

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO HENRIQUE MARQUES MARGOTTO
SARA MARTINS DE OLIVEIRA

COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE PROJETO DE TURBINAS
EÓLICAS E CFD PARA O EXPERIMENTO NREL PHASE VI

VITÓRIA
2017

BRUNO HENRIQUE MARQUES MARGOTTO
SARA MARTINS DE OLIVEIRA

**COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE PROJETO DE TURBINAS
EÓLICAS E CFD PARA O EXPERIMENTO NREL PHASE VI**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de engenharia mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Juan Sergio Romero Saenz

VITÓRIA
2017

BRUNO HENRIQUE MARQUES MARGOTTO
SARA MARTINS DE OLIVEIRA

**COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE PROJETO DE TURBINAS
EÓLICAS E CFD PARA O EXPERIMENTO NREL PHASE VI**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de engenharia mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 25 de Julho de 2017

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Juan Sergio Romero Saenz
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Me. Elias Antonio Gomes Coelho Marochio
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Me. Matheus Darós Pagani
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

VITÓRIA
2017

AGRADECIMENTOS

Após mais uma etapa concluída em nossas vidas, gostaríamos de agradecer às pessoas que fizeram de alguma forma parte de nossas vidas acadêmica e pessoal.

Aos nossos familiares agradecemos pelo total apoio fornecido para que prosseguíssemos com coragem e perseverança, dando os próximos passos desta jornada, dando-nos apoio imprescindível.

Aos amigos, por estarem sempre presentes tanto nos momentos bons quanto nos ruins e terem feito este período transcorrer de forma muito prazerosa e natural.

Aos professores, pelo conhecimento transmitido que nos deram a capacitação e competência para conduzir da melhor maneira possível este projeto e que continuaremos usando em nossa vida profissional.

Ao grupo PET, o qual nos possibilitou a utilização de um computador para as simulações.

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo”

Winston Churchill

RESUMO

Turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) vem sendo utilizadas e estudadas pela sociedade há algumas décadas, visando a produção de energia elétrica de maneira sustentável, acompanhando a tendência mundial. O Brasil se encontra entre os países que adotam a prática deste tipo de geração de energia renovável e que vem apresentando um crescimento significativo da porcentagem de energia elétrica gerada.

Neste trabalho, procura-se analisar através de um método analítico de projeto, BEM (*Blade Element Theory*), e através da ferramenta de simulação numérica (CFD) o modelo de uma turbina eólica com pás de geometria construtiva utilizada nos experimentos NREL Phase VI. Os parâmetros a serem analisados foram o torque, a potência e o empuxo gerado pela turbina. Buscando comparar o BEM, que calcula as forças atuantes em uma seção da pá como um perfil bidimensional em um escoamento, e a aplicação em CFD, utilizando o software ANSYS Fluent[®], pode-se obter resultados verossímeis em relação a modelos físicos experimentais.

Palavras-chave: BEM, Turbina eólica de eixo horizontal (TEEH), CFD, Energia sustentável, NREL Phase VI.

ABSTRACT

Horizontal axis wind turbines (HAWT) have been used and studied by society in for a few decades, aiming generating sustainable eletrical energy, following a world trend. Brazil is among the countries which adopted this kind of power generation of sustainable energy and that has been showing a percentual significative growth power generation.

In this work, the analytical design method, BEM (Blade Element Method), and CFD were analised using the NREL Phase VI experiments blade geometry. The analised parameters were torque, power and thrust developed by the turbine.

Addressing a comparison between BEM, which calculates the operating forces on a bidimensional profil blade section in a flow, and the CFD tool, adopting ANSYS Fluent[®], it is possible to obtain resonable results in relation to physical experimental methods.

Key-words: BEM, Horizontal axis wind turbine (HAWT), CFD, Sustainable energy, NREL Phase VI.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Turbina eólica de eixo horizontal SWT-2.3-101, fabricante Siemens.....	18
Figura 2 - Esquema downwind para turbinas de eixo horizontal	18
Figura 3 - Esquema upwind para turbinas de eixo horizontal	18
Figura 4 - Esquema da nacele de uma turbina eólica de eixo horizontal	19
Figura 5 - Volume de controle para turbinas eólicas de eixo horizontal.....	20
Figura 6 - Camada limite atmosférica	21
Figura 7 - Evolução da dimensão das turbinas eólicas de eixo horizontal.....	21
Figura 8 - Nomenclatura para as diferentes partes de um aerofólio em geral	22
Figura 9 - Pressões em torno de um perfil aerodinâmico e a geração das forças de arrasto e sustentação.....	23
Figura 10 - Relação das pressões e velocidades no disco atuador para a extração de energia cinética no aerogerador.....	24
Figura 11- Relação dos coeficientes de potência e de torque variando o fator de indução axial	27
Figura 12 - Linha de corrente simplificada para aerogeradores de eixo horizontal	27
Figura 13 - Esquema de velocidades na passagem de ar pelo aerogerador.....	28
Figura 14 - Discretização de pá para a teoria do elemento de pá	29
Figura 15 - Vetores de velocidade (esquerda) e forças (direita).....	30
Figura 16 - Malha não estruturada bidimensional	34
Figura 17 - Volume de controle notações típicas para uma malha bidimensional	35
Figura 18 - Volume de controle notações típicas para uma malha tridimensional.....	36
Figura 19 - Típica medição de velocidade por ponto em um escoamento turbulento.....	38
Figura 20 - Desenho da pá utilizada no experimento NREL Phase VI	45
Figura 21 - Discretização da pá em N elementos de pá	47
Figura 22- Processo iterativo para cálculo dos fatores de indução e ângulo de fluxo relativo	48
Figura 23 - Modelo tridimensional da pá NREL Phase VI	49
Figura 24 - Perfis dos aerofólios da pá.....	49
Figura 25 - Arredondamento da ponta da pá	50
Figura 26 - Alteração na borda de fuga	50
Figura 27 - Domínio semicilíndrico e as dimensões principais.....	51
Figura 28 - Malha da superfície da pá	52

Figura 29 - Detalhe da malha da ponta da pá	52
Figura 30 - Seção da malha volumétrica mostrando uma maior densidade de elementos nas regiões de esteira e nas adjacências da pá	52
Figura 31 - Detalhe do inflation em uma seção da malha volumétrica	53
Figura 32 - Nomes dados às regiões da malha	54
Figura 33 - Planos utilizados para apresentação de dados em 30, 50 e 90% do raio total - NREL Phase VI CFD	61
Figura 34 - Resíduo obtido para a simulação numérica - NREL Phase VI CFD	62
Figura 35 - Linhas de corrente para o aerofólio em $r/R = 0.3$ - NREL Phase VI CFD	62
Figura 36 - Linhas de corrente para o aerofólio em $r/R = 0.5$ - NREL Phase VI CFD	63
Figura 37 - Linhas de corrente para o aerofólio em $r/R = 0.9$ - NREL Phase VI CFD	63
Figura 38 -- Contorno de velocidades em torno do aerofólio em $r/R = 0.3$ - NREL Phase VI CFD	64
Figura 39 - Contorno de velocidades em torno do aerofólio em $r/R = 0.5$ - NREL Phase VI CFD	64
Figura 40 - Contorno de velocidades em torno do aerofólio em $r/R = 0.9$ - NREL Phase VI CFD	65
Figura 41 - Linhas de corrente limitantes na superfície da pá para a superfície de sucção - NREL Phase VI CFD	65
Figura 42 - Linhas de corrente limitantes na superfície da pá para a superfície frontal - NREL Phase VI CFD	66
Figura 43 - Resultado da linha de corrente obtido por Mourits para a região frontal	68
Figura 44 - Resultados de fator de indução axial e radial obtidos por Mourits para o modelo BEM	68
Figura 45 - Resultado da linha de corrente obtido por Lee et Mo para a região de sucção	68
Figura 46 - Resultado de linha de corrente obtido por Le Pape et Lecanu para a região de sucção	69
Figura 47 - Resultado da linha de corrente obtido por Malatesta para a região de sucção	69
Figura 48 - Resultado da linha de corrente obtido por Malatesta para a região frotnal	69
Figura 49 - Perfil aerodinâmico S809.....	77
Figura 50 - Gráfico coeficiente de sustentação	77
Figura 51 - Gráfico coeficiente de arrasto	77
Figura 52 - Contorno de pressão obtido em $r/R = 0.3$ - NREL Phase VI CFD.....	96

Figura 53 - Contorno de pressão obtido em $r/R = 0.5$ - NREL Phase VI CFD.....	96
Figura 54 - Contorno de pressão obtido em $r/R = 0.9$ - NREL Phase VI CFD.....	97

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Coeficientes do modelo $k - \omega$ SST	44
Tabela 2 - Quantidade de nós e elementos total da malha.....	53
Tabela 3 - Tipos de condição de contorno utilizados para cada região da malha	54
Tabela 4 - Condições de contorno aplicadas à regiões da malha	55
Tabela 5 - Esquema de discretização espacial.....	55
Tabela 6 - Dados de input no método BEM	56
Tabela 7 - Resultados de coeficiente de potência, torque, empuxo axial e potência total - NREL Phase VI BEM	60
Tabela 8 - Resultados de torque, empuxo axial e potência total - NREL Phase VI CFD	66
Tabela 9 - Diferença entre os resultados obtidos pelo modelo BEM e a simulação numérica	66
Tabela 10 - Resultados obtidos para o torque para os trabalhos citados em CFD	70
Tabela 11 - Resultados obtidos por Mourits em seu modelo BEM.....	70
Tabela 12 - Características construtivas da turbina eólica utilizada no experimento da NREL Phase VI.....	76

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Corda ao longo da pá NREL Phase VI	46
Gráfico 2 - Ângulo de passo ao longo da pá NREL Phase VI	46
Gráfico 3 - Erro do processo iterativo dos fatores de indução - NREL Phase VI BEM	56
Gráfico 4 - Número de iterações - NREL Phase VI BEM.....	57
Gráfico 5 - Resultado do fator de indução axial e radial comparado ao limite de Betz – NREL Phase VI BEM.....	57
Gráfico 6 - Ângulos calculados - NREL Phase VI BEM	58
Gráfico 7 - Coeficientes de contribuição local - NREL Phase VI BEM.....	58
Gráfico 8 - Forças resultantes na turbina – NREL Phase VI BEM.....	59
Gráfico 9 - Coeficiente de potência – NREL Phase VI BEM	60

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Motivação	15
1.2. Objetivo	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1. TURBINAS EÓLICAS.....	17
2.2. Perfis aerodinâmicos.....	22
2.3. Introdução ao Método de Elemento de Pá	23
2.3.1. Disco Atuador.....	23
2.3.2. Coeficiente de Potência	25
2.3.3. Coeficiente de Torque	26
2.3.4. Limite de Betz	26
2.3.5. Teoria do Momento Angular	27
2.3.6. Teoria de Elemento de Pá.....	28
2.3.7. Teoria do Momento de Elemento de Pá	30
2.4. Dinâmica dos Fluidos Computacional – CFD	32
2.4.1. O Método de Solução Numérica	32
2.4.1.2. Sistemas de Coordenada e de Base Vetorial.....	33
2.4.2. Método de Discretização	34
2.4.3. Método Dos Volumes Finitos – MVF	35
2.4.4. Método de Solução	36
2.4.5. Critério de Convergência.....	36
2.5. Escoamentos turbulentos	37
2.5.1. Introdução e Equacionamentos.....	37
2.5.2. Média de Reynolds	39
2.5.3. Modelos Baseados na Aproximação de Boussinesq.....	41

2.5.4.	Parâmetros Dependentes da Viscosidade	41
2.5.5.	Os Modelos $k - \omega$	42
1.1.1.1.	O Modelo $k - \omega$ SST	43
3.	METODOLOGIA.....	45
3.1.	Turbina NREL Phase VI.....	45
3.2.	Aplicação do método BEM.....	46
3.3.	Simulação fluidodinâmica	49
3.3.1.	O modelo geométrico	49
3.3.2.	Malha	50
3.3.3.	Configuração FLUENT	53
4.	RESULTADOS	56
4.1.	Resultados BEM	56
4.2.	Resultados CFD	60
5.	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	67
5.1.	Resultados de trabalhos similares	67
6.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
6.1.	Conclusão.....	71
6.2.	Recomendação para trabalhos futuros	71
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	APÊNDICE A	76
	APÊNDICE B.....	78
	APÊNDICE C.....	87
	APÊNDICE D	96

1. INTRODUÇÃO

Desde a criação dos Protocolos de Montreal (1987) e Kyoto (1997), engenheiros procuram alternativas para redução do impacto ambiental visando a preservação do planeta Terra para futuras gerações. Grande impactante, a produção de energia elétrica tomou grande importância neste cenário e com isso, houve a necessidade de se procurar alternativas sustentáveis. Por isso, os avanços tecnológicos em turbinas eólicas para produção de energia elétrica de maneira sustentável nos últimos anos foram impulsionados, inclusive no Brasil, mostrando que este tipo de geração será foco de pesquisa para os próximos anos. [24]

O CFD (*Computational Fluid Dynamics*) vem sendo utilizado com maiores proporções visto o grande avanço computacional, sendo muito empregado em muitas empresas e nas universidades. Com ele, pode-se visualizar e estudar os fenômenos físicos de interesse com grande representatividade e exatidão em comparação ao fenômeno físico real a ser estudado. Esta ferramenta computacional CFD já é uma realidade no âmbito de projetos de turbinas eólicas, uma vez que a realização de testes experimentais pode apresentar limitações devido ao custo.

Neste trabalho, foi feito o estudo do método de projeto de turbinas eólicas e implementação em linguagem computacional e comparação com resultados obtidos relacionados a simulação numérica por software de simulação comercial. As geometrias utilizadas neste trabalho foram fornecidas pelo experimento realizado pela NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) Phase IV, sendo apresentado ao fim melhorias que podem ser realizadas de acordo com os parâmetros ideais para projeto, conhecidos como parâmetros do limite de Betz.

1.1. Motivação

De acordo com os dados de 2016 da Global Wind Energy Council, o Brasil é o líder em produção na América Latina, com instalações majoritariamente no Nordeste. Os grandes investimentos nesta tecnologia, plano instituído em 2004 pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), levam o Brasil em direção às altas posições no ranking mundial, sendo estimado pelo governo através do Plano Decenal de Expansão de Energia a produção de 24 gigawatts em 2024. Isto explana a grande importância de profundos estudos e aperfeiçoamentos e melhorias nesta tecnologia para assegurar maiores gerações de energia elétrica e mais eficientes, garantindo um futuro mais limpo e sustentável.

1.2. Objetivo

Os objetivos principais do trabalho consistem em:

- Realizar o estudo do projeto das pás de uma turbina eólica utilizando o Método do Momento de Elemento de Pá (*Blade Element Momentum – BEM*) através da implementação pelo software MATLAB;
- Gerar uma simulação numérica, por meio da Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*), utilizando o modelo geométrico descrito pelo experimento da NREL;
- Comparar os resultados encontrados entre o modelo analítico e o computacional.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção esclareceremos o conceito de turbinas eólicas e perfis aerodinâmicos, bem como também a modelagem matemática adotada para o *Método de Elemento de Pá*, CFD e os modelos de turbulência para CFD.

2.1. TURBINAS EÓLICAS

A energia eólica se baseia no aproveitamento da energia mecânica presente nos ventos para obtenção de energia útil, ou seja, as forças eólicas são usufruídas em moinhos de vento, processo muito antigo ainda adotado, podendo ser datado sua utilização no século V, em velas para impulsão de veleiros ou em aerogeradores para geração de energia elétrica, que envolve uma tecnologia mais atual.

As turbinas eólicas, ou também chamadas de *aerogeradores*, são maquinários que utilizam a energia mecânica presente nos ventos devido a sua velocidade para geração de energia útil, que na maioria dos casos se resume em geração de energia elétrica. As turbinas eólicas, segundo Burton, possuem dois tipos de classificação: quanto à *orientação de eixo* e quanto à *potência nominal*. Quanto a sua orientação de eixo temos:

- Turbina Eólica de Eixo Horizontal (ou também chamada de TEEH);
- Turbina Eólica de Eixo Vertical (ou também chamada de TEEV).

As *turbinas eólicas de eixo horizontal* são as mais utilizadas atualmente, podendo possuir de uma a três pás, sendo mais comum três pás devido ao seu equilíbrio e assim geram menos vibrações e ruídos quando comparados a uma de duas pás, como também melhores relações de coeficiente de potência, custo e velocidade de rotação. Como o próprio nome diz, seu eixo se encontra na orientação horizontal, ou seja, sua linha de centro é paralela em relação ao chão e, normalmente, na orientação da velocidade do vento. Devido à existência de turbulências, o fluxo de ar pode variar na sua incidência sobre as pás do aerogerador. Um exemplo deste tipo de turbina de orientação horizontal pode ser encontrado na figura 1.

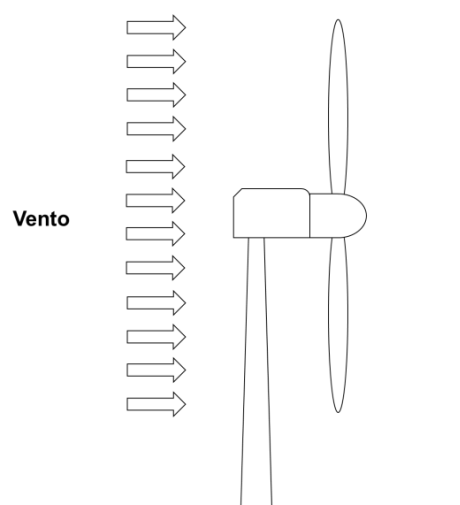
Figura 1 - Turbina eólica de eixo horizontal SWT-2.3-101, fabricante Siemens



Fonte: “<https://www.siemens.com/global/en/home/markets/wind/turbines-and-services/swt-2-3-101.html>”, Siemens.

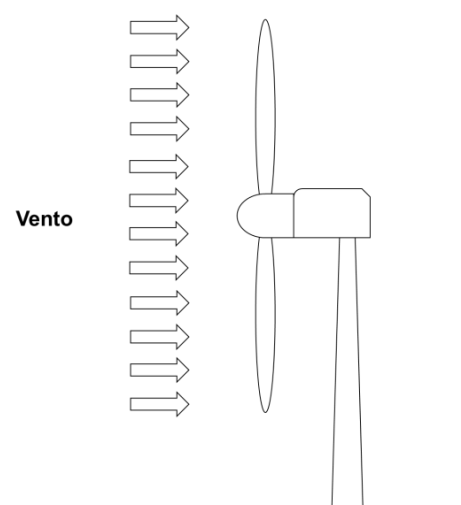
O conjunto de diversas turbinas eólicas, chamada de *wind farm* (fazenda eólica em português), é onde se constrói um número determinado de turbinas dispostas em uma determinada região, gerando energia elétrica que pode ser conectada diretamente à rede. A incidência do vento sobre o aerogerador diferencia a classificação das turbinas de orientação horizontal, ela podendo ser, segundo Burton, de dois tipos: esquema *downwind*, quando o vento incide na parte traseira do rotor, ou *upwind*, onde o vento incide na parte frontal do rotor. Estes dois esquemas estão representados respectivamente nas figuras 2 e 3.

Figura 2 - Esquema downwind para turbinas de eixo horizontal



Fonte: Autoria própria

Figura 3 - Esquema upwind para turbinas de eixo horizontal



Fonte: Autoria própria

A torre principal suporta a nacele, compartimento fundamental onde se encontra os componentes mecânicos e elétricos para a geração de energia, e o rotor, componente que realiza a conversão de energia cinética do vento em energia mecânica de rotação. A nacele contém equipamentos, sendo os principais:

- Caixa de engrenagens: também chamado de caixa de multiplicação, a caixa de engrenagens é um mecanismo que aumentará a rotação de saída, sendo a de entrada a do rotor, visto que as velocidades de rotor são normalmente baixas;
- Gerador: equipamento destinado a gerar energia elétrica utilizando a rotação do eixo após a caixa de engrenagens;
- Freios: são utilizados para controle da velocidade de rotação quando se tem ventos acima da velocidade de projeto (rajadas de vento), podendo gerar danos irreversíveis caso não sejam utilizados;
- Anemômetro: utilizado para se obter a velocidade do vento. São instalados na parte exterior na nacele;
- Biruta: é o componente que capta a direção do vento, importante para se realizar o ajuste do ângulo das pás (quando existir) visando obter um fluxo perpendicular que é a condição ideal de operação;

Um esquema generalizado da nacele pode ser encontrada na figura 4.

Figura 4 - Esquema da nacele de uma turbina eólica de eixo horizontal

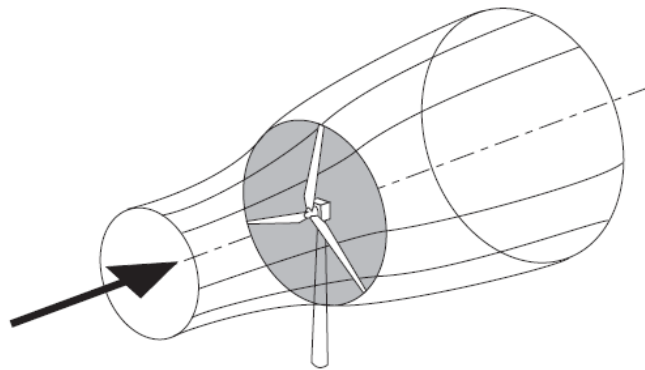


Fonte: “<http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=10>”, PUC-RS

Como anteriormente exposto, a turbina eólica aproveita a energia cinética presente no vento. Portanto, quando o vento passa pelo rotor da turbina, parte dessa energia é convertida em energia mecânica, fazendo assim com que o vento perca velocidade.

Para as turbinas eólicas de eixo horizontal, é considerado que o ar que atravessa o rotor permanece isolado do ar que não atravessa pelo rotor e que não sofre desaceleração. Este fenômeno descreve a vazão de ar em um volume de controle como o mostrado na Figura 5, onde se pode perceber a expansão gradual do volume de controle na parte à montante à jusante. Isto garante que, devido à desaceleração do ar, não há compressão de ar, havendo, portanto, o aumento da área para se manter a vazão de ar. [BURTON *et al*]

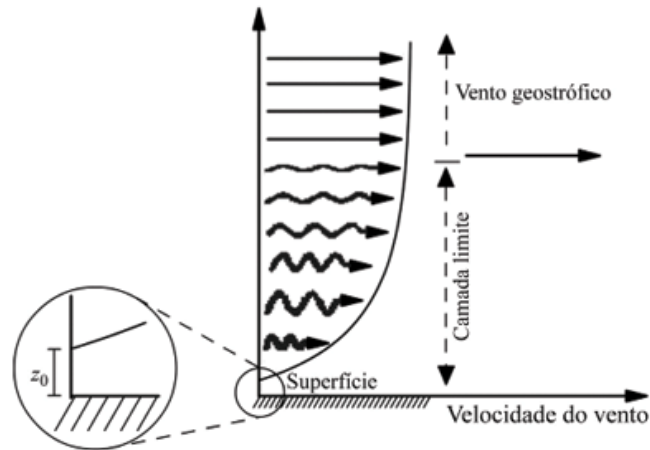
Figura 5 - Volume de controle para turbinas eólicas de eixo horizontal



Fonte: Burton *et al.*, Wind Energy Handbook (2001)

A evolução destas turbinas de eixo horizontal se dá principalmente no tamanho dos rotores e consequentemente das torres, possibilitando obter maiores velocidades e com menos turbulências, pois o escoamento de ar na atmosfera é tido como um escoamento turbulento, onde a rugosidade da superfície seria a terra, obtendo-se assim melhores ventos localizado o mais alto possível. Como por exemplo na figura 6, vemos que para regiões mais próximas à superfície as velocidades são baixas em relação às mais afastadas.

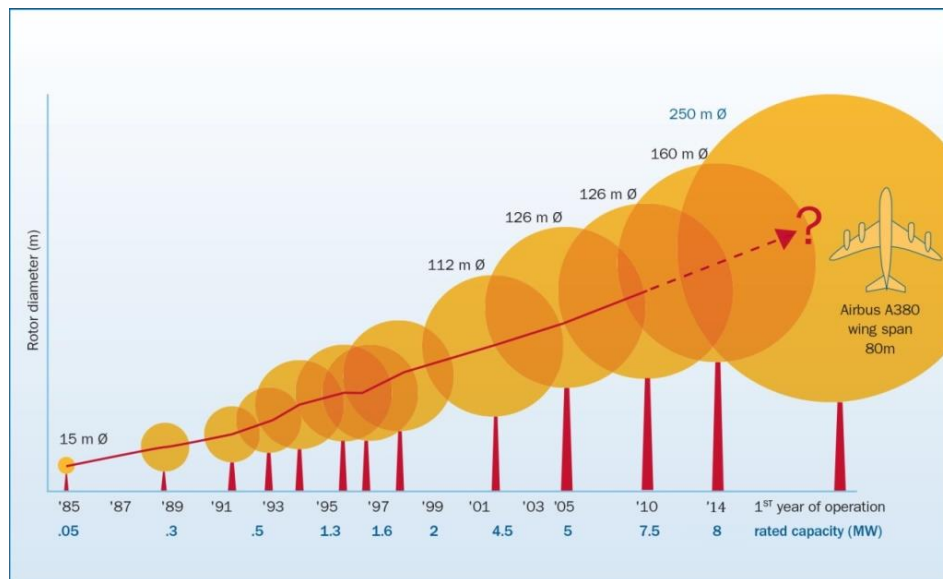
Figura 6 - Camada limite atmosférica



Fonte: Martins *et al.*, *O aproveitamento da energia eólica*

Atualmente, as turbinas eólicas de eixo horizontal chegam a alturas do cubo do rotor acima dos 100 metros, sendo a maior do mundo atualmente a turbina V-164 da empresa MHI Vestas, possuindo altura de 220 metros, rotor com diâmetro de 164m e potência nominal de 9.5 MW [26]. Abaixo podemos avaliar uma comparação da dimensão das primeiras turbinas com as atuais e uma previsão de que as turbinas futuras possuam 180 metros de torre e atinjam potências nominais em torno de 20.000 kW.

Figura 7 - Evolução da dimensão das turbinas eólicas de eixo horizontal

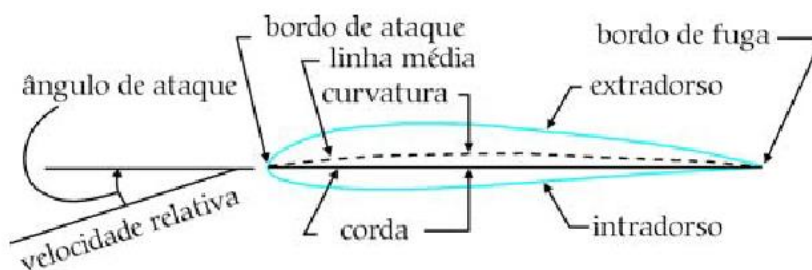


Fonte: goodenergiesalliancedotcom.files.wordpress.com

2.2. Perfis aerodinâmicos

Um perfil aerodinâmico, mais comumente chamado de aerofólio, é uma superfície projetada afim de se obter uma reação aerodinâmica decorrente de um escoamento do fluido em seu torno, gerando duas forças chamadas de *sustentação e arrasto*. Os aerofólios possuem características diferentes para cada tipo, portanto a figura 8 nos fornece o nome destas diferentes características:

Figura 8 - Nomenclatura para as diferentes partes de um aerofólio em geral

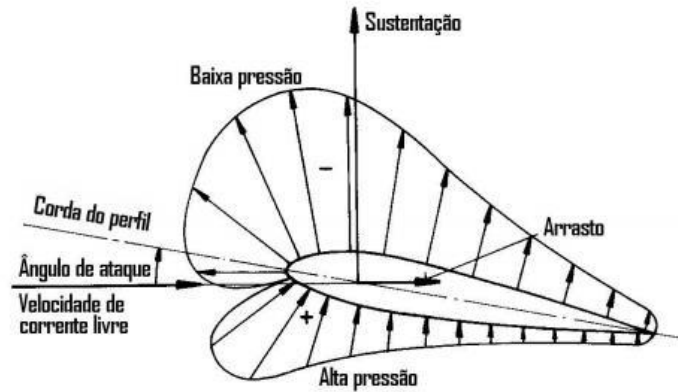


Fonte: Anderson (2006)

A linha média, observada na figura 8, define o ponto médio entre os pontos que formam a superfície superior e inferior do aerofólio. Já a linha de corda une os pontos inicial e final, aqui chamados de bordo de ataque e bordo de fuga, respectivamente, desta linha média. A curvatura é a máxima espessura entre a linha média e a corda.

O ângulo de ataque é o termo utilizado pela aerodinâmica para definir o ângulo formado entre a linha de corda do perfil e a direção do vento relativo. Este parâmetro é de grande importância para capacidade de sustentação em turbinas eólicas. Nele há um ponto de sustentação máxima que cai bruscamente e este ponto, chamado de estol, varia para cada tipo de perfil aerodinâmico. Portanto, os perfis aerodinâmicos possuem *coeficientes de arrasto e sustentação*, que variam com o ângulo de ataque, e que estes geram forças de arrasto e sustentação que são mostradas na figura 9.

Figura 9 - Pressões em torno de um perfil aerodinâmico e a geração das forças de arrasto e sustentação



Fonte: Picolo *et al.* (2014)

Nota-se que na região superior há uma região de baixa pressão e na região inferior de alta pressão, o que geram as forças ditas anteriormente.

As forças de arrasto, representadas por D , e de sustentação, representada por L , são calculadas através de [PICOLO *et al*]:

$$L = \frac{\rho}{2} C_L A V^2 \quad (3.1)$$

$$D = \frac{\rho}{2} C_D A V^2 \quad (3.2)$$

2.3. Introdução ao Método de Elemento de Pá

O método de elemento de pá, em inglês *Blade Element-Momentum Theory (BEM theory)*, é amplamente conhecido na indústria de aerogeradores pois este nos retorna resultados pertinentes de projeto, sendo necessário nas etapas preliminares e após a obtenção destes resultados se faz o uso de ferramentas como o CFD ou testes experimentais.

2.3.1. Disco Atuador

Primeiramente, introduz-se o conceito de disco atuador, que é, de acordo com *Burton*, um modelo utilizado para se realizar a análise da extração da energia cinética presente no ar para um aerogerador independentemente de seu design construtivo, onde se faz a consideração de um rotor com formato de disco, considerando um número infinito de pás, como mostrado na Figura 10. Observa-se que o vento se aproxima do rotor com uma velocidade e assim a

pressão do ar aumenta gradativamente em direção ao disco atuador, diminuindo assim a sua velocidade. Após sua passagem pelo disco atuador, sua pressão é reduzida drasticamente. Em sequência, a pressão do ar aumenta até certo ponto tal que ela seja igual a pressão atmosférica. Devido à conservação da continuidade no volume de controle adotado, podemos afirmar que a vazão de ar é igual na entrada, no disco atuador e na saída, ou seja:

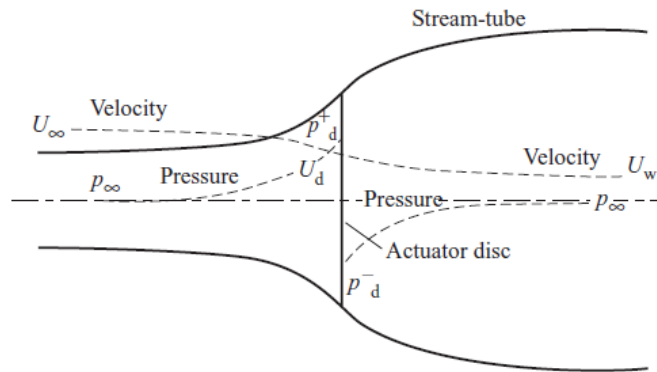
$$\rho A_{\infty} U_{\infty} = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w \quad (3.3)$$

As notações utilizadas aqui neste trabalho serão as mesmas utilizadas por *Burton et al.*, sendo assim os subscritos ∞ refere-se a uma distância grande à montante, d para as condições no disco atuador e w para as condições da esteira.

O disco atuador induz uma variação de velocidade do ar durante sua passagem, sendo necessário a definição do fator de interferência axial, dado pela letra a , onde $-aU_{\infty}$ é a componente deste escoamento induzido pela formação da esteira turbulenta, concluindo que a velocidade no disco atuador, U_d , pode ser calculada como:

$$U_d = U_{\infty}(1 - a) \quad (3.4)$$

Figura 10 - Relação das pressões e velocidades no disco atuador para a extração de energia cinética no aerogerador



Fonte: *Burton et al.*, *Wind Energy Handbook* (2001)

O ar que atravessa o disco atuador sofre uma variação total da sua velocidade, sendo esta variação $U_{\infty} - U_w$ e também uma variação de quantidade de movimento, determinada por:

$$\Delta M = (U_{\infty} - U_w) \rho A_d U_d \quad (3.5)$$

A variação é causada pela força gerada pela diferença de pressão produzida pelo disco atuador visto que fora do disco a pressão é atmosférica. Logo, teremos que:

$$(p_d^+ - p_d^-)A_d = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_\infty(1 - a) \quad (3.6)$$

Para se obter a diferença de pressão, se faz o uso da equação de Bernoulli para os trechos à montante e à jusante em relação ao disco atuador, considerando escoamento incompressível e horizontal, obtendo, respectivamente:

$$\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho U_d^2 + p_d^+ \quad (3.7)$$

$$\frac{1}{2}\rho U_w^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho U_d^2 + p_d^- \quad (3.8)$$

Subtraindo as equações acima, (5) e (6), é obtida a diferença de pressão. Substituindo na equação 4:

$$\frac{1}{2}\rho(U_\infty^2 - U_w^2)A_d = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_\infty(1 - a) \quad (3.9)$$

E assim simplificando, temos:

$$U_w = U_\infty(1 - 2a) \quad (3.10)$$

A equação 3.10 evidencia que metade da perda axial de velocidade no volume de controle será à montante e a outra metade à jusante.

2.3.2. Coeficiente de Potência

A força exercida pelo ar pode ser escrita como a diferença de pressão multiplicado pela área, resultando na equação abaixo:

$$F = (p_d^+ - p_d^-)A_d = 2\rho A_d U_\infty^2 a(1 - a) \quad (3.11)$$

Como esta força é aplicada no disco atuador, pode-se afirmar que a taxa de trabalho que é realizado é dada por:

$$P = F U_d = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1 - a) \quad (3.12)$$

Definindo assim o *coeficiente de potência* do aerogerador^[2], sendo ele a potência aerodinâmica extraída pela potência do vento de ar disponível sem o disco atuador:

$$C_P = \frac{Pot}{\frac{1}{2}\rho A_d U_\infty^3} \quad (3.13)$$

Podendo também ser descrito como:

$$C_P = 4a(1 - a)^2 \quad (3.14)$$

2.3.3. Coeficiente de Torque

De acordo com *Burton*, o *coeficiente de torque* é expresso como:

$$C_T = \frac{Pot}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_d} \quad (3.15)$$

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (3.16)$$

Onde Pot é a potência, ρ é a massa específica do ar, U_∞ é a velocidade do ar à montante do disco atuador, A_d é a área do disco atuador e a é o fator de indução axial.

O coeficiente de torque traduz quanto da potência da corrente livre de ar foi efetivamente aproveitada para a geração de torque, sendo portanto um parâmetro de análise da eficiência de uma turbina eólica.

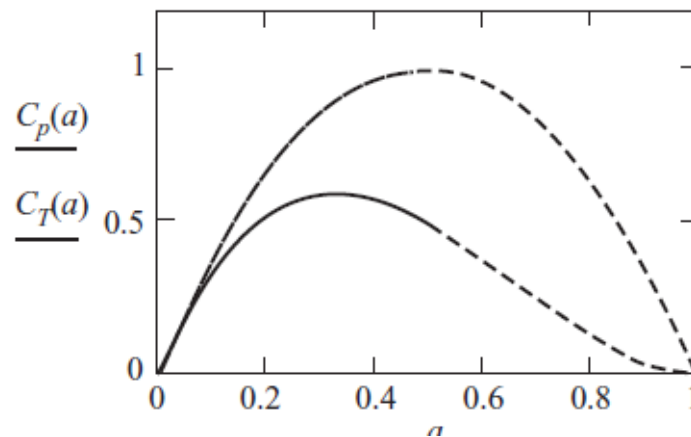
2.3.4. Limite de Betz

Uma vez que não é possível retirar toda a energia do ar^[2], isto é sua velocidade após o disco atuador deveria ser nula e isto é impossível, há também um valor ótimo de coeficiente de potência. O limite de Betz afirma que o valor máximo do coeficiente de potência é de aproximadamente 0.593, pois para se obter o valor máximo, basta derivar a equação 3.12 e igualar a 0, resultando em:

$$\frac{dC_P}{da} = 4a(1 - a)^2 \therefore a = \frac{1}{3} \quad (3.17)$$

Este valor, conhecido na área de projetos de aerogeradores, foi estudado e idealizado pelo alemão Albert Betz [27]. A figura 11 mostra a variação dos coeficientes de potência e torque. No gráfico, nota-se que para $a > 0,5$ o valor da velocidade de esteira se torna negativo e para isso nesta faixa deve-se adotar métodos empíricos para determinar seu comportamento [BURTON *et al.*].

Figura 11- Relação dos coeficientes de potência e de torque variando o fator de indução axial

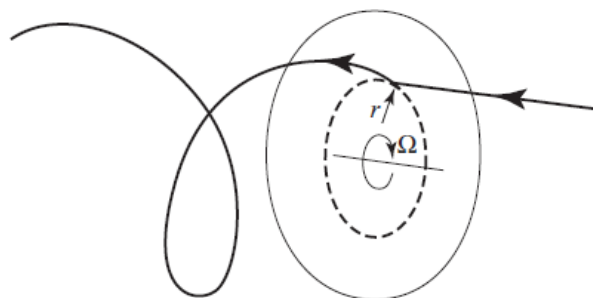


Fonte: Burton *et al.*, Wind Energy Handbook (2001)

2.3.5. Teoria do Momento Angular

A teoria do momento angular introduz um conceito de extrema importância para a região de esteira, logo após o disco atuador. De acordo com Burton (2001), sendo Ω a velocidade angular da turbina e r o raio em um dado ponto do raio total R , a região de esteira possui a seguinte característica (Nota-se que a sua velocidade angular possui sentido diferente da rotação do aerogerador):

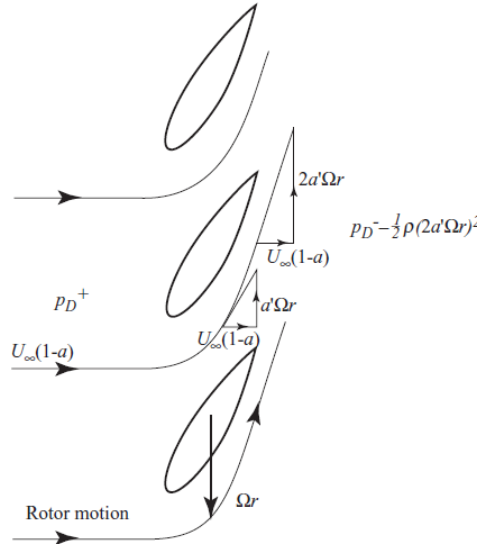
Figura 12 - Linha de corrente simplificada para aerogeradores de eixo horizontal



Fonte: Burton *et al.*, Wind Energy Handbook (2001)

Portanto, podemos definir o *fator de indução radial*, a' , que representa a mudança de velocidade tangencial. E por fim uma análise vetorial é proposta por Burton *et al.* (2001) mostrada na figura 13:

Figura 13 - Esquema de velocidades na passagem de ar pelo aerogerador



Fonte: Burton *et al.*, Wind Energy Handbook (2001)

Sabendo que o torque é igual a taxa de variação a vazão mássica multiplicado pela mudança da velocidade tangencial e pelo raio, temos que o torque pode ser expresso para um dado raio como:

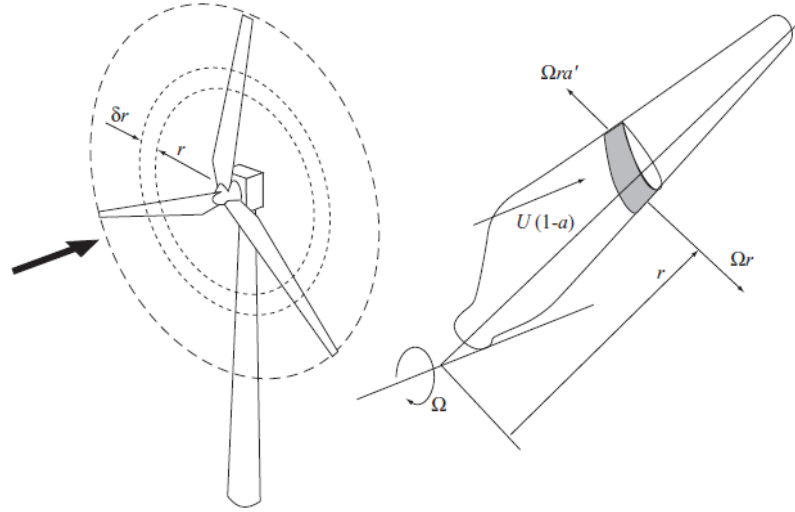
$$dT = \rho U_\infty (1 - a) 2 \Omega a' r^2 dA_d \quad (3.18)$$

2.3.6. Teoria de Elemento de Pá

Na teoria de elemento de pá, assume-se que as forças podem ser calculadas através das características do aerofólio escolhido em duas dimensões, ignorando os efeitos tridimensionais, considerando que os valores de C_L e C_D são conhecidos e adotando um ângulo de ataque definido como o ângulo incidente da velocidade na seção transversal dos elementos.

Adotando uma turbina com B pás, cada pá pode ser discretizada como mostrado na Figura 14, podendo variar o valor do ângulo de passo (torção da pá em relação ao eixo de rotação) e corda ao longo da pá.

Figura 14 - Discretização de pá para a teoria do elemento de pá



Fonte: Burton *et al.*, Wind Energy Handbook (2001)

Tem-se que, para uma dada rotação Ω do rotor em r , a velocidade tangencial do ar é dada pela soma da velocidade de rotação da pá, Ωr , com a velocidade de esteira, $a' \Omega r$, resultando em:

$$V_t = \Omega r(1 + a') \quad (3.19)$$

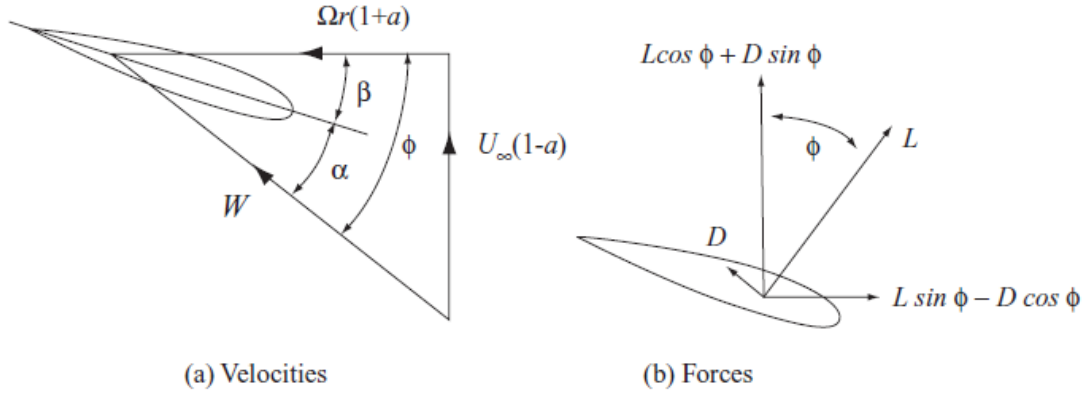
A velocidade axial, V_a , pode ser expressa por:

$$V_a = U_\infty(1 - a) \quad (3.20)$$

Na Figura 15 vemos os vetores de velocidade e força, adotando que α é o ângulo de ataque, β é o ângulo de passo e Φ o ângulo de fluxo relativo, L e D é a força de sustentação e arrasto, respectivamente. Portanto temos que a velocidade relativa W é expressa por:

$$W = \sqrt{U_\infty^2(1 - a)^2 + \Omega^2 r^2(1 - a')^2} \quad (3.21)$$

Figura 15 - Vetores de velocidade (esquerda) e forças (direita)



Fonte: Burton *et al.*, Wind Energy Handbook (2001)

Pelo triângulo de velocidades:

$$\sin \phi = \frac{U_{\infty}(1-a)}{W} \quad (3.22)$$

$$\cos \phi = \frac{r\Omega(1+a')}{W} \quad (3.23)$$

Portanto, as forças de sustentação e arrasto em um elemento de pá de largura dr são expressas da seguinte forma, respectivamente:

$$dL = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_L dr \quad (3.24)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_D dr \quad (3.25)$$

2.3.7. Teoria do Momento de Elemento de Pá

A teoria do momento de elemento de pá assume, corfome Burton, que as forças nos elementos são as únicas responsáveis para a mudança de momento do ar em um dado elemento, considerando, portanto, que não há interação radial com os elementos, hipótese esta que é verdadeira apenas se o fator de indução axial não varia radialmente. Lock (1924) mostrou que tal independência é aceitável, visto que na prática isto não ocorre.

O empuxo axial imposto nas B pás é dado por:

$$dL \cos \phi + dD \sin \phi = \frac{1}{2} \rho W^2 B c (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \quad (3.26)$$

E a contribuição de torque poder ser expressa por:

$$dL \sin \phi - dD \cos \phi = \frac{1}{2} \rho W^2 B c (C_L \sin \phi + C_D \cos \phi) r dr \quad (3.27)$$

Analisando a relação de velocidades no triângulo da Figura 15, podemos afirmar que:

$$\tan \phi = \frac{1 - a}{\lambda \mu (1 + a')} \quad (3.28)$$

Onde λ é um parâmetro chamado de *tip speed ratio* e μ é a relação entre os raios local e do rotor, sendo eles calculados por:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U_\infty} \quad (3.29)$$

$$\mu = \frac{r}{R} \quad (3.30)$$

É importante definir a *solidez local*, denotada por σ_r e é expressa por:

$$\sigma_r = \frac{Bc}{2\pi\mu R} \quad (3.31)$$

Portanto, reescrevendo a equação (3.11) e (3.18) com $A_d = 2\pi r dr$ e igualando a (3.26) e (3.27), respectivamente, obteremos que:

$$\frac{a}{(1 - a)} = \frac{\sigma (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi)}{4 \sin^2 \phi} \quad (3.32)$$

$$\frac{a'}{(1 + a)} = \frac{\sigma (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)}{4 \mu \lambda \sin^2 \phi} \quad (3.33)$$

Assim, com o conjunto de equações (3.28), (3.32) e (3.23), podemos realizar um processo iterativo afim de encontrar os valores de Φ , a e a' .

Portanto, o somatório dos empuxos axiais e torques para todos os elementos de pá nos fornecerá o empuxo axial e torque totais para uma pá, tal que:

$$E = \sum_{r_0}^R \frac{dE(r)}{B} \mid dE(r) = \rho U_{\infty} 4a(r)(1 - a(r))\pi r dr \quad (3.34)$$

$$T = \sum_{r_0}^R \frac{dT(r)}{B} \mid dT(r) = 4a'(r)(1 - a'(r))\rho U_{\infty} \pi r^3 \Omega dr \quad (3.35)$$

2.4. Dinâmica dos Fluidos Computacional – CFD

A Dinâmica dos Fluidos Computacional, comumente referida por CFD – acrônimo para *Computational Fluid Dynamics* – é um ramo da Mecânica dos Fluidos que analisa, por meio de simulações computacionais, sistemas que onde há escoamento fluidodinâmico, transferência de calor e fenômenos associados (VEERSTEG, H.K; MALALASEKERA, W, 1995).

Atualmente, o CFD é uma das técnicas mais aplicadas na indústria e na área científica. Com o aumento da potência computacional ao longo dos anos, o CFD tem se tornado não só uma ferramenta de análise essencial, como também é usado na fase de projeto em várias áreas da engenharia, sendo algumas delas:

- Aerodinâmica de veículos e de aeronaves;
- Motores de combustão interna;
- Hidrodinâmica de navios;
- Processos químicos de mistura e separação;
- Turbomáquinas;
- Bioengenharia.

2.4.1. O Método de Solução Numérica

Quando se trata de problemas envolvendo fluidos, sabe-se que as equações só têm solução analítica para determinados tipos de escoamento. Embora essas soluções ajudem no entendimento de como um fluido se comporta, raramente elas podem ser usadas no campo da engenharia, seja para análise ou para projeto, o que levou ao desenvolvimento de novas abordagens e métodos de resolução.

A simplificação das equações por meio de hipóteses somada à correção utilizando-se de dados empíricos e extrapolação de valores ainda é comumente utilizada como um dos métodos primários de análise e desenvolvimento na área de fluidos, tendo, porém, suas limitações em diversos casos. Portanto, recorre-se a experimentos para se obter dados representativos do problema.

Entretanto, experimentos podem ser caros e a medição dos parâmetros pode se tornar trabalhosa ou impossível, havendo a necessidade de alternativas do desenvolvimento de métodos alternativos.

Utilizando a força computacional, o CFD emprega tais técnicas numéricas para fornecer resultados para tais problemas. Alguns pontos importantes dessas soluções numéricas serão descritos nas próximas subseções.

2.4.1.1. Modelo Matemático

O modelo matemático consiste nos conjuntos de equações diferenciais parciais, ou de equações integrais-diferenciais, e das condições de contorno. Esse modelo pode incluir simplificações das leis de conservação e os modelos variam de acordo com a objetivo da aplicação. Os conjuntos de soluções normalmente são gerados para uma série particular de equações, pois criar um método visando uma solução geral é impraticável e provavelmente não seria útil a todas as aplicações [FERZIRGER *et al*, 2002].

2.4.1.2. Sistemas de Coordenada e de Base Vetorial

As leis de conservação podem ser escritas de maneiras diferentes, a depender do sistema de coordenadas escolhido (cartesiano, cilíndrico, esférico, etc.), que pode ser fixo ou móvel. A escolha de qual usar será dependente do escoamento analisado e pode influenciar o método de discretização e o tipo malha utilizada [FERZIRGER *et al*, 2002].

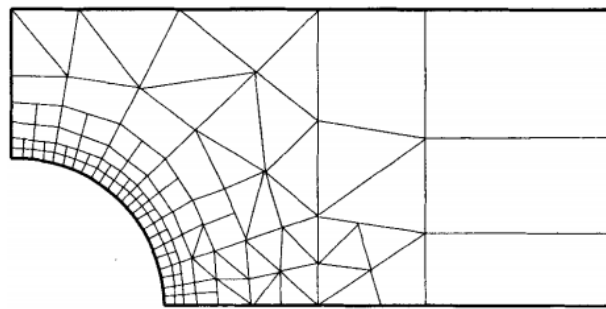
2.4.1.3. Malha Numérica

A malha pode ser descrita como a representação discreta do domínio geométrico em que o problema será resolvido, definindo as posições discretas em que as variáveis serão calculadas. Esta representação é realizado ao se dividir o domínio da solução em um número finito de subdomínios (elementos, volumes de controle etc.) [FERZIRGER *et al*, 2002].

2.4.1.4. Malha Não Estruturada

Malhas não estruturadas são mais flexíveis pois podem se ajustar a quaisquer domínios e, portanto, são as mais adequadas para geometrias complexas. Apesar de serem poderem ser usadas com quaisquer esquemas de discretização, esse tipo de malha se adapta melhor aos métodos de volumes finitos e de elementos finitos. Os elementos da malha podem ter qualquer forma e não há restrição para o número de nós ou de elementos vizinhos, o que possibilita um refinamento local da malha. Os elementos mais utilizados são os triangulares ou quadriláteros – para aplicações 2D – e os tetragonais e hexaédricos – para aplicações 3D. Devido à irregularidade da estrutura dos dados, a matriz das equações algébricas perde a característica regular e diagonal, o que demanda um maior tempo para que o sistema de equações seja resolvido.

Figura 16 - Malha não estruturada bidimensional



Fonte: Ferziger, (2002)

2.4.2. Método de Discretização

A discretização consiste no método de aproximação das equações diferenciais por meio de um sistema de equações algébricas para as variáveis em um conjunto de posições discretas no espaço e no tempo [FERZIRGER *et al*, 2002]. Existem várias abordagens de discretização, cada uma mais adequada à determinada aplicação, porém, os mais conhecidos e importantes são:

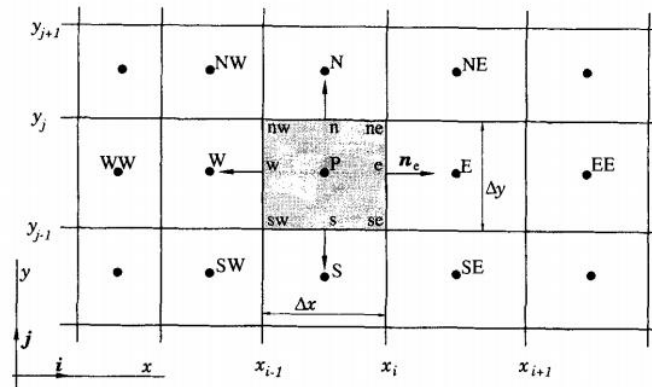
- Diferenças finitas;
- Elementos finitos;
- Volumes finitos.

Dentre os três métodos acima, o Método de Volumes Finitos se destaca ainda por ser o utilizado pela maioria dos softwares comerciais de CFD, incluindo o Fluent, pertencente ao Pacote Ansys, que é o utilizado nesse trabalho.

2.4.3. Método Dos Volumes Finitos – MVF

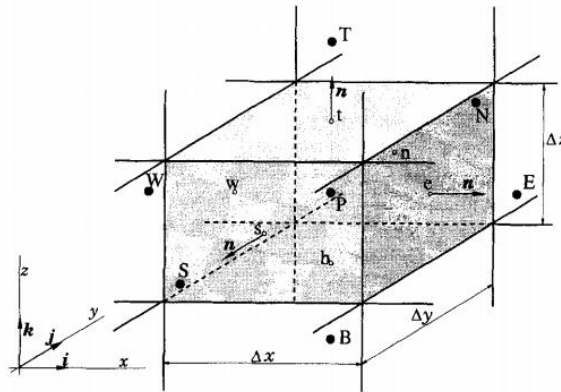
O Método dos Volumes Finitos utiliza a forma integral da equação de conservação como o seu ponto inicial. O domínio é subdividido em um número finito de volumes de controle (VC) contínuos e as equações de conservação são aplicadas a cada VC, onde é feito um balanço de propriedade. No centroide de cada VC está localizado o nó computacional onde a variável será calculada. Interpolações são utilizadas para expressar os valores da superfície dos VC's em termos dos valores nodais. Ainda, aproximações utilizando fórmulas de quadratura apropriadas para as integrais de superfície e de volume resultam nas equações algébricas para cada VC, para os quais um número de valores nodais vizinhos aparece. (Ferziger, 2002).

Figura 17 - Volume de controle notações típicas para uma malha bidimensional



Fonte: Ferziger, (2002)

Figura 18 - Volume de controle notações típicas para uma malha tridimensional



Fonte: Ferziger, (2002)

O MFV integra diretamente as equações diferenciais sobre a malha, o que facilita a aquisição de resultados. Ele ainda se acomoda a qualquer tipo de malha, sendo, portanto, apto para geometrias complexas. Sua construção é conservativa contanto que as superfícies integrais (que representam os fluxos convectivos e difusivos) sejam as mesmas para os VC's que dividem as fronteiras [FERZIRGER *et al*, 2002].

2.4.4. Método de Solução

A discretização do domínio gera um sistema não-linear de equações algébricas robusto. O método de solução desse sistema vai depender do problema tratado. Por exemplo, para escoamentos instáveis, métodos baseados nos usados para problemas de valor inicial para equações diferenciais ordinárias (avanço com o tempo) são os utilizados, sendo um problema resolvido a cada passo de tempo, enquanto que para escoamentos estáveis, métodos de “pseudoavanço” com o tempo ou esquemas equivalentes de iterações são preferidos. Uma vez que as equações não são lineares, iterações são necessárias para a resolução.

Esses métodos utilizam sucessivas linearizações das equações, resultando em sistemas lineares que são frequentemente resolvidos por técnicas de iteração [FERZIRGER *et al*, 2002].

2.4.5. Critério de Convergência

Normalmente, há dois níveis de iteração: as internas, que resolvem as equações lineares, e as externas, que lidam com a não-linearidade e acoplamento das equações.

A decisão de quando o processo iterativo deve ser cessado é importante para os pontos de vista da precisão e da eficiência [FERZIRGER *et al*, 2002].

2.5. Escoamentos turbulentos

2.5.1. Introdução e Equacionamentos

Em problemas fluidodinâmicos, os modelos matemáticos são fundamentalmente baseados nos princípios de conservação de massa, momento e energia. Esses equacionamentos são consolidados e descrevem o comportamento de todos os escoamentos. Eles são chamados de Equações de Navier-Stokes e são apresentados abaixo:

- **Equação da continuidade:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.36)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, t é o tempo e u_i é o vetor de velocidade, que é apresentado na notação de Einstein [MOURITS, 2014].

- **Equação da Conservação de Quantidade de Movimento:**

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} + \rho S_i \quad (3.37)$$

Onde S_i representa as forças no corpo, P é a pressão e $\overline{\tau_{ij}}$ é o tensor newtoniano de tensões. Este último é definido abaixo como:

$$\overline{\tau_{ij}} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (3.38)$$

Onde μ é a viscosidade turbulenta e δ_{ij} é o delta de Kronecker, definido como:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } i = j \\ 0 & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (3.39)$$

Onde E é a energia total do fluido por unidade de volume, definida como:

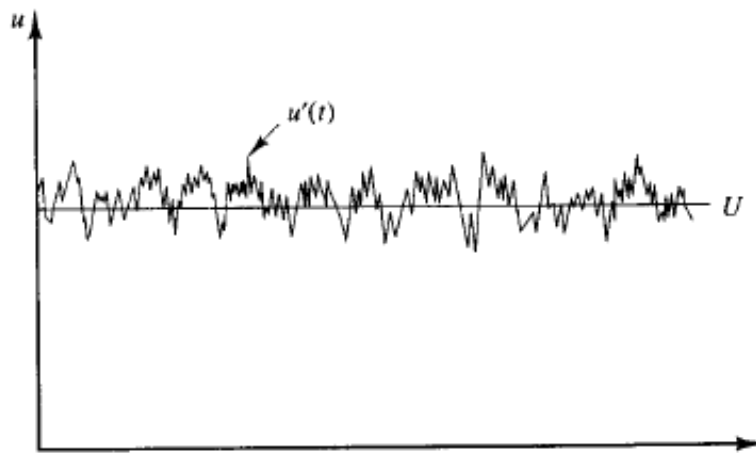
$$E = \left[e + \frac{1}{2} u_i u_i \right] \quad (3.40)$$

Sendo e a energia interna específica, e $u_i u_i$ a representação da energia cinética. O vetor de fluxo de calor q_j é calculado, por meio da lei de Fourier [INCROPERA *et al*], como:

$$q_j = -k_T \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3.41)$$

Quase todos os escoamentos, quer no campo da engenharia ou situações cotidianas, tornam-se instáveis a partir de um determinado Número de Reynolds.

Figura 19 - Típica medição de velocidade por ponto em um escoamento turbulento



Fonte: Versteeg; Malalasekera, (1995)

A turbulência em um escoamento se caracteriza por um comportamento aleatório e caótico, onde o movimento do fluido se torna instável mesmo com condições de contorno impostas. A velocidade e todas as outras propriedades do fluido variam de maneira imprevisível e aleatória.

As flutuações turbulentas sempre têm caráter tridimensional e constantemente anisotrópico. Além disso, estruturas com um fluxo rotacional são observadas nesses escoamentos. Elas são os chamados vórtices turbulentos, que tem tamanhos variados.

A movimentação dos vórtices gera dissipação na forma térmica devido ao trabalho realizado contra as forças viscosas. Essa dissipação leva a perdas de energia associadas aos escoamentos turbulentos.

A não-linearidade das equações de Navier-Stokes indica uma grande interação entre as flutuações turbulentas em diferentes direções e aspectos. Se essas equações irresolutas são utilizadas para se calcular diretamente o escoamento, uma grande variedade de escalar de tempo e comprimento devem ser computadas, o que requer uma malha muito fina e uma resolução alta no tempo, chamadas escalas de Kolmogorov. Essa abordagem é chamada de DNS (Dynamic Numerical Simulation) e é atualmente, devido às limitações computacionais, somente aplicável em casos de números de Reynolds muito baixos.

Outra técnica chamada de LES (Large Eddy Simulation), que resolve as grandes escalas diretamente e as pequenas são modeladas. Uma escala de sub-malha (Sub-Grid Scale – SGS) é usada para se modelar escalas que são assumidamente mais isotrópicas (*i.e.* as regiões de pequenos vórtices). Apesar de exigir menos recursos computacionais do que o DNS, o LES ainda assim é considerado um método custoso, especialmente para altos números de Reynolds [MOURITS, 2014].

Um modelo de turbulência, portanto, deve levar em conta parte das flutuações nos movimentos para que o custo computacional se mantenha baixo, enquanto não há perda extremamente significativa na precisão dos resultados. Assim sendo, deve-se considerar a amplitude da aplicabilidade, a precisão, a simplicidade e o custo computacional. Esses modelos estatísticos de turbulência são aplicados a determinadas formas de equações de movimento chamadas de RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), que são obtidas aplicando-se a média de Reynolds nas equações de Navier-Stokes.

2.5.2. Média de Reynolds

Em escoamentos turbulentos, os campos de pressão, velocidade, temperatura e densidade variam aleatoriamente. A abordagem de Reynolds consiste em separar os escoamentos em partes estacionárias e aleatórias. Essas quantidades são então apresentadas como a soma do escoamento médio com uma parte flutuante [CHASSAING, 2000]:

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (3.42)$$

Essa formulação é então inserida nas equações de conservação e assim, a média de Reynolds é calculada. Três métodos de cálculo da média são possíveis, sendo eles:

- **Média do tempo:** Só pode ser usada para escoamentos turbulentos estatisticamente estacionários. O escoamento médio é calculado por:

$$\overline{u_i(x)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T_{int}} \int_i^{i+T_{int}} u_i(x, t) dt \quad (3.43)$$

- **Média espacial:** É aplicado em casos de turbulência homogênea, um tipo de escoamento que é uniforme em todas as direções, em média.

$$\overline{u_i(t)} = \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{1}{V} \iiint_V u_i(x, t) dt \quad (3.44)$$

- **Média total:** É o tipo mais genérico e é aplicável, por exemplo, a escoamentos que decaem com o tempo.

$$\overline{u_i(x)} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_i(x, t) \quad (3.45)$$

Aplicando o método da média do tempo acima descrito nas equações de massa, momento e energia, obtém-se as equações RANS. A equação de continuidade não se altera por não ser dependente da velocidade, entretanto, termos extras aparecem nas equações de momento e energia devido à não-linearidade dos termos convectivos. Esses termos são chamados de Tensões de Reynolds, que aparecem nas Equações de Navier-Stokes, e fluxos escalares turbulentos, presentes na equação de Transporte Escalar [MALALASEKERA, VEERSTEG, 1997]. São eles:

$$\tau_{ij}^R = -\rho \overline{u_i' u_j'} \quad (3.46)$$

$$\Psi_i = -\rho \overline{u_i \phi'} \quad (3.47)$$

- **Equação do Transporte Escalar:**

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_j \Phi} + \Psi_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) \quad (3.48)$$

O maior problema desse modelo é calcular as tensões de Reynolds. Uma das abordagens mais utilizadas é a aproximação de Boussinesq [MALALASEKERA, VEERSTEG, 1997].

2.5.3. Modelos Baseados na Aproximação de Boussinesq

A aproximação de Boussinesq consiste em assumir uma relação entre as forças viscosas e as tensões de Reynolds, expressando as últimas em função viscosidade dos vórtices e do gradiente de velocidades. A hipótese de Boussinesq define que:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_T \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (3.49)$$

$$k \equiv \frac{u'_i u'_i}{2} \quad (3.50)$$

Onde k representa a energia cinética específica das flutuações. Ainda, tem-se que:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = 2\mu_T S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (3.51)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (3.52)$$

A viscosidade turbulenta dinâmica μ_T também deve ser modelada. Os modelos de turbulência que utilizam RANS são baseados nos números de equações necessárias para se calcular μ_T . Eles podem envolver de 0 a múltiplas equações. Neste trabalho, somente os modelos de duas equações serão abordados mais detalhadamente, uma vez que esses são os utilizados para a aplicação deste trabalho.

2.5.4. Parâmetros Dependentes da Viscosidade

Parâmetros adimensionais são utilizados para se calcular as distâncias da parede para o escoamento turbulento e para a camada laminar [MALALASEKERA, VEERSTEG, 1997]. São esses parâmetros:

$$y^* \equiv \frac{y_n \sqrt{k}}{v} \quad (3.53)$$

$$y^+ \equiv \frac{y_n u_\tau}{\nu} \quad (3.54)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.55)$$

Onde y_n é a distância da parede mais próxima, u_τ é a velocidade de atrito e τ_w é a tensão de cisalhamento dinâmica na parede.

O número de Reynolds turbulentos também são parâmetros dependentes da viscosidade e são definidos por, para os modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$, respectivamente:

$$R_\omega \equiv \frac{k}{\nu \omega} \quad (3.56)$$

2.5.5. Os Modelos $k - \omega$

Os modelos de duas equações são atualmente os mais usados no ramo da engenharia, principalmente pelo fato predizerem as propriedades de um escoamento sem conhecimento prévio da geometria dele ou da estrutura turbulenta inerente.

Os modelos $k - \omega$ se utiliza da taxa de dissipação específica de k para que a μ_T e os tamanhos de comprimento de mistura sejam computados. Ele considera que:

$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega} \quad (3.57)$$

Esse modelo é indicado para os casos de escoamento livre de cisalhamento, de camada limite em placas planas, em casos de gradientes adversos de pressão e em separação de escoamento. Entretanto, devido à grande dependência das condições de contorno do escoamento livre, ele falha ao predizer o comportamento de escoamentos com extensas separações, em redemoinhos, de fluidos com partículas em suspensão, dentre outros.

Dessa forma, algumas alterações no modelo $k - \omega$ padrão foram feitas, de forma a expandir as áreas de aplicação. Destacam-se o modelo $k - \omega$ baseline (BSL) e o modelo $k - \omega$ Shear-Stress Transport (SST). O último, por oferecer uma boa performance em casos de escoamento ao redor de aerofólios, é mais detalhado a seguir.

1.1.1.1. O Modelo $k - \omega$ SST

Este modelo foi desenvolvido por Menter em 1988 para conseguir unir a formulação robusta e precisa do modelo $k - \omega$ nas regiões próximas à parede com a independência em relação ao escoamento livre do modelo $k - \varepsilon$ nas regiões afastadas da parede. Apesar de semelhante ao padrão, o modelo SST inclui algumas características que melhoram a precisão e a confiabilidade para diversos casos de escoamentos com grandes gradientes adversos de pressão, ao redor de aerofólios e nos casos de escoamento com ondas de choque transônicas. A formulação matemática do modelo $k - \omega$ SST é:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho(P_k - \beta^* \omega k) \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \rho \left(\frac{\alpha}{\nu_t} P_\omega - \frac{\beta}{\beta^* \omega^2} \right) + \rho S_l \quad (3.59)$$

A equação (3.58) é conhecida como equação de transporte de k e a equação (3.59) como equação de transporte de ω . A variável P representa a produção de turbulência, P_k , e a taxa de dissipação específica em relação a k , P_ω , são definidas por:

$$P_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.60)$$

$$P_\omega = \rho \frac{\alpha}{\nu_t} P_k \quad (3.61)$$

Menter desenvolveu os modelos como uma forma de “mistura” entre os modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$. Este processo se dá por meio da equação abaixo:

$$B \left(\frac{a}{b} \right) \equiv F_1 a + (1 - F_1) b \quad (3.62)$$

Onde a F_1 é denominada a função de “blending”:

$$F_1 = \tanh \arg_1^4 \quad (3.63)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y_n \omega} \right), \frac{2k\omega}{y_n^2 \max(\nabla k \cdot \nabla \omega, 0.0)} \right] \quad (3.64)$$

A tabela abaixo sumariza o valor dos coeficientes usados na equação.

Tabela 1- Coeficientes do modelo k – ω SST

α^*	β^*	α	β	σ_k	σ_ω	S_l
$\min\left(1, \frac{0,31}{F_2} \frac{\omega}{\bar{w}}\right)$	0,09	$B \left(\frac{553}{440}\right)$	$B \left(\frac{0,075}{0,083}\right)$	$\frac{1}{B \left(\frac{0,85}{1,0}\right)}$	$\frac{1}{B \left(\frac{0,5}{0,856}\right)}$	$B \left(\frac{0}{\frac{1,71}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega}\right)$

Fonte: Menter, 1994

Para baixos números de Reynolds, as seguinte condições de contorno são assumidas para uma integração direta na parede [MENTER, 1994]:

$$k_w = 0, \quad \text{fluxo}(k)_w = 0 \quad (3.67)$$

$$\omega = 0, \quad \text{fluxo}(\omega)_w = -\nu \nabla \omega \quad (3.68)$$

Onde o subscrito w denota os valores exatamente na parede.

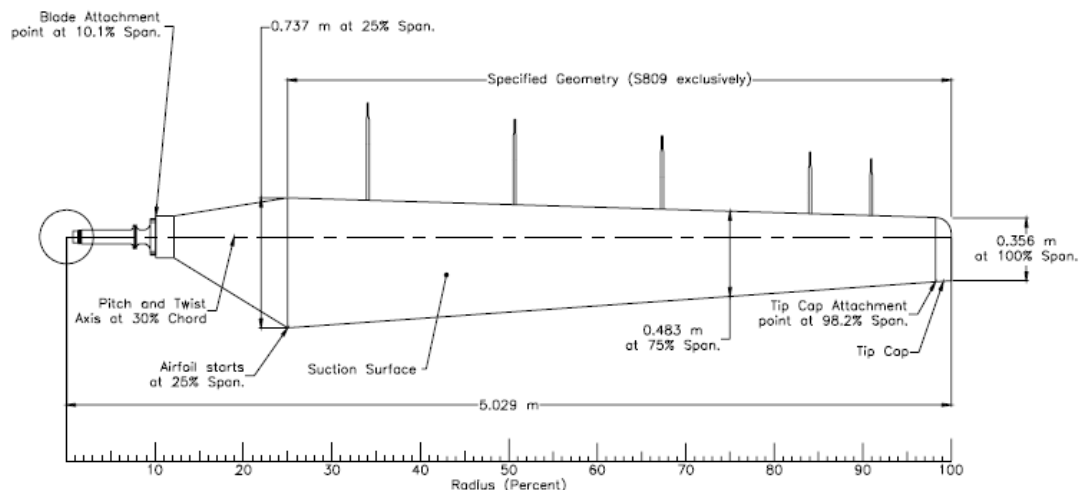
3. METODOLOGIA

Nesta seção, são apresentados o procedimento de cálculo para o método BEM de projeto de turbinas eólicas junto as características da turbina NREL Phase VI e as configurações utilizadas para a simulação numérica, incluindo geometria 3D obtida, malha gerada e o *setup* de condições de contorno no software ANSYS.

3.1. Turbina NREL Phase VI

A turbina apresentada no relatório da NREL Phase VI é utilizada neste trabalho para referência de resultados. Ela possui diâmetro de 10m e foi construída para estudos experimentais pela NREL. Nela foram realizados experimentos de performance das mais variadas condições. Ela foi inserida em um túnel de vento de 24,4x36,6m da NASA-Ames, sendo realizado medições principalmente de pressão. O perfil ao longo da pá foi unicamente o S809, devido à maior facilidade de fabricação, perfil este com dados de coeficiente de sustentação e arrasto e perfil geométrico retirados pelo website da NREL e são apresentados no Apêndice A, assim como a geometria da pá (comprimento, ângulo de passo, tamanho de corda, etc.).

Figura 20 - Desenho da pá utilizada no experimento NREL Phase VI



Fonte: NREL Phase VI

O ângulo de passo e o tamanho de corda pode ser visualizado pelos gráficos **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e

Gráfico 1 - Corda ao longo da pá NREL Phase VI

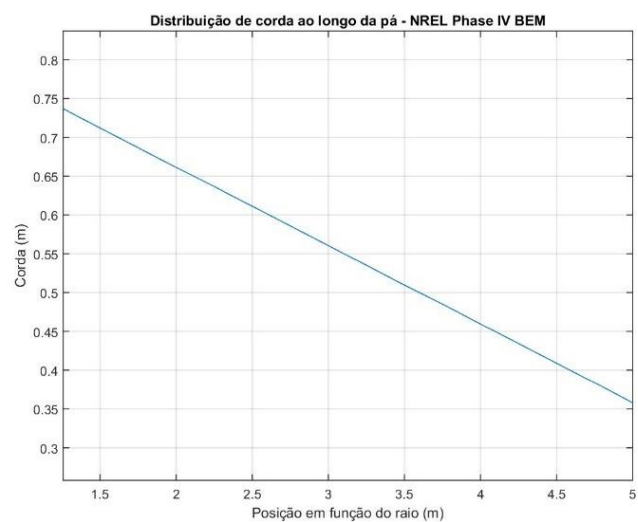


Gráfico 2, respectivamente:

Gráfico 1 - Corda ao longo da pá NREL Phase VI

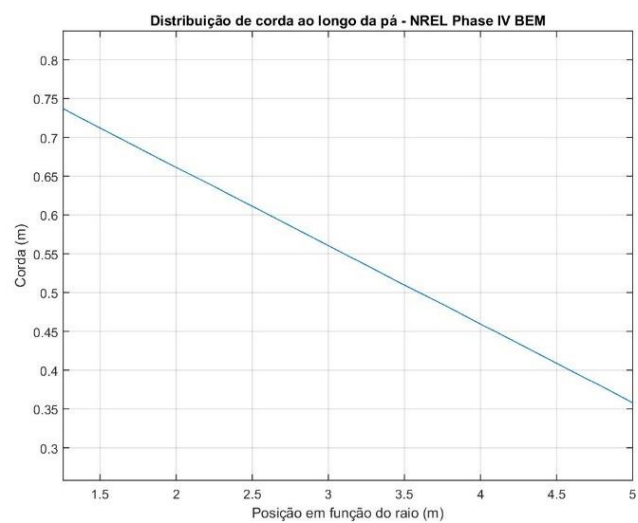
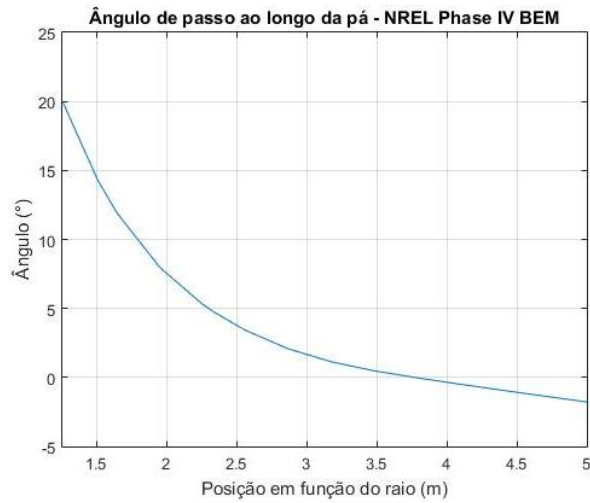


Gráfico 2 - Ângulo de passo ao longo da pá NREL Phase VI

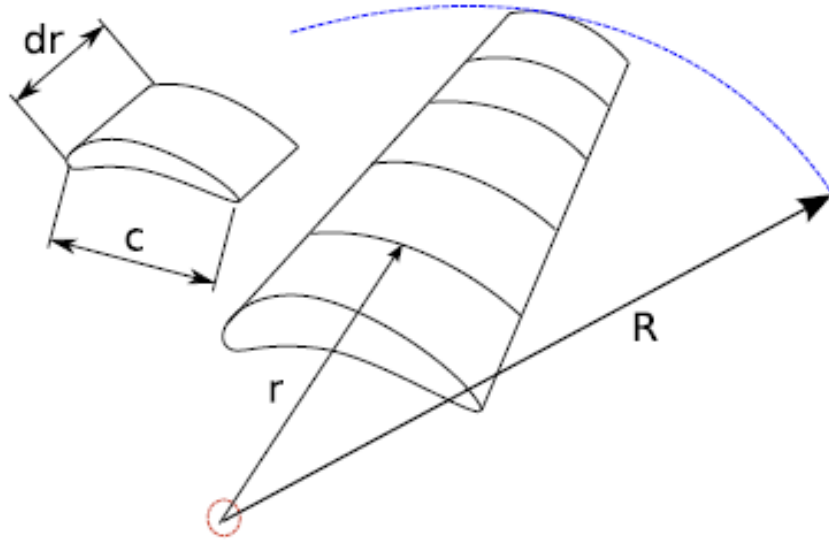


3.2. Aplicação do método BEM

O procedimento de projeto de turbinas consiste em analisar a potência e rotação desejada, características geométricas (número de pás, distribuição de corda e ângulo de passo ao longo da pá). Não foi apresentado neste trabalho a escolha destes parâmetros como projeto, mas sim com uma turbina já existente. Portanto, estes parâmetros são conhecidos e foram apresentados anteriormente.

Primeiramente, a pá deve ser dividida em N elementos. A distância entre os elementos é dada pelo Apêndice A. Nota-se que normalmente os elementos são equidistantes, porém utilizamos os valores de cada seção utilizada na geometria construtiva da NREL Phase VI. A Figura 21 demonstra como se dispõe os elementos de pá de uma maneira generalizada.

Figura 21 - Discretização da pá em N elementos de pá



Fonte: (INGRAM, 2011)

Assim, com as equações (3.28), (3.32) e (3.33) apresentadas na seção de fundamentação teórica, tem-se que:

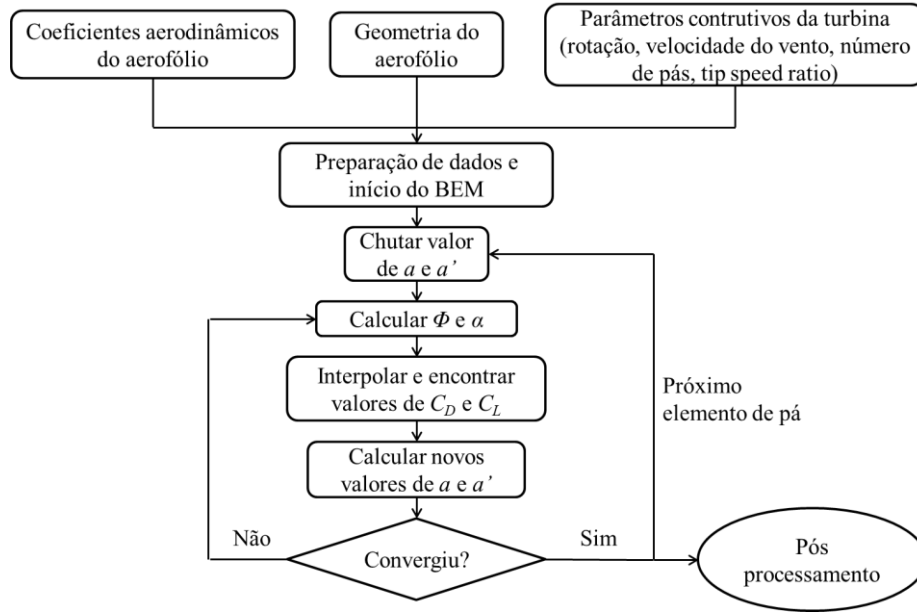
$$\tan\phi = \frac{1 - a}{\lambda\mu(1 + a')} \quad (4.1)$$

$$\frac{a}{(1 - a)} = \frac{\sigma(C_L \cos\phi + C_D \sin\phi)}{4 \sin^2 \phi} \quad (4.2)$$

$$\frac{a'}{(1 + a)} = \frac{\sigma(C_L \sin\phi - C_D \cos\phi)}{4\mu\lambda \sin^2 \phi} \quad (4.3)$$

Com isso, é feito um processo iterativo para se obter os valores de indução axial e radial, como pode ser visto na figura a seguir, que demonstra como o processo iterativo deve ser realizado:

Figura 22- Processo iterativo para cálculo dos fatores de indução e ângulo de fluxo relativo



Fonte: Autoria própria

Com os valores de fator de indução axial e radial e ângulo de incidência ao longo da pá, obtém-se o torque e o empuxo axial para cada elemento de pá discretizado, coeficiente de potência, a própria potência e as forças de arrasto e sustentação pelas equações descritas na fundamentação teórica, que são lembradas abaixo:

$$E = \sum_{r_0}^R \frac{dE(r)}{N} \mid dE(r) = \int \rho U_{\infty} 4a(r)(1 - a(r))\pi r dr \quad (4.4)$$

$$T = \sum_{r_0}^R \frac{dT(r)}{N} \mid dT(r) = \int 4a'(r)(1 - a'(r))\rho U_{\infty} \pi r^3 \Omega dr \quad (4.5)$$

$$C_p(r) = 4a(r)(1 - a(r))^2 \quad (4.6)$$

$$Pot = \frac{1}{2} \rho A_d U_{\infty}^3 C_p \quad (4.7)$$

3.3. Simulação fluidodinâmica

Após a introdução sobre o funcionamento geral da turbina, do processo de análise por meio do BEM e das características do aerofólio, os próximos tópicos tratam das principais etapas e procedimentos da simulação numérica.

3.3.1. O modelo geométrico

Um modelo tridimensional da pá NREL foi gerado em CAD, especificamente, pelo software SOLIDOWORDKS, a partir do aerofólio S809 e das dimensões geométricas fornecidas no relatório disponibilizado pela NREL^[10]..

Alterações na borda de fuga da pá foram feitas, representadas na Figura 23, de modo a evitar cantos vivos e consequentemente, evitar a formação elementos com baixa qualidade e esforço computacional por parte do software para gerar malha nesses pontos. Ainda, uma aresta mais espessa manteve maior congruência com o protótipo físico estudado.

Figura 23 - Modelo tridimensional da pá NREL Phase VI

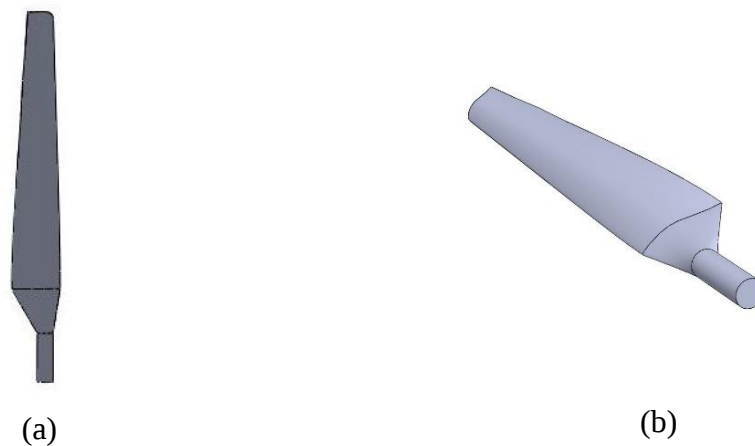
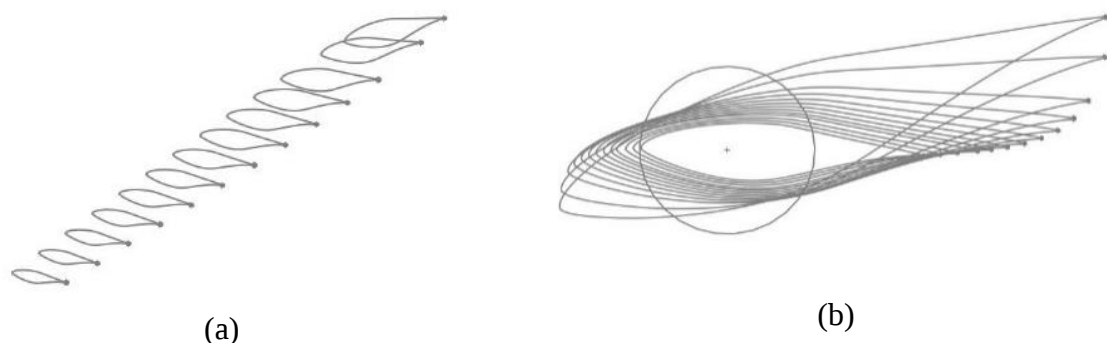


Figura 24 - Perfis dos aerofólios da pá



A ponta da pá também é arredondada, com base na descrição da geometria nos documentos da NREL PHASE VI, como mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Arredondamento da ponta da pá

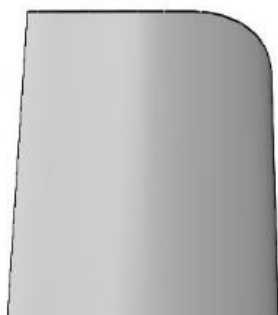
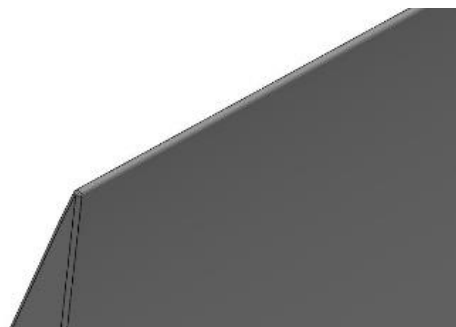


Figura 26 - Alteração na borda de fuga



3.3.2. Malha

A malha foi gerada utilizando o software ANSYS MESHING, que é integrado e gera diversos tipos de malha, desde estruturais às fluidodinâmicas. Apesar de suas limitações em relação ao ajuste fino da malha, ele se provou uma ferramenta útil para o caso analisado.

3.3.2.1. Dimensões

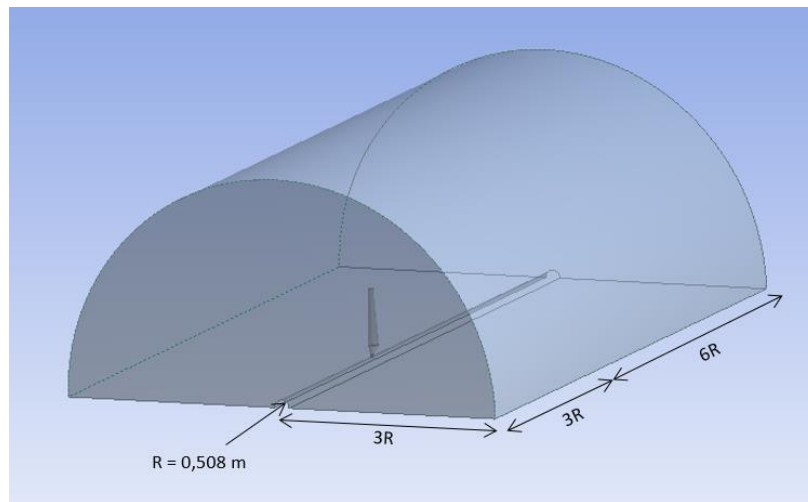
Inicialmente, foi ponderada de a geração de uma malha hexaédrica, uma vez que essa apresenta um menor tempo de convergência e economiza tempo computacional. Entretanto, optou-se por uma malha não-estruturada formada de elementos tetraédricos devido à complexidade da geometria.

Apesar de o rotor da turbina ser formado de duas pás, apenas uma das pás é tratada, permitindo que a metade do domínio seja representado e assim, diminuindo pela metade a quantidade de elementos de malha. Essa representação é possível devido à aplicação das condições de contorno periódicas.

A malha consiste de elementos triangulares para as superfícies, elementos tetraédricos para o domínio volumétrico e de elementos prismáticos ao redor da superfície da pá de maneira a se manter uma malha mais refinada nas adjacências da camada limite.

Um semicilindro foi gerado ao redor da pá Figura 27, sendo que o raio da última é de $R = 5,029 \text{ m}$. A entrada é localizada a uma distância de $3R$ à montante da pá e saída, a $6R$ à jusante. O raio do semicilindro é de $3R$. Uma vez que se optou por não modelar o cubo do rotor, para se economizar em elementos de malha e evitar a geração de mais uma geometria complexa, um outro semicilindro com um raio de $0,508 \text{ m}$ foi estabelecido como condição de contorno. Acredita-se que a não introdução do cubo no modelo possa gerar imprecisões, entretanto, através da análise de artigos e trabalhos já publicados, como em [3], [15], [21] e [22], essa aproximação não deve acarretar em erros relevantes.

Figura 27 - Domínio semicilíndrico e as dimensões principais



A escolha do comprimento do domínio varia de autor para autor. A distância entre a pá e a saída chega a variar entre $20R$ e $6R$ na literatura pesquisada. Devido à questão quantitativa dos elementos de malha e aos bons resultados obtidos com esse valor, optou-se por posicionar a saída do domínio a $6R$, como anteriormente explicitado.

Os tamanhos máximos e mínimos dos elementos de malha podem ser controlados pelo software. Dessa maneira, os elementos maiores foram localizados nas regiões mais externas, próximas aos limites do domínio, enquanto nas proximidades da pá e na região de esteira à montante e à jusante, um maior refinamento e densidade de elementos foi observado. Um dos motivos para se desejar elementos menores na região de esteira é que a região de esteira afeta o escoamento através da pá e, portanto, tem influência na distribuição do torque. Entretanto, devido à limitada potência computacional disponível para a realização deste trabalho, o refinamento da região de esteira pode não ter sido suficiente, o que levou à grandes discrepâncias quanto ao valor do torque gerado pela turbina, como apresentado na seção 4 (RESULTADOS).

Figura 28 - Malha da superfície da pá

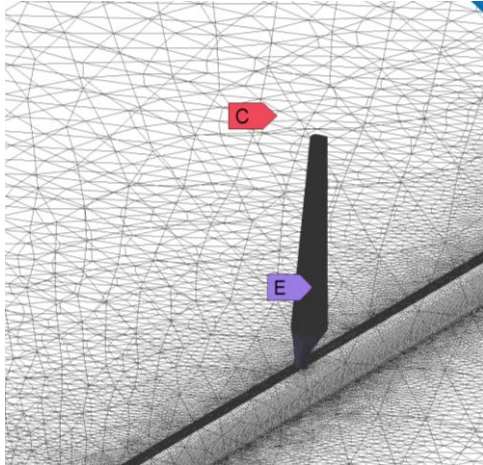


Figura 29 - Detalhe da malha da ponta da pá

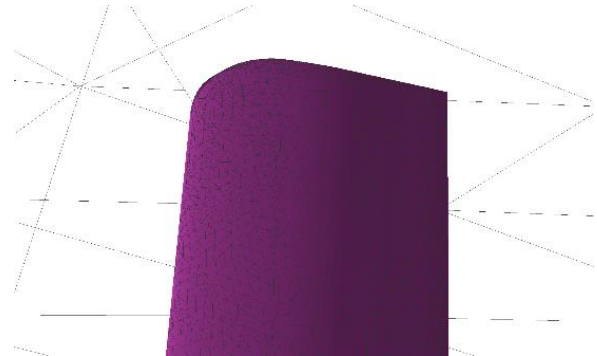
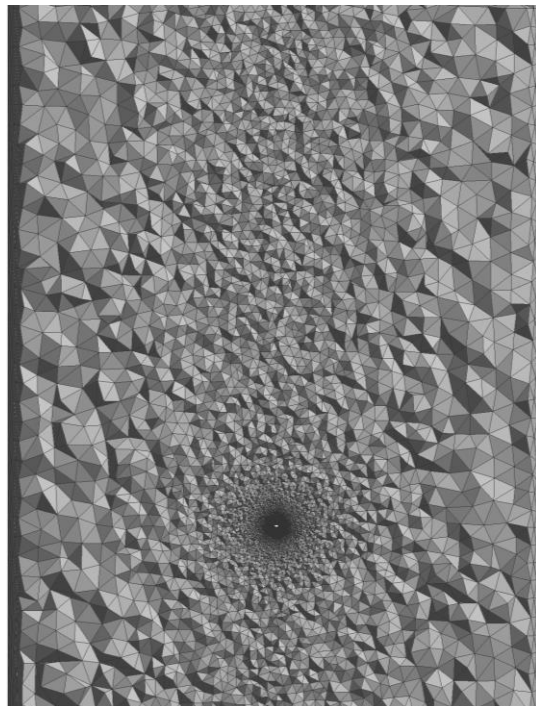


Figura 30 - Seção da malha volumétrica mostrando uma maior densidade de elementos nas regiões de esteira e nas adjacências da pá

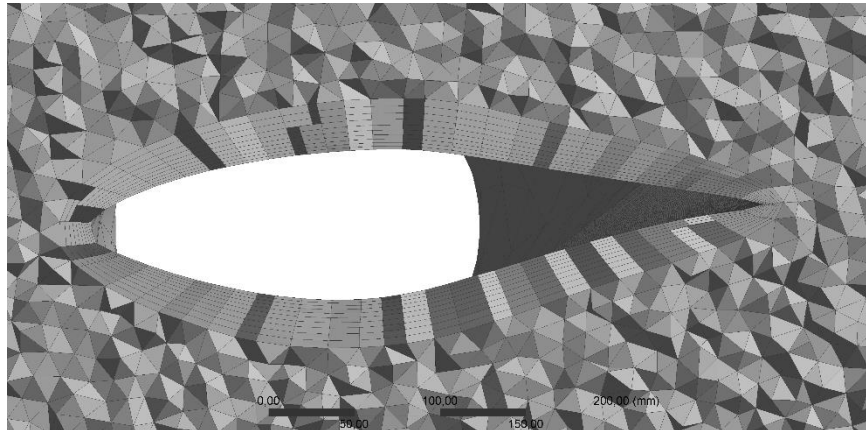


3.3.2.2. INFLATION – Camada de elementos prismáticos

Uma vez que o tratamento da camada limite é de suma importância em estudos de aerofólios, optou-se por utilizar um *inflation* ao longo de toda a pá, por se tratar de uma malha não-estruturada. Essa metodologia consiste na geração de uma malha de superfície, que posteriormente são “extrudadas” na forma de elementos prismáticos.

O número de camadas escolhido foi de 10, com uma taxa de crescimento de 10%. A espessura da primeira camada prismática não foi especificada, uma vez que se optou pelo método de “*Smooth transition*”, por este ter uma melhor influência na qualidade geral da malha.

Figura 31 - Detalhe do inflation em uma seção da malha volumétrica



3.3.2.3. Estatísticas da malha

O número total de elementos de malha se mostrou alto, especialmente devido à presença do *inflation* e do refino nas regiões já comentadas, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade de nós e elementos total da malha

Número de nós	Número de elementos
1.629.036	8.706.931

Esta malha final fora utilizada devido ao custo computacional e ao fato de que as tentativas de um maior refino resultavam na piora dos parâmetros de qualidade da malha, muitas vezes tornando impossível realizar a simulação.

3.3.3. Configuração *FLUENT*

Optou-se por utilizar o esquema de *Single Moving Reference Frame* par – SRF), uma vez que a rotação da pá, que é lida como uma parede móvel em relação ao domínio estático, era imprescindível para se analisar o problema proposto. Posto que a velocidade de entrada e de rotação do caso eram baixas, o SRF é considerado apropriado para fornecer resultados fidedignos quanto ao caso de rotação em regime permanente. [15]

3.3.3.1. Condições de contorno

A configuração das condições de contorno é uma etapa importante para a resolução de simulações computacionais. Na Tabela 3, estão representados os nomes das partes e os tipos de condição de contorno utilizadas.

Tabela 3 - Tipos de condição de contorno utilizados para cada região da malha

Região	Tipo de CC
Entrada	<i>Velocity-INlet</i>
Campo aberto	<i>Symmetry</i>
Saída	<i>Pressure-Outlet</i>
Faces-periódicas	<i>Periodic</i>
Semecilindro	<i>Symmetry</i>
Pá	<i>No-slip wall</i>

Figura 32 - Nomes dados às regiões da malha

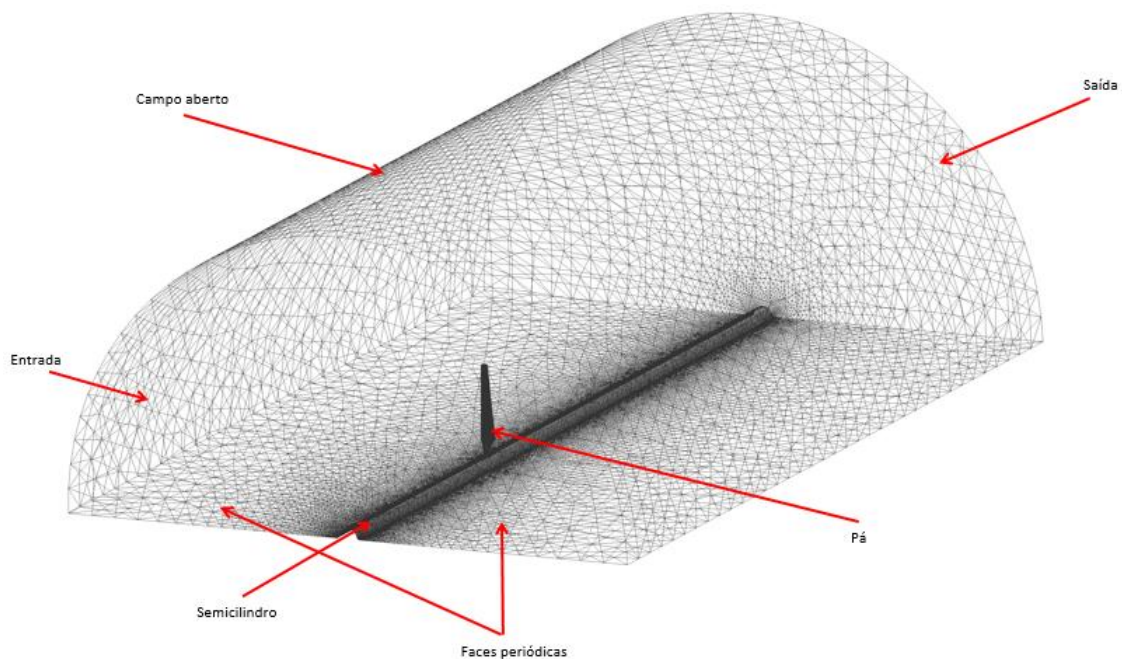


Tabela 4 - Condições de contorno aplicadas à regiões da malha

Região	Condição de contorno
Entrada	7 m/s , $TI = 0.5\%$
Campo aberto	-
Saída	0 Pa
Faces periódicas	<i>Offset do ângulo = 180°</i>
Semicilindro	-
Pá	7.54 rad/s

3.3.3.2. Método de solução

O esquema de discretização adotado foi o baseado em pressão, com o algoritmo *coupled*, que em cada passo, resolve as equações de continuidade baseadas na pressão e as de momento. Esse esquema e algoritmo permitiram uma convergência mais rápida e segura da simulação. Quanto aos métodos, as recomendações gerais do FLUENT foram seguidas: As simulações foram iniciadas com um esquema *upwind* de primeira ordem para todas as variáveis e, quando o sistema começou a convergir (a partir de cerca da centésima iteração), o esquema foi mudado para *upwind* de segunda ordem. O primeiro é indicado para limitar problemas de divergência, enquanto o segundo é mais preciso em seus cálculos. Um sumário dos *inputs* da discretização é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Esquema de discretização espacial

Gradiente	<i>Least Squares Cell Based</i>
Pressão	<i>Standard</i>
Momentum	<i>Second Order Upwind</i>
Energia cinética turbulenta	<i>Second Order Upwind</i>
Taxa de dissipação específica	<i>Second Order Upwind</i>

4. RESULTADOS

Nesta etapa do trabalho, serão apresentados os resultados obtidos pelo método de projeto BEM que fora implementado em linguagem MATLAB, este que se encontra anexo no Apêndice B, e também os resultados obtidos pela simulação numérica pelo software ANSYS Fluent®.

4.1. Resultados BEM

As condições utilizadas como *input* são apresentadas na Tabela 6:

Tabela 6 - Dados de *input* no método BEM

Velocidade do vento U_{∞}	7 m/s
Rotação da turbina Ω	72 rpm
Número de pás N	2
Densidade do ar ρ	1,225 kg/m ³
Raio da pá R	5 m
Ângulo de passo β e corda	Apêndice A
Ângulo de pitch	5°
Número de iterações e erro máximo	100 e 1e-4

Com isso, os gráficos Gráfico 3 e Gráfico 4 apresentam o erro gerado na iteração e o número de iterações de cálculo dos fatores de indução a e a' :

Gráfico 3 - Erro do processo iterativo dos fatores de indução - NREL Phase VI BEM

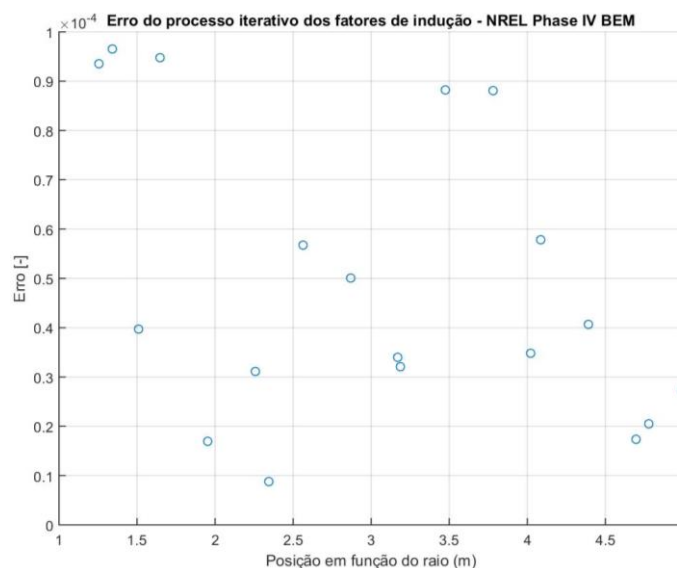
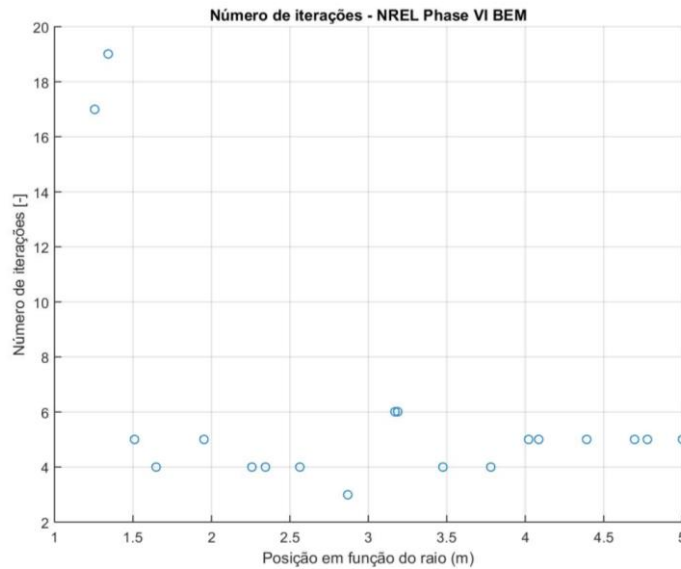


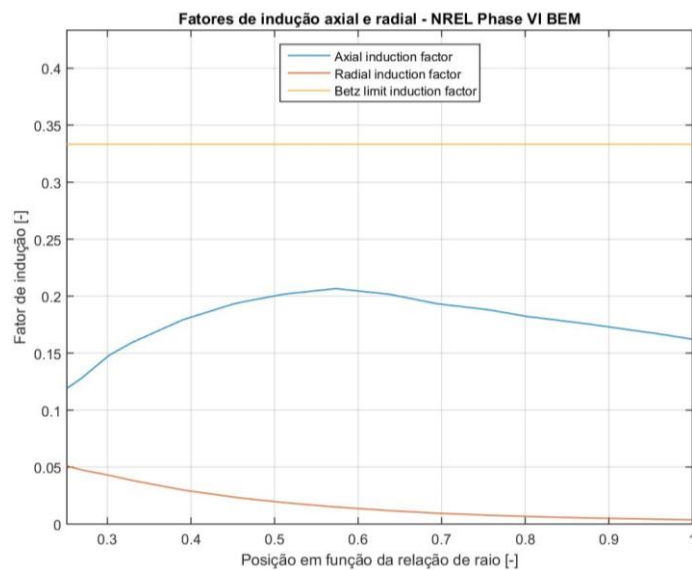
Gráfico 4 - Número de iterações - NREL Phase VI BEM



Nota-se que o critério de erro foi atingido antes do número de iterações máximo e, portanto, foi satisfeita a condição de convergência. Portanto, podemos realizar a análise dos resultados gerados para as forças e demais parâmetros desejados.

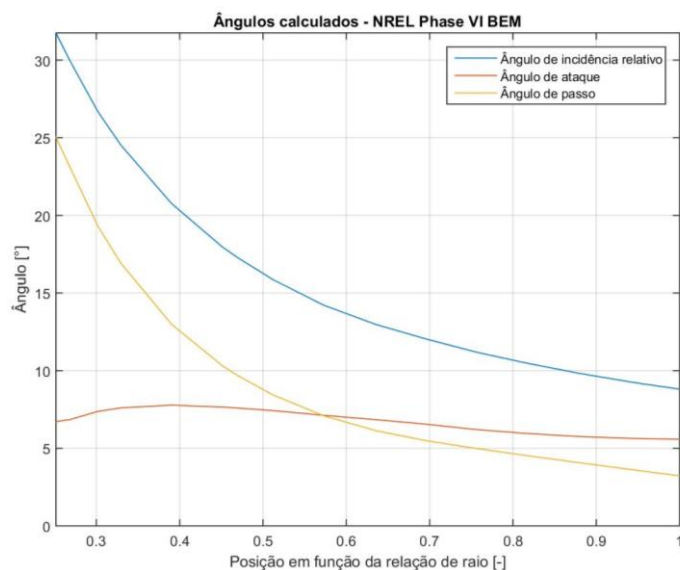
Primeiramente, são apresentados os valores de fator de indução axial e radial comparados com o valor limite de Betz no gráfico 5.

Gráfico 5 - Resultado do fator de indução axial e radial comparado ao limite de Betz – NREL Phase VI BEM



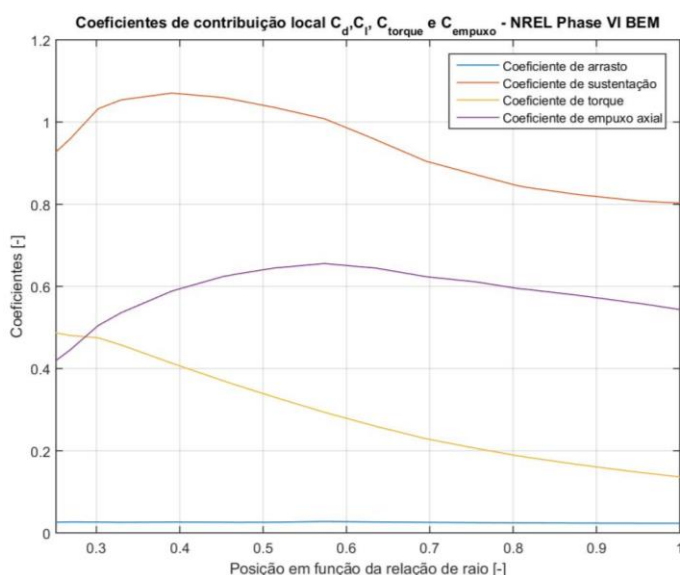
É de interesse do presente estudo analisar os ângulos presentes na turbina: ângulo de passo, ângulo de incidência relativo e o ângulo de ataque. Portanto:

Gráfico 6 - Ângulos calculados - NREL Phase VI BEM



Nota-se no gráfico 6 que o ângulo de ataque (em vermelho) varia em torno de 6 a 8°. O ângulo de passo foi acrescido do ângulo de pitch de 5° e o ângulo de incidência relativo possui uma característica semelhante ao de passo, sendo isso justificado pela variação do ângulo de ataque, sendo ela quase nula. É pertinente também avaliar os coeficientes de sustentação e arrasto, torque e de empuxo axial, como é mostrado abaixo.

Gráfico 7 - Coeficientes de contribuição local - NREL Phase VI BEM

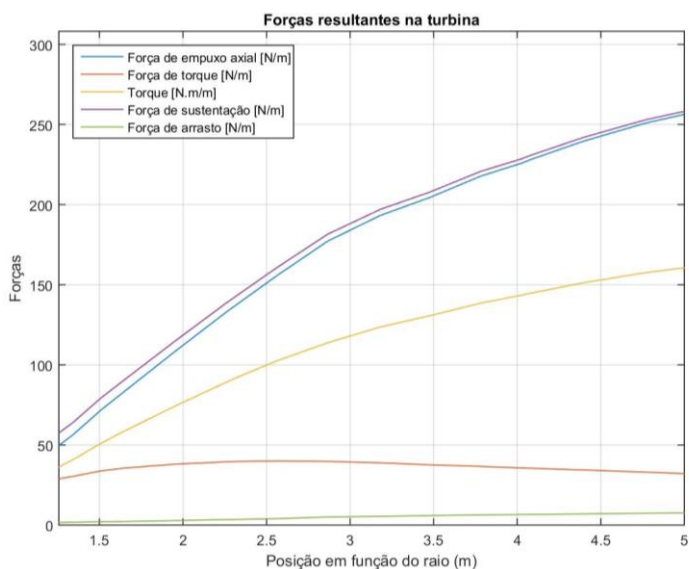


Podemos notar que o coeficiente de sustentação varia consideravelmente quando analisado junto a variação do ângulo de ataque, visto que o ângulo de ataque varia brevemente. Isso se

deve ao fato de que os valores de coeficiente de sustentação e arrasto terem sido obtidos com um número de Reynolds constante, o que pode afetar na variação dos resultados.

As forças geradas ao longo da pá são apresentadas no Gráfico 8. Podemos visualizar que a força de arrasto (em verde) possui menor intensidade que a força de sustentação (em roxo) ao longo da pá, o que é previsto no projeto para turbinas eólicas; caso contrário não se obtém valores pertinentes para a geração de potência. Vemos que a força de torque (em vermelho) apresentou um comportamento menos variante ao longo da pá, apontando menores, mas não relevantes, em sua ponta e base, e que a força de empuxo axial (em azul) se assemelhou à curva de força de sustentação.

Gráfico 8 - Forças resultantes na turbina – NREL Phase VI BEM



Com as forças obtidas, é possível analisar a performance da turbina eólica quanto a sua potência gerada. Para isso, os valores obtidos para o coeficiente de potência são apresentados pelo Gráfico 9. É visível que os maiores valores para o coeficiente de potência desta turbina se concentram na região mais central do gráfico que em relação à ponta e à base. Estes valores para o coeficiente de potência citados ao centro não devem ser interpretados como a redução de geração de potência, mas sim como uma referência de eficiência de geração de potência com a potência disponível que pode ser extraída. Nas regiões mais afastadas, tanto na base quanto na ponta da pá, os valores de C_P decaem em relação ao centro. Isso é justificado pelo fato de que ao extremo da pá contém uma área maior e com isso maior potência disponível de vento.

Gráfico 9 - Coeficiente de potência – NREL Phase VI BEM

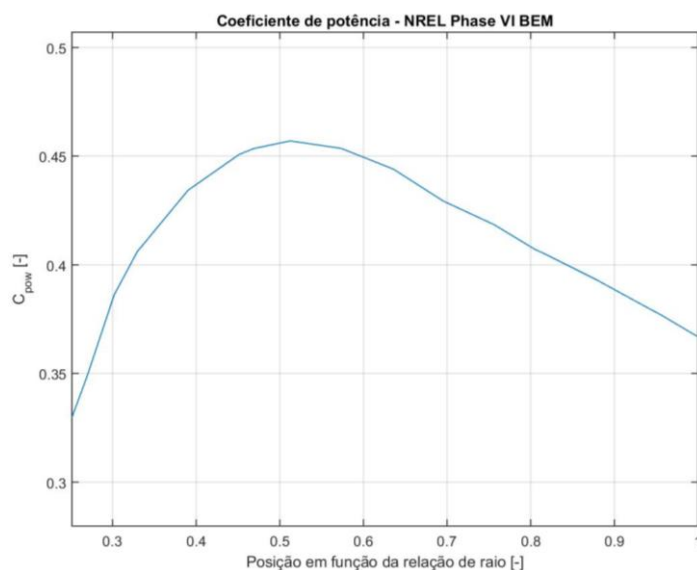


Tabela 7 - Resultados de coeficiente de potência, torque, empuxo axial e potência total - NREL Phase VI BEM

C_p	0,3125
<i>Torque</i>	850,11 N
<i>Empuxo axial</i>	1316,57 N
<i>Potência total</i>	5157,43 W

4.2. Resultados CFD

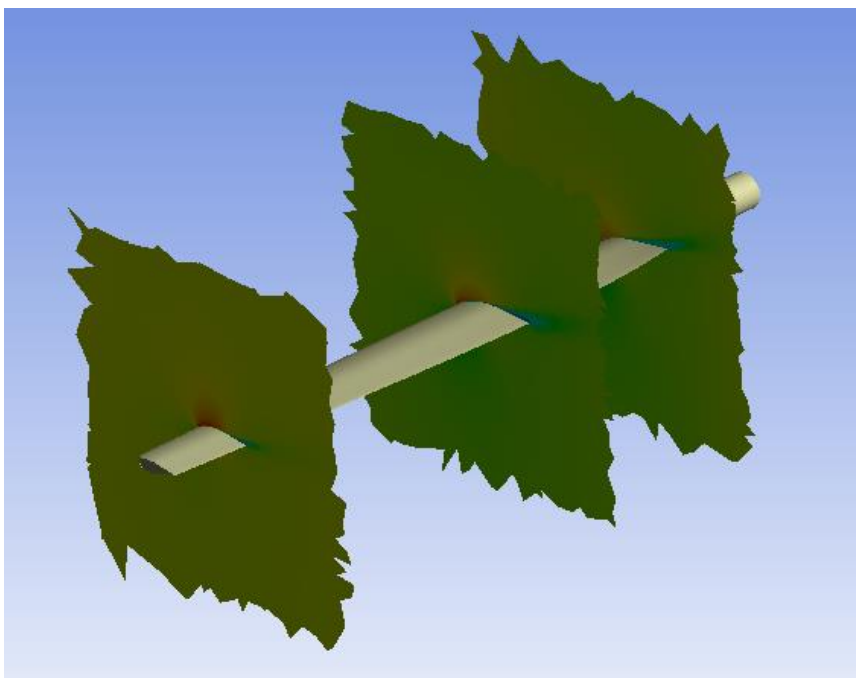
Nas próximas seções, os resultados das simulações são apresentados. O estudo numérico de turbinas eólicas pode fornecer uma infinidade de dados, que variam do comportamento aerodinâmico à análise transiente da região de esteira gerada no funcionamento de tais máquinas. A exposição dos resultados é limitada à distribuição da pressão na pá, do torque gerado e de um panorama geral do escoamento ao redor do rotor, uma vez que esses são os valores comparados com os obtidos pelo BEM.

Uma vez que os valores experimentais obtidos foram limitados, a validação da malha foi realizada utilizando os valores de torque, empuxo e potência. Literaturas (referenciadas neste trabalho nas referências bibliográficas) porém, indicam que o coeficiente de pressão é o melhor parâmetro de validação. Como os últimos não foram possíveis de serem obtidos, no caso do experimento da NREL, este será apenas exposto como um parâmetro de comparação com o BEM.

O escoamento para três seções radiais é exibido nas figuras 35,36 e 37, mostrando as linhas de corrente e os contornos de velocidade nos respectivos planos referentes aos valores de $r/R =$

0.3, 0.5 e 0.9. Na figura 33, observa-se a geração destes três planos empregados para análise. É possível observar a região de descolamento da camada limite e a recirculação do fluido na região de sucção da pá nestas seções a partir dos resultados apresentados.

Figura 33 - Planos utilizados para apresentação de dados em 30, 50 e 90% do raio total - NREL Phase VI CFD



Mais informações acerca do descolamento são mostradas nas linhas de corrente limitadoras (tradução livre) e dos contornos de pressão na superfície da pá.

Por final, os resultados da performance da turbina, que serão de fato os valores utilizados para a validação, são dados na forma de torque, potência e empuxo, além do coeficiente de potência em relação à velocidade da corrente livre.

A partir da extração dos valores de torque do Fluent, a potência foi obtida através da multiplicação do torque pela velocidade angular da pá. O coeficiente de potência foi calculado através da equação (3.13). As demais visualizações do escoamento são mostradas no apêndice D.

A Figura 34 apresenta os resíduos obtidos durante o processo iterativo. O critério de convergência adotado foi de $1e-4$. Entretanto, devido à limitação de potência computacional, adotou-se os resultados a partir deste ponto. É importante ressaltar que o valor padrão para critério de convergência é de $1e-3$, o que então considerou um resultado satisfatório.

Figura 34 - Resíduo obtido para a simulação numérica - NREL Phase VI CFD

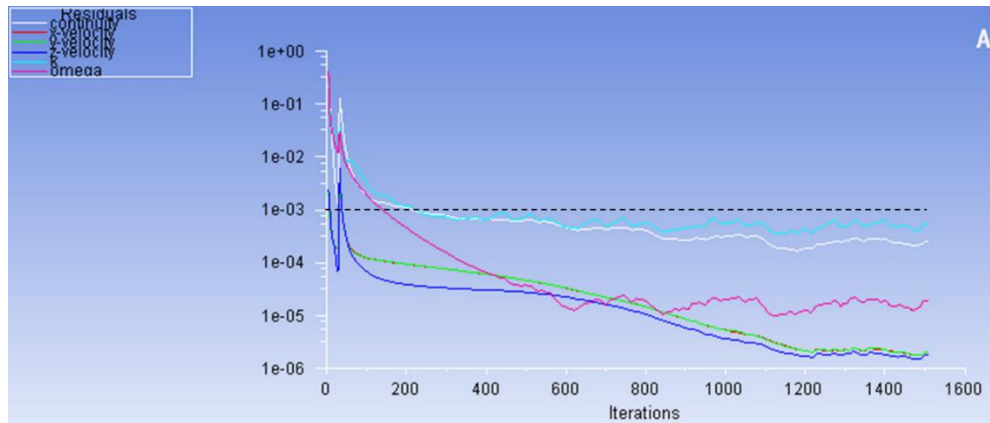


Figura 35 – Linhas de corrente para o aerofólio em $r/R = 0.3$ - NREL Phase VI CFD

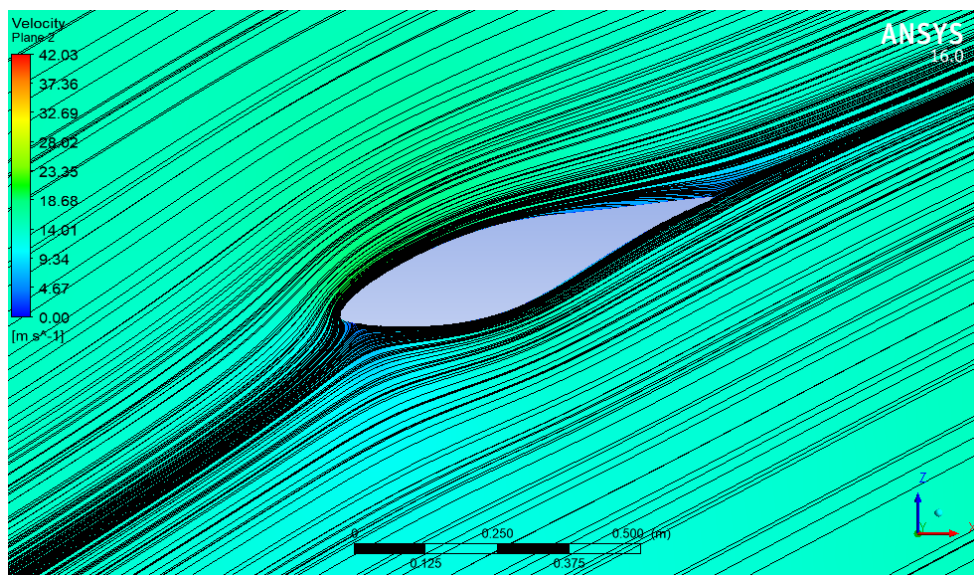


Figura 36 - Linhas de corrente para o aerofólio em $r/R = 0.5$ - NREL Phase VI CFD

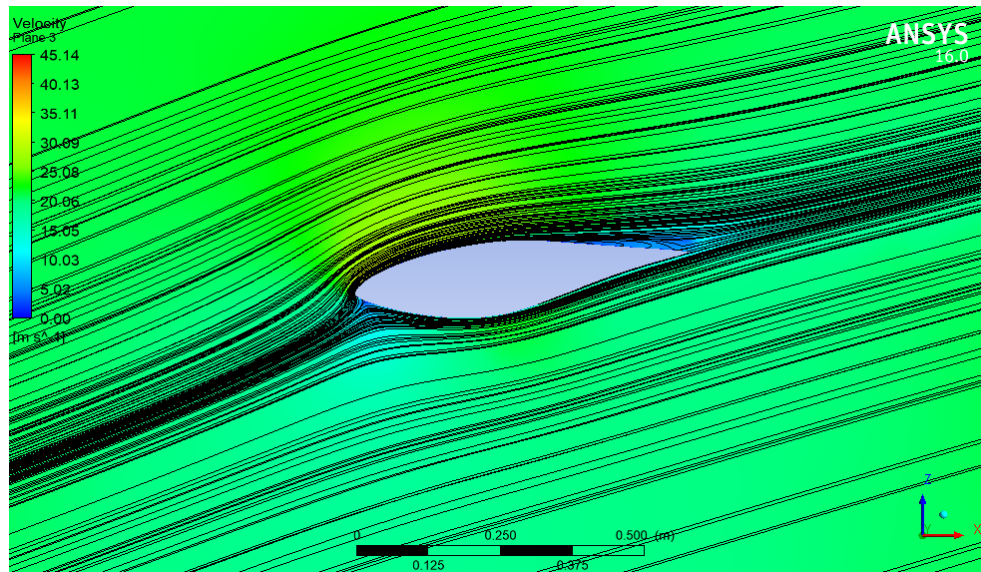


Figura 37 - Linhas de corrente para o aerofólio em $r/R = 0.9$ - NREL Phase VI CFD

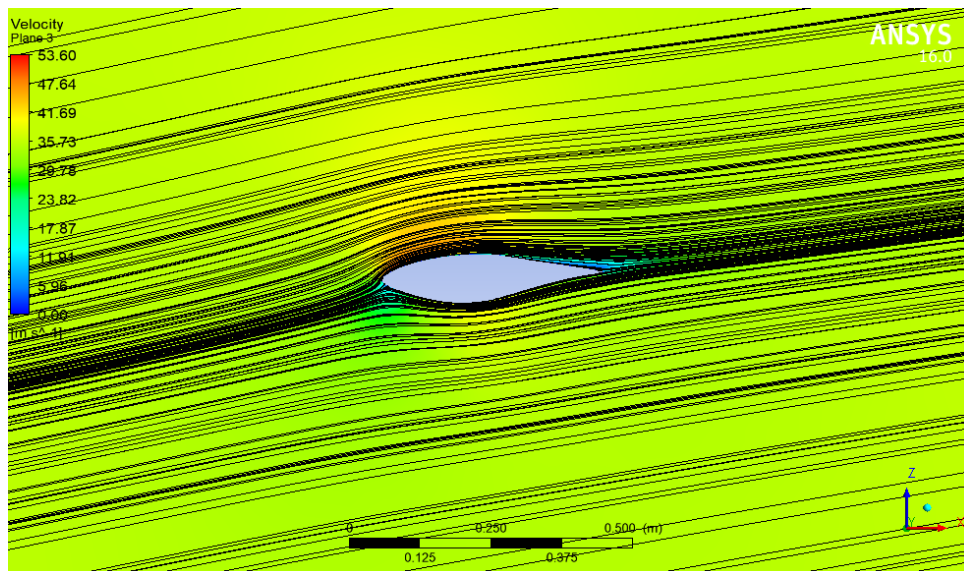


Figura 38 -- Contorno de velocidades em torno do aerofólio em $r/R = 0.3$ - NREL Phase VI CFD

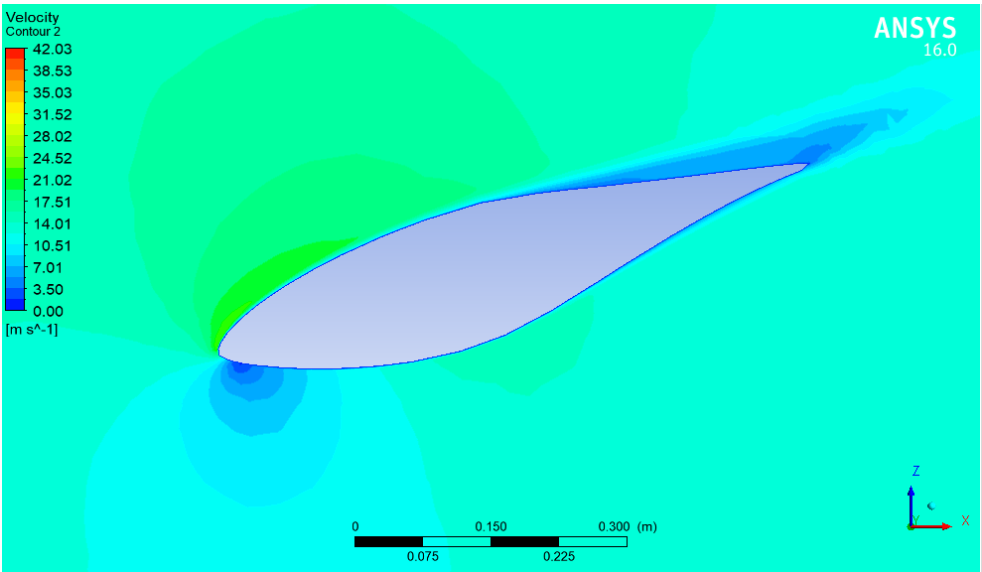


Figura 39 - Contorno de velocidades em torno do aerofólio em $r/R = 0.5$ - NREL Phase VI CFD

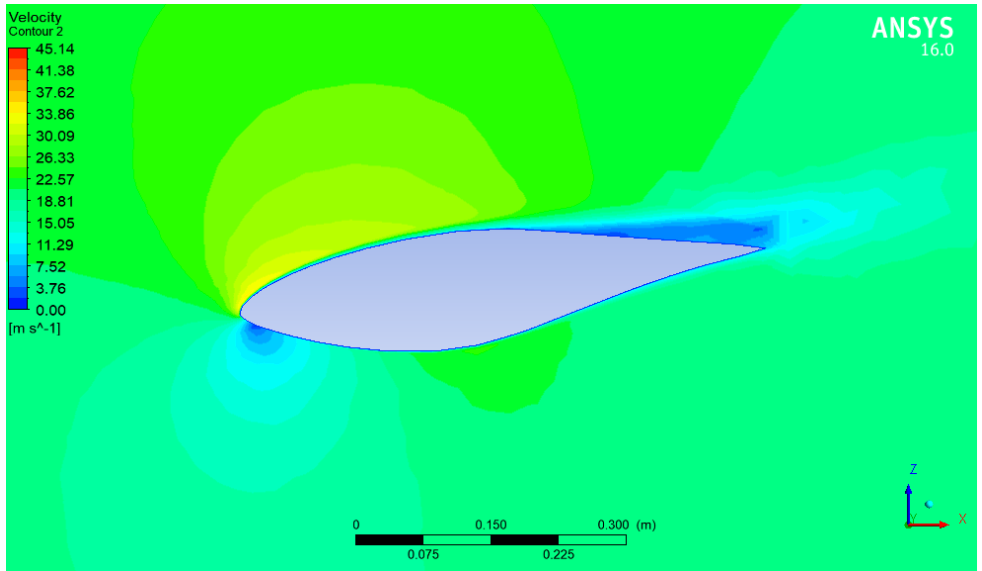


Figura 40 - Contorno de velocidades em torno do aerofólio em $r/R = 0.9$ - NREL Phase VI CFD

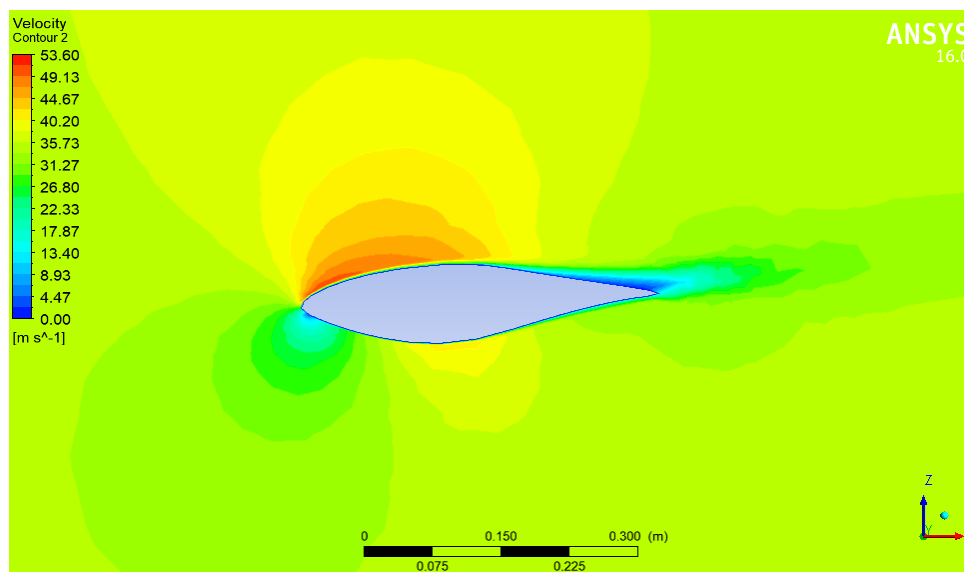


Figura 41 – Linhas de corrente limitantes na superfície da pá para a superfície de sucção - NREL Phase VI CFD

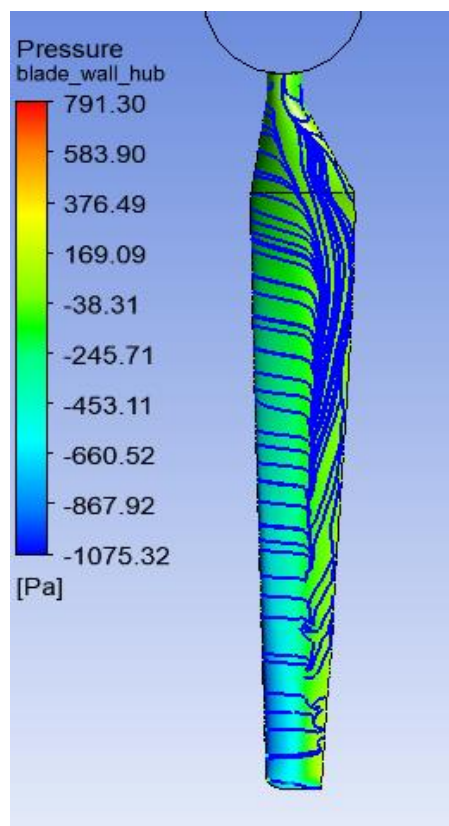
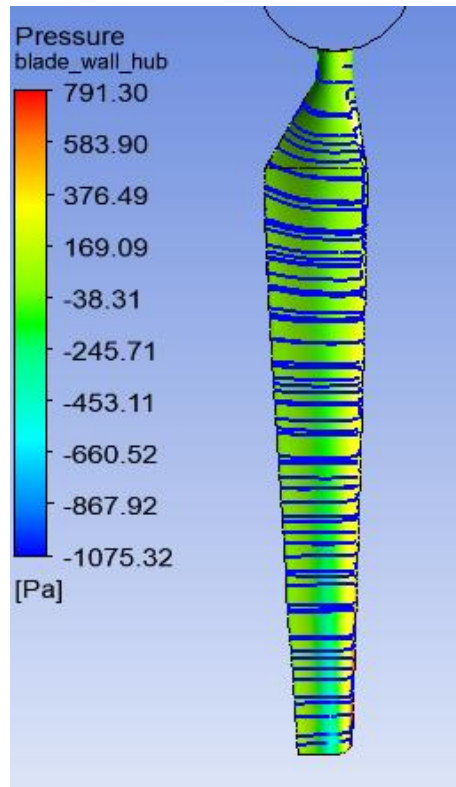


Figura 42 - Linhas de corrente limitantes na superfície da pá para a superfície frontal - NREL Phase VI CFD



Na Tabela 8 é apresentado os resultados para o torque, empuxo axial e potência total gerada pela turbina obtidos pela simulação numérica.

Tabela 8 - Resultados de torque, empuxo axial e potência total - NREL Phase VI CFD

C_p	0,25
<i>Torque</i>	547,68 N
<i>Empuxo axial</i>	974,23 N
<i>Potência total</i>	4129,51 W

A Tabela 9 apresenta a diferença entre os resultados obtidos pelo modelo BEM e a simulação numérica.

Tabela 9 - Diferença entre os resultados obtidos pelo modelo BEM e a simulação numérica

Parâmetro analisado	Erro absoluto [-]	Erro relativo [%]
C_p	0,075	30
<i>Torque</i>	302,43 N	55,22
<i>Empuxo axial</i>	342,34 N	35,14
<i>Potência total</i>	1027,92 W	24,89

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Este capítulo é destinado a análise dos resultados obtidos no capítulo anterior, enfatizando particularmente a física do escoamento e como e isso afeta a performance da turbina eólica.

Com a ajuda dos resultados obtidos nas referências, uma comparação foi feita entre os valores encontrados nesse trabalho com outros estudos similares publicados. Paralelamente com os dados experimentais disponíveis, conclusões importantes acerca da imprecisão deste estudo podem ser elaboradas.

Percebe-se que, pelas figuras 39, 39 e 40, como era esperado, as velocidades são maiores quando comparadas às velocidades na base, ou seja, isso ocorre com o incremento gradativo do raio local analisado. A diferença de pressão, como mostrado no apêndice D, também aumenta proporcionalmente ao aumento de μ , o que acarreta em maiores forças geradas nas pontas das pás. Isso pode ser visualizado pelo Gráfico 8 gerado pelo modelo BEM.

A partir das leituras dos contornos de velocidade apresentados na seção anterior, é possível notar que a velocidade relativa é aquela vista do ponto referencial da borda de ataque da pá, e não de um observador externo. Esse tipo de velocidade é preferível, por fornecer mais informações acerca da aerodinâmica do aerofólio.

Na Figura 38, é possível observar que grande parte do escoamento não sofre descolamento de camada limite, exceto por algumas regiões. Esse descolamento aumenta à medida que a relação r/R e x/c aumenta, sendo mínimo no plano situado a $r/R = 0.3$ e máximo no situado a $r/R = 0.9$. No último, a partir da metade do comprimento de corda do aerofólio, na região de sucção da pá, as linhas de corrente se desviam das linhas de corrente paralelas do interior do fluido para outras direções, devido à aceleração centrífuga causada pela rotação^[17].

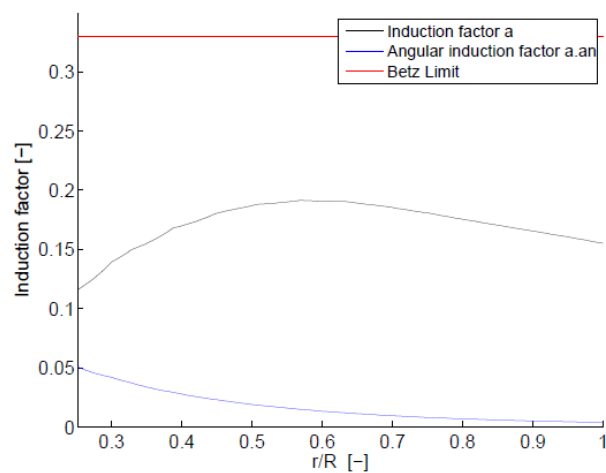
5.1. Resultados de trabalhos similares

Outros pesquisadores realizaram trabalhos com resultados pertinentes e que serão apresentados em seguida. *Mourits* (2014) realizou o estudo em BEM e em CFD para a comparação entre os métodos. Os valores de fator de indução axial e radial são apresentados pela Figura 44 As linhas de corrente para a região frontal encontradas são apresentadas na Figura 43.

Figura 43 - Resultado da linha de corrente obtido por *Mourits* para a região frontal



Figura 44 - Resultados de fator de indução axial e radial obtidos por *Mourits* para o modelo BEM



Percebe-se que o comportamento obtido por *Mourits* para os fatores de indução axial e radial possuem características que se assemelham aquela obtida no Gráfico 5. Seu torque é apresentado junto ao torque obtido pelos outros autores referenciados neste trabalho.

Para *Mo* e *Lee*, através do software Ansys Fluent[®], as linhas de corrente na região de sucção da pá são mostradas na Figura 45. O valor de torque final de turbina é apresentado na Tabela 10.

Figura 45 - Resultado da linha de corrente obtido por *Lee et Mo* para a região de sucção

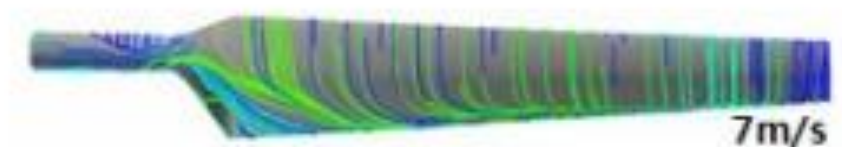
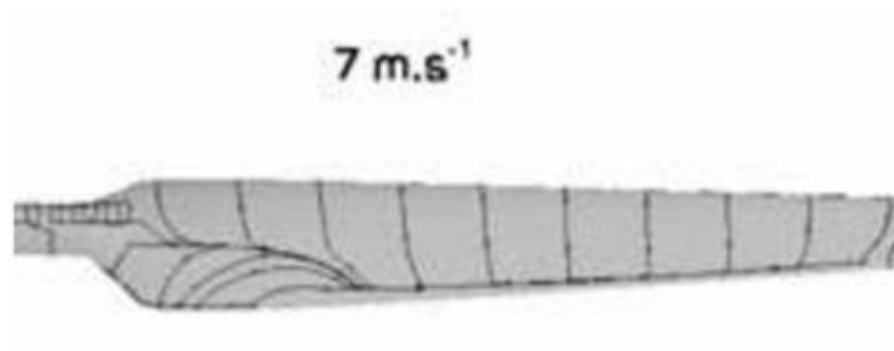


Figura 46 - Resultado de linha de corrente obtido por *Le Pape et Lecanu* para a região de sucção



Para *Malatesta* (2012), as linhas de corrente tanto para a região de sucção quanto para região frontal são apresentadas nas figuras Figura 47 e Figura 48.

Figura 47 - Resultado da linha de corrente obtido por *Malatesta* para a região de sucção

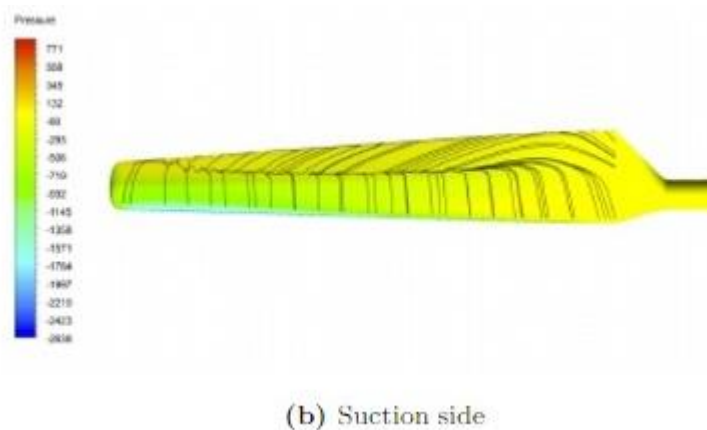
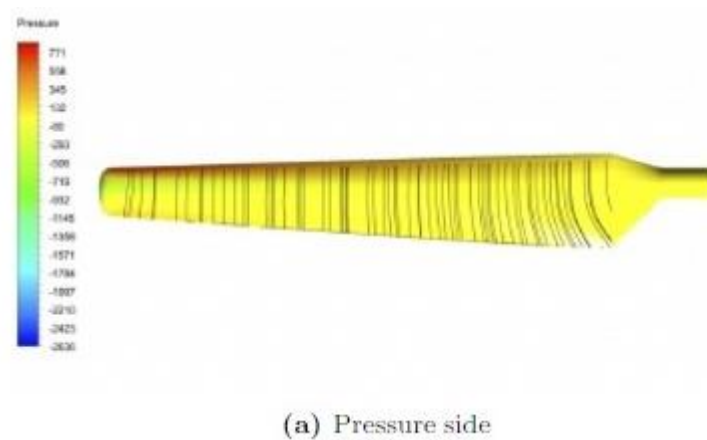


Figura 48 - Resultado da linha de corrente obtido por *Malatesta* para a região frotnal



A Tabela 10 apresenta os resultados para torque obtidos em CFD para os autores referenciados.

Tabela 10 - Resultados obtidos para o torque para os trabalhos citados em CFD

Autores	547,68 N.m
J. MOURITS	~720 N.m
F. MALATESTA	~860 N.m
LEE <i>et</i> MO	~800 N.m
LE PAPE <i>et</i> J. LECANU	~802 N.m

Para o modelo BEM de *Mourits*, obteve-se os resultados mostrados na Tabela 11:

Tabela 11 - Resultados obtidos por *Mourits* em seu modelo BEM

C_p	0.338
<i>Potência gerada</i>	5474 W
<i>Torque</i>	~850 N
<i>Força de empuxo axial</i>	~1300 N

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção, serão apresentados a conclusão do trabalho realizado, bem como recomendações para trabalhos futuros que envolvem as ferramentas apresentadas até aqui.

6.1. Conclusão

Foi apresentado neste trabalho dois métodos de análise de turbinas eólicas: o BEM e a análise CFD. A utilização do BEM é de extrema importância e é utilizado com relevante frequência para projeto de turbinas eólicas^[2]. Ela pode ser vista como a etapa de pré-projeto para turbinas e consequentemente estudos mais aprofundados são necessários para se obter dados condizentes com a realidade, sendo estes estudos através de experimentos e/ou simulação numérica em CFD. A realização de experimentos é muitas vezes cara e inviável, justificando o emprego do CFD.

Os resultados obtidos para o BEM e CFD mostraram erros relativos acima de 20%. Isto pode ser justificado pela qualidade da malha gerada, visto que não foram geradas malhas mais refinadas devido à sua complexidade de construção e ao custo computacional inerente ao aumento do número de pontos nodais, principalmente na parede da pá, e pelas perdas que não foram implementadas no modelo BEM, perdas estas que são conhecidas por *tip* e *root loss*, que considera as perdas nas pás em sua ponta e base^[2].

A utilização de malhas mais refinadas, especialmente nas paredes da pá e na região de esteira, é crucial para a obtenção de resultados mais acurados em simulações de escoamentos tridimensionais de turbinas eólicas.

O modelo BEM se mostrou mais vantajoso pela sua simplicidade e rapidez em relação ao método CFD, entretanto a visualização do escoamento 3D em torno das pás pela simulação é de grande utilidade, podendo ser investigado a performance da turbina sujeita a alterações geométricas.

6.2. Recomendação para trabalhos futuros

Através da otimização pelo método BEM, apresentada no Apêndice C, se pode obter melhores parâmetros construtivos de uma turbina. A utilização da ferramenta CFD para este caso otimizado potencializa os estudos aerodinâmicos em torno na turbina e torna mais precisa a avaliação quanto à melhora dos indicadores comparativamente ao mostrado neste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AERODYNAMIC shape optimization and analysis of small wind turbine blades employing the Viterna approach for post-stall region. **Elsevier**, Tehran (Irã), Urmia (Irã), 11 Julho 2016. 1-9.
- [2] BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. Segunda edição. ed. West Sussex: [s.n.], 2001.
- [3] CHEN, Y.-P. **A Study of the Aerodynamic Behavior of a NREL Wind Turbine using CFD Methodology**. Wright State University. Fairborn, Ohio, p. 124. 2009.
- [4] CYPRIANO, M. A.; IMANISHI, R. M. M. **PROJETO, CONSTRUÇÃO E AFERIÇÃO DE UMA MESA DE TESTES PARA HÉLICES**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 46. 2014.
- [5] DA SILVA, A. B. **Projeto Aerodinâmico de Turbinas Eólicas**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 93. 2013.
- [6] DE ABREU E LIMA, T. N. **PROJETO DE UM PROTÓTIPO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL**. Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola Politécnica. Rio de Janeiro, p. 99. 2015.
- [7] EL KHCHINE, Y.; SRITI, M. **WIND TURBINE BLADE OPTIMISATION WITH AXIAL INDUCTION FACTOR AND TIP LOSS CORRECTIONS**. 13ème Congrès de Mécanique. Meknès (Marrocos): [s.n.]. 14 Abril 2017.
- [8] GOMES, R. M. **ESTUDO SOBRE A TRAÇÃO FORNECIDA POR HÉLICES MONO-PÁS**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 45. 2016.
- [9] GOMEZ-LEON, J. **Wind Turbine Blade Analysis Using Blade Element Momentum Theory**. Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute. Hartford, p. 32. 2016.
- [10] GOVERNO BRASILEIRO. <http://www.brasil.gov.br>. **Brasil é o maior gerador de energia eólica da América Latina**, 2017. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2017/03/brasil-e-o-maior-gerador-de-energia-eolica-da-america-latina>>. Acesso em: 15 Maio 2017.

- [11] HAND, M. et al. **Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns**. National Renewable Energy Laboratory. Colorado, p. 310. 2001.
- [12] HANSEN, M. O. L. **Aerodynamics of Wind Turbines**. Segunda Edição. ed. Londres & Sterling, Virginia: Earthscan, v. Volume único, 2008.
- [13] INGRAM,. **Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method**. Durham University. Durham, p. 21. 2011.
- [14] LANDESBERGER, J. **The Blade Element Momentum Theory**. Technische Universiät München Lehrstuhl. Munique.
- [15] LE PAPE; LECANU, J. **Navier–Stokes Computations of a Stall-regulated Wind Turbine**. Chatillon, France.
- [16] MALATESTA, F. **CFD Study of a Wind Turbine Rotor**. Queen Mary, University of London. Londres, p. 83. 2012.
- [17] MO, J.-O.; LEE, Y.-H. CFD Investigation on the aerodynamic characteristics of a small-sized wind turbine of NREL PHASE VI operating with a stall-regulated method. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Adelaide (Austrália), Busan (Coreia do Sul), 12 Outubro 2011. 81-92.
- [18] MOURITS, J. **BEM theory and CFD for Wind Turbine Aerodynamics**. University of Twente & University of Liverpool. Enschede & Liverpool, p. 73. 2014.
- [19] NGHIEM, A. et al. **Wind in power 2016**. Wind Europe. Bruxelas, p. 24. 201.
- [20] RAMDIN, S. F. **Prandtl tip loss factor assessed**. Delft University of Technology. Delft, p. 180. 2017.
- [21] SEDAGHAT, A.; EL HAJ ASSAD, M.; GAITH, M. Aerodynamics performance of continuously variable speed horizontal axis wind turbine with optimal blades. **Elsevier**, Isfahan (Irã), Safat (Kuwait), 8 Outubro 2014. 752-759.
- [22] SEZER-UZOL, N.; GUPTA, A.; LONG, L. N. 3-d time-accurate inviscid and viscous cfd simulations of wind turbine rotor flow fields. **Parallel Computational Fluid Dynamics**, Berlin Heidelberg, v. 67, p. 457-464, 2009.
- [23] VAN ROOIJ, R. P. J. O. M.; ARENS, E. A. Analysis of the experimental and computational flow characteristics with respect to the augmented lift phenomenon caused by blade rotation. **Journal of Physics: Conferences Series**, n. 75(1):012021, 2007.

- [24] WENZEL, G. M. **PROJETO AERODINÂMICO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 76. 2007.
- [25] http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2016_EN_WEB.pdf
- Acesso em: 12 de Julho de 2017.
- [26] <http://www.windpowermonthly.com/10-biggest-turbines> - Acesso em: 25 de Julho de 2017
- [28] BETZ, A. (1966) **INTRODUCTION TO THE THEORY OF FLOW MACHINES**. (D. G. Randall, Trans.) Oxford: Pergamon Press.
- [29] MENTER, F. R. (1994), **TWO-EQUATION EDDY-VISCOSITY TURBULENCE MODELS FOR ENGINEERING APPLICATIONS**. AIAA Journal, vol. 32, no 8. pp. 1598-1605.

APÊNDICE A

Dados geométricos construtivos - NREL Phase VI e perfil de aerofólio:

Tabela 12 - Características construtivas da turbina eólica utilizada no experimento da NREL Phase VI

Raio local [m]	Razão de raio local [-]	Corda [m]	Ângulo de passo (°)
1,2575	0,25	0,737	20,04
1,343	0,267	0,728	18,074
1,51	0,3	0,711	14,292
1,648	0,328	0,697	11,909
1,952	0,388	0,666	7,979
2,257	0,449	0,636	5,308
2,343	0,466	0,627	4,715
2,562	0,509	0,605	3,425
2,867	0,57	0,574	2,083
3,172	0,631	0,543	1,15
3,185	0,633	0,542	1,115
3,476	0,691	0,512	0,494
3,781	0,752	0,482	-0,015
4,023	0,8	0,457	-0,381
4,086	0,812	0,451	-0,475
4,391	0,873	0,42	-0,92
4,696	0,934	0,389	-1,352
4,78	0,95	0,381	-1,469
5	0,994	0,358	-1,775

Figura 49 - Perfil aerodinâmico S809

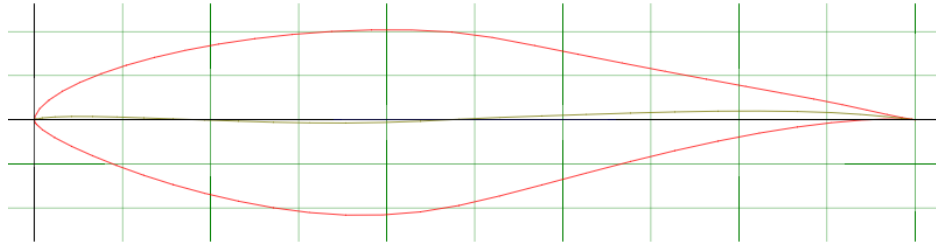


Figura 50 - Gráfico coeficiente de sustentação

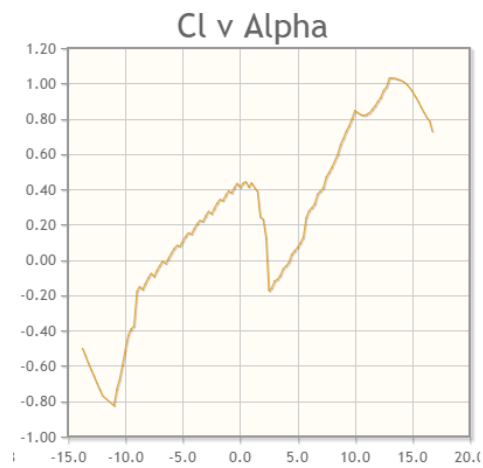
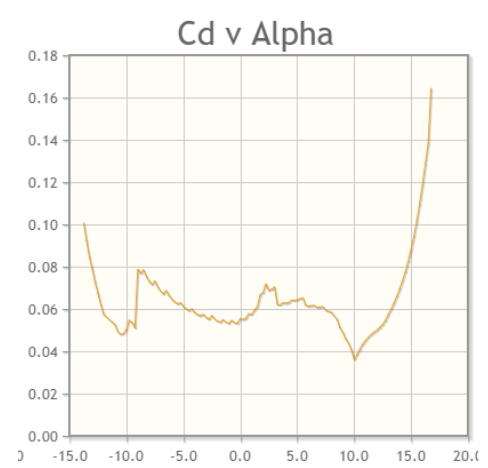


Figura 51 - Gráfico coeficiente de arrasto



Fonte: airfoiltools, NREL's S809 Airfoil (2017)

APÊNDICE B

```
% Programa para o Método do Momento de Elementos de Pá

% Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
% Bruno Margotto
% Sara Martins
% Orientador: Prof. Dr. Juan Romero

%% Introdução

% Este programa foi desenvolvido para se realizar de maneira mais rápida e
% eficiente os cálculos presentes no método do elemento de pá para a
% turbina utilizada nos testes da NREL Phase VI o projeto de graduação pela
% Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) como orientador o
% Prof. Dr. Juan Jomero.

%% Limpeza e formatação do MATLAB

clear;
close all;
clc

format long;

%% Dados do ar

Temp    = 20;                % Temperatura do ar em °C
rho_ar = 1.225;              % Densidade do ar em kg/m³

%% Leitura dos dados da turbina

Dados_turbina = xlsread('NREL Phase VI.xlsx');
r              = Dados_turbina(:,1);
c              = Dados_turbina(:,4);
Beta          = Dados_turbina(:,8);

N              = length(Dados_turbina);

Rrotor        = r(N);

%% Inicialização das variáveis
```

```

Vvento    = 7;                                % Velocidade do vento em m/s
B         = 2;                                % Número de pás
TipRatio  = 5.386;                            % Tip Ratio

Rot = TipRatio*Vvento/Rrotor;                 % Rotação do rotor

Phi       = zeros(N,1);                      % Vetor alocando o ângulo de fluxo
relativo da pá em ° para um dado raio local
Alpha     = zeros(N,1);                      % Vetor alocando o ângulo de ataque da
pá em ° para um dado raio local
Solidity  = zeros(N,1);                      % Vetor alocando a Solidez da pá []
u         = zeros(N,1);                      % Vetor alocando o valor de mu []
Cpow      = zeros(N,1);                      % Vetor alocando o Coeficiente de
Potência para o raio local []

Forca_Lift = zeros(N,1);                     % Vetor alocando a força de sustentação
ao longo da pá [N/m]
Forca_Drag = zeros(N,1);                     % Vetor alocando a força de arrasto ao
longo da pá [N/m]
Forca_Thrust = zeros(N,1);                   % Vetor alocando a força de empuxo
axial ao longo da pá [N/m]
Forca_Torque = zeros(N,1);                   % Vetor alocando o torque gerado ao
longo da pá [N.m]
Torque      = zeros(N,1);                     % Vetor alocando o torque acumulado ao
longo da pá [N.m]

C_Torque = zeros(N,1);
C_Thrust = zeros(N,1);

itermax    = 100;                            % Número máximo de iterações no
processo iterativo de cálculo do BEM
erromax    = 1e-4;                            % Valor máximo do erro para o processo
iterativo de cálculo do BEM
erro       = zeros(N,1);                      % Vetor que conterà o erro para cada
elemento de pá
erro_iter  = zeros(itermax,N);                % Vetor que conterà o erro por iteração
para cada elemento de pá
iter       = zeros(N,1);                      % Vetor que conterà o número de
iterações para cada elemento de pá

Cd_graph = zeros(N,1);                       % Vetor alocando os valores do
coeficiente de arrasto para plotagem []
Cl_graph = zeros(N,1);                       % Vetor alocando os valores do
coeficiente de sustentação para plotagem []

% Fatores de indução radial e axial

```

```

a          = zeros(N,1);          % Vetor alocando fator de indução axial
[]
alinha     = zeros(N,1);          % Vetor alocando fator de indução
radial []
abetz      = ones(N,1)*1/3;       % Vetor alocando fator de indução do
limite de Betz []

%% Encontrando o valor mínimo de Cd/Cl

Dados_aerof = xlsread('S809.xlsx');

counter_line = length(Dados_aerof);

Alpha_dados = Dados_aerof(:,1);   % Vetor com os valores
de alpha para cada raio local, em m
Clift_dados = Dados_aerof(:,2);   % Vetor com os valores
de coeficiente de sustentação para cada raio local []
Cdrag_dados = Dados_aerof(:,3);   % Vetor com os valores
de coeficiente de arrasto para cada raio local []
Cl_Cd       = abs(Clift_dados./Cdrag_dados); % Vetor Cl/Cd, visando
obter o maior razão pois assim teremos ?Lift ?Drag

posmaxCl_Cd = find(Cl_Cd == max(Cl_Cd));

Cl = Clift_dados(posmaxCl_Cd);     % Alpha inicial para
calcular o valor da corda de projeto

clc;                                % Limpando tela

%% Preparação dos dados

for i=1:N
    u(i) = r(i)/Rrotor;
    Solidity(i) = (B*c(i)) / (2*pi*r(i));
end

uR = u(1);

%% Método do Elemento de Pá

% Chutes iniciais

for i=1:N
    Phi(i) = (2/3)*atand( 1 / ( TipRatio*u(i) ) );

```

```

Alpha(i)      = Phi(i) - Beta(i);

% Encontrando os valores de Cl e Cd

for j=2:counter_line
    if Alpha(i) < Alpha_dados(j) && Alpha(i) > Alpha_dados(j-1)
        Cl = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
        Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Clift_dados(j) - Clift_dados(j-1)
...
        ) ) + Clift_dados(j-1);

        Cd = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
        Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Cdrag_dados(j) - Cdrag_dados(j-1)
...
        ) ) + Cdrag_dados(j-1);
    end
end

k = Solidity(i) * (Cl*cosd(Phi(i)) + Cd*sind(Phi(i))) /
(4*sind(Phi(i))^2);
klinha = Solidity(i) * (Cl*sind(Phi(i)) - Cd*cosd(Phi(i))) /
(4*(sind(Phi(i))^2*u(i)*TipRatio);

a(i)      = k/(1+k);
alinha(i) = (1-a(i))*klinha;

end

aold = a;
alinhaold = alinha;

% Início do processo iterativo

for i=1:N

    iter(i)      = 1;
    erro(i)      = 1;
    parada      = 1;
    erro_iter(1,i) = 1;

    while parada == 1
        Phi(i) = atand( ( 1 - aold(i) ) / ( TipRatio * u(i) * ( 1 +
alinhaold(i) ) ) );
        Alpha(i) = Phi(i) - Beta(i);

        % Encontrando os valores de Cl e Cd

```

```

        for j=2:counter_line
            if Alpha(i) < Alpha_dados(j) && Alpha(i) > Alpha_dados(j-1)
                Cl = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
                    Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Clift_dados(j) -
Clift_dados(j-1)
...
                    ) ) + Clift_dados(j-1);

                Cd = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
                    Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Cdrag_dados(j) -
Cdrag_dados(j-1)
...
                    ) ) + Cdrag_dados(j-1);
            end
        end

        k = Solidity(i) * (Cl*cosd(Phi(i)) + Cd*sind(Phi(i))) /
(4*sind(Phi(i))^2);
        klinha = Solidity(i) * (Cl*sind(Phi(i)) - Cd*cosd(Phi(i))) /
(4*(sind(Phi(i)))^2*u(i)*TipRatio);

        a(i) = k/(1+k);
        alinha(i) = (1-a(i))*klinha;

        iter(i) = iter(i) +1;
        erro(i) = max(abs(a(i) - aold(i)),abs(alinha(i) - alinhaold(i)));
        aold(i) = a(i);
        alinhaold(i) = alinha(i);
        erro_iter(iter(i),i) = erro(i);

        if erro(i) < erromax || iter(i) > itermax
            parada = 0;
        end

    end
end

%% Cálculo do coeficiente de potência e forças

for i=1:N

    for j=2:counter_line
        if Alpha(i) < Alpha_dados(j) && Alpha(i) > Alpha_dados(j-1)
            Cl = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
                Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Clift_dados(j) - Clift_dados(j-
1)
...
                ) ) + Clift_dados(j-1);

```

```

        Cd = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
        Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Cdrag_dados(j) - Cdrag_dados(j-
1)
        ...
        ) ) + Cdrag_dados(j-1);
    end
end

Forca_Thrust(i) = rho_ar*Vvento^2*4*pi*(a(i)*(1-a(i))*r(i))/B;
% Força de empuxo axial
Torque(i) = 4*rho_ar*Vvento*pi*Rot*(alinha(i)*(1-a(i))*r(i)^3)/B;
% Torque
Forca_Torque(i) = Torque(i)/r(i);
% Força de torque
Forca_Lift(i) = (rho_ar*Vvento^2/2)*( (1-
a(i))^2*c(i)*Cl/sind(Phi(i))^2); % Força de sustentação
Forca_Drag(i) = (rho_ar*Vvento^2/2)*( (1-
a(i))^2*c(i)*Cd/sind(Phi(i))^2); % Força de arrasto

C_Torque(i) = Torque(i)/(rho_ar*Vvento^2*pi*r(i)^2/2)*B;
C_Thrust(i) = 4*a(i)*(1-a(i));

end

%% Cálculos

for i=1:N
    Cpow(i) = (TipRatio*u(i))^2*4*alinha(i)*(1-a(i)); % Coeficiente
de potência []
end

Cpow_Total = 0.0;
Torque_Total = 0.0;
Thrust_Total = 0.0;
for i=1:N-1
    Cpow_Total = Cpow_Total + (Cpow(i+1)+Cpow(i))*(u(i+1)-u(i))/2;
    Torque_Total = Torque_Total + (Torque(i+1)+Torque(i))*(r(i+1)-r(i))/2;
    Thrust_Total = Thrust_Total +
    (Forca_Thrust(i+1)+Forca_Thrust(i))*(r(i+1)-r(i))/2;
end

Power = Cpow_Total*(rho_ar*Vvento^3*pi*Rrotor^2/2);
Torque_Total = Torque_Total*2;
Thrust_Total = Thrust_Total*2;

msgcp = 'Cp total da turbina ideal: %f';
msgpower = 'Potência total da turbina ideal: %f';
msgtorque = 'Torque total da turbina ideal: %f';
msgthrust = 'Empuxo axial total da turbina ideal: %f';
MsgCp=sprintf(msgcp,Cpow_Total);
disp('DADOS OBTIDOS PARA UMA TURBINA IDEAL')
disp(MsgCp)
disp(' ');
MsgPower=sprintf(msgpower,Power);

```

```

disp(MsgPower);
disp(' ');
MsgTorque=sprintf(msgtorque,Torque_Total);
disp(MsgTorque);
disp(' ');
MsgThrust=sprintf(msgthrust,Thrust_Total);
disp(MsgThrust);
disp(' ');

for i=1:N

    for j=2:counter_line
        if Alpha(i) < Alpha_dados(j) && Alpha(i) > Alpha_dados(j-1)
            Cl = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
            Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Clift_dados(j) - Clift_dados(j-
1) ...
            ) ) + Clift_dados(j-1);

            Cd = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
            Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Cdrag_dados(j) - Cdrag_dados(j-
1) ...
            ) ) + Cdrag_dados(j-1);
        end
    end

    Cl_graph(i) = Cl; % Alocando valores de Cl para
    plotagem
    Cd_graph(i) = Cd; % Alocando valores de Cd para
    plotagem

end

%% Plotagem dos gráficos

%Plot corda
FigH=figure;
plot(r,c);
xlabel('Posição em função do raio (m)');
ylabel('Corda (m)');
grid;
title('Distribuição de corda ao longo da pá - NREL Phase VI BEM');
axis([r(1) r(N) (min(c)-0.1) (max(c)+0.1)]);

% Plot erro
FigH1=figure;
scatter(r,erro);
grid;
xlabel('Posição em função do raio (m)');
ylabel('Erro [-]');
title('Erro para o processo iterativo de cálculo dos fatores de indução -
NREL Phase VI BEM');

% Plot número de iterações
FigH2=figure;
scatter(r,iter);

```

```

xlabel('Posição em função do raio (m)');
ylabel('Número de iterações [-]');
grid;
title('Número de iterações - NREL Phase VI BEM');

% Fator de indução axial e radial
FigH3=figure;
plot(r/Rrotor,a,r/Rrotor,alinha,r/Rrotor,abetz);
axis([r(1)/Rrotor r(N)/Rrotor 0 max(abetz)+0.1]);
legend('Axial induction factor','Radial induction factor','Betz limit induction factor','Location','North');
xlabel('Posição em função da relação de raio [-]');
ylabel('Fator de indução [-]');
grid;
title('Fatores de indução axial e radial - NREL Phase VI BEM');

% Ângulos relativos à pá
FigH4=figure;
plot(r/Rrotor,Phi,r/Rrotor,Alpha,r/Rrotor,Beta);
legend('Ângulo de incidência relativo','Ângulo de ataque','Ângulo de passo','Location','Northeast');
xlabel('Posição em função da relação de raio [-]');
ylabel('Ângulo [°]');
title('Ângulos calculados - NREL Phase VI BEM');
axis([r(1)/Rrotor r(N)/Rrotor 0 Phi(1)]);
grid;

% Coeficiente de potência
FigH5=figure;
plot(r/Rrotor,Cpow);
xlabel('Posição em função da relação de raio [-]');
ylabel('C_{pow} [-]');
title('Coeficiente de potência - NREL Phase VI BEM');
grid;
axis([r(1)/Rrotor r(N)/Rrotor (Cpow(1)-0.05) (max(Cpow)+0.05)]);

% Coeficientes locais de lift, drag, torque e empuxo
FigH6=figure;
plot(r/Rrotor,Cd_graph,r/Rrotor,Cl_graph,r/Rrotor,C_Torque,r/Rrotor,C_Thrust);
xlabel('Posição em função da relação de raio [-]');
ylabel('Coeficientes [-]');
title('Coeficientes de contribuição local C_{d}, C_{l}, C_{torque} e C_{empuxo} - NREL Phase VI BEM');
legend('Coeficiente de arrasto','Coeficiente de sustentação','Coeficiente de torque','Coeficiente de empuxo axial','Location','Northeast');
axis([r(1)/Rrotor r(N)/Rrotor 0 1.2]);
grid;

% Torque, força de torque, empuxo axial, lift e drag forces
FigH7=figure;
plot(r,Forca_Thrust,r,Forca_Torque,r,Torque,r,Forca_Lift,r,Forca_Drag);
legend('Força de empuxo axial [N/m]', 'Força de torque [N/m]', 'Torque [N.m/m]', 'Força de sustentação [N/m]', 'Força de arrasto [N/m]', 'Location', 'Northwest');
xlabel('Posição em função do raio (m)');
ylabel('Forças');
title('Forças resultantes na turbina')
val = [Forca_Thrust,Forca_Torque,Torque,Forca_Lift,Forca_Drag];
ylim = max(max(val));

```

```

axis([r(1) r(N) 0 ylimit+50]);
grid;

%% Salvar gráficos? SIM -> 1 ou NÃO -> 0
salvar = 0;
if salvar == 1
    saveas(FigH, 'Perfil Corda','jpeg')
    saveas(FigH1, 'Erro nas iterações','jpeg')
    saveas(FigH2, 'Número de iterações','jpeg')
    saveas(FigH3, 'Fator de indução','jpeg')
    saveas(FigH4, 'Ângulos','jpeg')
    saveas(FigH5, 'Coeficiente de potência','jpeg')
    saveas(FigH6, 'Coeficientes','jpeg')
    saveas(FigH7, 'Forças','jpeg')
end

%% Fim

```

APÊNDICE C

```
% Programa para o Método de Elementos de Pá e Momento

% Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
% Bruno Margotto
% Sara Martins
% Orientador: Prof. Dr. Juan Romero

%% Introdução

% Este programa foi desenvolvido para se realizar de maneira mais rápida e
% eficiente os cálculos presentes no método do elemento de pá para o
% projeto de graduação pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
% como orientador o Prof. Dr. Juan Jomero.

%% Limpeza e formatação do MATLAB

clear;
close all;
clc

format long;

%% Dados do ar

Temp    = 20;                % Temperatura do ar em °C
rho_ar  = 1.225;             % Densidade do ar em kg/m³

%% Inicialização das variáveis

Vvento  = 7;                 % Velocidade do vento em m/s
Rrotor  = 5;                 % Raio do rotor em m
Rhub    = 1.257;             % Raio do cubo em m
B       = 2;                 % Número de pás
N       = 20;                % Número de elementos de pá
TipRatio = 5.386;            % Tip Ratio

Rot = TipRatio*Vvento/Rrotor; % Rotação do rotor

r      = zeros(N,1);         % Vetor alocando o raio local em m
c      = zeros(N,1);         % Vetor alocando o tamanho de corda de
projeto variando com o raio local, em m
```

```

Phi      = zeros(N,1);           % Vetor alocando o ângulo de fluxo
relativo da pá em ° para um dado raio local
Beta     = zeros(N,1);           % Vetor alocando o ângulo de passo da
pá em ° para um dado raio local
Alpha    = zeros(N,1);           % Vetor alocando o ângulo de ataque da
pá em ° para um dado raio local
u        = zeros(N,1);           % Vetor alocando  $M_i$ , proporção do raio
local com o raio do rotor (r/R) []
Solidity = zeros(N,1);           % Vetor alocando a Solidez da pá []
Cpow     = zeros(N,1);           % Vetor alocando o Coeficiente de
Potência para o raio local []

Forca_Thrust = zeros(N,1);       % Força de empuxo axial
Torque       = zeros(N,1);       % Torque
Forca_Torque = zeros(N,1);       % Força de torque
Forca_Lift   = zeros(N,1);       % Força de sustentação
Forca_Drag   = zeros(N,1);       % Força de arrasto

C_Torque = zeros(N,1);           % Coeficiente de torque
C_Thrust = zeros(N,1);           % Coeficiente de empuxo axial
Cl_graph = zeros(N,1);           % Alocando valores de  $C_l$  para plotagem
Cd_graph = zeros(N,1);           % Alocando valores de  $C_d$  para plotagem

dQ         = zeros(N,1);         % Vetor alocando o torque gerado em N.m
dP         = zeros(N,1);         % Vetor alocando a potência gerada em W

itermax = 100;                   % Número máximo de iterações no
processo iterativo de cálculo do BEM
erromax = 1e-4;                  % Valor máximo do erro para o processo
iterativo de cálculo do BEM
erro     = zeros(N,1);           % Vetor que conterà o erro para cada
elemento de pá
iter     = zeros(N,1);           % Vetor que conterà o número de
iterações para cada elemento de pá

% Fatores de indução radial e axial

a        = zeros(N,1);           % Vetor alocando fator de indução axial
[]
alinha   = zeros(N,1);           % Vetor alocando fator de indução
radial []
abetz    = ones(N,1)/3;          % Vetor alocando fator de indução do
limite de Betz []

%% Encontrando o valor mínimo de  $C_d/C_l$ 

Dados_aerof = xlsread('S809.xlsx');

counter_line = length(Dados_aerof);

```

```

Alpha_dados = Dados_aerof(:,1); % Vetor com os valores
de alpha para cada raio local, em m
Clift_dados = Dados_aerof(:,2); % Vetor com os valores
de coeficiente de sustentação para cada raio local []
Cdrag_dados = Dados_aerof(:,3); % Vetor com os valores
de coeficiente de arrasto para cada raio local []
Cl_Cd = abs(Clift_dados./Cdrag_dados); % Vetor Cl/Cd, visando
obter o maior razão pois assim teremos ?Lift ?Drag

posmaxCl_Cd = find(Cl_Cd == max(Cl_Cd));

Cl = Clift_dados(posmaxCl_Cd); % Alpha inicial para
calcular o valor da corda de projeto

clc; % Limpeza da tela

%% Preparação dos dados

dr = (Rrotor - Rhub)/N; % dr para encontrar o raio local, em m

for i=1:N
    r(i) = Rhub+dr*i;
    u(i) = r(i)/Rrotor;
% mi (u), que seria a relação r/R
    Beta(i) = atand( (2/3) * (1/(u(i)*TipRatio)) ) -
Alpha_dados(posmaxCl_Cd); % Função de ângulo de passo
end

uR = u(1);

%% Cálculo do tamanho de corda

for i=1:N
    Theta = (2/3) * atand(1/(TipRatio*u(i)));
    c(i) = (8*pi*r(i)) / (B*Cl) * (1-cosd(Theta));
end

%% Método do Elemento de Pá

% Chutes iniciais

for i=1:N
    Phi(i) = (2/3)*atand( 1 / ( TipRatio*u(i) ) );
    Solidity(i) = (B*c(i)) / (2*pi*r(i));
    Alpha(i) = Phi(i) - Beta(i);

    % Encontrando os valores de Cl e Cd

```

```

for j=2:counter_line
    if Alpha(i) < Alpha_dados(j) && Alpha(i) > Alpha_dados(j-1)
        Cl = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
        Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Clift_dados(j) - Clift_dados(j-1)
...
        ) ) + Clift_dados(j-1);

        Cd = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
        Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Cdrag_dados(j) - Cdrag_dados(j-1)
...
        ) ) + Cdrag_dados(j-1);
    end
end

k = Solidity(i) * (Cl*cosd(Phi(i)) + Cd*sind(Phi(i))) /
(4*sind(Phi(i))^2);
klinha = Solidity(i) * (Cl*sind(Phi(i)) - Cd*cosd(Phi(i))) /
(4*(sind(Phi(i)))^2*u(i)*TipRatio);

a(i) = k/(1+k);
alinha(i) = (1-a(i))*klinha;

end

aold = a;
alinhaold = alinha;

% Início do processo iterativo

for i=1:N
    iter(i) = 1;
    erro(i) = 1;
    parada = 1;
    while parada == 1
        Phi(i) = atand( ( 1 - aold(i) ) / ( TipRatio * u(i) * ( 1 +
alinhaold(i) ) ) );
        Alpha(i) = Phi(i) - Beta(i);

        % Encontrando os valores de Cl e Cd

        for j=2:counter_line
            if Alpha(i) < Alpha_dados(j) && Alpha(i) > Alpha_dados(j-1)
                Cl = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...

```

```

        Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Clift_dados(j) -
Clift_dados(j-1)    ...
        ) ) + Clift_dados(j-1);

        Cd = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
        Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Cdrag_dados(j) -
Cdrag_dados(j-1)    ...
        ) ) + Cdrag_dados(j-1);
    end
end

    k = Solidity(i) * (Cl*cosd(Phi(i)) + Cd*sind(Phi(i))) /
(4*sind(Phi(i))^2);
    klinha = Solidity(i) * (Cl*sind(Phi(i)) - Cd*cosd(Phi(i))) /
(4*(sind(Phi(i)))^2*u(i)*TipRatio);

    a(i)      = k/(1+k);
    alinha(i) = (1-a(i))*klinha;

    iter(i) = iter(i) +1;
    erro(i) = max(abs(a(i) - aold(i)),abs(alinha(i) - alinhaold(i)));
    aold(i) = a(i);
    alinhaold(i) = alinha(i);

    if erro(i) < erromax || iter(i) > itermax
        parada = 0;
    end

end
end

%% Cálculo do coeficiente de potência

for i=1:N

    for j=2:counter_line
        if Alpha(i) < Alpha_dados(j) && Alpha(i) > Alpha_dados(j-1)
            Cl = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
            Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Clift_dados(j) - Clift_dados(j-
1)    ...
            ) ) + Clift_dados(j-1);

            Cd = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
            Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Cdrag_dados(j) - Cdrag_dados(j-
1)    ...
            ) ) + Cdrag_dados(j-1);
        end
    end
end

```

```

end

Forca_Thrust(i) = rho_ar*Vvento^2*4*pi*(a(i)*(1-a(i))*r(i))/B;
% Força de empuxo axial
Torque(i)       = 4*rho_ar*Vvento*pi*Rot*(alinha(i)*(1-a(i))*r(i)^3)/B;
% Torque
Forca_Torque(i) = Torque(i)/r(i);
% Força de torque
Forca_Lift(i)    = (rho_ar*Vvento^2/2)*((1-
a(i))^2*c(i)*Cl/sind(Phi(i))^2);      % Força de sustentação
Forca_Drag(i)    = (rho_ar*Vvento^2/2)*((1-
a(i))^2*c(i)*Cd/sind(Phi(i))^2);      % Força de arrasto

C_Torque(i) = Torque(i)/(rho_ar*Vvento^2*pi*r(i)^2/2)*B;
C_Thrust(i) = 4*a(i)*(1-a(i));

end

%% Cálculos

for i=1:N
    Cpow(i) = (TipRatio*u(i))^2*4*alinha(i)*(1-a(i));      % Coeficiente
de potência []
end

Cpow_Total = 0.0;
Torque_Total = 0.0;
Thrust_Total = 0.0;
for i=1:N-1
    Cpow_Total = Cpow_Total + (Cpow(i+1)+Cpow(i))*(u(i+1)-u(i))/2;
    Torque_Total = Torque_Total + (Torque(i+1)+Torque(i))*(r(i+1)-r(i))/2;
    Thrust_Total = Thrust_Total +
    (Forca_Thrust(i+1)+Forca_Thrust(i))*(r(i+1)-r(i))/2;
end

Power = Cpow_Total*(rho_ar*Vvento^3*pi*Rrotor^2/2);
Torque_Total = Torque_Total*2;
Thrust_Total = Thrust_Total*2;

msgcp = 'Cp total da turbina ideal: %f';
msgpower = 'Potência total da turbina ideal: %f';
msgtorque = 'Torque total da turbina ideal: %f';
msgthrust = 'Empuxo axial total da turbina ideal: %f';
MsgCp=sprintf(msgcp,Cpow_Total);
disp('DADOS OBTIDOS PARA UMA TURBINA IDEAL')
disp(MsgCp)
disp(' ');
MsgPower=sprintf(msgpower,Power);
disp(MsgPower);
disp(' ');
MsgTorque=sprintf(msgtorque,Torque_Total);
disp(MsgTorque);

```

```

disp(' ');
MsgThrust=sprintf(msgthrust,Thrust_Total);
disp(MsgThrust);
disp(' ');

%% Preparação de dados para Cl e Cd

for i=1:N

    for j=2:counter_line
        if Alpha(i) < Alpha_dados(j) && Alpha(i) > Alpha_dados(j-1)
            Cl = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
            Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Clift_dados(j) - Clift_dados(j-
1) ...
            ) ) + Clift_dados(j-1);

            Cd = ( ( Alpha(i) - Alpha_dados(j-1) ) / ( Alpha_dados(j) -
...
            Alpha_dados(j-1) ) ) * ( ( Cdrag_dados(j) - Cdrag_dados(j-
1) ...
            ) ) + Cdrag_dados(j-1);
        end
    end

    Cl_graph(i) = Cl; % Alocando valores de Cl para
    plotagem
    Cd_graph(i) = Cd; % Alocando valores de Cd para
    plotagem

end

%% Plotagem dos gráficos

%Plot corda
FigH=figure;
plot(r,c);
xlabel('Posição em função do raio (m)');
ylabel('Corda (m)');
grid;
title('Distribuição de corda ao longo da pá - NREL Phase VI BEM');
axis([r(1) r(N) (min(c)-0.1) (max(c)+0.1)]);

% Plot erro
FigH1=figure;
scatter(r,erro);
grid;
xlabel('Posição em função do raio (m)');
ylabel('Erro [-]');
title('Erro para o processo iterativo de cálculo dos fatores de indução -
NREL Phase VI BEM');

```

```

% Plot número de iterações
FigH2=figure;
scatter(r,iter);
xlabel('Posição em função do raio (m)');
ylabel('Número de iterações [-]');
grid;
title('Número de iterações - NREL Phase VI BEM');

% Fator de indução axial e radial
FigH3=figure;
plot(r/Rrotor,a,r/Rrotor,alinha,r/Rrotor,abetz);
axis([r(1)/Rrotor r(N)/Rrotor 0 max(abetz)+0.1]);
legend('Axial induction factor','Radial induction factor','Betz limit induction factor','Location','Northeast');
xlabel('Posição em função da relação de raio [-]');
ylabel('Fator de indução [-]');
grid;
title('Fatores de indução axial e radial - NREL Phase VI BEM');

% Ângulos relativos à pá
FigH4=figure;
plot(r/Rrotor,Phi,r/Rrotor,Alpha,r/Rrotor,Beta);
legend('Ângulo de incidência relativo','Ângulo de ataque','Ângulo de passo','Location','Northeast');
xlabel('Posição em função da relação de raio [-]');
ylabel('Ângulo [°]');
title('Ângulos calculados - NREL Phase VI BEM');
axis([r(1)/Rrotor r(N)/Rrotor 0 Phi(1)]);
grid;

% Coeficiente de potência
FigH5=figure;
plot(r/Rrotor,Cpow);
xlabel('Posição em função da relação de raio [-]');
ylabel('C_{pow} [-]');
title('Coeficiente de potência - NREL Phase VI BEM');
grid;
axis([r(1)/Rrotor r(N)/Rrotor (Cpow(1)-0.05) (max(Cpow)+0.05)]);

% Coeficientes locais de lift, drag, torque e empuxo
FigH6=figure;
plot(r/Rrotor,Cd_graph,r/Rrotor,Cl_graph,r/Rrotor,C_Torque,r/Rrotor,C_Thrust);
xlabel('Posição em função da relação de raio [-]');
ylabel('Coeficientes [-]');
title('Coeficientes de contribuição local C_{d},C_{l}, C_{torque} e C_{empuxo} - NREL Phase VI BEM');
legend('Coeficiente de arrasto','Coeficiente de sustentação','Coeficiente de torque','Coeficiente de empuxo axial','Location','East');
axis([r(1)/Rrotor r(N)/Rrotor 0 1.2]);
grid;

% Torque, força de torque, empuxo axial, lift e drag forces
FigH7=figure;
plot(r,Forca_Thrust,r,Forca_Torque,r,Torque,r,Forca_Lift,r,Forca_Drag);
legend('Força de empuxo axial [N/m]','Força de torque [N/m]','Torque [N.m/m]','Força de sustentação [N/m]','Força de arrasto [N/m]','Location','Northwest');
xlabel('Posição em função do raio (m)');

```

```

ylabel('Forças');
title('Forças resultantes na turbina')
val = [Forca_Thrust,Forca_Torque,Torque,Forca_Lift,Forca_Drag];
ylim = max(max(val));
axis([r(1) r(N) 0 ylim+50]);
grid;

%% Salvar gráficos? SIM -> 1 ou NÃO -> 0
salvar = 1;
if salvar == 1
    saveas(FigH, 'Perfil Corda Optm','jpeg')
    saveas(FigH1,'Erro nas iterações Optm','jpeg')
    saveas(FigH2,'Número de iterações Optm','jpeg')
    saveas(FigH3,'Fator de indução Optm','jpeg')
    saveas(FigH4,'Ângulos Optm','jpeg')
    saveas(FigH5,'Coeficiente de potência Optm','jpeg')
    saveas(FigH6,'Coeficientes Optm','jpeg')
    saveas(FigH7,'Forças Optm','jpeg')
end

%% Fim

```

APÊNDICE D

Figura 52 - Contorno de pressão obtido em $r/R = 0.3$ - NREL Phase VI CFD

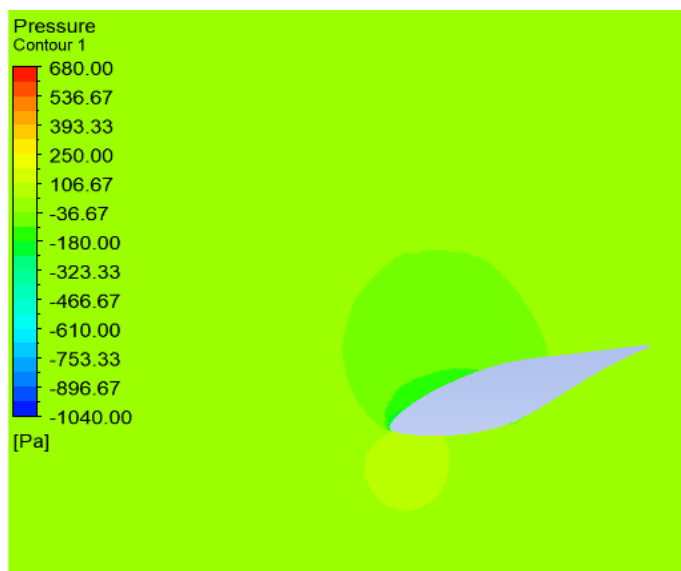


Figura 53 - Contorno de pressão obtido em $r/R = 0.5$ - NREL Phase VI CFD

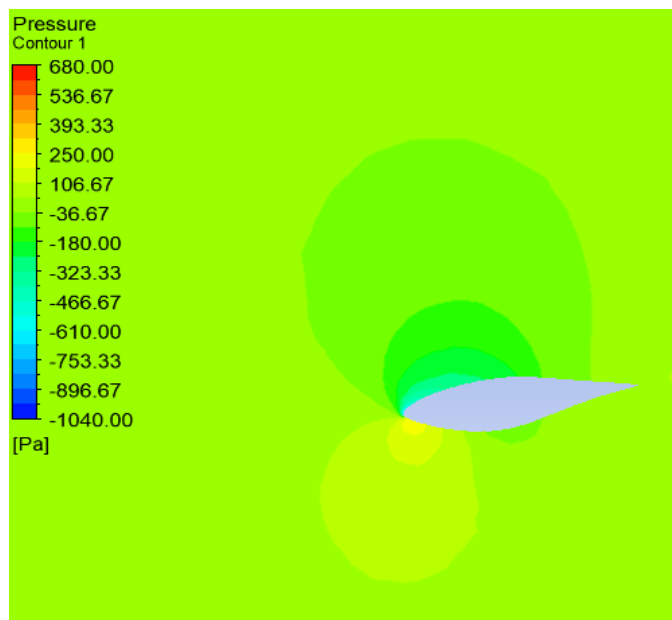


Figura 54 - Contorno de pressão obtido em $r/R = 0.9$ - NREL Phase VI CFD

