

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS EDUARDO KRUPPA
SUELEN CRISTINA FERREIRA BAGGIO

**CÁLCULO DE CARREGAMENTO AERODINÂMICO EM PÁ DE
GERADOR EÓLICO EMPREGANDO VORTEX LATTICE METHOD**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc2 – No de inscrição - 11)

CURITIBA

2017

CARLOS EDUARDO KRUPPA
SUELEN CRISTINA FERREIRA BAGGIO

CÁLCULO DE CARREGAMENTO AERODINÂMICO EM PÁ DE GERADOR EÓLICO EMPREGANDO VORTEX LATTICE METHOD

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr., Cláudio Tavares da Silva

CURITIBA

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa " CÁLCULO DE CARREGAMENTO AERODINÂMICO EM PÁ DE GERADOR EÓLICO EMPREGANDO VORTEX LATTICE METHOD", realizado pelos alunos Carlos Eduardo Kruppa e Suelen Cristina Ferreira Baggio, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Cláudio Tavares da Silva
Damec, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Admilson Teixeira Franco
Damec, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. Eduardo Matos Germer
Damec, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 30 de novembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por ter nos dado saúde e força para superar as dificuldades.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela oportunidade de realizar o curso de graduação.

Ao Prof. Dr. Cláudio Tavares pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho.

Aos Professores Admilson Teixeira Franco e Eduardo Matos Germer pelo paciente trabalho de revisão.

Aos pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Aos amigos que fizeram parte da nossa formação e que vão continuar presentes em nossas vidas.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

RESUMO

KRUPPA, Carlos Eduardo, BAGGIO, Suelen Cristina Ferreira. **Cálculo de carregamento aerodinâmico em pá de gerador eólico empregando Vortex Lattice Method**. 2017. 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica, Curitiba, 2017.

Para viabilizar a utilização de microgeradores eólicos é adequado fazer o controle do ângulo de arfagem de forma passiva. Para fazer esse controle utilizando materiais compósitos através do *aeroelastic tailoring* é necessário conhecer o carregamento aerodinâmico. No presente trabalho foi empregado o *Vortex Lattice Method* (VLM) para cálculo do carregamento aerodinâmico em uma pá de gerador eólico. Para este desenvolvimento, foram abordados tópicos do método de elemento de pá (BEM) e da teoria aerodinâmica. Para uso do VLM, a pá é dividida em uma malha, onde cada elemento recebe um ponto de controle e uma ferradura de vórtices. Com a condição de não permeabilidade da parede da pá, é possível calcular o carregamento em cada ponto. Os resultados obtidos estão próximos com os obtidos pelo método BEM, presente na literatura. Isso mostra a confiabilidade do VLM e seu potencial para ser utilizado no dimensionamento das pás do gerador eólico.

Palavras-chave: Vortex Lattice Method. Método do Elemento de Pá. Aeroelastic Tailoring.

ABSTRACT

KRUPPA, Carlos Eduardo, BAGGIO, Suelen Cristina Ferreira. **Aerodynamic loading calculation on a wind turbine generator using Vortex Lattice Method.** 2017. 57 p. Work Completion of course (Graduation) - Federal University of Technology - Paraná, Mechanical Engineering Graduation, Curitiba, 2016.

In order to make it possible to use micro wind generators, it is appropriate to passively control the pitch angle. To make this control using composite materials through aeroelastic tailoring it is necessary to know the aerodynamic loading. In the present work the Vortex Lattice Method (VLM) was used to calculate the aerodynamic load on a wind turbine generator. For this development, topics of the Blade Element Method (BEM) and aerodynamic theory were discussed. For VLM use, the blade is divided into a mesh, where each element receives a control point and a vortex horseshoe. With the non-permeability condition of the blade wall, it is possible to calculate the loading at each point. The obtained results are close to those obtained by the BEM method, present in the literature. It shows the reliability of the VLM and its potential to be used in the design of the blades of the wind generator.

Keywords: Vortex Lattice Method. Blade Element Method. Aeroelastic Tailoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais componentes geradores eólicos.	12
Figura 2 Comportamento do vento através de uma turbina.	18
Figura 3 Trajetória de uma partícula de ar passando pelo rotor.	19
Figura 4 Composição da velocidade em uma turbina eólica.	19
Figura 5 Escoamento do ar antes e depois do rotor.	21
Figura 6 Área radial infinitesimal.	23
Figura 7 Área varrida pelo rotor.	25
Figura 8 Conceito de circulação.	26
Figura 9 Circulação para curvas fechadas: (a) elemento retangular; (b) curva geral C.	26
Figura 10 Forças agindo em um cilindro.	27
Figura 11 Distribuição de pressão teórica ao redor de um cilindro.	28
Figura 12 Nomenclatura para condição de tangência: (a) normal ao elemento de curvatura média; (b) secção AA; secção BB.	30
Figura 13 Linhas de corrente ao redor da secção do aerofólio: (a) sem circulação, estagnação na superfície superior; (b) com circulação, estagnação na borda de fuga.	31
Figura 14 Representação da curvatura média por uma camada de vórtices.	32
Figura 15 Parâmetros do aerofólio fino.	33
Figura 16 Análise da localização do ponto de controle e do vórtice.	36
Figura 17 Representação da divisão da superfície de acordo com o VLM.	40
Figura 18 Nomeclatura para o cálculo da velocidade induzida para um filamento de vórtices com comprimento finito.	42
Figura 19 Ferradura de Vórtices Genérica.	44
Figura 20 Configuração dos vetores para cálculo da velocidade induzida.	45
Figura 21 Segmento de vórtice de A até D.	46
Figura 22 Ângulo de ataque local.	48
Figura 23 Módulos, sub-rotinas e fluxo do programa.	51
Figura 24 Geometria e malha da pá.	53
Figura 25 Distribuição da Sustentação na pá.	54
Figura 26 Distribuição de sustentação na pá.	54
Figura 27 Diagrama de momento.	55
Figura 28 Diagrama de momento teórico.	55

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEM – Blade Element Theory

NOS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

VLM – Método Vórtice Latisse

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ - Densidade do ar

A – Área varrida pelo rotor

U_∞ – Velocidade do vento

P – Potência

C_p - Coeficiente de potência

Γ - Circulação

l - Sustentação

d - Arrasto

ϕ - Ângulo de torção do aerofólio

δ - Inclinação da linha de curvatura média no ponto de controle

$\gamma(s)$ - Distribuição de vorticidade

α - Ângulo de ataque

α_m - Ângulo de ataque local do ponto de controle m_{th}

α_i - Ângulo de ataque associado com o escoamento incidente no plano xz

a – Fator de indução na direção axial

a' – Fator de indução na direção radial

V - Velocidade induzida

$C_{m,n}$ - Coeficiente de influência

φ - Ângulo de torção geométrica

N – Número total de elementos

Δy_n - Comprimento elementar do painel

c_n - Corda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	CONTEXTO DO TEMA	12
1.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	13
1.3	OBJETIVOS	14
1.4	JUSTIFICATIVA	15
1.5	CONTEÚDO OU ETAPAS DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	MÉTODO DE ELEMENTO DE PÁ	17
2.2	POTÊNCIA E COEFICIENTE DE POTÊNCIA	24
2.3	CIRCULAÇÃO	26
2.4	SUSTENTAÇÃO EM UM CILINDRO	27
2.5	SUSTENTAÇÃO E ARRASTO (CILINDRO GIRANDO)	29
2.6	A CONDIÇÃO DE TANGÊNCIA DO ESCOAMENTO	29
2.7	A TEORIA DO AEROFÓLIO DELGADO	31
2.7.1	Aerofólio delgado e simétrico	34
2.8	SELEÇÃO DO PONTO DE CONTROLE E LOCALIZAÇÃO DO VÓRTICE	36
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	39
3.1	HIPÓTESES	41
3.2	EQUACIONAMENTO	42
4	Implementação numérica	50
5	RESULTADOS	52
6	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui atualmente aproximadamente 142 GW de potência instalada, considerando todas as formas de geração de nossa matriz energética. 76% da energia gerada no país é proveniente de recursos renováveis. Segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), em 2015, a fonte geradora de 71% da potência instalada é hidráulica, 4% é eólica e 1% é biomassa. Dados provenientes da NOS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) estimam um crescimento médio de 3,5% ao ano no consumo de energia no período de 2016-2020.

Com o crescimento do consumo de energia elétrica e considerando o Brasil um país privilegiado pelos recursos hídricos, pensando em escala global, o desenvolvimento de energias renováveis é uma necessidade atual (ANEEL, 2016).

A energia eólica, que consiste na energia cinética contida nas massas de ar (vento), é uma fonte renovável que traz muitas vantagens. A fonte geradora é inesgotável, não emite gases poluentes, e o custo dos equipamentos reduziu drasticamente nas últimas décadas. Em contrapartida, a intermitência do vento é uma desvantagem desse tipo de energia, ou seja, ela deverá sempre estar atrelada a outra fonte geradora principal, atuando como energia complementar e alternativa (ANEEL, 2016).

A microgeração é uma alternativa para gerar energia elétrica através do vento por geradores eólicos de pequeno e médio porte, bem mais baratos que os grandes geradores. No Brasil, de acordo com a resolução normativa 482/2012 da ANEEL, sistemas que produzem até 100 kW de potência são considerados microgeradores. Como esses equipamentos podem ser instalados em áreas urbanas, as construções (prédios, casas, jardins com grandes árvores) nas proximidades do local de instalação podem influenciar na qualidade do vento, pois, devido a seu menor porte, está mais próximo ao solo do que os geradores de grande porte. Outro problema relacionado à utilização de microgeradores é a eficiência, já que a velocidade do vento sofre turbulências que alteram os fatores direção e intensidade, produzindo uma quantidade de energia menor do que o esperado. A velocidade do vento é um fator importante, visto que, se acima de 15 m/s, as pás param de girar para não danificar o equipamento (ANEEL, 2016).

Tendo em vista problemas como os citados, na presente dissertação é apresentado um estudo que visa calcular o carregamento aerodinâmico na pá de um microgerador com o objetivo de calcular o *aerolastic tailoring*.

1.1 CONTEXTO DO TEMA

A utilização de energia eólica data do século XIII, onde eram utilizados moinhos em áreas rurais para moer os grãos produzidos. Houve um estímulo para o desenvolvimento da energia eólica no ano de 1973. Nesta época o petróleo era escasso e tinha valor de mercado elevado, o que incentivou o governo norte-americano e de alguns países europeus a investir em energias renováveis (BURTON, 2001.)

Com o investimento de alguns países europeus e dos Estados Unidos, já no final dos anos 90, a indústria de energia eólica movimentava mais de um bilhão de dólares ao ano, e cresceu mais de 20% ao ano até 2008 (BURTON, 2001). Na Europa, onde a maior parcela de geração de energia eólica é a da Alemanha, essa taxa de crescimento chegou a 40% entre 1991 e 1999. Esse alto grau de investimento fez com que o valor da energia, em US\$/kWh tivesse competitividade com os combustíveis fósseis, amplamente utilizados na América do Norte e Europa.

As turbinas eólicas possuem vários subconjuntos de componentes, conforme mostrado na Figura 1. São eles: torre, rotor, *nacele*, sistema de transmissão, gerador, anemômetro e biruta.

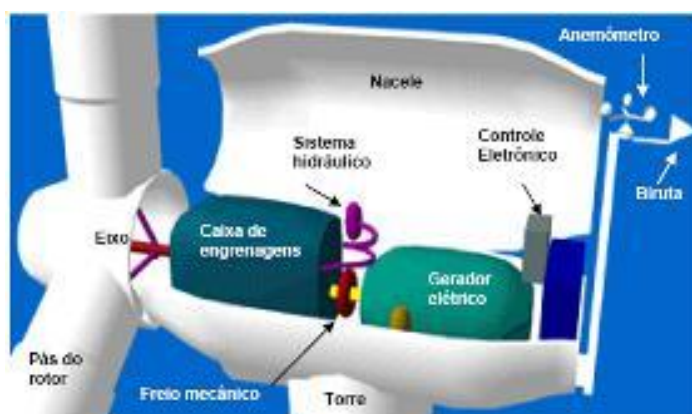


Figura 1 – Principais componentes geradores eólicos.
Fonte: ROSSI (2012).

A torre é o elemento que sustenta o rotor e a *nacele* na altura adequada ao funcionamento da turbina eólica. O rotor é o componente que concentra todas as pás, todo o conjunto é conectado a um eixo que transmite a rotação das pás para o gerador, muitas vezes, através de uma caixa multiplicadora. A *nacele* é o compartimento instalado no alto da torre e que abriga todo o mecanismo do gerador, o qual pode incluir: caixa multiplicadora, freios, embreagem, mancais, controle eletrônico, sistema hidráulico.

A transmissão é o mecanismo que transmite a energia mecânica do eixo do rotor ao eixo do gerador. O gerador é o componente que tem função de converter a energia mecânica do eixo em energia elétrica. O anemômetro mede a intensidade e a velocidade dos ventos. As pás do rotor captam o vento e convertem a energia cinética em energia mecânica de rotação. São elas que captam a direção do vento, pois ele deve estar perpendicular à torre para obter um maior rendimento. (ROSSI, 2012). O presente trabalho envolve o subconjunto das pás do rotor.

Em 2016, no Brasil, a energia eólica abasteceu uma população equivalente ao sul do país e gerou 41 mil postos de trabalho. E a perspectiva é que o setor continue crescendo, segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABBEólica). Em termos de matriz energética, a energia eólica é a fonte mais competitiva se grandes projetos hidroelétricos forem desconsiderados. Em 17 de abril de 2012 entrou em vigor a resolução normativa ANEEL número 484/2012, que possibilita ao consumidor brasileiro gerar sua própria energia elétrica por meio de fontes renováveis e fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Segundo a ANEEL os principais benefícios são o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética. Considerando o cenário apresentado, a melhoria da eficiência dos microgeradores é uma forma de estimular o pequeno produtor a adquirir maquinário, produzir energia e devolver o excedente para a rede.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Devido à grande variação apresentada pela velocidade do vento, especialmente nas grandes cidades, onde a microgeração é mais aplicada, o rendimento do gerador é reduzido, pois a faixa de rotação que proporciona o

máximo rendimento é estreita. Para aumentar esta faixa busca-se manter a rotação do eixo constante.

O controle da rotação em grandes geradores é feito através de um sistema de controle ativo, no qual são utilizados motores de passo, ou até mesmo motores hidráulicos, que controlam o ângulo de arfagem das pás, mantendo uma rotação constante independente da velocidade do vento. Já na microgeração o controle ativo não é economicamente rentável, visto que além do custo do sistema de controle, que envolve motores de passo e um software para operá-lo, existe o consumo de energia para acioná-los, o que reduz a eficiência final do gerador eólico.

Portanto, é interessante o emprego de um sistema de controle passivo do ângulo de arfagem do microgerador eólico. Para tanto, a otimização da geometria da pá e uma boa estimativa do carregamento aerodinâmico, bem como o emprego de um material inteligente que possibilite a mudança do ângulo de arfagem em função do carregamento aerodinâmico, são necessários.

1.3 OBJETIVOS

O cálculo do carregamento aerodinâmico na pá do gerador eólico é o foco do trabalho e seu principal objetivo. Entende-se por carregamento aerodinâmico o cálculo da sustentação da pá e do coeficiente de potência.

Para que isso seja possível, é adaptado um código computacional para realizar o cálculo da sustentação na pá do gerador eólico, a partir de uma geometria pré-determinada. O programa original calcula o carregamento para uma asa fixa, e este é modificado para atender uma asa rotativa.

O código é desenvolvido com base no Método Vórtice Lattice (VLM), ferramenta que permite a soluções numéricas para o carregamento aerodinâmico em uma superfície.

Uma vez conhecido o carregamento, é possível projetar o controle passivo do ângulo de arfagem, utilizando os princípios de *aeroelastic tailoring*. O conceito de *aeroelastic tailoring* diz respeito à aplicação da rigidez direcional em materiais compósitos no projeto de componentes sujeitos a cargas aerodinâmicas, de forma a controlar suas deformações da melhor maneira possível a ponto de otimizar seu

desempenho estrutural ou performance de maneira geral. (BORGES; FOFANO, 2016).

1.4 JUSTIFICATIVA

A instalação de microgeradores é uma alternativa para reduzir o consumo de energia elétrica da rede em locais com disponibilidade de vento, como por exemplo, no topo de edifícios nas grandes cidades. Outra aplicação é em regiões isoladas, onde não haja distribuição de energia elétrica, possibilitando o acesso de mais pessoas a uma fonte de energia barata em comparação com energia termoelétrica.

Para que o rendimento de um microgerador seja aumentado e permita a geração de energia em uma faixa maior de velocidades do vento, um controle passivo do ângulo de arfagem é uma solução economicamente viável e de fácil aplicação. Uma das possibilidades é usar o *aeroelastic tailoring*, que segundo Borges et. al (2016) já está sendo estudados para verificar qual a contribuição para o controle passivo e alívio em pás de grandes geradores eólicos.

A determinação dos parâmetros aerodinâmicos da pá é uma das etapas para o desenvolvimento de uma pá otimizada para um microgerador eólico. Então, se obtém o carregamento aerodinâmico para que, por fim, seja possível calcular o *aerolasting tailoring*.

O VLM é selecionado para o desenvolvimento do trabalho devido à fácil implementação computacional, à rapidez no processamento dos dados, possibilitando seu emprego num processo iterativo de otimização, e à consistência dos resultados (DA SILVA, 2011).

1.5 CONTEÚDO OU ETAPAS DO TRABALHO

A partir das definições básicas presentes na revisão bibliográfica, é possível o entendimento dos conceitos de circulação, sustentação, arrasto, condições de contorno, definições do VLM e velocidade atuante na pá.

O capítulo da metodologia aborda o desenvolvimento matemático do método, com a caracterização da velocidade induzida, circulação, sustentação e coeficiente de potência, permitindo a implementação numérica do problema e, assim, gerando os resultados desejados.

O capítulo com a implementação numérica apresenta uma breve descrição do programa e suas sub-rotinas, além das alterações para a pá rotativa.

Os resultados apresentam gráficos e dados obtidos, além da comparação com a literatura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a teoria do elemento de pá, seguida de teorias aerodinâmicas e de um método de seleção do ponto de controle. Essa teoria serve como base tanto para os procedimentos metodológicos quanto para a implementação numérica do programa.

2.1 MÉTODO DE ELEMENTO DE PÁ

A teoria do elemento de pá (BEM) é uma das formas de calcular o carregamento e o projeto aerodinâmico das pás. O projeto aerodinâmico consiste na determinação da geometria, como a envergadura e a corda. O método tradicional para turbinas eólicas foi proposto por Glauert (1935). O modelo permite o cálculo de cargas estáveis e a potência para determinada velocidade do vento, velocidade de rotação e ângulo de inclinação (HANSEN, 2008). Ainda fornece informações sobre o desempenho do rotor de uma turbina eólica e do projeto de suas pás, levando em consideração os efeitos dos parâmetros de projeto, tais como aerofólio, distribuição de comprimento de corda, torção geométrica, entre outros. O método de elemento de pá divide a seção em elementos bidimensionais isolados, ou seja, o que acontece com os outros elementos não é percebido pelo elemento em questão. Por fim, os elementos são integrados para a obtenção do empuxo e do torque (DA SILVA, 2011).

Um modelo baseado na teoria do momento linear é usado para determinar a potência de um rotor ideal. O modelo é atribuído a Betz (BURTON, 2001). Um fator de indução pode ser definido de acordo com o decréscimo na velocidade do vento entre o escoamento livre e o plano no rotor. O fator de indução, a , está apresentado na equação (1).

$$a = \frac{U_{\infty} + U_d}{U_{\infty}} \quad (1)$$

sendo U_{∞} a velocidade do vento e U_d a velocidade do vento média no disco rotor.

O princípio da conservação do momento do escoamento pode ser aplicado na direção radial e na direção axial. A variação do momento do escoamento ao longo do tubo de escoamento deve ser igual ao empuxo produzido por cada

elemento de pá. O tubo de escoamento pode ser observado na Figura 2, começando antes do rotor, passando pelo disco do rotor e cobrindo toda a área varrida pelo rotor, e, em seguida, movendo-se para o ao longo da esteira. Adota-se como hipótese que as variáveis são invariantes no tempo. O empuxo axial no plano do disco do rotor, T , é dado de acordo com a equação (2) (DA SILVA, 2011).

$$T = \frac{1}{2} \rho A U^2 [4a(1-a)] \quad (2)$$

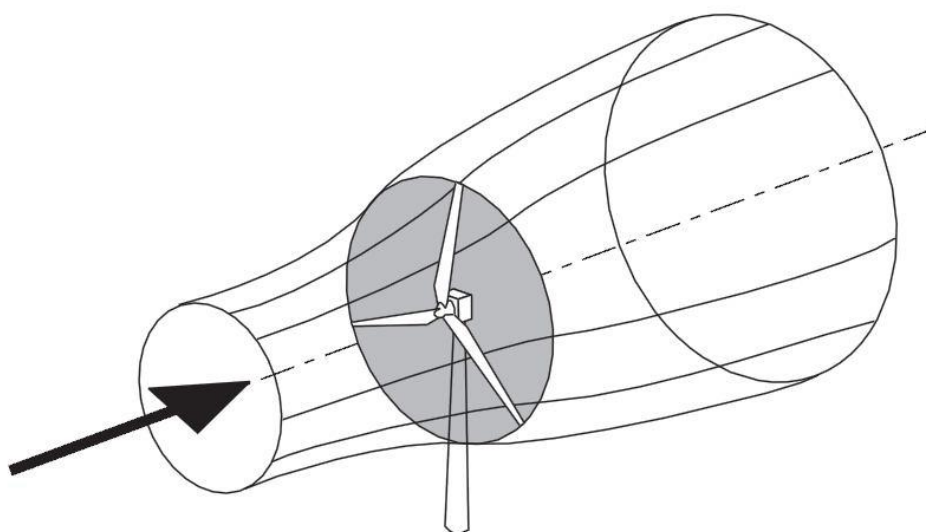


Figura 2 Comportamento do vento através de uma turbina.
Fonte: BURTON (2001)

Definido o empuxo, se obtém a potência de saída, P , multiplicando o empuxo pela velocidade do escoamento no disco, de acordo com a equação (3).

$$P = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 4a(1-a)^2 \quad (3)$$

O coeficiente de potência, C_p , representa a fração de potência do vento que é efetivamente extraída pelo rotor e entregue ao eixo da turbina. O coeficiente de potência é calculado através da equação (4). O termo do numerador representa a potência no rotor e o termo do denominador representa a potência do vento.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3} \quad (4)$$

Considerando a trajetória de uma partícula de ar que passa pelo rotor, conforme a Figura 3, a componente da velocidade tangencial é descrita como $\Omega r(1+a')$, sendo Ω a velocidade angular do rotor, r o raio da partícula e a' o fator de indução na direção radial. A Figura 4 representa a relação geométrica que permite obter a velocidade tangencial do vento, sendo α o ângulo de ataque, ϕ o ângulo relativo ao vento e θ o ângulo geométrico de cada seção. Portanto o ângulo relativo ao vento é a soma do ângulo de ataque e o ângulo geométrico de cada seção, $\phi = \alpha + \theta$ (DA SILVA, 2011).

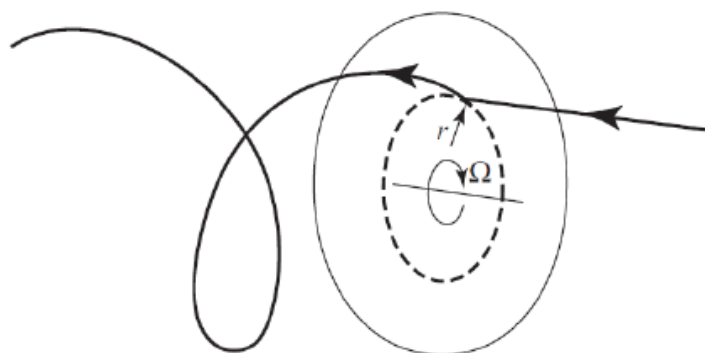


Figura 3 Trajetória de uma partícula de ar passando pelo rotor.
Fonte: BURTON (2001)

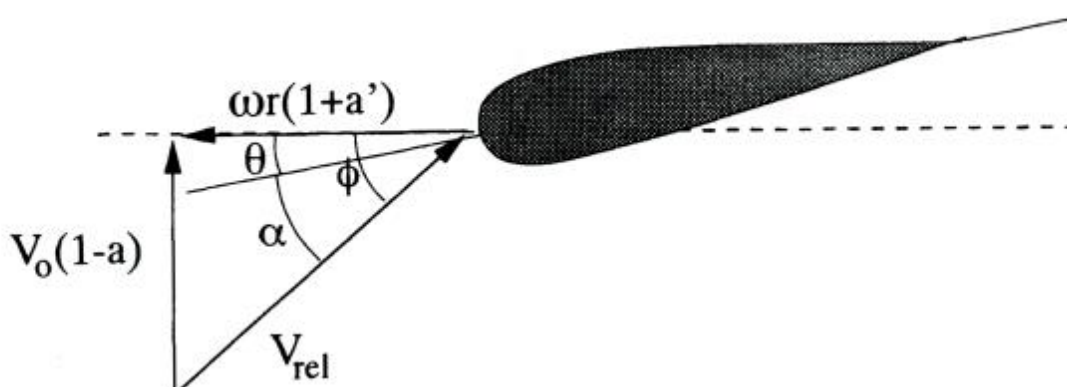


Figura 4 Composição da velocidade em uma turbina eólica.
Fonte: ANDERSEN (2008)

As forças de sustentação e de arrasto dependem do ângulo de ataque e da velocidade relativa do vento. A força de sustentação é perpendicular à direção do vento e a força de arrasto é paralela ao vento. Tanto a força de sustentação quanto

a força de arrasto são proporcionais à pressão dinâmica, então os respectivos coeficientes relacionados às forças são divididos pela pressão dinâmica.

Os coeficientes de sustentação e de arrasto podem ser definidos levando em consideração as forças de arrasto, D , e de sustentação, L , de acordo com as equações (5) e (6). Esses coeficientes são calculados de acordo com a área de cada painel, o que é importante para o método de elementos de pás, pois as forças são calculadas individualmente para cada elemento (ANDERSEN, 2008).

$$C_l = \frac{L}{qA_b} = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} \quad (5)$$

sendo $q = \frac{1}{2}\rho v^2$ a pressão dinâmica, v é a velocidade relativa do ar que chega a cada painel, $A_b = lc$ a área do elemento, l é o comprimento do painel, c é o comprimento da corda e $\frac{1}{2}\rho U^2 c$ a força dinâmica.

$$C_d = \frac{D}{qA_b} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} \quad (6)$$

Um aspecto importante é a velocidade do vento da perspectiva da pá. A velocidade do vento que chega na turbina é diferente da velocidade do vento após passar a turbina, como pode ser observado na Figura 2, pois parte da energia do vento foi extraída. Normalmente isso é modelado através da velocidade induzida, que representa a forma que o vento muda ao longo da envergadura (ANDERSEN, 2008).

Essa velocidade é representada pelos fatores a e a' , onde a velocidade do vento pode ser observada nas equações (7) e (8). Na direção axial a velocidade do vento é reduzida pelo fator a . Já na direção radial, o vento é acelerado da raiz para a ponta da pá, conforme a Figura 4 (ANDERSEN, 2008).

$$V_{rel} \sin \phi = U_\infty (1 - a) \quad (7)$$

$$V_{rel} \cos \phi = \Omega r (1 + a') \quad (8)$$

A partir da Figura 4 é possível estabelecer as relações apresentadas nas equações (9), (10) e (11).

$$V_{rel} = \frac{U(1-a)}{\sin\phi} \quad (9)$$

$$F_n = L\cos\phi + D\sin\phi \quad (10)$$

$$F_t = L\sin\phi - D\cos\phi \quad (11)$$

sendo V_{rel} a velocidade relativa do vento na seção, F_n a força normal e F_t a força tangencial ao disco do rotor.

Os coeficientes da força normal e da força tangencial são definidos de acordo com as equações (12) e (13).

$$C_n = \frac{F_n}{\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 c} \quad (12)$$

$$C_t = \frac{F_t}{\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 c} \quad (13)$$

Assumindo que o fluxo de ar ocorra apenas na direção x , então a diferença na velocidade do ar será diferente antes e depois do rotor. Como é possível observa na Figura 5 a velocidade antes do rotor é V_0 e a velocidade após o rotor é u_1 . A partir do volume de controle, obtém-se a equação (14).

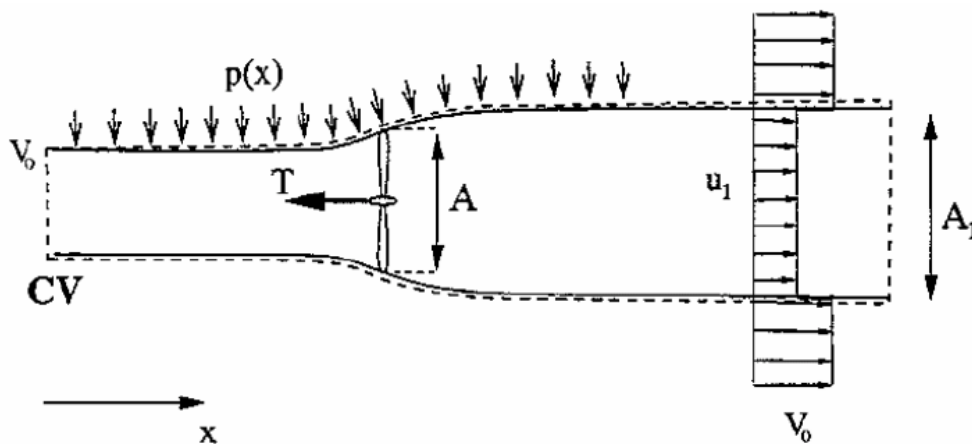


Figura 5 Escoamento do ar antes e depois do rotor.

FONTE: ANDERSEN (2008).

$$T = \dot{m}(V_0 - u_1) \quad (14)$$

O fluxo de massa em determinado ponto é dado multiplicando a área, a velocidade e a densidade do ar. Adotando uma área infinitesimal, o fluxo de massa é dado de acordo com a equação (15).

$$d\dot{m} = 2\pi r \rho u (V_0 - u_1) \quad (15)$$

sendo u a velocidade do vento em um determinado raio do rotor. Dessa forma, a partir da equação (14) e da equação (15), o empuxo pode ser escrito conforme a equação (16).

$$dT = 2\pi r \rho u (V_0 - u_1) dr \quad (16)$$

O coeficiente da velocidade induzida pode ser introduzido e se obtém $u = V_0(1-a)$ e $u_1 = V_0(1-2a)$. Substituindo os termos na equação (16), pode-se reescrever o empuxo como na equação (17).

$$dT = 4\pi r \rho V_0^2 a(1-a) dr \quad (17)$$

Considerando uma turbina com um número B de pás, a força normal diferencial na seção a uma distância r do centro do rotor, conforme Figura 6, é dada pela equação (18).

$$dT = BF_n dr = B \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c C_n dr \quad (18)$$

A partir da equação (17) e da equação (18) é possível determinar o coeficiente de indução a (equação (19)). (ANDERSEN, 2008).

$$dT = 4\pi r \rho V_0^2 a(1-a) dr = \frac{1}{2} V_0^2 \frac{(1-a)^2}{\text{sen}^2 \phi} c B C_n dr$$

$$\frac{a}{1-a} = \frac{cB}{2\pi r} \frac{C_n}{4\text{sen}^2 \phi}$$

$$a = \frac{1}{\left(\frac{4\text{sen}^2 \phi}{\left(\frac{cB}{2\pi r} \right) C_n} + 1 \right)} \quad (19)$$

O torque diferencial atuando no rotor é o mesmo torque atuando no vento, e consiste na derivada do momento angular em relação ao tempo, conforme equação (20).

$$Q = \frac{d(mV_{t,1}ra')}{dt} = \dot{m}V_{t,1}ra' \quad (20)$$

sendo $V_t = \Omega ra'$ então $V_{t,1} = 2\Omega ra'$ e a' é o fator de indução radial da velocidade. Substituindo $V_{t,1}$ e considerando um volume de controle infinitesimal, como na Figura 6, obtém-se a equação (21). (ANDERSEN, 2008).

$$dQ = 2\dot{m}\Omega a' r^2 = 4\pi\rho V_0(1-a)\Omega a' r^2 dr \quad (21)$$

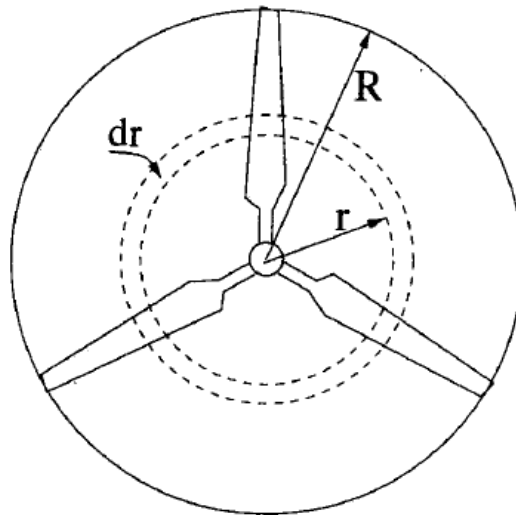


Figura 6 Área radial infinitesimal.
FONTE: ANDERSEN (2008)

O torque pode ser escrito como na equação (22).

$$dQ = rBF_t dr = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 cC_t r B dr \quad (22)$$

Substituindo as velocidades relativas que estão representadas nas equações (7) e (8). Igualando a equação (21) se obtém o fator a' , conforme equação (23).

$$dQ = 4\pi\rho V_0(1-a)\Omega a' r^2 dr = \frac{1}{2} \rho \frac{V_0(1-a)\Omega r(1+a')}{\text{sen}\phi \cos\phi} cC_t r B dr$$

$$a' = (1 + a') \frac{\left(\frac{cB}{2\pi r}\right) C_t}{4 \text{sen}\phi \cos\phi} = \frac{1}{\left(\frac{cB}{2\pi r}\right) C_t - 1} \quad (23)$$

O coeficiente de potência também pode ser calculado como uma função da razão de velocidade de ponta da pá $\lambda = \frac{\Omega R}{U}$ e da razão da velocidade local $\lambda_r = \frac{\lambda R}{r}$ conforme a equação (24) (GASH; TWELE, 2002).

$$c_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_r}^{\lambda} \text{sen}^2\phi (\cos\phi - \lambda_r \text{sen}\phi) (\text{sen}\phi + \lambda_r \cos\phi) \left[1 - \frac{C_d}{C_l} \cot\phi\right] \lambda_r^2 d\lambda_r \quad (24)$$

O empuxo e o torque totais da turbina eólica são obtidos somando-se os resultados de cada seção radial de elemento de pá ao longo da direção radial de acordo com as equações (25) e (26) (DONADON; IANNUCCI, 2006).

$$T = \sum_{i=1}^N \Delta T \quad (25)$$

$$Q = \sum_{i=1}^N \Delta Q \quad (26)$$

2.2 POTÊNCIA E COEFICIENTE DE POTÊNCIA

A potência aumenta com o cubo da velocidade do vento, de acordo com a equação clássica, apresentada na equação (27), que permite determinar a potência produzida em um gerador eólico.

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A U_\infty^3 \quad (27)$$

A potência é dependente também da densidade do ar (ρ), do coeficiente de potência (C_p), da área varrida pelo rotor (A), além da velocidade do vento (U). A área varrida pelo rotor é igual à área de um círculo (πR^2) devido ao movimento de rotação das pás, como pode ser visto na Figura 7. Portanto, aumentar a faixa de velocidades de vento com que o microgerador produz energia, significa aumentar a potência produzida.

A potência extraída máxima ocorreria quando o coeficiente de potência se igualasse a 1, mas para isso, toda a energia do vento teria que ser convertida em energia elétrica. Isso não acontece, pois, a velocidade do vento após passar pelo gerador é sempre maior do que zero. De acordo com a formulação proposta pelo físico Albert Betz, a eficiência da turbina não pode ser maior do que 59,3%, devido à própria natureza da turbina, que não consegue “travar” 100% do vento que passa pela seção. Para que a velocidade do vento após a saída do gerador seja igual zero, é necessária a substituição das pás por uma massa sólida, a fim de frear toda a massa de ar em deslocamento que passa pela área varrida pelo rotor. Desta forma, o movimento de rotação do rotor é impossibilitado, pois a turbina age como uma barreira. Conseqüentemente, a energia cinética não é transformada em mecânica. (BURTON, 2001).

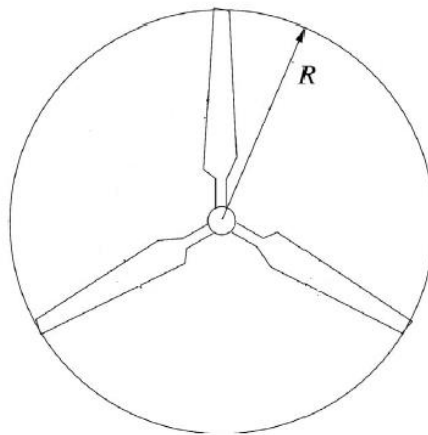


Figura 7 Área varrida pelo rotor.
FONTE: HANSEN (2008)

A potência nominal é a potência máxima permitida que o gerador deve produzir e um sistema de controle deve garantir que a rotação não exceda os limites estabelecidos em projeto quando em condições de ventos fortes. A velocidade do vento é o parâmetro que deve ser considerado para a determinação da potência nominal. Com o aumento da velocidade do vento a potência aumenta gradativamente até atingir a potência nominal (HANSEN, 2008).

2.3 CIRCULAÇÃO

A circulação é definida como a integral de linha da velocidade ao redor de uma curva fechada, como mostrado na Figura 8 e aplicado na equação (28) (FOX; MCDONALD; PRICHARD, 2014).

$$-\Gamma = \oint_C \vec{V} \cdot \vec{ds} \quad (28)$$

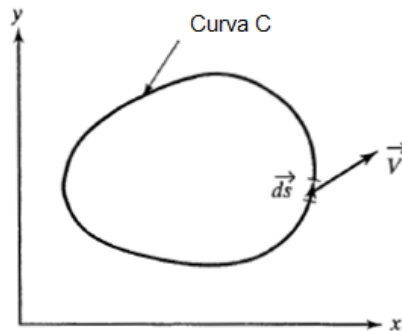


Figura 8 Conceito de circulação.
Fonte: BERTIN (2009)

sendo $\vec{V} \cdot \vec{ds}$ o produto escalar entre o vetor velocidade e o vetor diferencial do comprimento sobre a superfície de integração.

Considerando a circulação ao redor de um pequeno elemento quadrado no plano xy , como na Figura 9(a), e integrando a componente da velocidade em cada lado, obtém-se a equação (29) (BERTIN, 2009).

$$-\Delta\Gamma = u\Delta x + \left(v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y - \left(u + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \right) \Delta x - v\Delta y \quad (29)$$

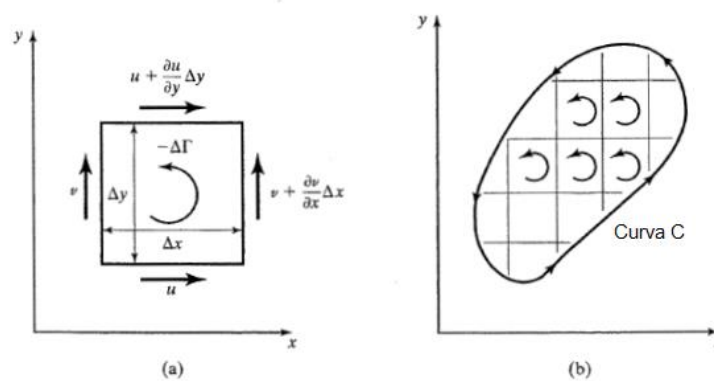


Figura 9 Circulação para curvas fechadas: (a) elemento retangular; (b) curva geral C.
Fonte: BERTIN, 2009

Simplificando:

$$-\Delta\Gamma = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \Delta x \Delta y \quad (30)$$

Esse procedimento pode ser generalizado para a curva vista na Figura 9(b).

$$-\Gamma = \oint_C (u dx + v dy) = \iint_A \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) dx dy \quad (31)$$

A equação (32) representa o teorema de Green para transformar uma integral de linha em uma integral dupla. Para transformação em coordenadas tridimensionais, utilizamos o teorema de Stokes (BERTIN, 2009).

$$\oint_C \vec{V} \cdot \vec{ds} = \iint_A (\nabla \times \vec{V}) \cdot \hat{n} dA \quad (32)$$

onde $\hat{n} dA$ é o vetor normal à superfície.

2.4 SUSTENTAÇÃO EM UM CILINDRO

A movimentação das partículas de ar ao redor dos cilindros produz forças com componentes normais e tangenciais. Logo, tem-se duas forças atuando no cilindro, uma na direção perpendicular ao escoamento, conhecida como sustentação, e outra paralela ao escoamento, conhecida como arrasto. As forças estão representadas na Figura 10. A equação (33) representa a velocidade na direção da sustentação (BERTIN, 2009).

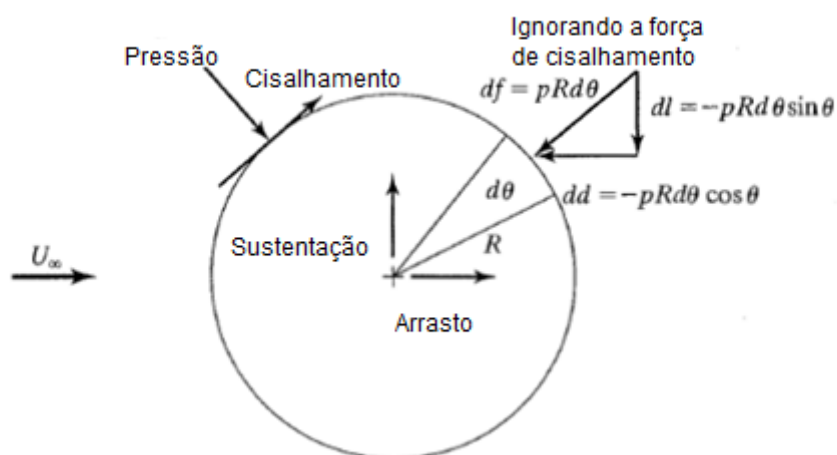


Figura 10 Forças agindo em um cilindro.

Fonte: BERTIN (2009)

$$v_{\theta} = -2U_{\infty} \sin\theta \quad (33)$$

E utilizando a equação de Bernoulli, a distribuição de pressão, conforme equação (34).

$$p = p_{\infty} + \frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2 - 2\rho_{\infty} U_{\infty}^2 \sin^2\theta \quad (34)$$

Partindo das expressões para a distribuição de velocidades, mostrada na equação (33), e para a distribuição de pressão, da equação (34), obtém-se a equação (35).

$$l = -\int_0^{2\pi} p \sin\theta R d\theta = 0 \quad (35)$$

A equação (35) representa a sustentação l nula. Este resultado é consistente, visto que a distribuição de pressão é simétrica no plano horizontal. De forma similar, a equação (36) representa o arrasto.

$$d = -\int_0^{2\pi} p \cos\theta R d\theta \quad (36)$$

e assim, o arrasto obtido é $d = 0$ (ANDERSON JR., 2010).

Este é um resultado teórico, porém muito diferente de experimentos, como o resultado contido na Figura 11, onde o resultado teórico para a distribuição de pressão ao redor do cilindro difere consideravelmente dos resultados experimentais. (BERTIN, 2009).

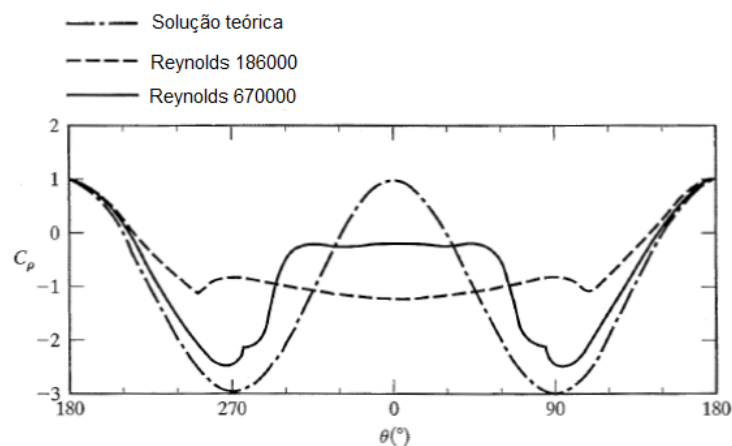


Figura 11 Distribuição de pressão teórica ao redor de um cilindro.

Fonte: BERTIN, 2009

2.5 SUSTENTAÇÃO E ARRASTO (CILINDRO GIRANDO)

Devido à velocidade na superfície do cilindro ser uma função de θ , como apresentado na equação (37), a pressão estática também será uma função de θ . Considerando escoamento uniforme com circulação imposta no sentido horário, tem-se que:

$$v_{\theta} = -2U_{\infty} \sin \theta - \frac{\Gamma}{2\pi r} \quad (37)$$

Utilizando a equação de Bernoulli, na equação (38) obtém-se a distribuição de pressão (BERTIN, 2009).

$$p = p_{\infty} + \frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2 - \frac{1}{2} \rho_{\infty} \left(-2U_{\infty} \sin \theta - \frac{\Gamma}{2\pi r} \right)^2 \quad (38)$$

$$p = p_{\infty} + \frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2 - \frac{1}{2} \rho_{\infty} \left(4U_{\infty}^2 \sin^2 \theta + \frac{2\Gamma U_{\infty} \sin \theta}{\pi r} + \left(\frac{\Gamma}{2\pi r} \right)^2 \right)$$

Aplicando a distribuição de pressão na equação do arrasto obtém-se a equação (39).

$$d = -\int_0^{2\pi} p(\cos \theta) r d\theta = 0 \quad (39)$$

Este resultado pode ser generalizado para qualquer corpo bidimensional em um escoamento permanente, incompressível e irrotacional (BERTIN, 2009).

São considerados irrotacionais os escoamentos onde nenhuma rotação de partícula ocorre. Nenhum escoamento é verdadeiramente irrotacional devido à viscosidade. Como os efeitos viscosos são desprezíveis, é possível considerar este escoamento como irrotacional (FOX; MCDONALD; PRICHARD, 2014).

De maneira similar, para a sustentação, obtém-se a equação (40).

$$l = -\int_0^{2\pi} p(\sin \theta) r d\theta = \rho_{\infty} U_{\infty} \Gamma \quad (40)$$

Este resultado é o teorema de Kutta-Joukowski (ANDERSON JR., 2010).

2.6 A CONDIÇÃO DE TANGÊNCIA DO ESCOAMENTO

Considerando que a superfície se comporta como uma linha de corrente, o escoamento é tangente à superfície em todo ponto do aerofólio. Utilizando a Figura

12, tem-se que o requisito de tangência do escoamento de acordo com a equação (41). Esta condição faz com que não ocorra escoamento através da superfície, ou seja, é a condição de não permeabilidade na parede.

$$-u_m \sin \delta \cos \phi - v_m \cos \delta \sin \phi + w_m \cos \phi \cos \delta + U_\infty \sin(\alpha - \delta) \cos \phi = 0 \quad (41)$$

sendo ϕ o ângulo de torção do aerofólio e δ a inclinação da linha de curvatura média no ponto de controle (BERTIN, 2009).

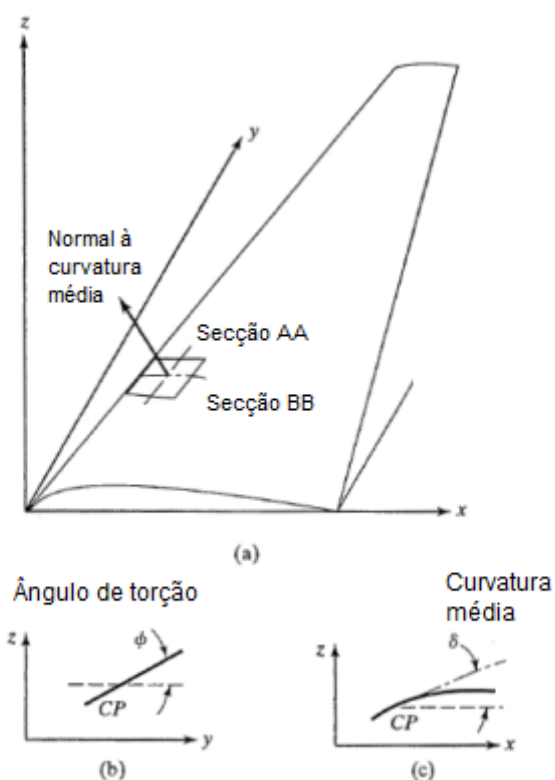


Figura 12 Nomenclatura para condição de tangência: (a) normal ao elemento de curvatura média; (b) seção AA; seção BB.

Fonte: BERTIN (2009)

Assim,

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{dz}{dx} \right)_m \quad (42)$$

Para asas onde a inclinação da linha de curvatura média é pequena e que também possuam pequenos ângulos de ataque, a equação (42) pode ser substituída pela sua aproximação, vista na equação (43) (BERTIN, 2009).

$$w_m - v_m \tan \phi + U_\infty \left[\alpha - \left(\frac{dz}{dx} \right)_m \right] = 0 \quad (43)$$

Considerando um aerofólio sem torção, obtém-se a equação (44).

$$\frac{w_m}{U_\infty} = \left(\frac{dz}{dx} \right)_m - \alpha \quad (44)$$

2.7 A TEORIA DO AEROFÓLIO DELGADO

As hipóteses para a teoria do aerofólio delgado são: a sustentação do aerofólio antes do estol é pouco influenciada pela camada limite; o aerofólio está com um baixo ângulo de ataque, ou seja, pequeno ângulo entre a corda média e o vetor velocidade; e a resultante das forças de pressão são pouco afetadas pela espessura do aerofólio (BERTIN, 2009).

Assume-se também a magnitude da viscosidade suficiente para produzir a circulação mostrada na Figura 13, mas seus efeitos relacionados à camada limite são desconsiderados. A camada limite é considerada delgada e, portanto, não altera significativamente a pressão estática quando comparamos com o modelo invíscido (BERTIN, 2009).

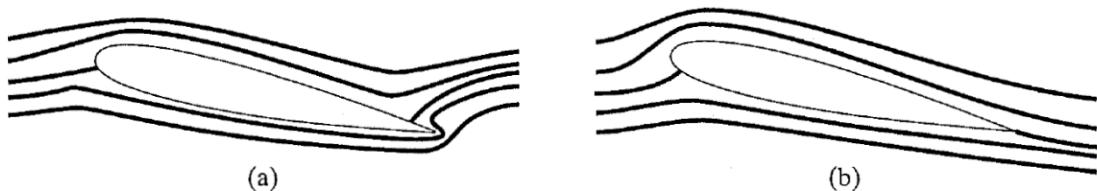


Figura 13 Linhas de corrente ao redor da secção do aerofólio: (a) sem circulação, estagnação na superfície superior; (b) com circulação, estagnação na borda de fuga.

Fonte: BERTIN (2009)

A diferença de velocidade entre a parte superior e a parte inferior do aerofólio é necessária para produzir a sustentação. Um elemento de vórtice coincidente com a linha de curvatura média produz uma distribuição de velocidades que mostra a diferença de velocidade necessária. Portanto, o escoamento necessário pode ser obtido pela superposição de uma série de linhas de vórtice induzidas em um campo uniforme, como apresentado na Figura 14 (BERTIN, 2009).

A circulação total é a soma das circulações dos filamentos de vórtice:

$$\Gamma = \int_0^c \gamma(s) ds \quad (45)$$

onde $\gamma(s)$ é a distribuição de vorticidade na linha de vórtices e o comprimento do elemento arbitrário é ds . (ANDERSON JR., 2010).

A vorticidade é uma medida da rotação de um elemento de fluido conforme ele se move no campo de escoamento (FOX; MCDONALD; PRICHARD, 2014).

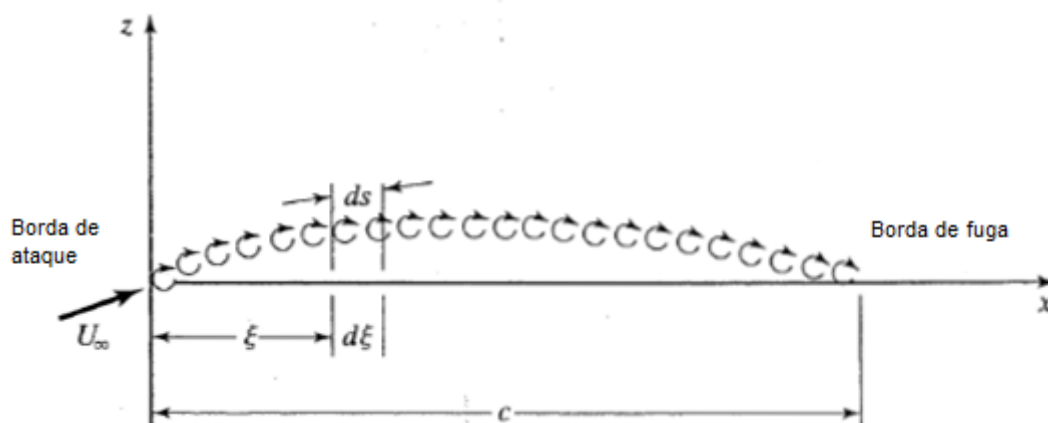


Figura 14 Representação da curvatura média por uma camada de vórtices.

Fonte: BERTIN (2009)

O campo de velocidade ao redor do elemento é a soma da velocidade do vento e da velocidade induzida por todos os filamentos de vórtice. Para que a camada de vórtices esteja na direção do escoamento, é necessário que a velocidade resultante seja tangente à linha de curvatura média em cada ponto. Além disso, a soma das componentes normais à superfície dessas duas velocidades é zero. Outro fator é que a condição de Kutta requer que a distribuição de vorticidade seja zero na borda de fuga (BERTIN, 2009).

A camada de vórtice ds vista na Figura 15 produz uma velocidade no ponto P, que é perpendicular à linha de comprimento r e que junta o elemento ds ao ponto P. A componente normal da velocidade induzida na linha de curvatura, no ponto P, devido ao elemento de vórtice ds pode ser vista na equação (46) (BERTIN, 2009).

$$dV_{s,n} = -\frac{\gamma ds \cos \delta_3}{2\pi r} \quad (46)$$

onde o sinal negativo se dá pela circulação induzir uma velocidade no sentido horário e a força normal na superfície superior é positiva. Para calcular o vórtice induzido resultante no ponto P, é necessário integrar através de todos os filamentos de vórtice. A localização do elemento de vórtice ds será dada pela sua coordenada ξ . Para calcular o efeito de todos os elementos de vórtice sobre um ponto, é necessário integrar sobre ξ de $\xi = 0$ até $\xi = c$. Sabendo que

$$\cos \delta_2 = \frac{x - \xi}{r} \quad (47)$$

e

$$ds = \frac{d\xi}{\cos \delta_1} \quad (48)$$

a resultante do vórtice induzido em qualquer ponto P, localizado em x , é dado pela equação (49) (BERTIN, 2009).

$$V_{s,n}(x) = -\frac{1}{2\pi} \int_0^c \frac{\gamma(\xi) \cos \delta_2 \cos \delta_3 d\xi}{(x - \xi) \cos \delta_1} \quad (49)$$

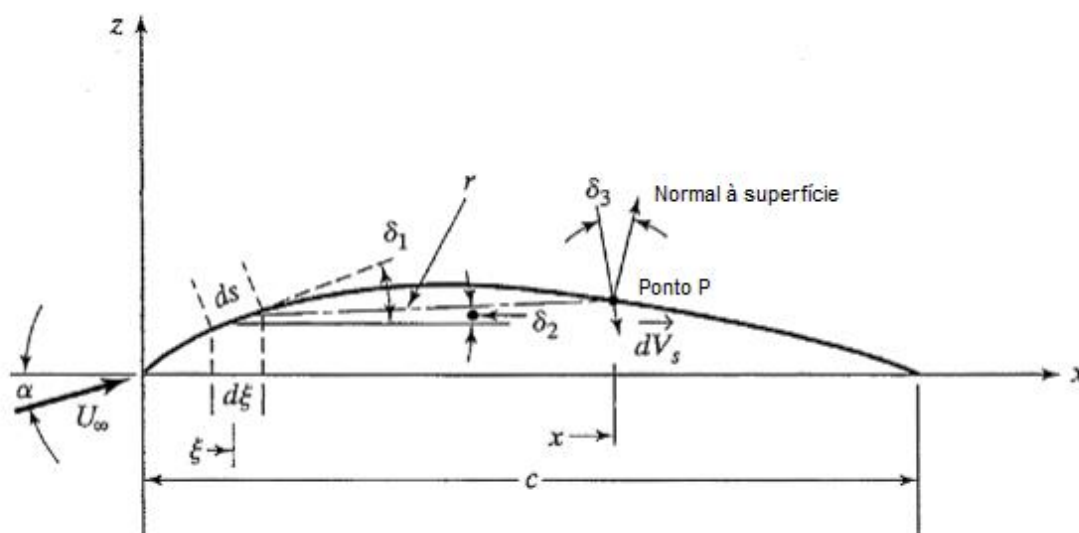


Figura 15 Parâmetros do aerofólio fino.
Fonte: BERTIN (2009)

A componente da velocidade do vento na curvatura média no ponto P é dada pela equação (50).

$$U_{\infty,n}(x) = U_{\infty} \text{sen}(\alpha - \delta_p) \quad (50)$$

onde α é o ângulo de ataque e δ_p é inclinação da linha de curvatura no ponto P, ou seja,

$$\delta_p = \tan^{-1} \frac{dz}{dx} \quad (51)$$

$z(x)$ descrevendo a linha de curvatura. Assim,

$$U_{\infty,n}(x) = U_{\infty} \text{sen} \left(\alpha - \tan^{-1} \frac{dz}{dx} \right) \quad (52)$$

Como a soma das componentes de velocidade normais à superfície devem ser zero em todos os pontos da camada de vórtice, obtém-se a equação (53).

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^c \frac{\gamma(\xi) \cos \delta_2 \cos \delta_3 d\xi}{(x-\xi) \cos \delta_1} = U_{\infty} \text{sen} \left(\alpha - \tan^{-1} \frac{dz}{dx} \right) \quad (53)$$

A distribuição de vorticidade $\gamma(\xi)$ que satisfaz a integral faz com que a camada de vórtice esteja na direção do escoamento. A vorticidade deve também satisfazer a condição de Kutta, que $\gamma(c) = 0$ (BERTIN, 2009).

Com essas hipóteses da teoria do aerofólio delgado, os ângulos δ_1 , δ_2 , δ_3 e α são muito pequenos. Usando uma aproximação trigonométrica para ângulos pequenos, obtém-se a equação (54) (ANDERSON JR., 2010).

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^c \frac{\gamma(\xi) d\xi}{(x-\xi)} = U_{\infty} \left(\alpha - \frac{dz}{dx} \right) \quad (54)$$

2.7.1 Aerofólio delgado e simétrico

Considerando um aerofólio simétrico, ou seja, o qual possui na metade da sua curvatura a linha de corda, a solução teórica para o aerofólio delgado é apresentada para o escoamento irrotacional de velocidade finita. Esta solução não considera a variação de corda do escoamento ao redor do aerofólio real (BERTIN, 2009).

Como se trata de um aerofólio simétrico, a linha da curvatura média é coincidente com a linha da corda e, portanto dz/dx é zero neste caso. Assim, a equação (54) se torna a equação (55) (ANDERSON JR., 2010).

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^c \frac{\gamma(\xi)}{(x-\xi)} d\xi = U_\infty \alpha \quad (55)$$

É conveniente introduzir uma transformação de coordenada, conforme equação (56).

$$\xi = \frac{c}{2}(1 - \cos \theta) \quad (56)$$

Analogamente, a coordenada x , de acordo com a equação (57).

$$x = \frac{c}{2}(1 - \cos \theta_0) \quad (57)$$

Assim, os limites de integração para coordenadas cilíndricas se tornam, através da equação (56):

$$\theta = 0 \text{ e } \theta = \pi$$

e a equação (57) se torna

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{\gamma(\theta) \sin \theta d\theta}{\cos \theta - \cos \theta_0} = U_\infty \alpha \quad (58)$$

A distribuição de vorticidade que satisfaz a equação (58) e a condição de Kutta é

$$\gamma(\theta) = 2\alpha U_\infty \frac{1 + \cos \theta}{\sin \theta} \quad (59)$$

Partindo do teorema de Kutta-Joukowski para escoamento em regime permanente através de um aerofólio bidimensional, tem-se que a sustentação é dada pela densidade do ar, a velocidade do vento e a circulação total, assim a sustentação é dada pela equação (60) (BERTIN, 2009).

$$l = \int_0^c \rho_\infty U_\infty \gamma(\xi) d\xi \quad (60)$$

Utilizando a circulação encontrada na equação (60) e a transformação de coordenadas,

$$l = \rho_{\infty} U_{\infty}^2 \alpha c \int_0^{\pi} (1 + \cos \theta) d\theta \quad (61)$$

$$l = \pi \rho_{\infty} U_{\infty}^2 \alpha c \quad (62)$$

2.8 SELEÇÃO DO PONTO DE CONTROLE E LOCALIZAÇÃO DO VÓRTICE

O objetivo nesta seção é a localização do ponto de controle e do vórtice para que a condição de contorno seja satisfeita. Tradicionalmente essa localização é feita por comparação com resultados conhecidos. Para o caso desenvolvido, será considerado um aerofólio plano com apenas um vórtice e um ponto de controle (CUMMINGS, 2015).

Considerando a Figura 16, onde tem-se o vórtice localizado no ponto a e o ponto de controle no ponto b, a velocidade no ponto de controle pode ser dada pela equação (63).

$$v_{pc} = -\frac{\Gamma}{2\pi r} \quad (63)$$

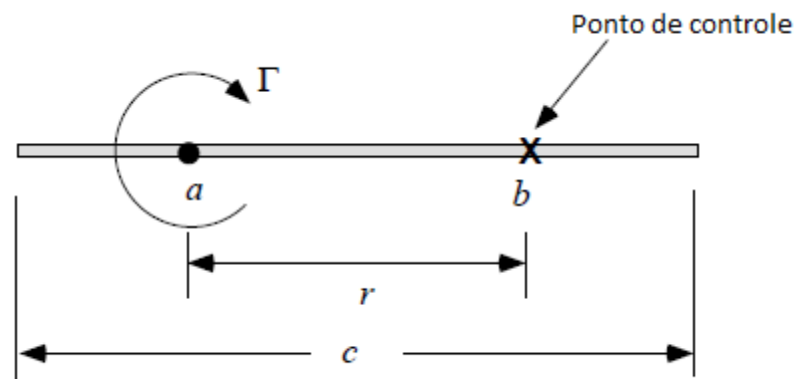


Figura 16 Análise da localização do ponto de controle e do vórtice.

Fonte: CUMMINGS (2015)

A condição de escoamento tangencial é dada pela equação (64).

$$\frac{w_m}{U_{\infty}} = \left(\frac{dz}{dx} \right)_m - \alpha \quad (64)$$

Ignorando a curvatura, obtém-se a equação (65).

$$w_m = -\alpha U_\infty \quad (65)$$

Igualando as equações (63) e (65):

$$-\frac{\Gamma}{2\pi r} = -\alpha U_\infty \quad (66)$$

Resultando na equação (67).

$$\alpha = \frac{\Gamma}{2\pi r U_\infty} \quad (67)$$

Utilizando o teorema de Kutta-Joukowski e o resultado para a teoria do aerofólio delgado, a sustentação é representada de acordo com as equações (68) e (69).

$$l = \rho U_\infty \Gamma \quad (68)$$

$$l = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 c 2\pi \alpha \quad (69)$$

Igualando as equações (68) e (69) e aplicando o ângulo de ataque da equação (67), tem-se que:

$$\begin{aligned} \rho U_\infty \Gamma &= \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 c 2\pi \alpha \\ \rho U_\infty \Gamma &= \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 c 2\pi \frac{\Gamma}{2\pi r U_\infty} \\ 1 &= \frac{1}{2} \frac{c}{r} \end{aligned} \quad (70)$$

E assim,

$$r = \frac{c}{2} \quad (71)$$

Logo, essa regra é conhecida como a regra do $\frac{1}{4}$ - $\frac{3}{4}$ e apesar de não ser uma lei teórica, é um conceito que funciona bem e se tornou usual. Esse conceito é amplamente utilizado e se provou suficientemente preciso na prática (CUMMINGS, 2015).

Neste capítulo foram apresentadas teorias que se referem à geradores eólicos, aerodinâmica e seleção do ponto de controle. Essas teorias são a base dos próximos capítulos e são fundamentais para a implementação do programa e para realizar o cálculo do carregamento aerodinâmico.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A descrição do método vórtice lattice é a primeira parte do capítulo, tendo continuidade com as hipóteses e posterior formulação matemática. Os conceitos abordados são a base para o desenvolvimento do código justificando a importância do capítulo.

Para determinação das características aerodinâmicas, que no presente trabalho são representadas pela distribuição da sustentação na pá, aplica-se o método vórtice lattice. A teoria é desenvolvida para aerofólios, mas pode ser aplicada para a pá de um microgerador eólico.

A solução do método é obtida a partir de um sistema de vórtices que simula o comportamento do ar ao redor da asa, devido à sustentação. Uma distribuição adequada dos vórtices representa a asa física, a exceção da espessura da asa, que deve ser desconsiderada (BERTIN, 2009).

Cada seção do aerofólio na asa atua como uma seção bidimensional isolada. Então, cada seção do aerofólio gera uma sustentação equivalente à sustentação de uma seção da asa física que possua a mesma circulação (PRANDTL; TIETJENS, 1957).

Segundo Kenneth (1980), a distribuição de sustentação longitudinal deve ser representada por um sistema de filamento de vórtices, com o eixo normal ao plano de simetria e que passe pelo centro aerodinâmico da superfície que está gerando a sustentação. O centro aerodinâmico está localizado na linha de um quarto de corda, então o vórtice de borda é localizado nesse ponto. A força do vórtice de borda em qualquer ponto da asa é proporcional à sustentação local. Quando a sustentação é alterada em qualquer parte da pá, a sustentação total muda proporcionalmente.

Com um grande número de vórtices de borda é possível montar um modelo para a determinação da sustentação de uma pá, porém um filamento de vórtices não pode acabar em um fluido. Desta forma, o vórtice de borda muda de direção em dois pontos, de forma com que o vórtice vire para a direção da envergadura, ou seja, o vórtice vira 90° . Os segmentos na direção da envergadura são chamados de borda

de fuga e são estendidos até o infinito. Com esses três segmentos forma-se a ferradura de vórtices (BERTIN, 2009).

Para a implementação do VLM, a condição de contorno da regra “ $\frac{1}{4}$ - $\frac{3}{4}$ ” deve ser satisfeita. O primeiro passo é dividir a pá em uma estrutura com painéis quadriláteros e posicionar uma ferradura de vórtices em cada painel. O vórtice de borda deve ser posicionado a $\frac{1}{4}$ da corda em cada painel. O ponto de controle em cada painel deve ser posicionado a $\frac{3}{4}$ da corda e no ponto médio na direção da pá.

A Figura 17 representa a divisão da superfície de acordo com o VLM, sendo possível observar todos os elementos descritos nos parágrafos anteriores: os painéis, o vórtice de borda, os vórtices de fuga e pontos de controle. O fluxo livre do vento está na direção x, que é a direção da corda.

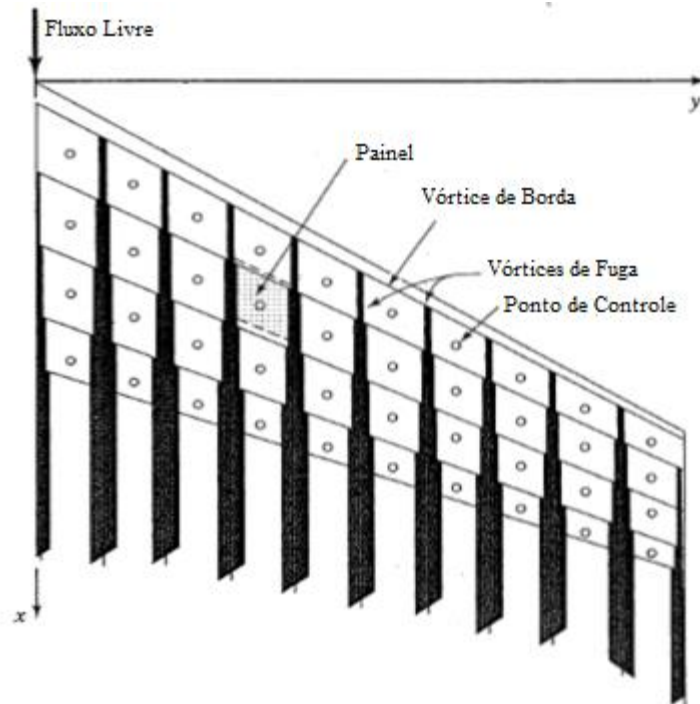


Figura 17 Representação da divisão da superfície de acordo com o VLM.

Fonte: BERTIN (2009)

A velocidade induzida é calculada para cada ponto de controle das ferraduras a partir da lei de Biot-Savart, e em seguida a sustentação de cada vórtice é calculada para satisfazer as condições de contorno através da solução de um sistema de equações lineares (CUMMINGS, 2015).

A solução do método é feita com um número finito de painéis

3.1 HIPÓTESES

O método é aplicado a um escoamento estacionário, irrotacional, invíscido e incompressível. A teoria do fluxo potencial está na forma da lei de Biot-Savart para representar os distúrbios criados no escoamento pela distribuição da sustentação na pá. Assume-se que em qualquer plano paralelo aos planos \hat{x}, \hat{y} as discrepâncias verticais que ocorrem na pá são negligenciadas, a não ser que as condições de contorno no ponto de controle sejam determinadas (MARGASON; LAMAR, 1971).

A condição de contorno para cada ferradura de vórtices é satisfeita quando as inclinações das linhas de corrente são coincidentes com o ângulo de ataque do ponto de controle do painel localizado a $\frac{3}{4}$ da corda.

A circulação requer a condição de contorno de tangência do escoamento, que é satisfeita pela solução de uma matriz.

O teorema de Kutta-Joukowski é usado para determinar a sustentação de cada elemento do painel.

A condição de contorno de aerofólio fino é ajustada para que ocorra a linearização e transferência da condição de contorno da superfície atual para uma superfície plana. Isso que permite simplificar a relação de pressão e de velocidade, permitindo o tratamento do problema como uma superposição das contribuições da sustentação e da espessura (CUMMINGS, 2015).

Ao longo de uma linha de vórtices a circulação, Γ , é constante. Como um filamento de vórtices não pode começar ou terminar abruptamente em um fluido, a linha de vórtices deve ser fechada, estendida até o infinito ou terminada em uma borda sólida. Além disso, a circulação, Γ , em qualquer seção é a intensidade do vórtice. Um escoamento inicialmente irrotacional e invíscido continuará irrotacional. Os conceitos abordados são chamados de teoremas dos vórtices e são tratados por Karamcheti (1966). Relacionado com os teoremas, um resultado importante é estabelecido. Uma folha de vórtices pode suportar uma mudança na velocidade tangencial, enquanto a velocidade normal é contínua. O que significa que a folha de vórtices pode representar uma superfície de sustentação (CUMMINGS, 2015).

3.2 EQUACIONAMENTO

A velocidade induzida (V) por um filamento de vórtices com circulação Γ e comprimento dl num ponto qualquer, é obtida através da lei de Biot-Savart, apresentada na equação (72) (ROBSON; LAURMANN, 1956).

$$\vec{dV} = \frac{\Gamma_n (\vec{dl} \times \vec{r})}{4\pi r^3} \quad (72)$$

onde r é a distância entre o ponto considerado e um elemento diferencial qualquer dl do filamento de vórtices. A Figura 18 ilustra a nomenclatura utilizada. O ponto em que se quer obter a velocidade induzida V é representado pelo ponto C.

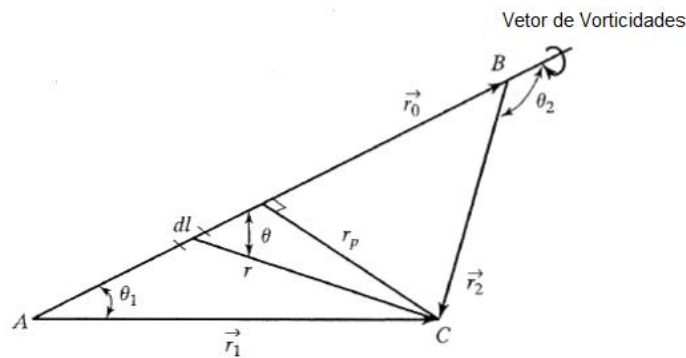


Figura 18 Nomeclatura para o cálculo da velocidade induzida para um filamento de vórtices com comprimento finito.

Fonte: BERTIN (2009)

Desenvolvendo o produto vetorial $r \times dl$ da equação (72), considerando θ o ângulo formado entre dl e r , obtém-se a magnitude de dV pela equação (73) (BERTIN, 2009):

$$dV = \frac{\Gamma_n \text{sen}\theta dl}{4\pi r^2} \quad (73)$$

Considerando $dl = r d\theta$ e $rp = r \text{sen}\theta$ a equação (73) pode ser escrita como mostrado na equação (74):

$$dV = \frac{\Gamma_n \text{sen}\theta d\theta}{4\pi r_p} \quad (74)$$

Integrando a equação (74) entre os pontos A e B da Figura 18, obtém-se a magnitude da velocidade no ponto C, conforme a equação (75).

$$V = \frac{\Gamma_n}{4\pi r_p} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta = \frac{\Gamma_n}{4\pi r_p} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (75)$$

onde r_p é a distância normal de C até o filamento de vórtices considerado.

Voltando à Figura 18 podemos determinar os valores de θ_1 e θ_2 em função dos vetores \vec{r}_0 , \vec{r}_1 e \vec{r}_2 , como segue nas equações (76), (77) e (78):

$$r_p = \frac{|\vec{r}_1 \times \vec{r}_2|}{r_0} \quad (76)$$

$$\cos\theta_1 = \frac{\vec{r}_0 \cdot \vec{r}_1}{r_0 r_1} \quad (77)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{\vec{r}_0 \cdot \vec{r}_2}{r_0 r_2} \quad (78)$$

A direção da velocidade induzida é dada pelo vetor unitário $\frac{\vec{r}_1 \times \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 \times \vec{r}_2|}$. Substituindo as equações (76), (77) e (78) na equação (75), é obtida uma expressão geral para a velocidade induzida num ponto qualquer, apresentada na equação (79) (BERTIN, 2009).

$$\vec{V} = \frac{\Gamma_n \cdot \vec{r}_1 \times \vec{r}_2}{4\pi |\vec{r}_1 \times \vec{r}_2|^2} \left[\vec{r}_0 \cdot \left(\frac{\vec{r}_1}{r_1} - \frac{\vec{r}_2}{r_2} \right) \right] \quad (79)$$

No presente trabalho, o interesse é voltado para o escoamento criado por uma “ferradura de vórtices” que consiste em três segmentos de vórtices, sendo um vórtice de borda e dois vórtices de fuga. Nesse sistema, \vec{V} pode ser calculado para um ponto no espaço (x, y, z) a partir da equação (79).

Para a ferradura de vórtices mostrada na Figura 19, que representa um dos elementos do painel da asa (Figura 17), o segmento AB representa o vórtice de borda, e neste trabalho coincide com o quarto da corda do elemento do painel. Os dois vórtices de fuga são paralelos ao eixo x. Sendo assim, o vetor da velocidade induzida deve ser calculado considerando a influência de cada um desses elementos.

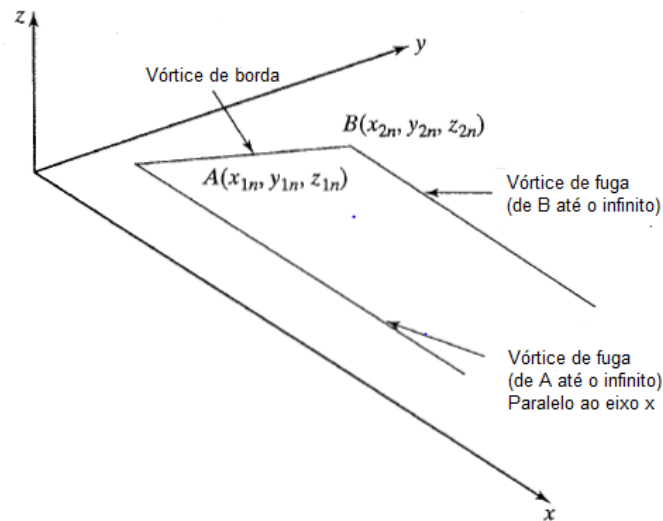


Figura 19 Ferradura de Vórtices Genérica.

Fonte: BERTIN (2009)

Para o vórtice de borda apenas, segmento AB, tem-se os seguintes vetores para \vec{r}_0 , \vec{r}_1 e \vec{r}_2 , pelas coordenadas dos pontos:

$$\vec{r}_0 = \overrightarrow{AB} = (x_{2n} - x_{1n})\hat{i} + (y_{2n} - y_{1n})\hat{j} + (z_{2n} - z_{1n})\hat{k} \quad (80)$$

$$\vec{r}_1 = (x - x_{1n})\hat{i} + (y - y_{1n})\hat{j} + (z - z_{1n})\hat{k} \quad (81)$$

$$\vec{r}_2 = (x - x_{2n})\hat{i} + (y - y_{2n})\hat{j} + (z - z_{2n})\hat{k} \quad (82)$$

Substituindo os vetores na equação (79), para o filamento de vórtices AB, obtém-se a velocidade induzida em um ponto C (equação (83)). A configuração dos vetores pode ser observada na Figura 20.

$$V_{AB} = \frac{\Gamma_n}{4\pi} \{Fac1_{AB}\} \{Fac2_{AB}\} \quad (83)$$

Sendo,

$$Fac1_{AB} = \frac{\vec{r}_1 \times \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 \times \vec{r}_2|^2} = \frac{\begin{cases} [(y - y_{1n})(z - z_{1n}) - (y - y_{2n})(z - z_{1n})]\hat{i} \\ -[(x - x_{1n})(z - z_{2n}) - (x - x_{2n})(z - z_{1n})]\hat{j} \\ +[(x - x_{1n})(y - y_{2n}) - (x - x_{2n})(y - y_{1n})]\hat{k} \end{cases}}{\begin{cases} [(y - y_{1n})(z - z_{2n}) - (y - y_{2n})(z - z_{1n})]^2 \\ +[(x - x_{1n})(z - z_{2n}) - (x - x_{2n})(z - z_{1n})]^2 \\ +[(x - x_{1n})(y - y_{2n}) - (x - x_{2n})(y - y_{1n})]^2 \end{cases}} \quad (84)$$

e

$$\begin{aligned} Fac2_{AB} &= (\vec{r}_0 \cdot \frac{\vec{r}_1}{r_1} - \vec{r}_0 \cdot \frac{\vec{r}_2}{r_2}) = \\ &= \frac{[(x_{2n} - x_{1n})(x - x_{1n}) + (y_{2n} - y_{1n})(y - y_{1n}) + (z_{2n} - z_{1n})(z - z_{1n})]}{\sqrt{(x - x_{1n})^2 + (y - y_{1n})^2 + (z - z_{1n})^2}} \\ &\quad - \frac{[(x_{2n} - x_{1n})(x - x_{2n}) + (y_{2n} - y_{1n})(y - y_{2n}) + (z_{2n} - z_{1n})(z - z_{2n})]}{\sqrt{(x - x_{2n})^2 + (y - y_{2n})^2 + (z - z_{2n})^2}} \end{aligned} \quad (85)$$

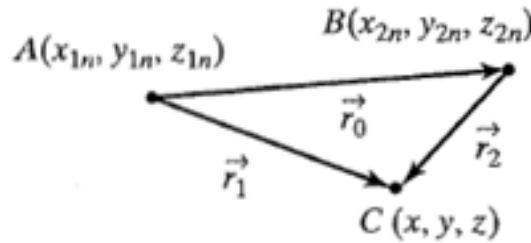


Figura 20 Configuração dos vetores para cálculo da velocidade induzida.

Fonte: BERTIN (2009)

Para calcular a velocidade induzida pelo filamento que se estende de A até ∞ (vórtices de fuga), primeiramente é calculada a velocidade induzida colinear com o filamento com comprimento finito que se estende de A até D na Figura 21. O vetor \vec{r}_0 é a direção da vorticidade do vetor.

$$\vec{r}_0 = \overrightarrow{DA} = (x_{1n} - x_{3n})\hat{i} \quad (86)$$

$$\vec{r}_{1n} = (x - x_{3n})\hat{i} + (y - y_{1n})\hat{j} + (z - z_{1n})\hat{k} \quad (87)$$

$$\vec{r}_2 = (x - x_{1n})\hat{i} + (y - y_{1n})\hat{j} + (z - z_{1n})\hat{k} \quad (88)$$

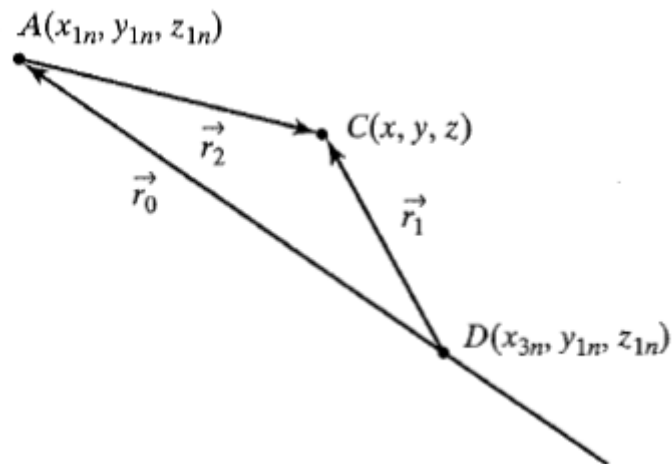


Figura 21 Segmento de vórtice de A até D.

Fonte: BERTIN (2009)

A velocidade do ponto A até o ponto D é descrita na equação (89).

$$V_{AD} = \frac{\Gamma_n}{4\pi} \{Fac1_{AD}\} \{Fac2_{AD}\} \quad (89)$$

sendo

$$Fac1_{AD} = \frac{(z - z_{1n})\hat{j} + (y_{1n} - y)\hat{k}}{[(z - z_{1n})^2 + (y_{1n} - y)^2](x_{3n} - x_{1n})} \quad (90)$$

e

$$Fac2_{AD} = (x_{3n} - x_{1n}) \left\{ \begin{array}{l} \frac{x_{3n} - x}{\sqrt{(x - x_{3n})^2 + (y - y_{1n})^2 + (z - z_{1n})^2}} \\ + \frac{x - x_{1n}}{\sqrt{(x - x_{1n})^2 + (y - y_{1n})^2 + (z - z_{1n})^2}} \end{array} \right\} \quad (91)$$

Considerando x_3 indo para o infinito, o primeiro termo de $Fac2_{AD}$ tende para 1. Portanto, a velocidade induzida pelo filamento que se estende de A até ∞ paralelo ao eixo x na direção positiva, e é dada na equação (92).

$$\vec{V}_{A\infty} = \frac{\Gamma_n}{4\pi} \left\{ \frac{(z - z_{1n})\hat{j} + (y - y_{1n})\hat{k}}{(z - z_{1n})^2 + (y_{1n} - y)^2} \right\} \left[1 + \frac{x - x_{1n}}{\sqrt{(x - x_{1n})^2 + (y - y_{1n})^2 + (z - z_{1n})^2}} \right] \quad (92)$$

Similarmente, a velocidade induzida pelo filamento que se estende de B até ∞ paralelo ao eixo x na direção positiva é dada pela equação (93).

$$\vec{V}_{B\infty} = \frac{\Gamma_n}{4\pi} \left\{ \frac{(z - z_{2n})j + (y - y_{2n})k}{(z - z_{2n})^2 + (y_{2n} - y)^2} \right\} \left[1 + \frac{x - x_{2n}}{\sqrt{(x - x_{2n})^2 + (y - y_{2n})^2 + (z - z_{2n})^2}} \right] \quad (93)$$

A velocidade total induzida em um ponto genérico (x,y,z) por uma única ferradura de vórtices, que representa um painel da malha, é a soma da velocidade induzida de cada um dos 3 vetores da ferradura de vórtices, representada na Figura 19, ou seja, a soma das equações (83), (92) e (93), dada pela equação (94) (BERTIN, 2009).

$$V = V_{AB} + V_{A\infty} + V_{B\infty} \quad (94)$$

Examinando as equações (83), (92) e (94), vemos que (equação (95)):

$$\vec{V}_{m,n} = \vec{C}_{m,n} \Gamma_n \quad (95)$$

onde $\vec{C}_{m,n}$, denominado coeficiente de influência, depende da geometria da ferradura de vórtices n_{th} e à sua distância até o ponto de controle do painel m_{th} .

Assumindo o ponto C (x, y, z) como o ponto de controle de um painel m_{th} , que é designado pelas coordenadas (x_m, y_m, z_m) e notando que a circulação Γ_n manteve-se linear em todas as equações, a velocidade induzida no ponto de controle m_{th} pela vorticidade de um painel n_{th} é descrita pela equação (96) (DONADON; IANNUCCI, 2006).

$$\vec{V}_{m,n} = \vec{C}_{m,n} \Gamma_n = (C_{m,n}^u i + C_{m,n}^v j + C_{m,n}^w k) \Gamma_n \quad (96)$$

Como as equações são lineares, a velocidade total induzida no ponto de controle m_{th} é obtida com a combinação dos vórtices N, conforme equação (97), sendo N o número máximo de painéis elementares em uma das metades da pá.

$$\vec{V}_m = \vec{C}_{m,n} \Gamma_n = \sum_{n=1}^N (C_{m,n}^u i + C_{m,n}^v j + C_{m,n}^w k) \Gamma_n \quad (97)$$

Para computar a circulação, Γ_n , que representa o campo de escoamento relacionado à sustentação na pá, aplica-se a condição de contorno na qual a superfície é aproximada para uma linha de corrente. Ou seja, o escoamento resultante é tangente à pá em todos os pontos de controle. Como o escoamento é

tangente à pá, a componente normal da velocidade induzida na pá no ponto de controle anula a componente normal da velocidade do vento. Isso posto, as forças dos vórtices são obtidas com a resolução do sistema de equações lineares contidas na equação (98) (BERTIN, 2009).

$$\{\Gamma_n\} = [\bar{C}_{m,n}^w - \bar{C}_{m,n}^v \tan(\varphi)]^{-1} 4\pi U_\infty \{\alpha_m\} \quad (98)$$

onde U_∞ é a velocidade do vento, φ é o ângulo de torção geométrica da asa, α_m é o ângulo de ataque local do ponto de controle m_{th} . O ângulo de ataque mostrado abaixo na Figura 22 e é dada pela equação (99) (DA SILVA, 2011),

$$\alpha_m = a \cos\left(\frac{\vec{U} \cdot (\vec{p}_1 \times \vec{p}_2)}{|\vec{U}| |\vec{p}_1 \times \vec{p}_2|}\right) - \frac{\pi}{2} \quad (99)$$

sendo $\vec{U} = U_\infty \cos(\alpha_i) \hat{i} + U_\infty \sin(\alpha_i) \hat{j}$ e α_i o ângulo de ataque associado com o escoamento incidente no plano xz.

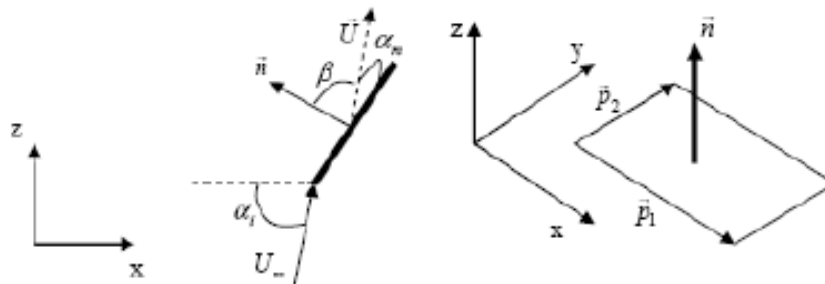


Figura 22 Ângulo de ataque local.

Fonte: BERTIN (2009)

Com a circulação de cada ponto de controle, a sustentação (ou intensidade dos vórtices) é calculada a partir da equação (100), que é o teorema de Kutta-Joukowski para a sustentação por unidade de comprimento do filamento de vórtices (DONADON; IANNUCCI, 2006).

$$\Delta l_n = l = \rho_\infty U_\infty \Gamma_n \quad (100)$$

O cálculo é feito para cada um dos painéis n_{th} . Para pás que não possuem torção sobre qualquer porção, toda a sustentação é gerada pela velocidade do vento passando pela extensão do filamento de vórtices, desde que não existam

velocidades contracorrente e lateral. O painel deve se estender desde a borda de ataque até a borda de fuga (BERTIN, 2009).

Sendo o fluxo simétrico, a sustentação total da pá é dada pela equação (101).

$$L = 2 \int_0^{0.5b} \rho_{\infty} U_{\infty} \Gamma(y) dy \quad (101)$$

Considerando uma quantidade de elementos finitos, a equação para a sustentação total é apresentada na equação (102).

$$L = 2 \rho_{\infty} U_{\infty} \sum_{n=1}^N \Gamma_n \Delta y_n \quad (102)$$

sendo N o número total de elementos e Δy_n é o comprimento elementar do painel.

O coeficiente de potência incremental no painel n_{th} é dado pela equação (103) (MARGARSON, 1971).

$$\Delta c_{p,n} = \frac{2\Gamma_n}{c_n U_{\infty}} \quad (103)$$

sendo c_n a corda.

A partir do desenvolvimento matemático contido no capítulo são obtidos o carregamento aerodinâmico e o coeficiente de potência. Estes tópicos são essenciais para a implementação do programa e interpretação dos resultados.

4 IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

O código do VLM foi desenvolvido para utilização em asa fixa. Portanto, é necessário a modificação do programa para que sejam obtidos resultados referentes à pá de um gerador eólico.

O programa é dividido em três módulos. O primeiro é o pré-processamento, responsável por fazer a torção da geometria e inserir todas as ferraduras de vórtices. Essa sub-rotina define a geometria e a malha da pá, computa as coordenadas dos nós, conecta os elementos e define os pontos de controle e ferradura para cada elemento (DONADON; IANNUCCI, 2006).

O *solver*, segundo módulo de programa, é responsável por calcular a velocidade em cada seção e as forças atuantes na pá, calcula os coeficientes de influência e a circulação dos vórtices resolvendo o sistema de equações lineares, representados na equação (98) (DONADON; IANNUCCI, 2006).

Há também o pós-processamento, responsável por gerar todos os gráficos e resultados do programa. Este programa é desenvolvido na ferramenta *MatLab* (DONADON; IANNUCCI, 2006).

O fluxograma com os módulos e sub-rotinas, bem como o processo de cálculo pode ser obtido na Figura 23.

A sub-rotina do *solver* responsável pelo cálculo da velocidade em cada ponto, *velovector*, é modificada de modo a entender a asa do programa como uma pá de gerador eólico. Esse programa recebe como *input* a velocidade do vento, a posição de cada nó e o ângulo de ataque em cada seção da pá (DA SILVA, 2011).

No *velovector* é definida a velocidade induzida levando em consideração os fatores de indução, as variáveis a e a' são inseridas e é calculada a velocidade em cada ponto da malha. Essa velocidade é utilizada para cálculo da sustentação da pá (DA SILVA, 2011).

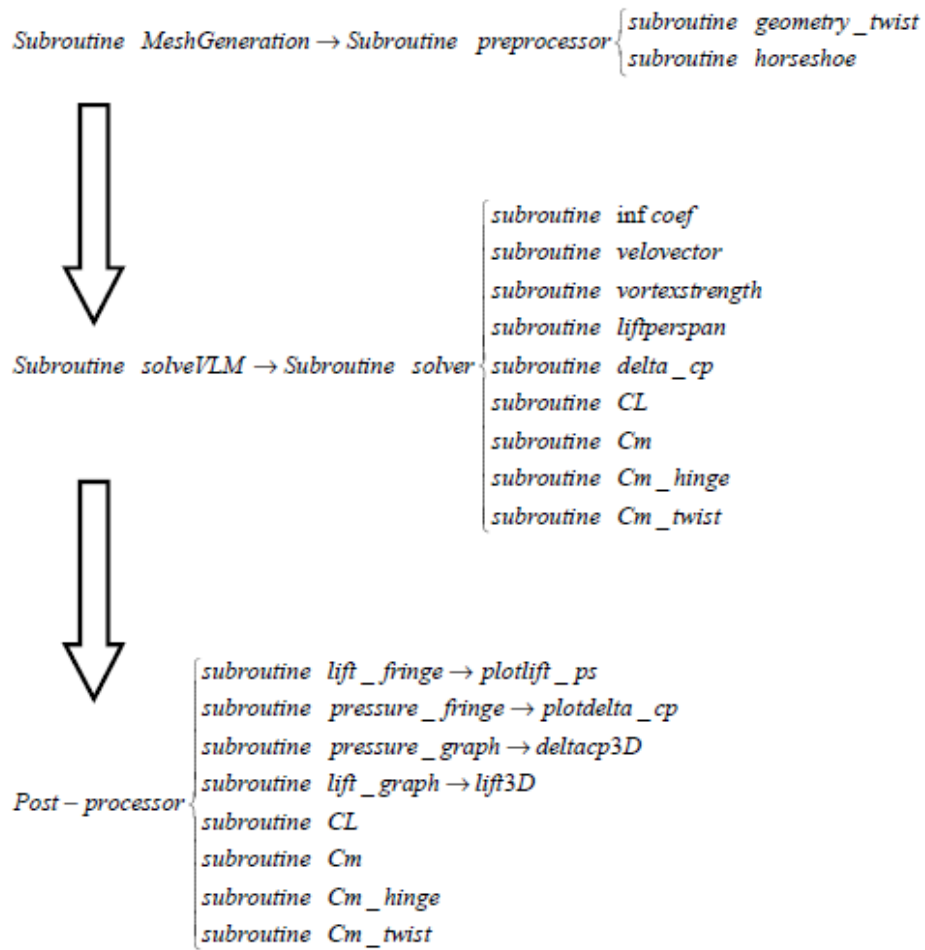


Figura 23 Módulos, sub-rotinas e fluxo do programa.

Fonte: DONADON (2006)

5 RESULTADOS

A teoria apresentada é usada para estimar o carregamento de uma turbina eólica de 2 MW. A turbina possui três pás igualmente espaçadas ao longo da direção circunferencial.

A potência de 2 MW é superior a potência máxima que classifica uma turbina como microgerador eólico. Como o processo de cálculo para uma turbina de 2 MW é igual para uma turbina de 100 kW, a potência selecionada não traz nenhum demérito para o presente trabalho.

A escolha da potência é baseada na bibliografia existente para comparação de resultados. Desta forma, é possível validar os resultados obtidos pelo método *vórtice lattice* através do método de elemento de pá.

O método de elemento de pá fornece resultados para a sustentação e para o coeficiente de potência, assim como o método *vórtice lattice*. A principal diferença é que o método de elemento de pá não leva em consideração a influência dos outros painéis no cálculo da velocidade induzida, portanto o método *vórtice lattice* é mais realista e os resultados obtidos apresentam valores mais baixos.

A geometria usada foi a do aerofólio NACA 4412. Os critérios para a seleção do aerofólio foram baseados na quantidade de energia aerodinâmica que pode ser gerada e transferida eficientemente para o eixo da turbina eólica para as condições de operação dadas. Neste caso, a velocidade do vento é de $U_{\infty} = 12,5$ m/s, ângulo de ataque de 12° . A quantidade de energia aerodinâmica é mensurada pelo coeficiente de potência, C_p , definido pela relação entre a energia aerodinâmica e a energia do vento (GASH; TWELE, 2002).

A eficiência aerodinâmica da turbina é comparada com resultados anteriormente obtidos pelo método de elemento de pá. Portanto, o aerofólio e os demais parâmetros selecionados para o presente trabalho são os mesmos usados em da Silva (2011).

O primeiro resultado gerado pelo programa é a geometria e malha da pá, que é mostrado na Figura 24. A geometria gerada já está otimizada com a melhor

distribuição de cordas e torção. Para uma pá com 35,8 metros de envergadura, a corda na raiz da pá é de 4,5 metros e a corda na ponta da pá de 0,77 metros. A torção máxima na pá é cerca de -21° considerando um ângulo de zero grau na raiz da pá.

A malha é dividida em 16 elementos na direção da corda e em 44 elementos na direção da envergadura, totalizando 704 painéis. Os pontos que dividem a malha, pontos de controle, pontos onde o vórtice de borda está localizado e os pontos onde as ferraduras são posicionadas, são representados na Figura 24.

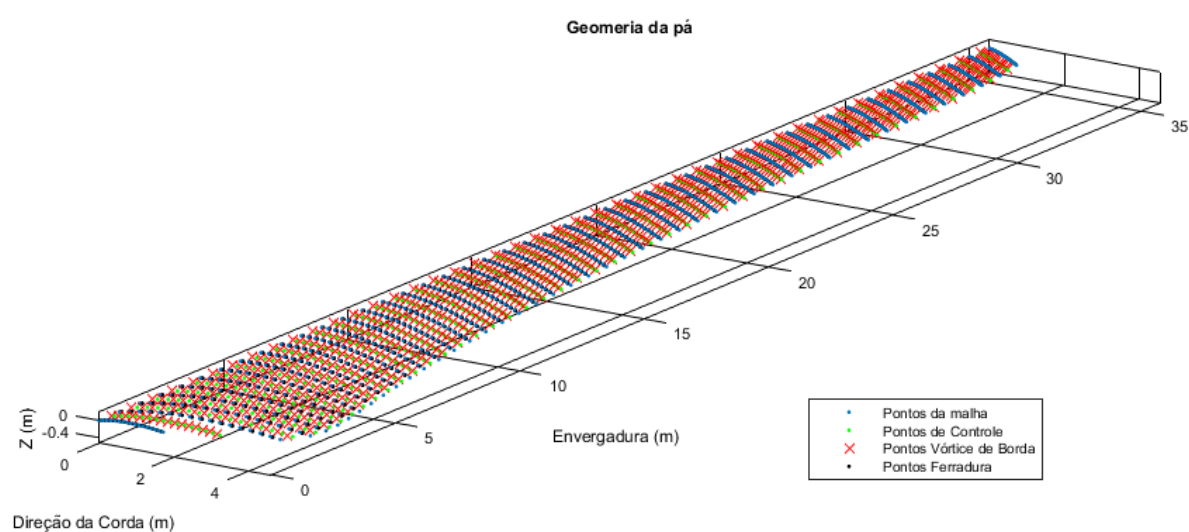


Figura 24 Geometria e malha da pá.

Fonte: Autoria própria.

O resultado mais importante no presente trabalho é a distribuição de sustentação na pá e pode ser observado na Figura 25 e na Figura 26. A partir da sustentação, os carregamentos estruturais podem ser obtidos.

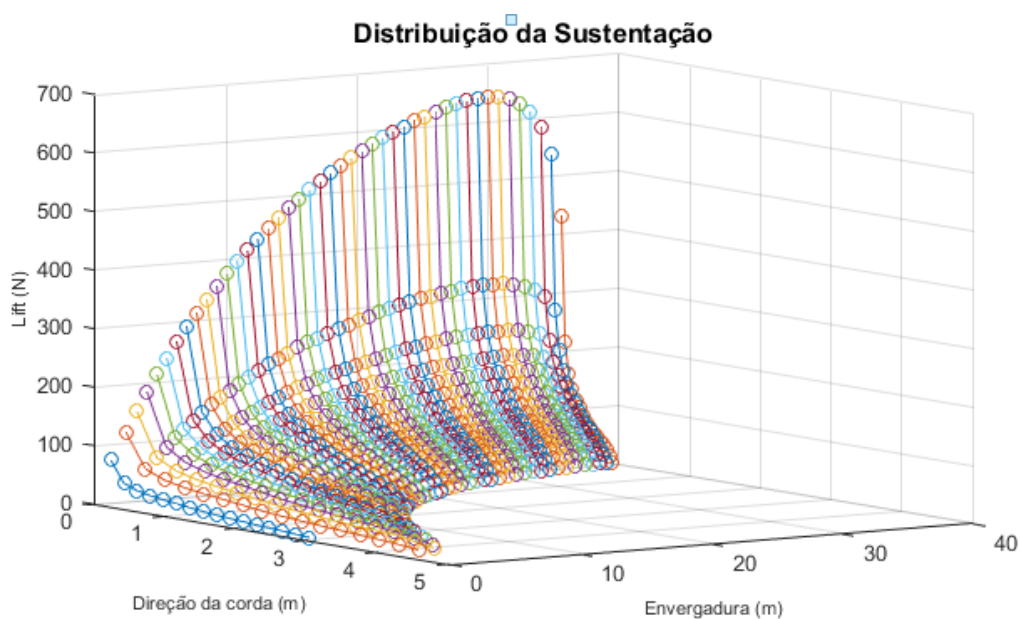


Figura 25 Distribuição da Sustentação na pá.
Fonte: Autoria própria.

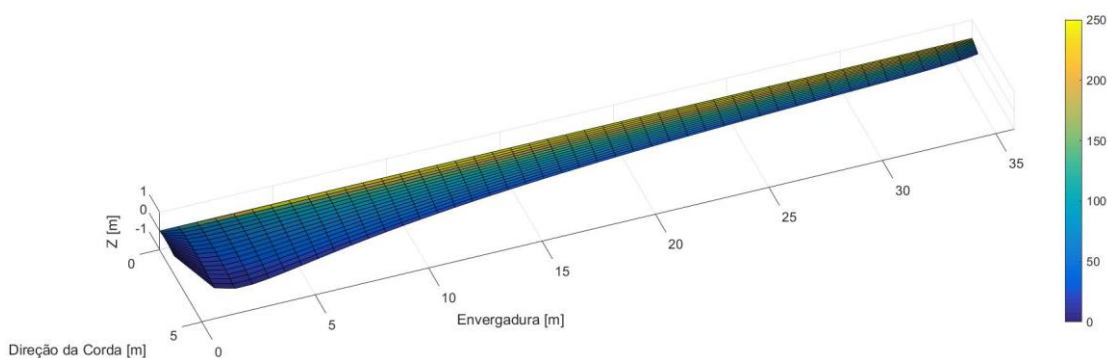


Figura 26 Distribuição de sustentação na pá.
Fonte: Autoria própria.

Para o cálculo da sustentação total, todos os valores apresentados na Figura 25 são somados, e o valor obtido é de 91,89 kN, e o resultado obtido através do método de elemento de pá é de 106,2 kN. Portanto, a diferença percentual entre os valores é de 13,4%. A diferença entre os dois valores ocorre devido à influência que um painel exerce sobre o outro no VLM, ou seja, a circulação imposta pelo vórtice de todos os painéis influencia no cálculo de cada painel individualmente, fazendo com que os valores obtidos sejam mais baixos do que os apresentados pelo BEM.

O coeficiente de potência para o BEM é de 0,54 e para o VLM foi de 0,47. A potência final obtida após a simulação foi de 1,68 MW, portanto a diferença para a potência nominal foi de 16%.

Outro resultado importante é o momento fletor atuante na pá, pois com ele é possível realizar os cálculos estruturais necessários. O momento fletor pode ser observado na Figura 27.

Ao compararmos estes resultados com aqueles obtidos por Hansen (2008) na Figura 28, vemos uma similaridade no comportamento do momento fletor, visto que o gráfico apresenta um comportamento decrescente.

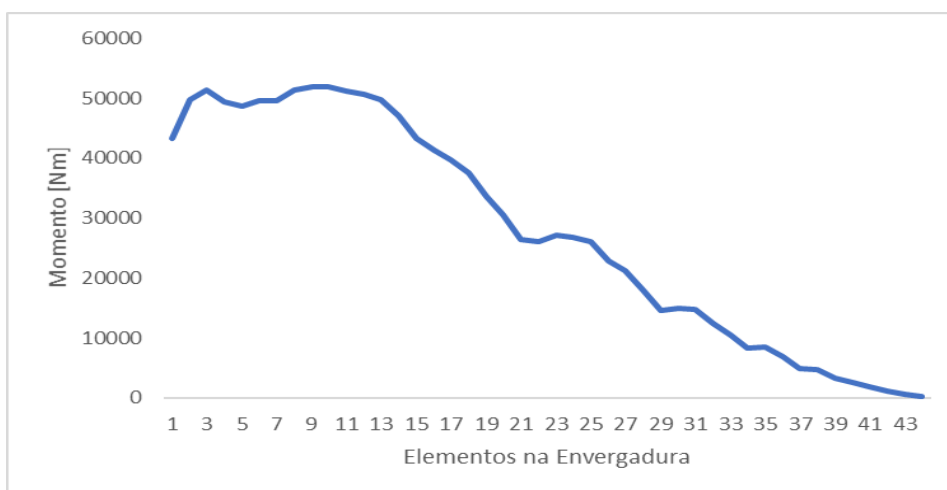


Figura 27 Diagrama de momento.

Fonte: Autoria própria.

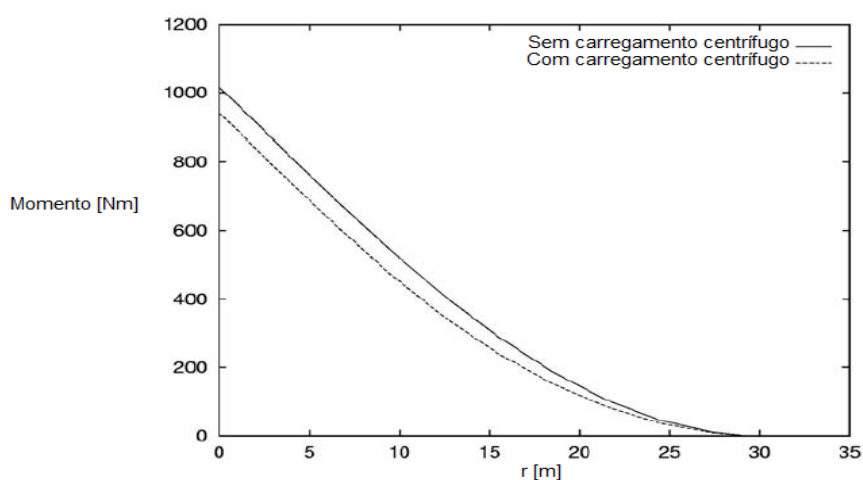


Figura 28 Diagrama de momento teórico.

Fonte: HANSEN (2008)

6 CONCLUSÕES

Um modelo para turbinas eólicas com geometria variável foi apresentado e discutido neste trabalho. Foi estudado uma turbina de 2,0 MW com uma velocidade do vento de 12,5 m/s. Foi modelada a dependência da velocidade do vento com as variáveis da pá, para que as características do vento sejam compatíveis com a realidade.

Os valores da sustentação mostram uma melhora dos resultados previamente obtidos por da Silva (2011) e estão coerentes com a literatura. A sustentação e o coeficiente de potência possuem o comportamento esperado, já que o VLM apresentou valores menores do que o BEM para ambos os resultados.

Assim, pode-se observar que o VLM é uma ferramenta poderosa, capaz de gerar resultados satisfatórios para o carregamento aerodinâmico na pá do gerador. Isto torna o VLM o principal método para obtenção dos carregamentos de forma rápida, principalmente quando comparamos com outras ferramentas, como por exemplo, o CFD.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Energia Eólica.** Disponível em [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf). Acesso em 15 de abril de 2016.

ANDERSEN, Ulrik Vølcker. **Load Reduction od Support Structures os Offshore Wind Turbines.** Technical University od Denmark (DTU), 2008. 81p.

ANDERSON JR., John D. **Fundamentals of Aerodynamics.** McGraw-Hill Education, 2010. 1106 p.

BERTIN, John J.; CUMMINGS, Russell, M. **Aerodynamics For Engineers.** Pearson Education International, 2008. 752 p.

BORGES, Bruna K., FOFANO, Luiz G, S. **Estudo da aplicação de *aeroelastic tailoring* para controle passivo do ângulo de passo de pás de geradores eólicos.** 2016. 73 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica, Curitiba, 2016.

BURTON, Tony; SHARPE, David; JENKINS, Nick; BOSSANYI, Ervin. **Wind Energy Handbook.** Wiley, 2001. 643 p.

CUMMINGS, Russell M.; MASON, Willian H.; MORTON, Scott A.; MCDANIEL, David R. **Applied Computational Aerodynamics.** Cambridge University Press, 2015. 888 p.

Da SILVA, C. T., DONADON, M. V., MENEZES, J. C. and SILVA, R. G. A., **A Vortex Lattice Program for Steady State Aerodynamic Analysis of Wind Turbine Blade Loads,** 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 2011.

DONADON, Mauricio Vivente; IANNUCCI, Lorenzo. **A Vortex Lattice Program to Compute Aerodynamic Loads in Flapped and Twisted Wing Planforms.** Imperial College London, 2006. 28 p.

FOX, Robert W., MCDONALD, Alan T., Pritchard, Philip J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** LTC, 2014. 888 p.

GASH, R., TWELE, J. **Wind Power Plants**. Ed. James & James (Science Publishers) Ltd., London, 2002. 390 p.

GLAUERT, H. **Airplane propellers**. Aerodynamic Theory, vol 4, Division L, Julius Springer, Berlin, 1935. 360 p.

HANSEN, M. O. L. **Aerodynamics of Wind Turbines: second edition**. (2 ed.) Earthscan Publications Ltd, 2008, 192p.

INDIO, C. **Em 2016, energia eólica no Brasil passou a ter condições de produzir 10 GW**. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2016-08/em-2016-energia-eolica-no-brasil-passou-ter-condicoes-de-produzir-10-gw>>. Acesso em: 16 de julho de 2017.

KARAMCHETI, K. **Principles of Ideal Fluid Aerodynamics**. John Wiley & Sons, New York, 1966. 518 P.

MARGASON, R.J., LAMAR, J.E. **Vortex-Lattice FORTRAN Program for Estimating subsonic Aerodynamic Characteristics of Complex Planforms**. NASA TN D-6142, 1971. 146 p.

NOS. **Previsões de Carga para o Planejamento Anual da Operação Energética 2016 – 2020**. 03 de dezembro de 2015.

KENNETH L. O. **Spanwise Lift Distribution on a Wing from Flowfield Velocity Surveys**, Journal of Aircraft, Vol. 17, No. 12 (1980), p. 875-882.

PRANTL, L., TIETJENS, O.G., **Fundamentals of Hydro and Aeromechanics**. Dover, 1957. 336 p.

ROBINSON, A., LAURMANN, J. A. **Wing Theory**. Cambridge University Press Schlichting, 1956. 15p.

ROSSI, P. H. J., DE OLIVEIRA, C. P. **Perguntas Frequentes sobre Energia Eólica**. Disponível em <<http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php>>. Acesso em: 16 de julho de 2017.