \cos(\alpha) + C_D \sin(\alpha) \quad (2.9)$$

As forças podem ser determinadas pelas equações:

$$F_t = \frac{1}{2} \rho W^2 H c C_t \quad (2.10)$$

$$F_n = \frac{1}{2} \rho W^2 H c C_n \quad (2.11)$$

A fração da força que age na direção do vento pode ser expressa para cada posição θ da turbina. Essa força instantânea pode ser representada pela Equação 2.12.

$$F_y = F_t \cos \theta - F_n \sin \theta \quad (2.12)$$

Essa fração também pode ser expressa em função dos coeficientes:

$$C_y = C_t \cos \theta - C_n \sin \theta \quad (2.13)$$

O torque instantâneo para cada pá individualmente em cada posição θ é expresso pela Equação 2.14.

$$T = F_t R \quad (2.14)$$

O valor médio do torque das três pás em toda a volta da turbina e a potência extraída do vento pela turbina podem ser expressos pelas equações 2.15 e 2.16 respectivamente.

$$T_{medio} = \sum F_t \frac{NR \Delta \theta}{2\pi} \quad (2.15)$$

$$P_{extraida} = T_{medio} \omega \quad (2.16)$$

Em que N é o número de pás da turbina.

A equação do Coeficiente de Potência (C_P) pode ser representada da seguinte maneira:

$$C_P = \frac{N \omega C_t \Delta \theta}{4\pi V_{inf}^2} \sum (u^2 \sin^2(\theta) + u \cos(\theta) + \frac{\lambda_o}{u F C}) \quad (2.17)$$

Os principais métodos de cálculo para a obtenção do valor do torque e dos coeficientes de sustentação foram mostrados na Revisão Bibliográfica. O modelo *Double Multiple Streamtubes* foi adotado por ser o modelo mais completo e preciso. A seguir são apresentadas as metodologias utilizadas para a criação do código FASTEEVSIM para a obtenção dos coeficientes de desempenho e da curva de potência das turbinas, assim como a metodologia desenvolvida para garantir a convergência da simulação.

2.2 Programa FASTEEVSIM para Variação do Ângulo de Ataque

O cálculo das forças de arrasto e sustentação, abordados na seção 1.1.1, são de grande importância para a análise das turbinas. Os valores dos coeficientes dessas forças podem ser obtidos experimentalmente ou através de tabelas¹, com esses dados disponíveis para várias condições de ventos. Existem, também, programas como o XFOIL capazes de fornecer esses valores para diferentes condições de ventos e ângulos de ataques fornecidos.

Um dos maiores desafios na análise aerodinâmica das turbinas eólicas de eixo vertical se deve ao fato de que as pás são submetidas a uma larga variedade de ângulos de ataques. Isto torna o processo de simulação de perfis no XFOIL trabalhoso e demorado, pois o mesmo faz apenas uma simulação por vez.

Neste trabalho, foi desenvolvido um programa escrito em Fortran, chamado FASTEEVSIM, no qual uma das funções (com algumas configurações no código do programa) é obter os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação através da execução automática do programa XFOIL. Dessa maneira, a simulação se torna mais rápida e os resultados mais precisos que os fornecidos por interpolações de tabelas.

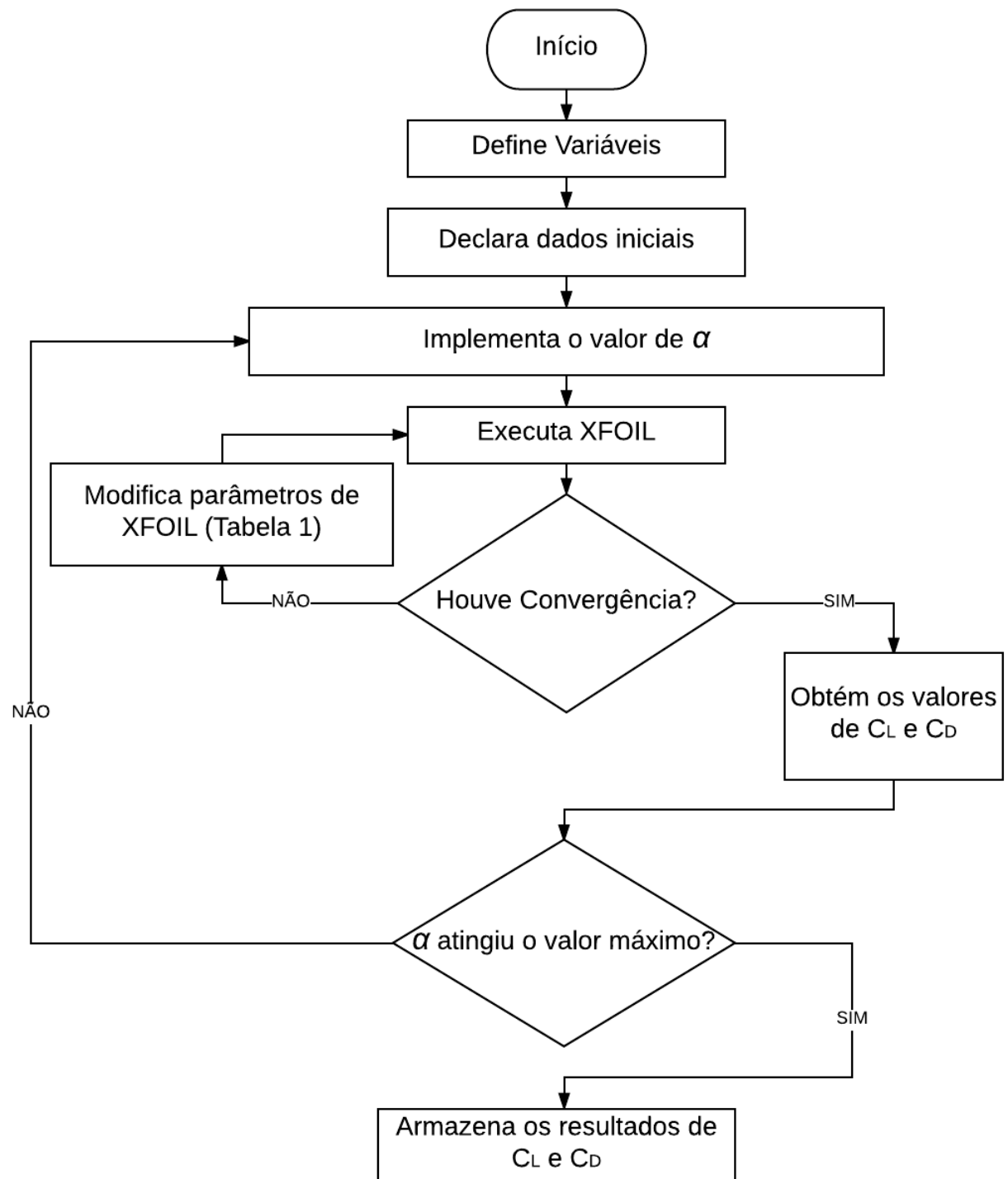
O programa desenvolvido para executar o XFOIL e obter os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação automaticamente segue a sequência mostrada no fluxograma apresentado na Figura 16. O programa funciona de modo a automatizar o processo de simulação do XFOIL.

Primeiramente, são definidos os parâmetros e valores nos quais se deseja realizar a simulação. Depois os valores dos coeficientes de arrasto e de sustentação são obtidos para os vários ângulos de ataque. Caso não haja convergência para determinada situação, o programa automaticamente modifica os parâmetros do XFOIL até convergir. As modificações são mostradas na Tabela 1.

O parâmetros do XFOIL que são modificados no caso de não haver convergência são relacionados à quantidade e forma com que os pontos do contorno do formato do perfil

¹ As tabelas com os dados das características aerodinâmicas de vários perfis aerofólios com diferentes condições de ventos e ângulos de ataque estão disponíveis em: <http://airfoiltools.com/>.

Figura 16 – Fluxograma do esquema de funcionamento do programa para execução automática do XFOIL.



Fonte: o Autor (2016).

são considerados na simulação. O ppan é o parâmetro de deformação dos pontos e τ é a taxa de densidade de pontos no contorno do perfil. A Figura 17 mostra a malha do

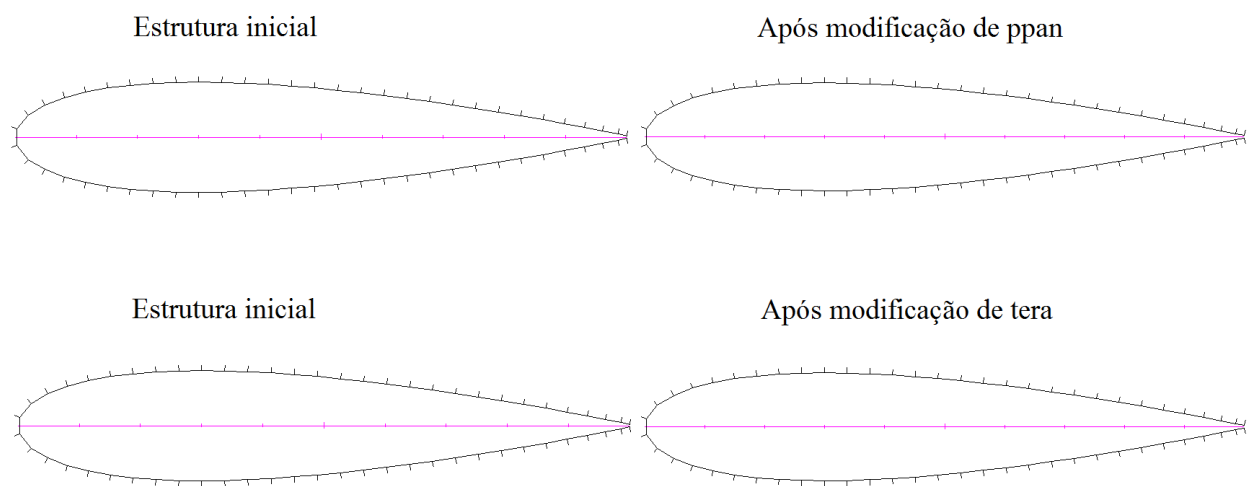
Tabela 1 – Modificação dos parâmetros do XFOIL.

Parâmetro	Modificação
ppan	ppan x 1,06
tera	tera x 0,96

Fonte: o Autor (2016).

perfil antes e depois dos parâmetros serem modificados. As modificações são mínimas e praticamente imperceptíveis visualmente.

Figura 17 – Estrutura do perfil antes e após a modificação dos parâmetros do XFOIL.



Fonte: o Autor (2016).

Quando a convergência é obtida, o valor do ângulo de ataque (α) é incrementado e o procedimento é repetido até o que o valor máximo do ângulo de ataque desejado seja alcançado. Ao fim, quando se obtém todos os valores de C_L e C_D para a variedade de ângulos de ataque estabelecidos, os resultados são armazenados.

Para validar os dados obtidos através das simulações do XFOIL, os perfis NACA0018 e DU 06W200 foram testados em diferentes condições de vento e os resultados comparados a dados experimentais de [Claessens \(2006\)](#) que serão apresentados no próximo capítulo.

2.3 Programa FASTEEVSIM para Análise Aerodinâmica de TEEV

Os modelos baseados no BEM mostrados na Revisão Bibliográfica são usados para calcular o desempenho de TEEV em duas dimensões. Pode, também, ser determinado por testes em túnel de vento, porém essa não é uma opção viável na fase de projeto, uma

vez que esses testes são de alto custo. Além disso, fabricar um modelo para cada perfil de pá que se deseja testar é economicamente inviável e consome muito tempo. A análise de turbinas utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional também demanda bastante tempo de simulação. Tendo isto em mente, o programa FASTEEVSIM foi adaptado para o cálculo do desempenho de TEEV de forma rápida e simples.

O FASTEEVSIM foi adaptado usando como base o modelo *Double Multiple Streamtube*. A Figura 18 mostra o fluxograma de funcionamento do programa. Primeiramente, são definidas as variáveis, os parâmetros e valores iniciais no quais se deseja realizar a simulação. Define-se também, o número de *streamtubes*, sendo que, esse número de *streamtubes* influencia na precisão dos resultados e no tempo de simulação. De acordo com o número escolhido, são definidas as posições θ da pá nas quais os cálculos são realizados.

O ângulo de ataque (α), a velocidade relativa (W) e o número de Reynolds são calculados para cada posição θ da pá usando as Equações 2.4, 2.5 e 2.6. Na sequência, os valores de C_L e C_D são obtidos usando a execução automática do programa XFOIL. Caso não haja convergência para determinada situação, o FASTEEVSIM automaticamente modifica os parâmetros do XFOIL até convergir. Maiores detalhes sobre o programa XFOIL são apresentados no Apêndice A.

Após a obtenção dos valores de C_L e C_D , a interferência é calculada. Para o cálculo da interferência, a Equação 1.31 é utilizada, lembrando que o valor de FC é diferente para o lado frontal ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$) e o posterior ($180^\circ < \theta < 360^\circ$) da turbina. Para resolver a função, foi usado o método de Newton-Raphson.

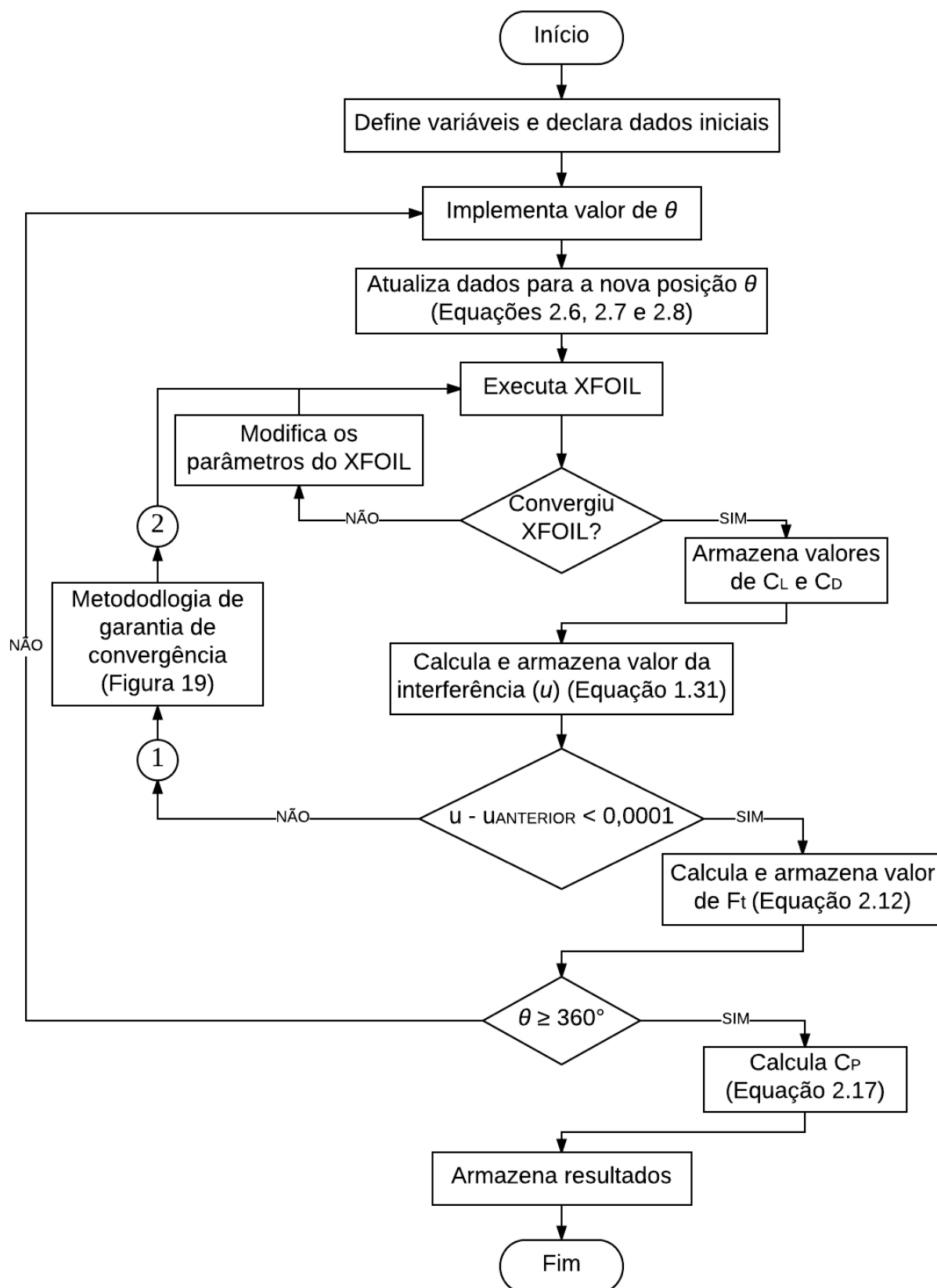
A iteração continua com a atualização dos valores dos coeficientes de desempenho e de interferência até convergir para uma solução com uma margem de erro determinada. Para as simulações realizadas neste trabalho, a margem utilizada foi de 0,0001.

Observou-se que, em alguns casos, a simulação converge para duas soluções diferentes. Tais problemas de convergência também foram relatados por outros trabalhos pesquisados (BRINCK; JEREMEJEFF, 2013) (CLAESSENS, 2006), como mostrado na Revisão Bibliográfica.

A ocorrência de duas soluções serem encontradas, ao invés de uma, pode ser explicada pelo fato da equação da interferência (Equação 1.31) ser de segunda ordem. Quando o programa converge para duas soluções, o valor do erro se mantém igual, o que faz com que o programa continue iterando infinitamente.

Com o intuito de solucionar tais problemas foi desenvolvida uma metodologia para garantir convergência da simulação. Várias simulações foram realizadas e os dados das simulações em que os problemas de convergência ocorreram foram salvos e analisados para a obtenção de uma solução que é apresentada no que segue.

Figura 18 – Fluxograma de funcionamento do FASTEEVSIM.

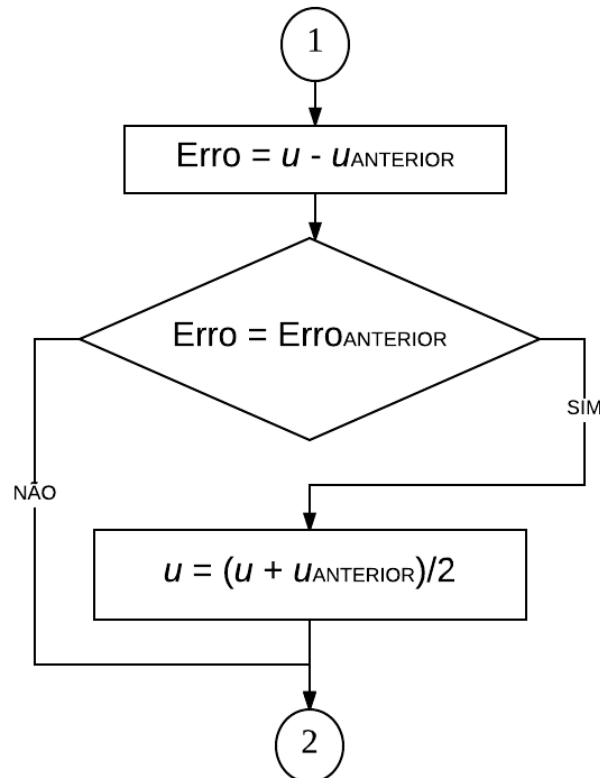


Fonte: o Autor (2016).

2.3.1 Metodologia para Garantir a Convergência da Simulação

Com o intuito de solucionar os problemas e garantir a convergência da simulação, foi desenvolvida a metodologia representada no fluxograma da Figura 19. Esta metodologia consiste na escolha do valor médio sempre que o programa convergir para duas soluções diferentes.

Figura 19 – Fluxograma para garantir a convergência da simulação.



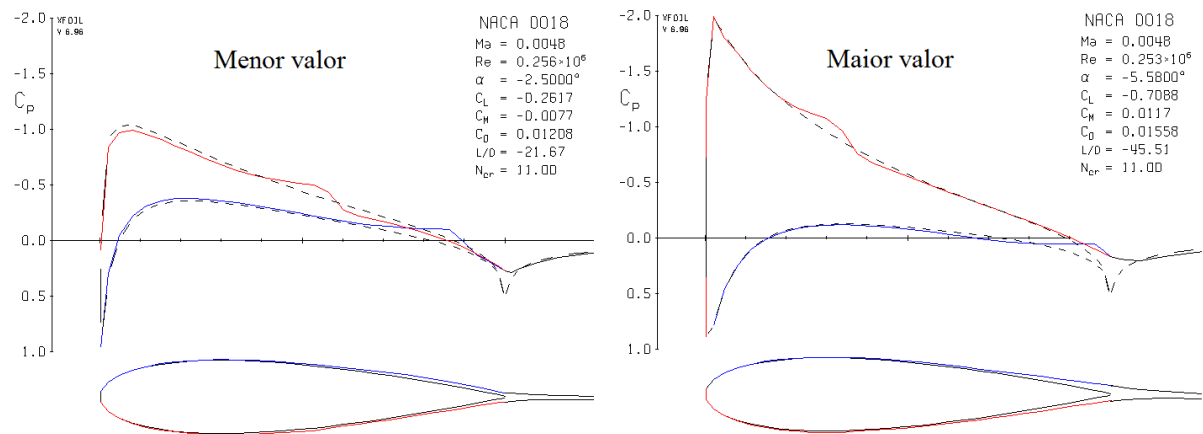
Fonte: o Autor (2016).

O programa apresentou, de modo geral, uma boa convergência. Porém, para alguns valores de $\lambda > 3$, a simulação convergiu para duas soluções diferentes. Nestes casos, a metodologia de garantia da convergência foi utilizada.

A Figura 20 mostra um exemplo de duas soluções atingidas para um $\theta = 255^\circ$. Nesses casos de solução dupla, o valor médio entre os dois resultados é escolhido, uma vez que foi observada a tendência de convergência para esse valor. As Figuras 21 e 22 mostram os gráficos do fator de interferência e força resultante que age nas pás na direção da rotação (F_t), respectivamente, em que são mostrados os dois valores aos quais o programa converge e o valor médio que foi adotado para estabilizar a solução e, conseqüentemente, garantir a convergência.

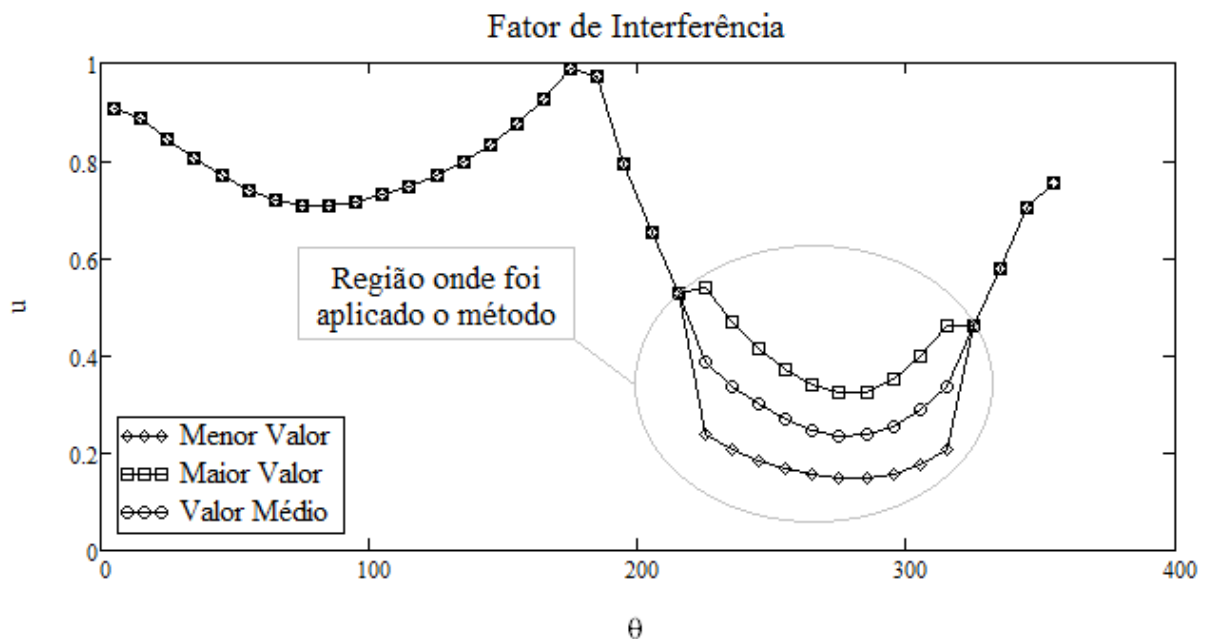
A Figura 23 mostra o gráfico do ângulo de ataque versus posição da pá. Quando a

Figura 20 – Resultado de simulação no XFOIL.



Fonte: o Autor (2016).

Figura 21 – Gráfico do fator de interferência.



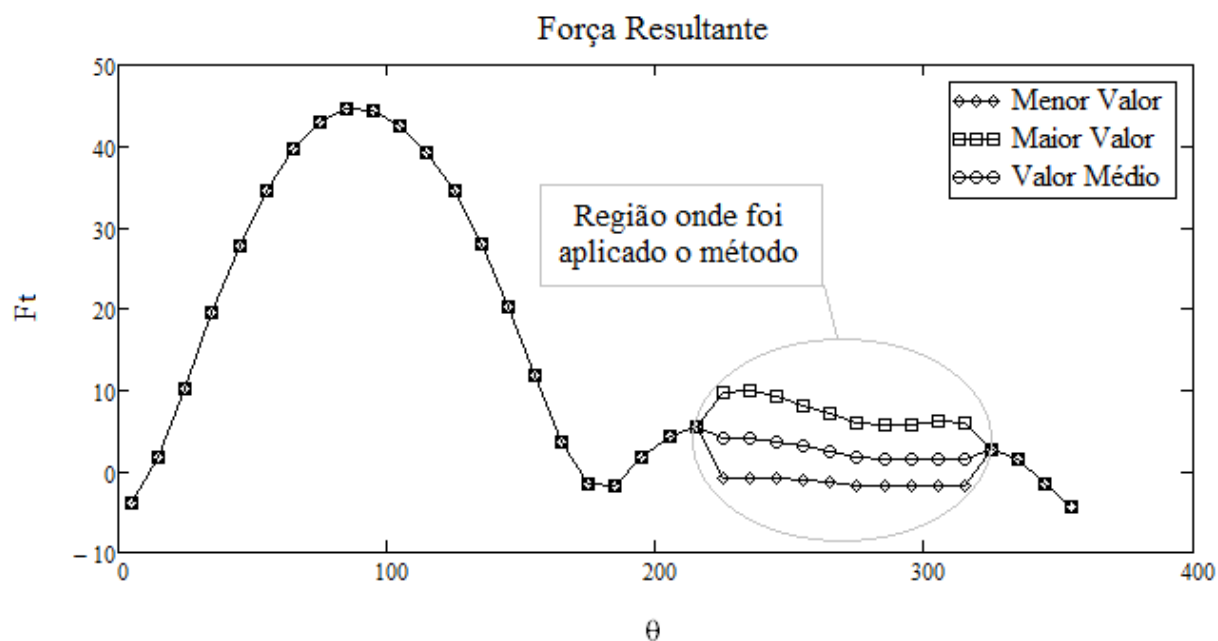
Fonte: o Autor (2016).

turbina começa a girar e tem uma rotação baixa, o ângulo de ataque atinge valores altos que diminuem com o aumento da rotação e da velocidade de ponta de pá.

Na Figura 24, pode-se visualizar como o fator de interferência se comporta em todas as posições das pás. Em ambos os lados da turbina, o vento sofre interferência, sendo que a jusante a interferência é ainda maior, uma vez que sofre a interferência da primeira parte da turbina.

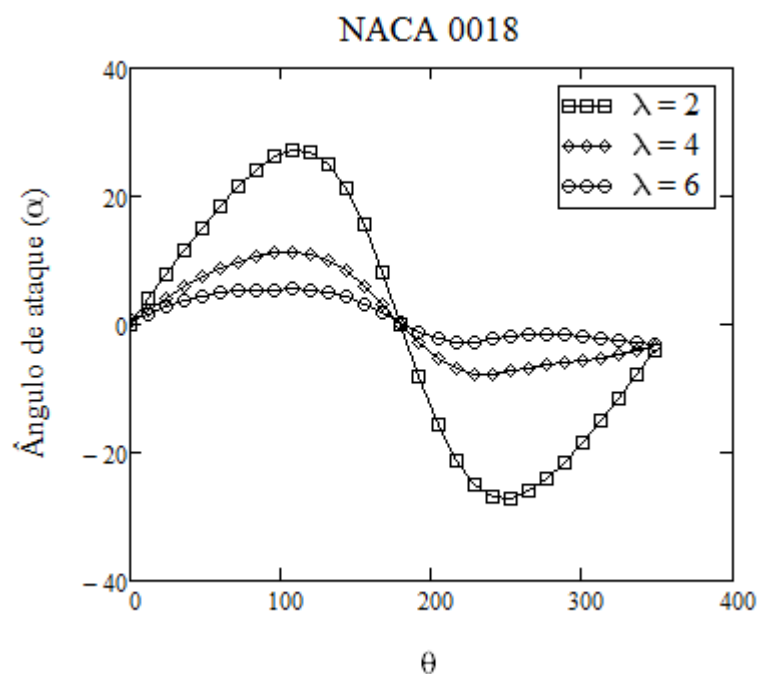
Nas figuras apresentadas, quando a convergência não é atingida, nota-se que existe

Figura 22 – Gráfico da força resultante.



Fonte: o Autor (2016).

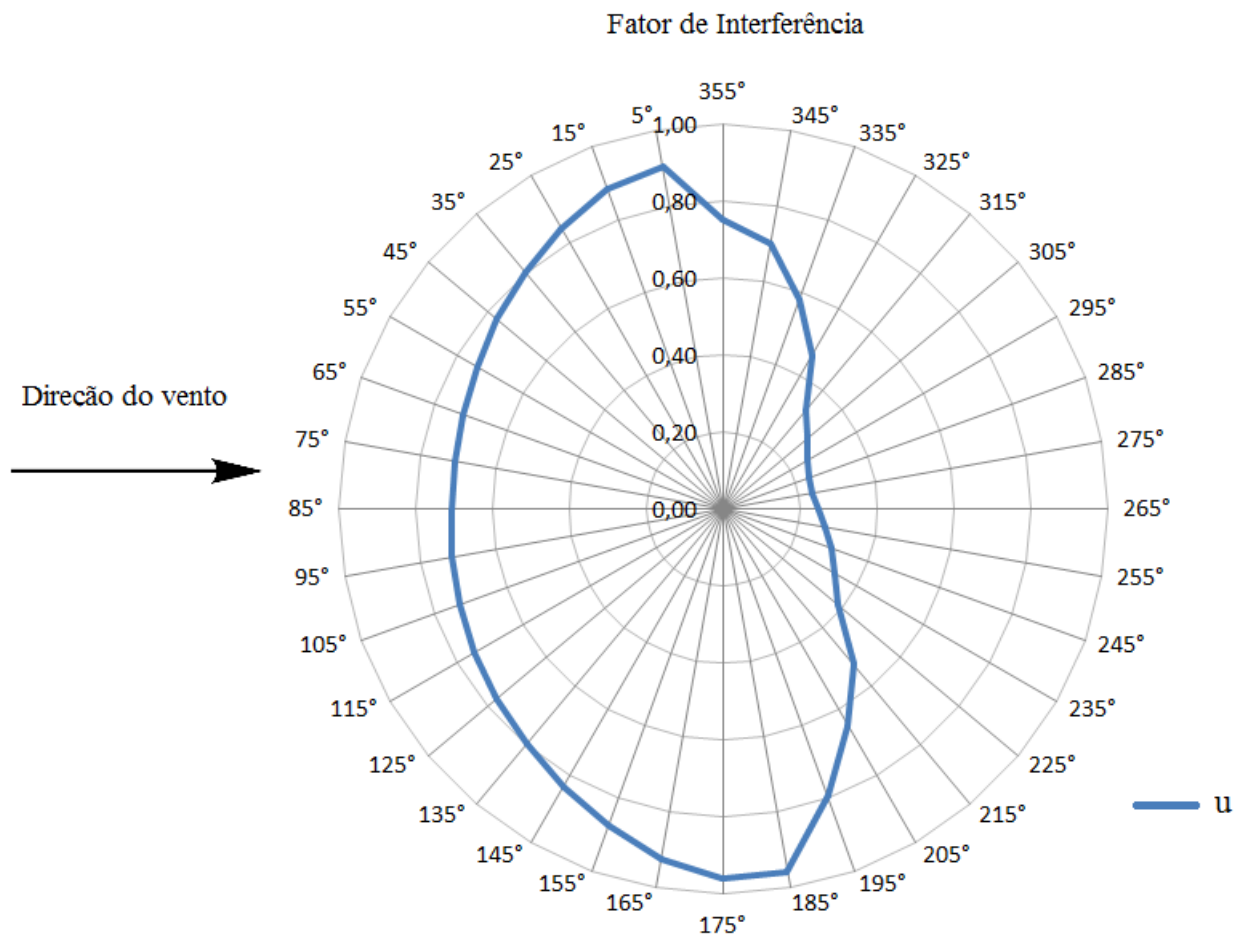
Figura 23 – Ângulo de ataque versus teta.



Fonte: o Autor (2016).

uma tendência da solução para um valor intermediário. Sendo assim, sempre que o problema ocorrer e duas soluções forem obtidas, o programa automaticamente escolhe o valor médio entre as duas interferências encontradas.

Figura 24 – Gráfico do Fator de Interferência.



Fonte: o Autor (2016).

Caso o problema de solução dupla não ocorra, a iteração continua até que um erro mínimo admitido seja atingido. Quando tal valor é atingido, o valor de interferência (u) encontrado é armazenado.

Depois da obtenção dos valores de C_L , C_D e u , os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação são usados para calcular a fração da força que age na pá na direção da rotação. A partir daí, o torque é obtido usando a Equação 2.14.

O mesmo procedimento é aplicado para cada *streamtube* até que a pá tenha realizado uma volta completa da turbina ($\theta = 360^\circ$). Em seguida, são calculados o valor médio do torque das três pás em toda a volta da turbina e a potência extraída do vento pela turbina, usando Equações 2.15 e 2.16.

Por fim, com o valor da potência extraída, é possível obter o coeficiente de potência C_P (Equação 2.17).

Para validar os resultados do FASTEEVSIM, os mesmos foram comparados a resultados experimentais apresentados nos trabalhos de [Claessens \(2006\)](#).

2.3.2 Definição do Número de *Streamtubes*

Uma das escolhas que tiveram que ser feitas durante o trabalho foi com relação ao número de *streamtubes*. Quanto maior for o número de *streamtubes*, maior a precisão dos resultados obtidos. Porém, um número muito alto pode tornar a simulação demorada. Sendo assim, deve-se escolher um número que não torne o processo demorado ao mesmo tempo que não prejudique a precisão do modelo.

Outro aspecto que deve ser observado na escolha no número de *streamtubes* é que o ângulo $\theta = 0^\circ$ deve ser evitado. Isto se deve ao fato de que o $\sin(\theta) = 0$ nesse ângulo, o que faria com que nenhuma solução fosse encontrada para a Equação 1.31 e (u) fosse aumentado infinitamente. Para evitar que isso ocorra, a posição inicial usada foi $\theta = 5^\circ$ e o passo $\Delta\theta = 10^\circ$, ou seja, 36 *streamtubes* foram usadas ([BRINCK; JEREMEJEFF, 2013](#)).

2.3.3 Escolha dos Perfis Aerofólios para Simulações

Uma escolha fundamental no projeto de qualquer turbina eólica é a do perfil aerofólio. Existem vários modelos de perfis, cada um com características diferentes que os tornam mais apropriados a determinados tipos de aplicação. As principais características da turbina utilizada na maior parte das simulações é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações da geometria e operação da turbina.

Altura	3m
Raio	1m
Número de pás	3
Velocidade do vento	10m/s

Fonte: O Autor (2016)

Neste trabalho, dois aerofólios diferentes foram testados na turbina acima: o NACA0018 e o DU06W200. Estes perfis foram escolhidos devido à grande quantidade de resultados na literatura, o que possibilita validação do presente programa. Além disso, um perfil é simétrico e o outro é assimétrico, o que permite observar como o programa se comporta em ambas as situações.

O NACA0018 é um dos perfis mais comuns e muito utilizados em TEEV. Este é um aerofólio simétrico com 18% de espessura a 30% da corda (Figura 25).

O NACA0018 faz parte de uma série de aerofólios desenvolvidos pelo comitê de aeronáutica americano, o *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA). Antes desses perfis serem criados, o formato dos mesmos era arbitrário, com nada para guiar o

Figura 25 – Aerofólio NACA0018.

Fonte: [AirfoilTools](#) (2016b)

projetista a não ser os experimentos passados com formatos conhecidos. Isso começou a mudar com o trabalho de [Jacobs, Ward e Pinkerton \(1933\)](#), que notaram várias semelhanças entre os perfis que apresentavam melhores características. A partir disso, foi apresentada uma série de equações que poderiam ser usadas para gerar famílias inteiras de perfis aerofólios. Com a sofisticação dos projetos, esta abordagem básica foi modificada para incluir vários perfis adicionais que foram usados no desenvolvimento de todas as séries de aerofólios NACA.

Figura 26 – Aerofólio DU 06-W-200.

Fonte: [AirfoilTools](#) (2016a)

O segundo perfil utilizado, o DU06W200, foi desenvolvido por [Claessens \(2006\)](#) que fez um projeto reverso, escolhendo as características aerodinâmicas ideais e a partir delas chegando à geometria final do aerofólio. As melhorias foram efetuadas usando o perfil NACA0018 como base de referência. O DU06W200 é assimétrico e possui uma espessura de 20% e curvatura de 0,8% (Figura 26).

2.4 Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentada a metodologia de desenvolvimento do programa FASTEEVSIM. O programa é destinado a analisar turbinas eólicas de eixo vertical de maneira simples e rápida. Foi mostrado, também, o desenvolvimento de metodologia para solucionar os problemas de convergência das simulações de modo a garantir que uma solução seja atingida.

O FASTEEVSIM foi usado para prever o desempenho de uma TEEV usando qualquer perfil de pá. Os valores obtidos foram comparados com os de outros trabalhos. Os resultados das simulações, assim como as discussões sobre os mesmos, são apresentadas no capítulo a seguir.

3 Resultados e Discussões

3.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os resultados das simulações utilizando a metodologia apresentada na seção anterior. Primeiramente, é apresentada a validação dos resultados obtidos nas simulações utilizando o programa XFOIL para a variação do ângulo de ataque. Na sequência, são apresentados os resultados do FASTEEVSIM em uma comparação com resultados experimentais para validar os resultados obtidos na análise aerodinâmica de TEEV. As simulações foram realizadas para uma turbina eólica de eixo vertical do tipo H-Darrieus usando os perfis NACA0018 e DU06W200, apresentados na seção 2.3.3. Ao final, é apresentada uma análise comparativa entre os dois perfis simulados.

3.2 Validação do FASTEEVSIM para Variação do Ângulo de Ataque

Os perfis aerofólios NACA0018 e DU06W200 foram testados para três diferentes números de Reynolds, 300.000, 500.000 e 700.000, com o ângulo de ataque variando de -20° a 20° . Para cada número de Reynolds, foram testadas diferentes configurações dos parâmetros do XFOIL até chegar a resultados que se aproximassem ao máximo dos experimentais de [Claessens \(2006\)](#). A partir daí, adotou-se esta configuração que foi utilizada em todas as outras simulações.

Os resultados do XFOIL podem ser corrigidos para os resultados de túnel de vento através do ajuste o fator de amplificação chamado Ncrit. Este fator é a medida do crescimento de instabilidades na camada limite. O valor de Ncrit é o valor no qual o XFOIL decide que a camada limite se torna turbulenta. Através do ajuste desse valor, os resultados do XFOIL podem ser ajustados para diferentes níveis de turbulência para diferentes números de Reynolds. A tabela 3 mostra os valores típicos de Ncrit para várias situações. Nas simulações realizadas no presente trabalho, foi usado $N_{crit} = 12$ (túnel de vento limpo).

Os resultados experimentais apresentados por [Claessens \(2006\)](#) foram realizados em túnel de vento, onde foram usados 50 pontos de medição da pressão. O método utilizado teve boa precisão, com um erro de até 0,1 Pa. A seguir são apresentados os resultados das simulações e dos testes experimentais para os dois perfis.

Tabela 3 – Valores de N_{crit}

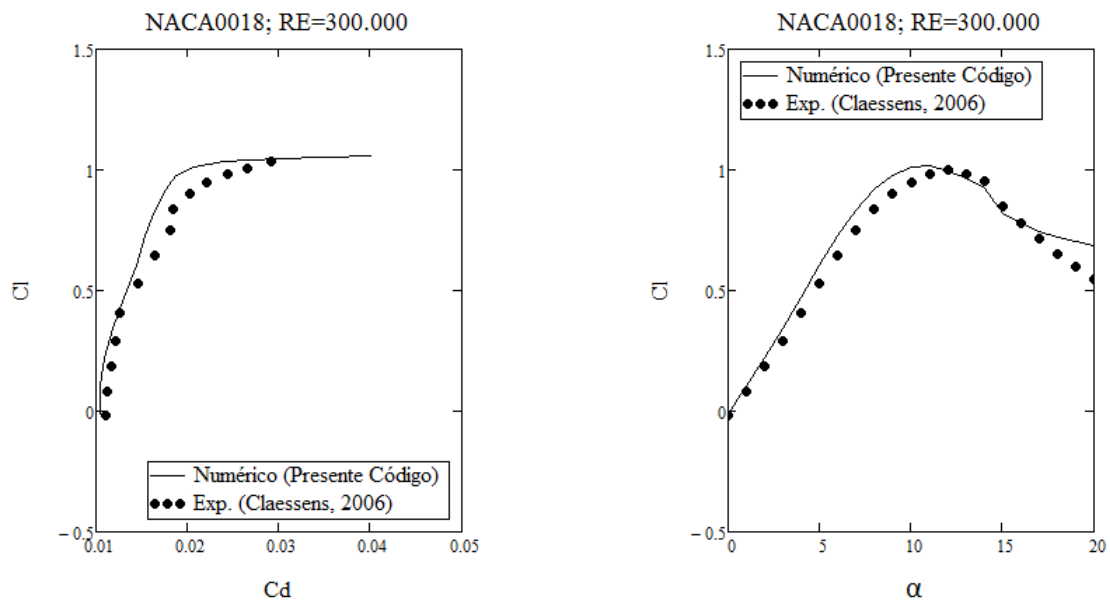
Situação	N_{crit}
Planador	12-14
Planador motorizado	11-13
Túnel de vento limpo	10-12
Túnel de vento padrão	9
Túnel de vento sujo	4-8

Fonte: [Drela e Youngren \(2001\)](#)

3.2.1 Variação do ângulo de ataque para o perfil NACA0018

O NACA0018 é um perfil simétrico, portanto os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação obtidos para os ângulos de ataque de 0° a -20° são idênticos ao obtidos para os ângulos de 0° a 20° , apenas invertendo o sinal. Sendo assim, não há necessidade de simulação para valores negativos.

Figura 27 – Coeficiente de sustentação versus coeficiente de arrasto e Coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque para o perfil NACA 0018 e Reynolds = 300.000.



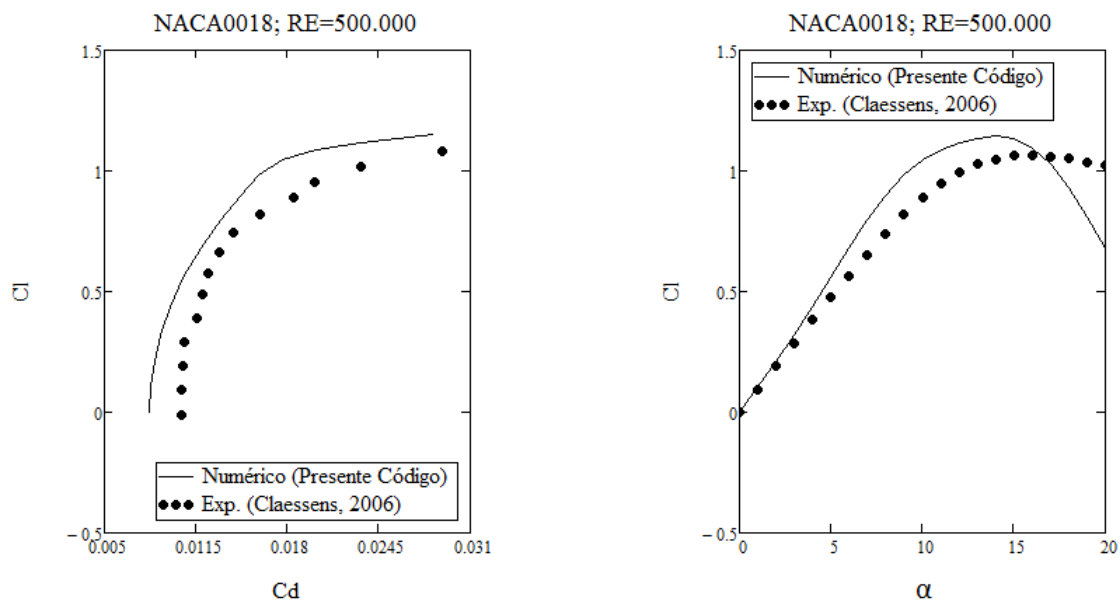
Fonte: o Autor (2016).

São apresentados na Figura 27, os gráficos comparativos dos resultados obtidos pelo FASTEEVSIM e resultados experimentais em túnel de vento de [Claessens \(2006\)](#) para o número de Reynolds igual a 300.000. Os gráficos apresentam curvas do coeficiente de sustentação versus coeficiente de arrasto e do coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque. Verifica-se que os resultados numéricos apresentaram uma boa aproximação quando comparados aos resultados experimentais.

No gráfico do coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque, observa-se que o coeficiente de sustentação não cresce indefinidamente com um aumento do ângulo de ataque. Existe um valor do ângulo de ataque, conhecido como ângulo crítico, no qual o coeficiente de sustentação atinge seu valor máximo. Ao atingir esse valor limite, ocorre o descolamento do fluxo de ar na parte superior do perfil, gerado pelo gradiente adverso de pressão. O fluido é forçado a ir de uma região de baixa pressão para uma região de alta pressão. Conforme o ângulo de ataque aumenta, o gradiente de pressão adverso também aumenta, e para um determinado valor do ângulo, ocorre a separação do escoamento no extradorso do perfil de maneira repentina. Quando o descolamento (*stall*) ocorre, o coeficiente de sustentação decresce drasticamente e o coeficiente de arrasto aumenta rapidamente.

O ângulo em que o coeficiente de sustentação começa a cair nos resultados experimentais é um pouco maior do que os apresentados pela simulação no caso de $Re = 300.000$. Apesar dessa pequena diferença, os dados têm boa aproximação.

Figura 28 – Coeficiente de sustentação versus coeficiente de arrasto e Coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque para o perfil NACA 0018 e Reynolds= 500.000.

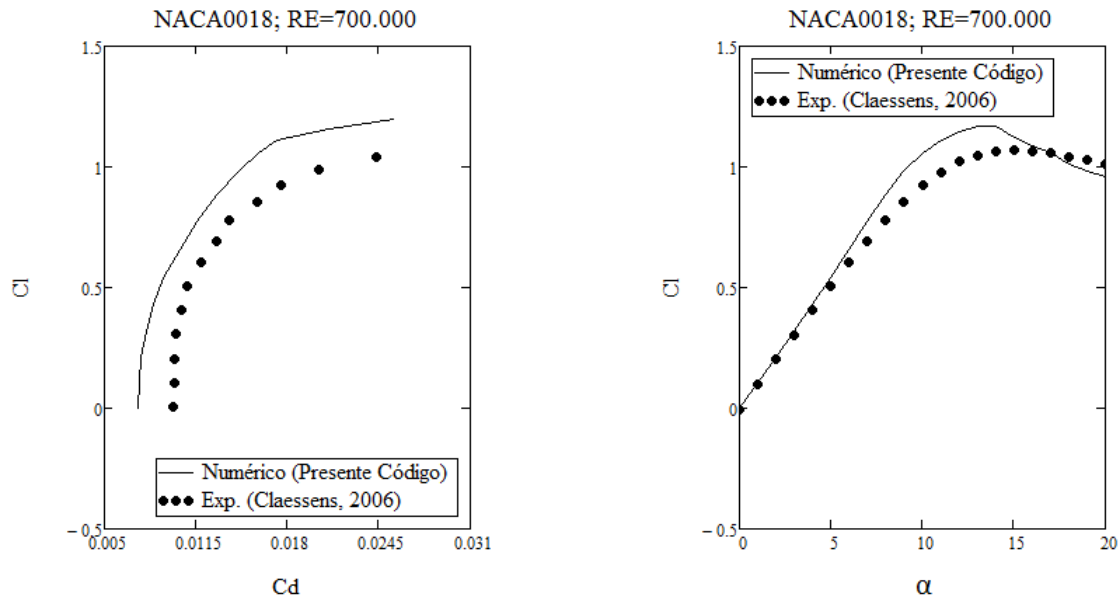


Fonte: o Autor (2016).

A Figura 28 mostra os resultados para o número de Reynolds igual a 500.000. Percebe-se, nesse caso, uma diferença um pouco maior entre os dados do FASTEEVSIM e os valores experimentais.

Para $Re = 500.000$, após $\alpha = 14^\circ$, o valor do coeficiente de sustentação da simulação começa a cair, enquanto que no experimental essa queda ocorre de maneira mais suave. Além disso, no FASTEEVSIM os valores de C_L são um pouco mais altos que os experimentais.

Figura 29 – Coeficiente de sustentação versus coeficiente de arrasto e Coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque para o perfil NACA 0018 e Reynolds=700.000.



Fonte: o Autor (2016).

Para $Re = 700,000$ (Figura 29), acontecem os mesmos fenômenos que para $Re = 500,000$, existe uma pequena diferença entre a simulação e o valor experimental e entre os ângulos de ataque 7° e 12° o valor de C_L é maior no FASTEEVSIM. Apesar disso, a curva da simulação segue o mesmo formato dos resultados de túnel de vento. Os resultados se assemelham e essa pequena diferença entre os valores pode ser justificada pelas condições nas quais os testes foram realizados no túnel de vento.

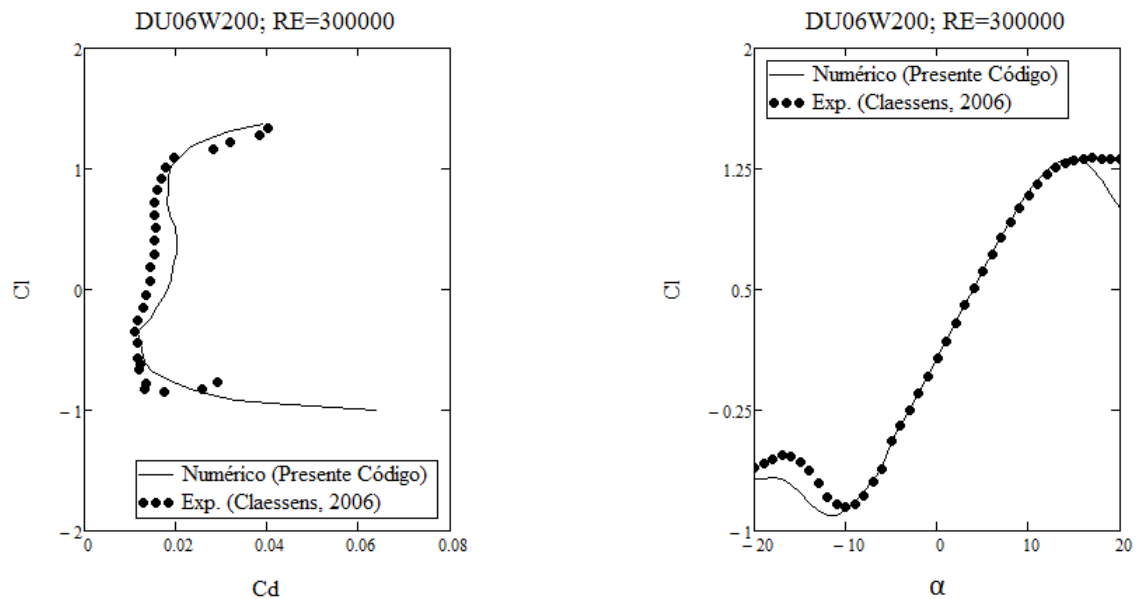
3.2.2 Variação do ângulo de ataque para o perfil DU06W200

O perfil aerofólio DU06W200 também foi simulado para três números de Reynolds. Esse perfil desenvolvido e medido por Claessens (2006) foi projetado com melhorias em relação ao NACA0018 e por isso deve apresentar melhores resultados de desempenho.

A Figura 30 mostra os resultados da simulação para o valor do número de Reynolds igual a 300.000. Observa-se, nos gráficos, que os resultados do programa se assemelham bastante aos experimentais. A única diferença notável é que, após $\alpha = 15^\circ$, os resultados da simulação caem, enquanto que os experimentais se matêm elevados por valores maiores de ângulo do ataque.

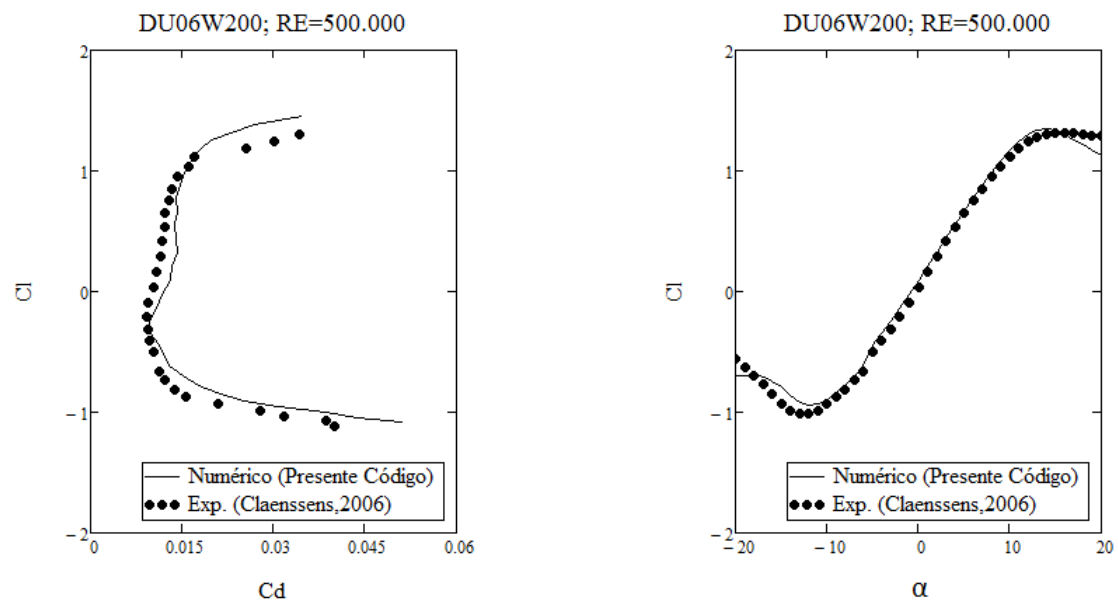
Para $Re = 500,000$ (Figura 31) e $Re = 700,000$ (Figura 32), esse fenômeno é bem menos perceptível. Os resultados das simulações para essas duas condições são muito similares às apresentadas experimentalmente, havendo apenas poucos pontos do ângulo de ataque em que os dois resultados não coincidem.

Figura 30 – Coeficiente de sustentação versus coeficiente de arrasto e Coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque para o perfil DU06W200 e Reynolds= 300.000.



Fonte: o Autor (2016).

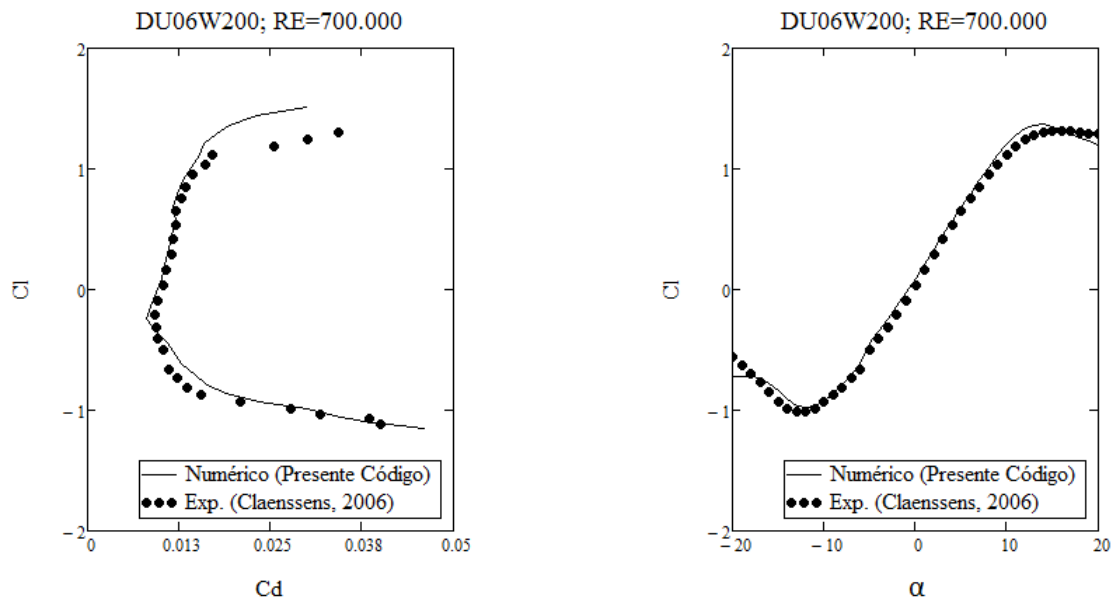
Figura 31 – Coeficiente de sustentação versus coeficiente de arrasto e Coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque para o perfil DU06W200 e Reynolds= 500.000.



Fonte: o Autor (2016).

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, é possível concluir que o programa desenvolvido para a execução automática do programa XFOIL permite obter os valores

Figura 32 – Coeficiente de sustentação versus coeficiente de arrasto e Coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque para o perfil DU06W200 e Reynolds=700.000.



Fonte: o Autor (2016).

das características aerodinâmicas dos perfis aerofólios de forma simples e rápida. Os resultados obtidos mostraram boa qualidade quando comparados a valores experimentais em túnel de vento. Os valores quantitativos mostraram algumas diferenças em relação aos experimentais.

Para ambos os perfis NACA0018 e DU06W200, as simulações apresentaram resultados próximos aos experimentais, sendo que para o DU06W200 os resultados foram ainda mais precisos. No caso do perfil NACA0018, o aumento do número de Reynolds fez com que a precisão dos resultados caíssem. O mesmo não ocorre para o DU06W200.

3.3 Validação do FASTEEVSIM para Análise Aerodinâmica de TEEV

Para validar os resultados do programa FASTEEVSIM na obtenção da curva do coeficiente de potência, optou-se por comparar os resultados obtidos na simulação dos perfis NACA0018 e DU06W200 aos resultados experimentais de Claessens (2006).

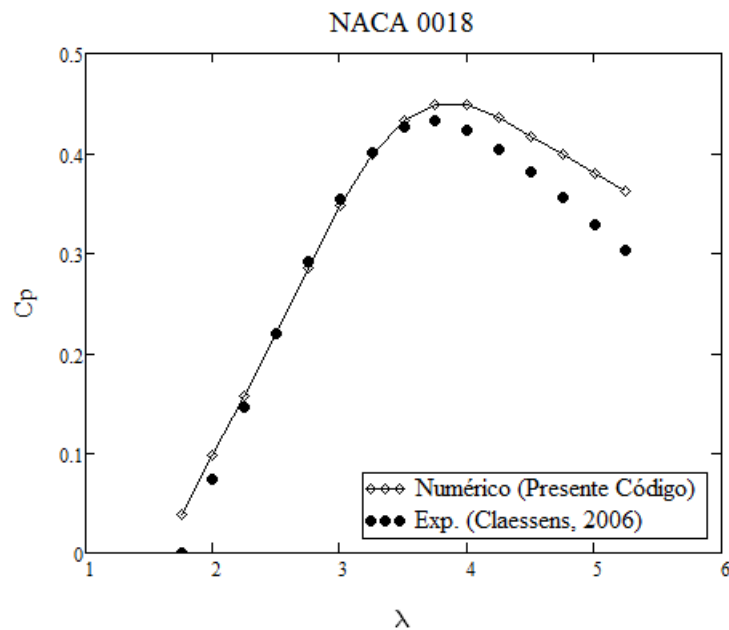
Os resultados das simulações e comparações com resultados experimentais, assim como a discussão dos mesmos são a apresentadas seguir.

3.3.1 TEEV usando o perfil NACA 0018

A simulação foi realizada para uma TEEV de três pás retas, com uma corda de 0,1 metro e uma velocidade do vento de 10 m/s.

A Figura 33 mostra uma comparação entre os valores de C_P obtidos pelo FASTEEVSIM e o resultados experimentais obtidos por Claessens (2006). Observa-se, no gráfico, que os resultados numéricos se aproximam dos resultados experimentais, podendo confirmar que o programa FASTEEVSIM proposto consegue representar bem os resultados obtidos em túnel de vento por Claessens (2006).

Figura 33 – Comparação entre as curvas de potência do perfil NACA0018 obtidas pelo FASTEEVSIM e CLAESSENS.



Fonte: o Autor (2016).

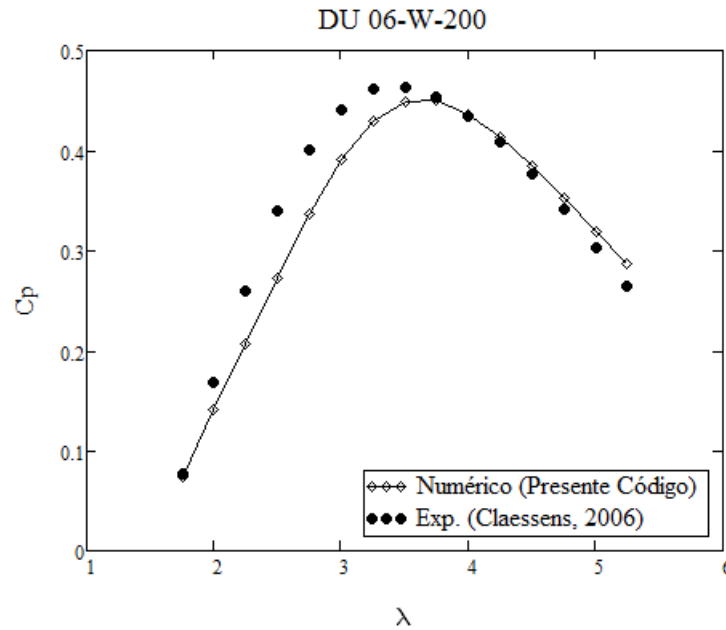
Apesar da boa aproximação para valores de velocidade de ponta de pá menores que 3,5, o FASTEEVSIM estima um coeficiente de potência um pouco mais alto que o experimental para valores maiores de λ . Essa diferença entre os resultados obtidos pelo FASTEEVSIM e os resultados experimentais pode ser explicada devido à limitação do modelo "BEM" em obter valores de interferência (u) com precisão para λ maiores.

Quanto maior for a velocidade de ponta de pá, maior será o espalhamento do ar ao chegar na turbina. Isto acontece por que a turbina em altas velocidades apresenta um bloqueio maior do vento, com grandes valores de interferência (u). Dentre os modelos baseados no "BEM", o *Double Multiple Streamtube*, usado neste trabalho, é o mais completo e capaz de estimar os valores de interferência com melhor precisão para esta faixa de λ . Contudo, o modelo ainda apresenta limitações, o que faz com que ocorra a diferença entre os valores apresentados na Figura 33 para λ superior a 3,5.

3.3.2 TEEV usando o perfil DU06W200

Uma turbina usando o aerofólio DU06W200 foi simulada no FASTEEVSIM. A comparação entre os valores de coeficiente de potência obtidos pela simulação e os resultados experimentais obtidos por Claessens (2006) para este perfil é mostrada na Figura 34.

Figura 34 – Comparação entre as curvas de potência do perfil DU06W200 obtidas pelo FASTEEVSIM e CLAESSENS.



Fonte: o Autor (2016).

O gráfico da Figura 34 mostra os valores do coeficiente de potência para vários valores de velocidade de ponta de pá (λ). Analisando os resultados apresentados pela simulação e os resultados experimentais obtidos em túnel de vento, percebe-se que as duas fontes mostram dados semelhantes, sendo que o FASTEEVSIM estimou valores de coeficiente de potência um pouco mais elevados que os experimentais para $\lambda < 3,5$.

Como abordado anteriormente, se o ângulo de ataque sobre uma pá é aumentado, em algum momento o fluxo de ar irá se separar da pá. A separação começa no bordo de fuga do perfil aerodinâmico e avança de acordo com o aumento do ângulo. Se o ângulo é aumentado, a separação avança para o bordo de ataque. Este fenômeno, chamado de *stall*, fará com que os gráficos de C_L versus C_D e de C_L versus α apresentem uma separação após o valor de ângulo de ataque em que o *stall* ocorre. Como pode ser observado nas Figuras 30 e 31, a partir de um valor de aproximadamente 10° de ângulo de ataque, o fenômeno de *stall* ocorre e o programa apresenta dificuldades em obter valores precisos. Além disso, observa-se que a diferença entre os resultados aumenta para menores de número de Reynolds.

Como pode ser observado na Figura 23, quanto menor for o valor de λ , maiores os ângulos de ataque nos quais a pá é submetida. Para uma simulação de λ igual à 3, por exemplo, os valores de números de Reynolds calculados na simulação variam de 207.200 a 344.000 e os ângulos de ataque variam de 1,6° e 10,49°. Isso pode explicar a diferença entre os valores obtidos no programa FASTEEVSIM e os valores experimentais para λ menores que 3,5, região em que a pá é submetida à maiores ângulos de ataque e baixos números de Reynolds.

Quando comparado ao resultado para o perfil NACA0018 numa faixa de velocidade de pontas de pá maior que 3,5, observa-se que o modelo apresenta resultados mais precisos para o perfil DUW06200. A melhor aproximação com o valor experimental para o DUW06200 deve-se ao fato de que os valores de interferência (u) calculados para o DUW06200 foram menores que para o outro perfil testado. Para uma simulação com velocidade do vento igual a 10m/s, por exemplo, o perfil NACA0018 apresentou um valor mínimo de interferência de 0,33, enquanto o valor mínimo de interferência para o DUW06200 foi de 0,28.

Observa-se que o programa desenvolvido consegue obter resultados confiáveis e com boa aproximação dos valores experimentais. Porém, os resultados não coincidem em algumas faixas de velocidade de ponta de pá λ .

3.4 Análise Comparativa entre os Perfis NACA0018 e DU06W200

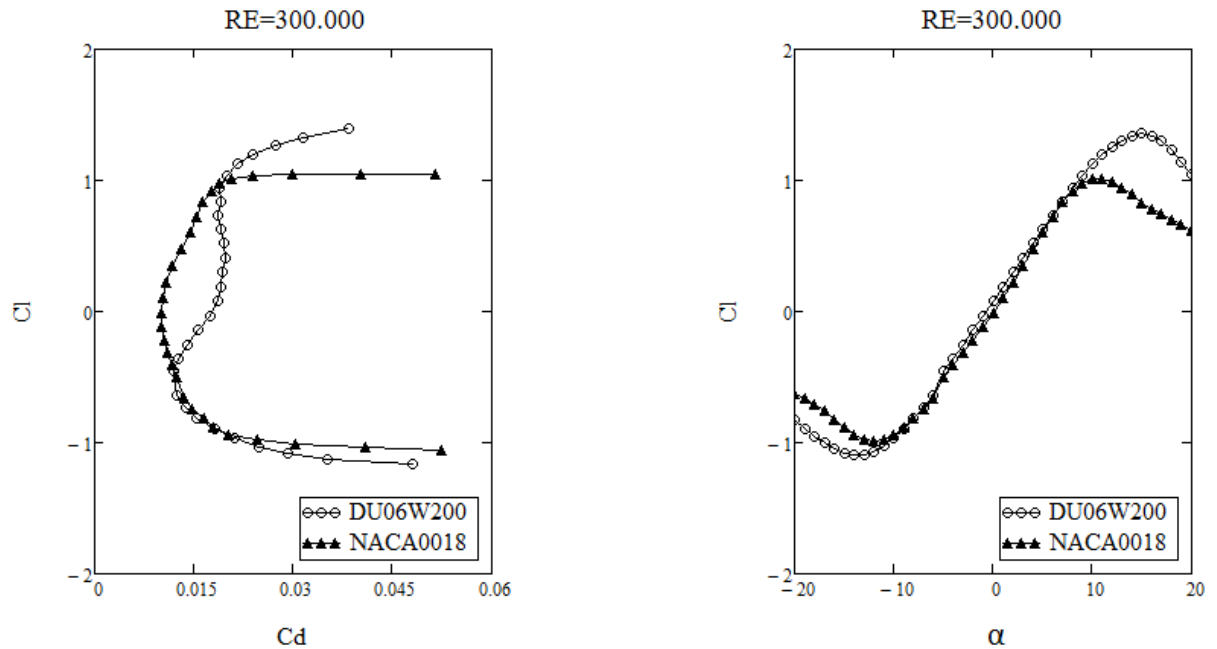
Com o intuito de comparar os perfis NACA0018 e DUW06200, os resultados do FASTEEVSIM para ambos os aerofólios foram mostrados em gráficos que apresentam as curvas do coeficiente de sustentação (C_L) versus coeficiente de arrasto (C_D) e do coeficiente de sustentação (C_L) versus ângulo de ataque (α) para as três diferentes condições de vento, com número de Reynolds de 300.000, 500.000 e 700.000.

A Figura 35 mostra a comparação entre os perfis para $Re = 300.000$. O perfil DU06W200 apresenta valores mais altos de sustentação. Além disso, nota-se, que o valor do coeficiente de sustentação do perfil NACA0018 começa a cair antes do perfil DU06W200. Isso mostra que o perfil DU06W200 consegue manter a camada limite sem descolar em maiores valores de ângulo de ataque.

Para $Re = 500.000$ (Figura 36), os mesmos fenômenos são observados. Mas neste caso, a diferença entre os dois perfis é menor. A diferença entre os resultados dos perfis se tornam ainda menores para $Re = 700.000$ (Figura 37).

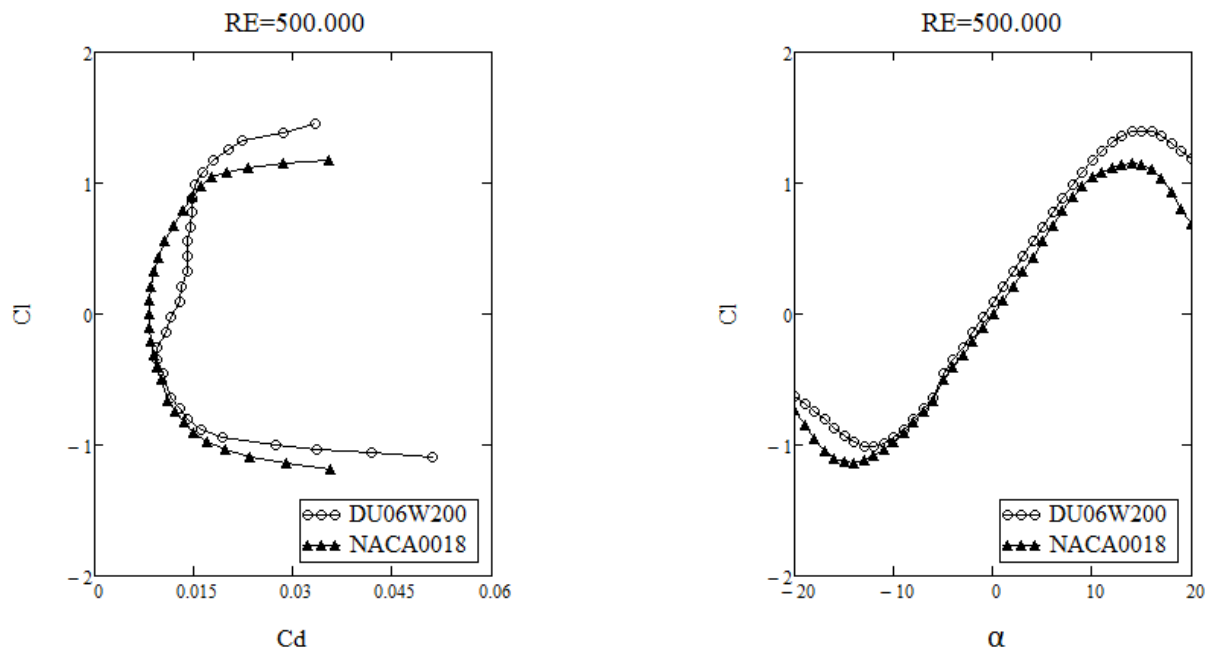
A partir dos gráficos, pode-se observar que os resultados obtidos pelo perfil com maiores valores de sustentação é o DU06W200, pois o seu coeficiente de sustentação (C_L)

Figura 35 – Coeficientes de sustentação versus coeficientes de arrasto e coeficientes de sustentação versus ângulos de ataque para os perfis NACA0018 e DU 06-W-200 para um número de Reynolds=300.000.



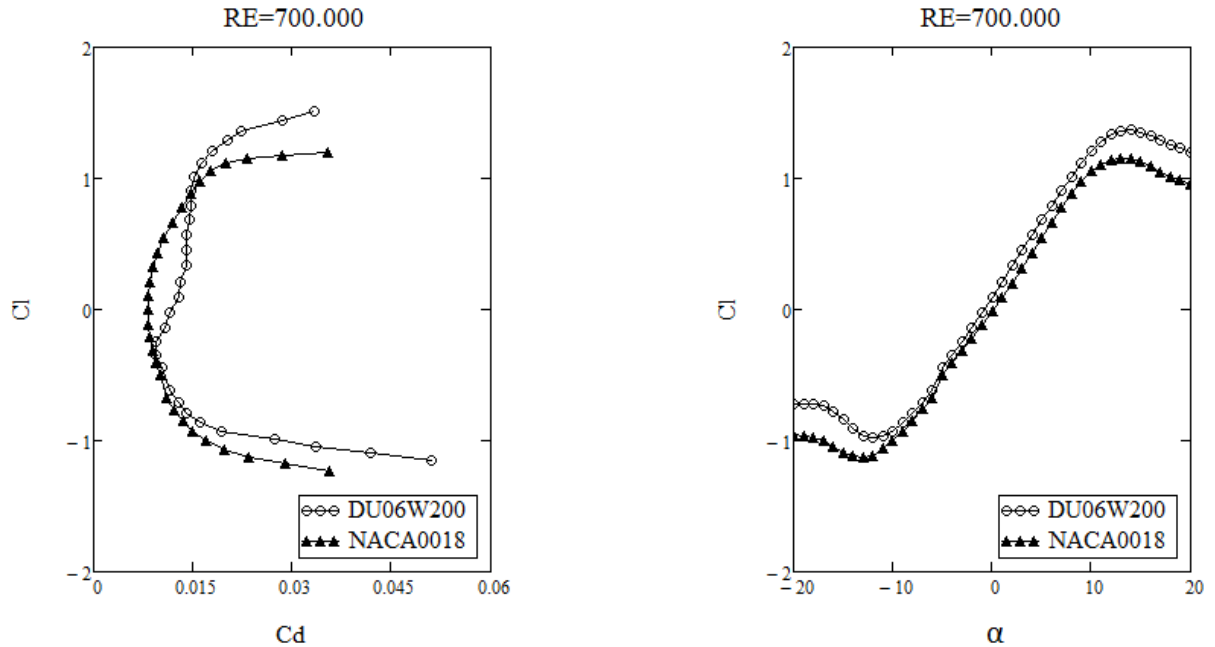
Fonte: o Autor (2016).

Figura 36 – Coeficientes de sustentação versus coeficientes de arrasto e coeficientes de sustentação versus ângulos de ataque para os perfis NACA0018 e DU06W200 para um número de Reynolds=500.000.



Fonte: o Autor (2016).

Figura 37 – Coeficientes de sustentação versus coeficientes de arrasto e coeficientes de sustentação versus ângulos de ataque para os perfis NACA0018 e DU06W200 para um número de Reynolds=700.000.



Fonte: o Autor (2016).

perdura para ângulos maiores.

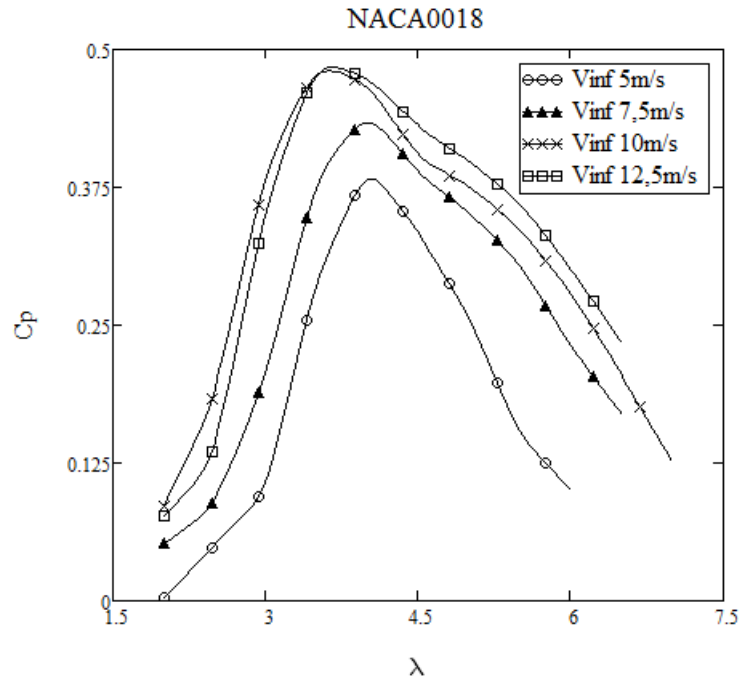
Percebe-se, também, que o ponto de descolamento do escoamento no perfil NACA0018 ocorre anteriormente ao do perfil DU06W200, caracterizando assim a perda de sustentação (*stall*) antecipada do perfil NACA0018. Conclui-se, então, que o perfil DU06W200 consegue manter a camada limite sem descolar em maiores ângulos de ataque, apresentando melhores valores de sustentação.

Para determinar qual perfil, entre o NACA 0018 e o DU06W200, mostra melhores valores de coeficiente de potência, os resultados obtidos nas simulações dos dois aerofólios foram comparados em valores de velocidade de vento diferentes.

A Figura 38 mostra os valores do coeficiente de potência de uma TEEV usando o perfil NACA0018 para diferentes velocidades de vento. Observa-se que a medida que o valor da velocidade do vento aumenta, os valores de C_P também aumentam, sendo que o aumento percentual de $V_{inf} = 5m/s$ para $V_{inf} = 7,5m/s$ e de $V_{inf} = 7,5m/s$ para $V_{inf} = 10m/s$ são bem maiores que de $V_{inf} = 10m/s$ para $V_{inf} = 12,5m/s$. Assim, verifica-se que os valores dos coeficientes de potência para $V_{inf} = 10m/s$ e para $V_{inf} = 12,5m/s$ são bem próximos.

Esses mesmos fenômenos também podem ser observados na Figura 39, que mostra a curva de potência da TEEV usando o perfil DU06W20 para vários valores de velocidade do

Figura 38 – Coeficiente de potência da TEEV usando o perfil NACA0018 para diferentes velocidades do vento.



Fonte: o Autor (2016).

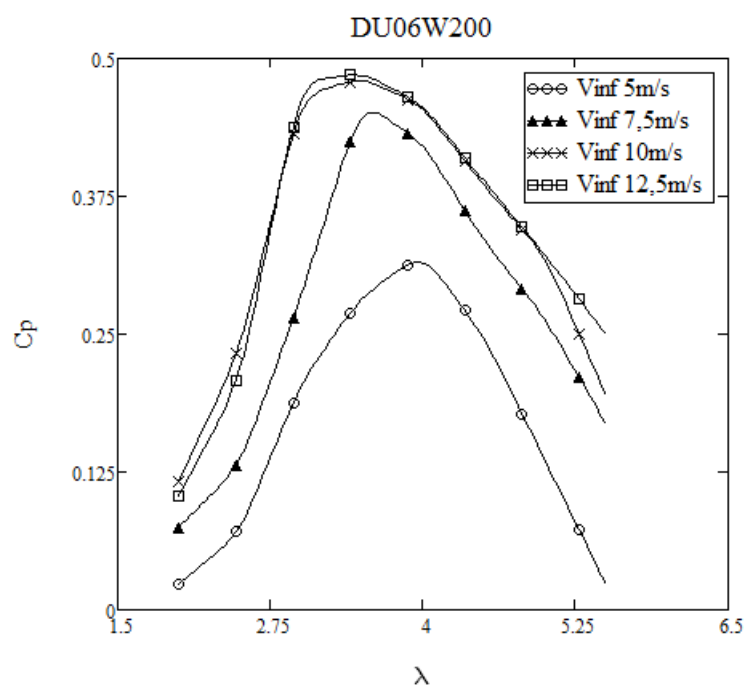
vento (V_{inf}). Como é possível observar, a turbina apresenta diferentes curvas de coeficiente de potência para diferentes valores de velocidade do vento. A influência da variação de V_{inf} na curva do coeficiente de potência foi investigada no trabalho de Li et al. (2016), em que foram realizados testes experimentais em uma turbina de eixo vertical de pás retas em túnel de vento e em campo. Em ambos foi possível verificar uma mudança da curva de C_P com a alteração da velocidade do vento.

Os perfis NACA0018 e DU06W200 foram comparados para cada valor de velocidade de vento individualmente. A Figura 40 mostra os resultados dos dois perfis para uma velocidade do vento igual a 5 m/s. Para esse valor de velocidade, o perfil DU06W200 apresenta melhores resultados para valores mais baixos de velocidade de ponta de pá (λ). Para valores maiores de λ , o NACA0018 apresenta valores melhores de coeficiente de potência. Além disso, o perfil NACA0018 apresenta valor de C_P máximo 16% mais alto que o DU06W200.

Para velocidade do vento igual a 7,5 m/s (Figura 41), o perfil DU06W200 também apresenta melhores valores para λ mais baixos, enquanto o NACA0018 apresenta melhores resultados para valores mais altos de velocidade de ponta de pá. Esse fenômeno se repete para todas as velocidades do vento testados, $V_{inf} = 10 \text{ m/s}$ (Figura 42) e $V_{inf} = 12,5 \text{ m/s}$ (Figura 43).

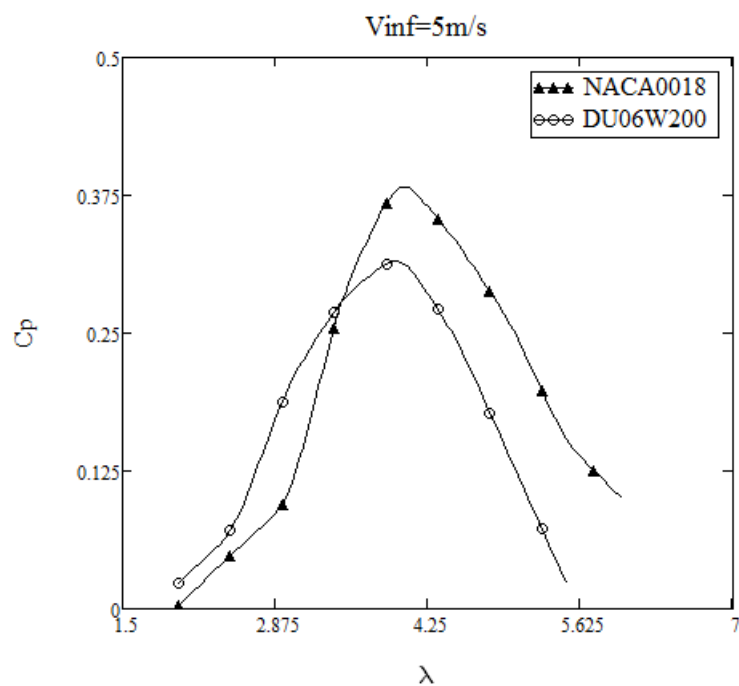
Para uma velocidade do vento de 7,5 m/s o perfil DU06W200 apresenta um valor

Figura 39 – Coeficiente de potência da TEEV usando o perfil DU06W20 para diferentes velocidades do vento.



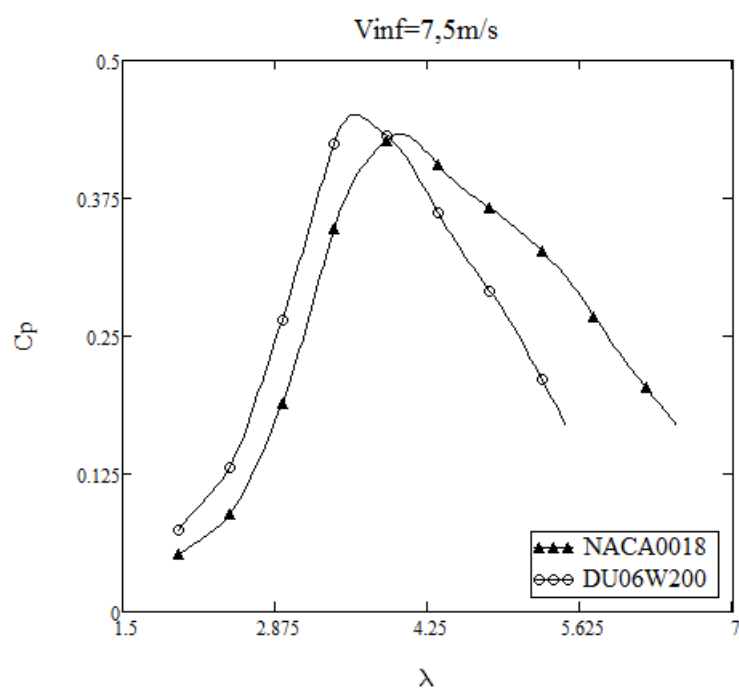
Fonte: o Autor (2016).

Figura 40 – Gráfico da curva de potência dos perfis NACA0018 e DU06W20 para velocidade do vento de 5 m/s.



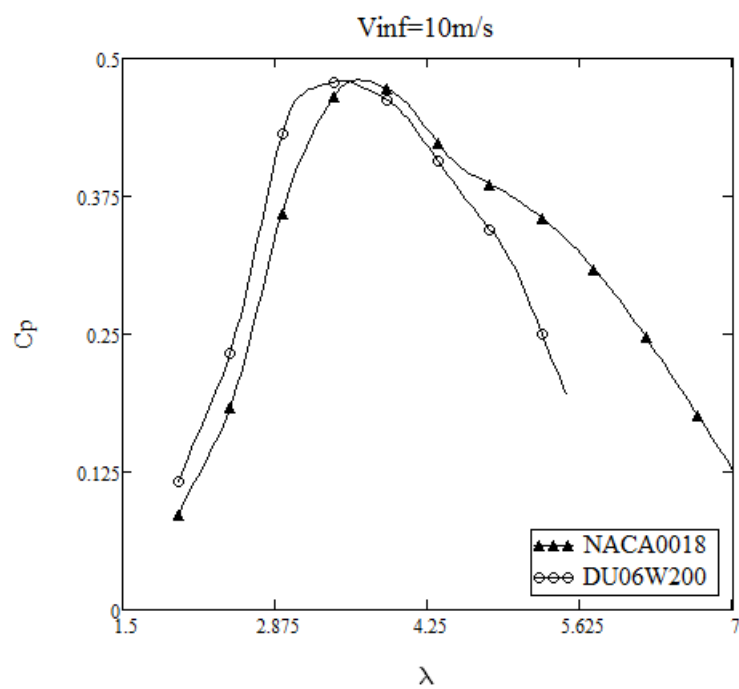
Fonte: o Autor (2016).

Figura 41 – Gráfico da curva de potência dos perfis NACA0018 e DU06W200 para velocidade do vento de 7,5 m/s.



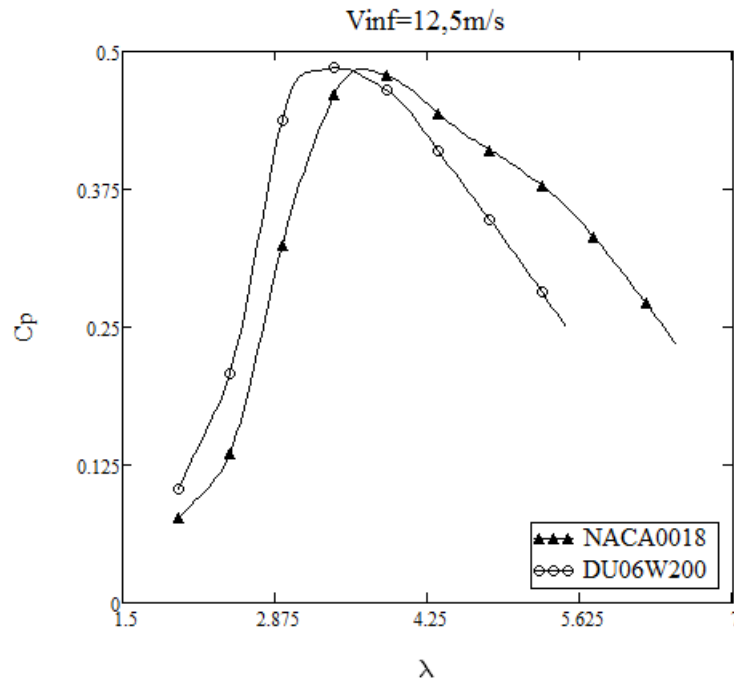
Fonte: o Autor (2016).

Figura 42 – Gráfico da curva de potência dos perfis NACA0018 e DU06W200 para velocidade do vento de 10 m/s.



Fonte: o Autor (2016).

Figura 43 – Gráfico da curva de potência dos perfis NACA0018 e DU06W200 para velocidade do vento de 12,5 m/s.



Fonte: o Autor (2016).

de C_P máximo 4,4 % maior que o perfil NACA0018. Para $V_{inf} = 10\text{ m/s}$ e $V_{inf} = 12,5\text{ m/s}$ essa diferença é menor que 0,6 %.

Com relação à análise aerodinâmica das turbinas, de modo geral, as turbinas usando o perfil DU06W200 apresentaram melhores valores para velocidades de ponta de pá menores que 4. Para valores de λ maiores, o NACA0018 ultrapassa o DU06W200, apresentando valores maiores de C_P . Este fenômeno também foi percebido nos resultados de [Claessens \(2006\)](#). Para velocidade de vento baixa (5 m/s), o NACA0018 apresentou um coeficiente de potência máxima maior, enquanto que o DU06W200 se sobressaiu para uma velocidade do vento de 7,5 m/s. Para velocidades do vento maiores os dois perfis apresentaram valores de C_P máximo semelhantes.

3.5 Cosiderações Finais

O FASTEEVSIM mostrou ser uma ferramenta útil na análise de turbinas eólicas de eixo vertical para diferentes perfis e condições de vento. As simulações apresentaram algumas diferenças quantitativas quando comparadas a valores experimentais, essas diferenças podem ser atribuídas às condições nas quais as turbinas foram testadas com uso de sensores em túnel de vento.

A metodologia de convergência aplicada às simulações mostrou ser útil para garantir

obtenção de resultados em todas as vezes que o programa foi executado. O modelo permitiu que uma solução fosse encontrada para as simulações em que ocorreram problemas de convergência.

4 Conclusões

4.1 Considerações Preliminares

A partir dos objetivos inicialmente estabelecidos para o presente trabalho, é possível dizer que os mesmos foram alcançados uma vez que se conseguiu implementar uma metodologia que garantiu a convergência das várias simulações realizadas. Os resultados produzidos pelo programa FASTEEVSIM para execução automática do XFOIL e para obtenção das curvas dos coeficientes de potência foram considerados satisfatórios quando comparados com resultados de fontes da literatura.

Na Revisão Bibliográfica apresentada na seção 1.2, foram mostrados três modelos para análise de turbinas eólicas de eixo vertical baseados no modelo BEM:

- *Single Streamtube Model*;
- *Multiple Streamtube Model*;
- *Double Multiple Streamtube Model*.

Alguns dos trabalhos apresentados na Revisão Bibliográfica relataram problemas de convergência nas simulações utilizando estes modelos. Para avançar os trabalhos nesta área e tentar solucionar os problemas de convergência, foram definidos os seguintes objetivos para o presente trabalho:

- Desenvolver programa para obtenção automática das características dos perfis de pás usando o XFOIL;
- Desenvolver programa (FASTEEVSIM) para avaliação das pás de turbinas eólicas de eixo vertical usando como base o modelo *Double Multiple Streamtube*;
- Desenvolver metodologia que garanta a convergência nas simulações das TEEV, usando modelos baseados no BEM;

O programa FASTEEVSIM para análise de turbinas eólicas de eixo vertical foi desenvolvido com o intuito de possibilitar a avaliação da potência das turbinas de maneira rápida, simples e de baixo custo.

Dois perfis foram simulados e os resultados obtidos foram comparados a resultados experimentais em túnel de vento para a validação do programa. A seguir são apresentadas as conclusões a respeito dos resultados obtidos.

4.2 Validação do FASTEEVSIM para variação do ângulo de ataque

Após a validação dos resultados obtidos na simulação do programa de execução automática do XFOIL para variação do ângulo de ataque, concluiu-se que:

- Para o perfil NACA0018, o programa estimou os valores dos coeficientes de sustentação e de arrasto com boa aproximação em relação aos valores experimentais, tendo apresentado valores um pouco mais elevados em algumas faixas do ângulo de ataque. Essa diferença se mostrou um pouco maior conforme aumentou-se o valor do número de Reynolds;
- Para o perfil DU06W200, o programa mostrou boa precisão nos resultados, com uma pequena diferença para ângulos de ataque maiores que $\alpha = 15^\circ$ em $Re = 300.000$. Essa diferença mostrou-se quase inexistente para os números de Reynolds iguais a 500.000 e 700.000;

4.3 Validação do FASTEEVSIM para análise aerodinâmica de TEEV

Com relação aos resultados apresentados nessa seção, chegaram-se às seguintes conclusões:

- Para o perfil NACA0018, o FASTEEVSIM mostrou resultados próximos aos valores experimentais. Os valores de coeficiente de potência obtidos através da simulação do programa foram superiores aos experimentais para baixos valores de λ ;
- Para o perfil aerofólio DU06W200, as simulações se mostraram semelhantes aos valores experimentais, com uma pequena diferença para valores baixos de λ ;

4.4 Análise Comparativa entre os perfis NACA0018 e DU06W200

Com a comparação realizada entre os perfis NACA0018 e DU06W200, pode-se concluir que:

- A partir das simulações com a variação do ângulo de ataque, verificou-se que o descolamento da camada limite do perfil DU06W200 ocorre a partir de um ângulo de ataque de aproximadamente $\alpha = 15^\circ$, enquanto o do perfil NACA0018 ocorre a partir

de aproximadamente $\alpha = 10^\circ$, concluindo-se então que o perfil DU06W200 consegue manter a camada limite sem descolar em maiores ângulos de ataque, apresentando melhores valores de sustentação.

- Ao comparar as TEEV usando os perfis NACA0018 e DU06W200, percebe-se que o DU06W200 apresenta melhor desempenho até o valor de velocidade de ponta de pá igual a aproximadamente 4. Para valores mais altos de λ , o NACA0018 supera, apresentando valores mais altos de coeficiente de potência.
- As turbinas que usam o NACA0018 apresentam um valor de λ máximo 16% mais alto em relação ao DU06W200 para um vento a 5 m/s. Para uma velocidade do vento de 7,5 m/s o DU06W200 apresenta um λ máximo 4,4% maior em relação ao outro perfil. Para velocidades do vento de 10 e 12,5 m/s a diferença entre os dois perfis é de apenas 0,6%.

A metodologia de convergência auxiliou de maneira útil para garantir que fosse obtida uma solução ao final das simulações.

4.5 Sugestões para Trabalhos Futuros

Através da análise comparativa com dados experimentais, comprovou-se que o programa, além de acelerar o processo de simulação, conseguiu chegar a resultados confiáveis. No entanto, no atual estado de desenvolvimento, o programa pode ainda receber melhorias. Para trabalhos futuros, são listadas as seguintes sugestões:

- Realizar simulações para uma variedade maior de perfis aerofólios para verificar a possibilidade de melhorar a precisão e confiabilidade dos resultados do FASTEEVSIM;
- Realizar simulações usando Dinâmica dos Fluidos Computacional, uma vez que as simulações em CFD permitem prever o desempenho da TEEV completa em três dimensões. É possível, também, quantificar a interferência do primeiro lado da turbina no segundo lado de rotação;
- Realizar testes em túnel de vento para obter resultados mais confiáveis, pois ainda existem poucos dados experimentais dos perfis aerofólios disponíveis na literatura.

Referências

AIRFOILTOOLS. **Coordenadas DU 06-W-200**. 2016. Disponível em: <<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=du06-w-200-dt>>, Acesso em: 18 fev. 2016.

AIRFOILTOOLS. **Coordenadas NACA 0018**. 2016. Disponível em: <<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>>, Acesso em: 18 fev. 2016.

ALVES, J. J. A. Análise regional da energia eólica no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 6, n. 1, 2010.

BERG, D.; KLIMAS, P.; STEPHENSON, W. Aerodynamic design and initial performance measurements for the sandia 34-m diameter vertical-axis wind turbine. In: SED. **Ninth ASME Wind Energy Symposium**. [S.l.], 1990. v. 9, p. 85.

BIADGO, M. A. et al. Numerical and analytical investigation of vertical axis wind turbine. **FME Transactions**, v. 41, n. 1, p. 49–58, 2013.

BIANCHINI, A.; FERRARA, G.; FERRARI, L. Design guidelines for h-darrieus wind turbines: Optimization of the annual energy yield. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 89, p. 690–707, 2015.

BRINCK, D.; JEREMEJEFF, N. **The development of a vertical axis tidal current turbine**. Dissertação (Mestrado) — KTH School of Industrial Engineering and Management, 2013.

BUSSEL, G. V.; POLINDER, H.; SIDLER, H. The development of turby, a small vawt for the built environment. In: **Global Windpower 2004 Conference and Exhibition, Chicago, IL**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 10.

CLAESSENS, M. The design and testing of airfoils for application in small vertical axis wind turbines. **Master of Science Thesis**, 2006.

DODD, H. et al. **Test results and status of the DOE/Sandia 34-M VAWT test bed**. [S.l.], 1989.

DODD, H. M. **Performance predictions for an intermediate-sized VAWT based on performance of the 34-M VAWT test bed**. [S.l.], 1989.

DRELA, M. Xfoil: An analysis and design system for low Reynolds number airfoils. In: **Low Reynolds number aerodynamics**. [S.l.]: Springer, 1989. p. 1–12.

DRELA, M.; YOUNGREN, H. **Manual do XFOIL**. 2001. Disponível em: <http://web.mit.edu/aeroutil_v1.0/xfoil_doc.txt>, Acesso em: 18 fev. 2016.

ELKHOURY, M.; KIWATA, T.; AOUN, E. Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Elsevier, v. 139, p. 111–123, 2015.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.

- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- FREELIFF. **Savonius Turbine Design**. 2016. Disponível em: <<http://freeliff.com/savonius-turbine-design/>>, Acesso em: 18 fev. 2016.
- GARCIA, S. et al. Aspectos no projeto de turbinas eólicas de eixo vertical. In: **I CBENS – FORTALEZA**, 2007.
- GUPTA, R.; BISWAS, A. Flow physics of 3-bladed straight chord h-darrieus wind turbine. **Journal of Urban and Environmental Engineering (JUEE)**, v. 7, n. 1, 2013.
- GWEC, G. W. E. C. Global wind statistics. 2015.
- HAU, E. **Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics**. [S.l.]: New York: Springer, 2000.
- HOWELL, R. et al. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. **Renewable energy**, Elsevier, v. 35, n. 2, p. 412–422, 2010.
- IMA. **Energia Eólica (biotecnologias)**. 2009. Disponível em: <<https://reformaminera.wordpress.com/2009/11/16/170-energia-eolica-biotecnologias/>>, Acesso em: 18 fev. 2016.
- JACOBS, E. N.; WARD, K. E.; PINKERTON, R. M. The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel. 1933.
- LI, Q. et al. Study on power performance for straight-bladed vertical axis wind turbine by field and wind tunnel test. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 90, p. 291–300, 2016.
- MARINI, M.; MASSARDO, A.; SATTA, A. Performance of vertical axis wind turbines with different shapes. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, Elsevier, v. 39, n. 1, p. 83–93, 1992.
- MARTINS, F.; GUARNIERI, R.; PEREIRA, E. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 30, n. 1, p. 1304, 2008.
- PARASCHIVOIU, I. Double-multiple streamtube model for darrieus in turbines. In: **Wind turbine dynamics**. [S.l.: s.n.], 1981.
- PARASCHIVOIU, I.; DELCLAUX, F. Double multiple streamtube model with recent improvements (for predicting aerodynamic loads and performance of darrieus vertical axis wind turbines). **Journal of Energy**, v. 7, n. 3, p. 250–255, 1983.
- PARASCHIVOIU, I. et al. Aerodynamic analysis of the darrieus rotor including secondary effects. **Journal of Energy**, v. 7, n. 5, p. 416–422, 1983.
- PARASCHIVOIU, I.; FRAUNIE, P.; BEGUIER, C. Streamtube expansion effects on the darrieus wind turbine. **Journal of Propulsion and Power**, v. 1, n. 2, p. 150–155, 1985.
- PONTA, F.; SEMINARA, J.; OTERO, A. On the aerodynamics of variable-geometry oval-trajectory darrieus wind turbines. **Renewable energy**, Elsevier, v. 32, n. 1, p. 35–56, 2007.

PRICE, T. J. Uk large-scale wind power programme from 1970 to 1990: the carmarthen bay experiments and the musgrove vertical-axis turbines. **Wind Engineering**, SAGE Publications, v. 30, n. 3, p. 225–242, 2006.

RIBEIRO, Á. G. S. **Análise aerodinâmica de asas usando o método VLM acoplado ao XFOIL**. Tese (Doutorado), 2009.

STIEBLER, M. **Wind energy systems for electric power generation**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008.

STRICKLAND, J. H. **Darrieus turbine: a performance prediction model using multiple streamtubes**. [S.l.], 1975.

TEMPLIN, R. **Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine**. [S.l.], 1974.

TOLMASQUIM, M. T. Energia renovável. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016.

WORDPRESS. **Evolução da Tecnologia AALP**. 2012. Disponível em: <<https://evolucaoalp.wordpress.com/category/evolucao-da-ciencia/>>, Acesso em: 18 fev. 2016.

APÊNDICE A – XFOIL

O XFOIL é um programa iterativo escrito em FORTRAN que foi desenvolvido por Mark Drela na década de 1980 para ser usado como uma ferramenta de projeto e análise de perfis aerofólios.

O programa XFOIL é capaz de calcular a distribuição de pressão no aerofólio, assim como as características de sustentação e arrasto. Os dados de entrada a serem fornecidos para que o programa possa realizar a simulação são o número de Reynolds, número de Mach, ângulo de ataque e as coordenadas especificando o formato do aerofólio.

Outra funcionalidade que o programa possui, é a de realizar o projeto inverso. Neste caso, o formato do aerofólio é modificado até que as características desejadas sejam atingidas (DRELA, 1989).

A solução do código XFOIL pode ser usada para obter os coeficientes aerodinâmicos de arrasto e sustentação de perfis aerofólios de duas dimensões numa determinada seção da pá ao longo de sua envergadura em função do ângulo de ataque e número de Reynolds.

Segundo Ribeiro (2009), no código do programa, o escoamento invíscido é representado pelas equações de Euler na forma integral e as camadas limites e a esteira são representadas por um método integral de dissipação compressível com atrasos.

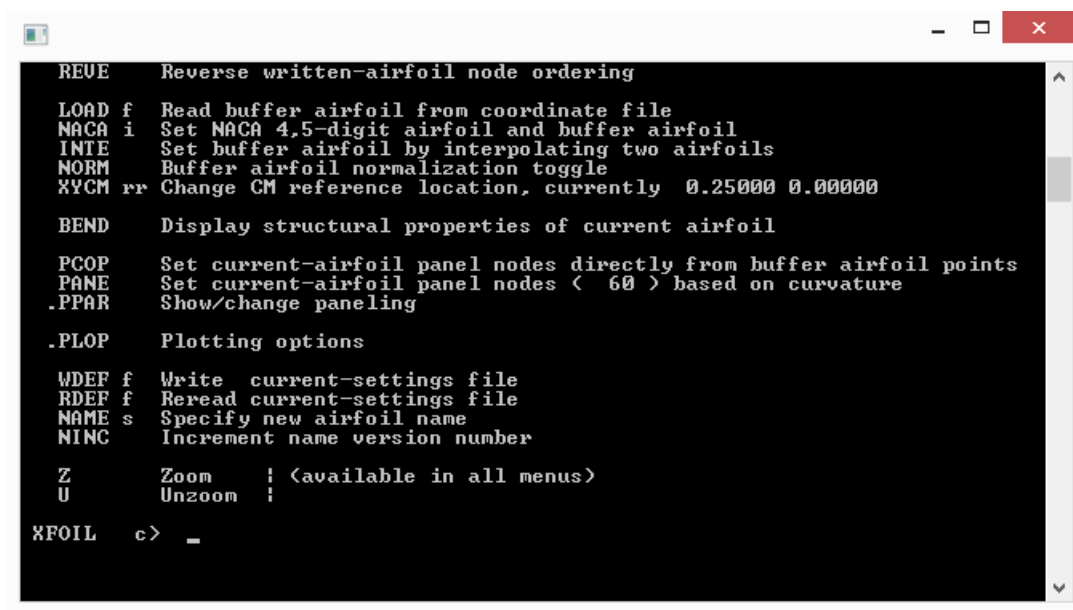
De acordo com Drela (1989), o XFOIL utiliza o método dos painéis com vorticidade linear (escoamento invíscido) e aplica a correção de compressibilidade de Kármán-Tsien. A camada viscosa é representada por duas equações integrais superpostas ao escoamento potencial. Todas as equações de camada limite, de transição e de escoamento invíscido são solucionadas por um método numérico global de Newton.

Ao ser aberto, o programa mostra uma série de funções para modificar os parâmetros de simulação, como apresentado na Figura 44. O programa FASTEVSIM possui em seu código funções para executar o programa XFOIL e armazenar seus resultados para serem utilizados em suas iterações. Após o comando para abrir o programa XFOIL, define-se qual o perfil aerofólio a ser utilizado e o arquivo com as coordenadas do perfil é carregado.

Após a seleção do aerofólio, é acionada a função do XFOIL "ppar", esta função mostra e modifica o número de painéis. O número de painéis pode ser modificado digitando "n" e o número desejado. Para as simulações apresentadas neste trabalho, o número de painéis utilizado foi 60.

Na sequência, é acionada a função "oper", onde são controlados os pontos diretos de operação. Nesta função, modifica-se: a análise para viscosa usando o comando "visc", o número de iterações com o comando "iter" (nas simulações realizadas foi definido o número

Figura 44 – Simulação no XFOIL



Fonte: o Autor (2016).

de 70 iterações), o número de Reynolds (comando "Re") e número de Mach (comando "m").

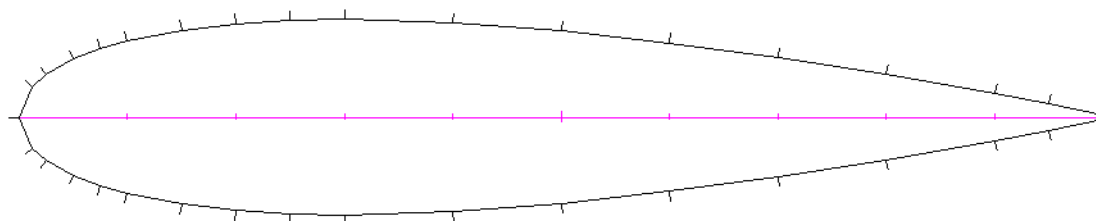
Por último, é definido o ângulo de ataque através do comando "alfa" e as iterações se iniciam até que o resultado seja encontrado e os dados são salvos. A Figura 45 mostra o aerofólio NACA0018 no XFOIL. A malha mostrada possui 35 pontos de painel e um ângulo máximo de painéis de 47,5%. Esses e outros parâmetros da malha podem ser alterados para melhorar a precisão nas simulações.

Figura 45 – Perfil NACA0018 no XFOIL

```

Current airfoil paneling
No. panel nodes: 35
Max panel angle: 47.50°

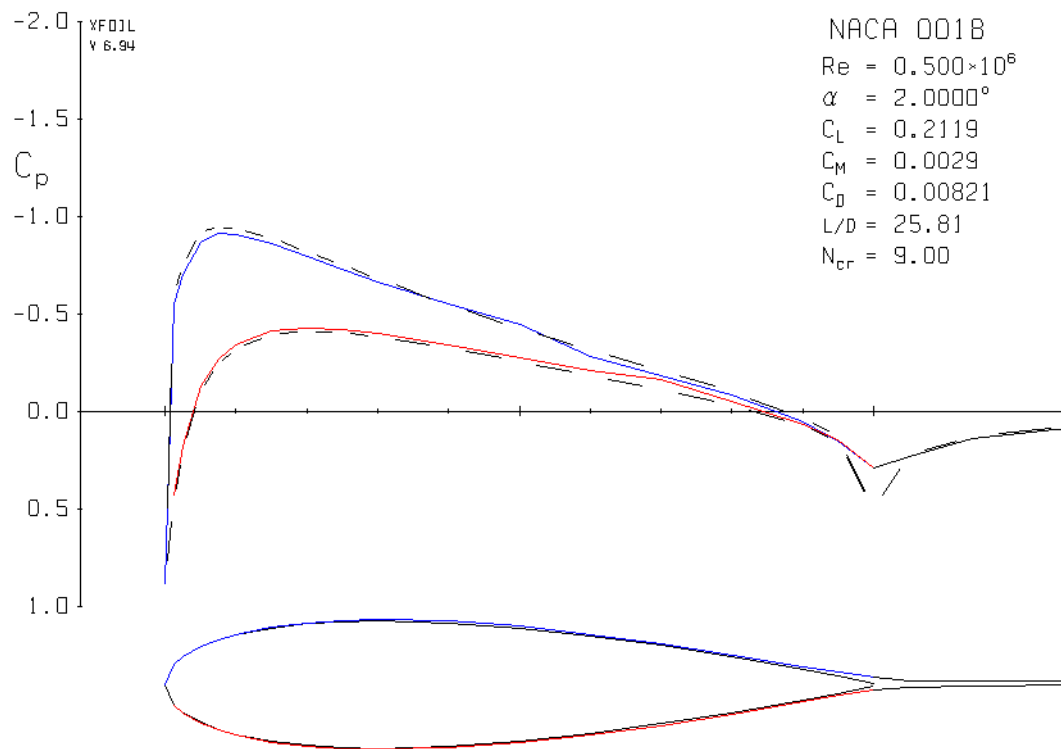
```



Fonte: o Autor (2016).

A Figura 46 apresenta uma simulação no XFOIL. Para esta simulação foram usados como dados de entrada o número de Reynolds igual a 500.000 e o ângulo de ataque igual a 2. Para essas condições, o valor do coeficiente de arrasto encontrado foi de 0,00821 e do coeficiente de sustentação de 0,2119.

Figura 46 – Simulação no XFOIL



Fonte: o Autor (2016).