



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO**  
**CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS**  
**CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA**

**PÂMELA LARISSA DE SOUSA VIEIRA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA GEOMÉTRICA DE GERADORES DE VÓRTICES  
APLICADOS EM TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE**

**CARAÚBAS - RN**  
**2018**

PÂMELA LARISSA DE SOUSA VIEIRA

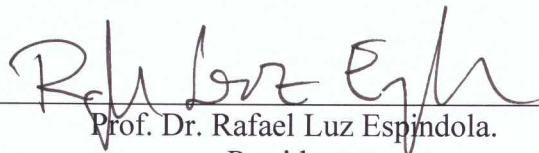
**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA GEOMÉTRICA DE GERADORES DE VÓRTICES  
APLICADOS EM TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao curso de Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –  
UFERSA, como requisito parcial para obtenção  
do título de Engenheiro Mecânico.

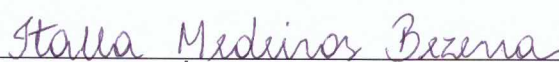
Orientador(a): Dr. Rafael Luz Espindola.

APROVADO EM: 18 / 04 / 2018

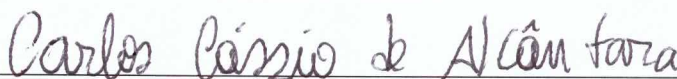
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Rafael Luz Espindola.  
Presidente



Prof.ª Dr.ª Ítalla Medeiros Bezerra  
Primeiro Membro



Prof. Me. Carlos Cássio de Alcântara  
Segundo Membro

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

S657a Sousa Vieira, Pâmela Larissa.  
Análise da influência geométrica de geradores  
de vórtices aplicados em turbinas eólicas de  
pequeno porte / Pâmela Larissa Sousa Vieira. -  
2018.  
68 f. : il.

Orientador: Rafael Luz Espindola.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia  
Mecânica, 2018.

1. Geradores de vórtice. 2. Turbinas eólicas. 3.  
CFD. 4. Simulações fluidodinâmicas. I. Luz  
Espindola, Rafael, orient. II. Título.

## **DEDICATÓRIA**

À minha amada família e meus pais, em especial a Rejane Maria de Sousa, minha mãe, por todo amor, dedicação, sacrifício e incentivo a mim dedicados.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar à Deus, por todo seu amor, pelo dom da vida, pela força nos momentos mais difíceis, pelas oportunidades que me foram concedidas, por todos os dons e pela realização deste trabalho.

Aos meus pais Rejane e Ivanildo, por todo amor e carinho, pelos ensinamentos e conselhos, pela paciência e confiança e por todo o apoio que não me permitiu desistir ao longo da minha caminhada.

Agradeço toda minha família, em especial minha madrinha Luiza (in memoriam) e minha avó materna Maria de Fátima (in memoriam), por todos os momentos que me proporcionaram felicidades, por todo incentivo, pelas palavras de apoio e por sempre me mostrarem o caminho certo a seguir.

Agradeço meus amigos de infância Renata, Maria Estela, Douglas, Jessica pela amizade, pelo carinho, pela paciência, cumplicidade e por toda inspiração que me fizeram chegar até aqui.

Agradeço aos amigos que fiz ao longo dessa caminhada, em especial Thayse, Aline, Terceiro, Luann, e Gleidson, meu namorado, por toda ajuda, companheirismo e força que me foram dedicados.

Agradeço ao meu orientador Rafael Espindola por toda confiança que me foi depositada, pelas cobranças e ensinamentos e por todo auxílio, sem sua inspiração não seria possível a realização deste trabalho.

“Não importa quanto a vida possa ser ruim,  
sempre existe algo que você pode fazer e  
triunfar. Enquanto há vida, há esperança.”  
(Stephen Hawking)

## RESUMO

O presente trabalho baseia-se na análise de utilização de geradores de vórtices de matriz contra-rotativa e co-rotativa para beneficiamento da eficiência das turbinas eólicas de pequeno porte. Na metodologia foram definidos todos os parâmetros importantes para a realização da pesquisa, bem como as simplificações necessárias em virtude da limitação computacional. Para obtenção dos resultados foi utilizado o *software* Autodesk CFD na realização das simulações fluidodinâmicas. Após as análises constatou-se que, dentre as geometrias dos geradores de vórtices estudadas não houve diferença justificável da utilização de uma em detrimento da outra, como também a incorporação dos geradores de turbulência não ocasionou resultados que fundamenta a sua utilização. Por fim, apesar de não identificado o efeito desejado no comportamento dos geradores de vórtices, é possível afirmar a existência de uma alta potencialidade na aplicação dos mesmos, visto que a adoção de outros parâmetros proporcionaria condições de trabalhos mais favoráveis.

**Palavras-chave:** Geradores de vórtices. Turbinas eólicas. CFD. Simulações fluidodinâmica.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1 - MOINHOS DE VENTO RUDIMENTAR. ....                                                                                                            | 16 |
| FIGURA 2 - FORMAÇÃO DOS VENTOS DEVIDO AO DESLOCAMENTO DAS MASSAS DE AR.....                                                                             | 18 |
| FIGURA 3 - DISTRIBUIÇÃO DE OCORRÊNCIA DE VELOCIDADES DE VENTO ADEQUADAS PARA<br>APROVEITAMENTO EÓLICO POR CONTINENTE. ....                              | 19 |
| FIGURA 4 - ESTIMATIVAS DO POTENCIAL EÓLICO MUNDIAL.....                                                                                                 | 19 |
| FIGURA 5 - VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DO VENTO A 50M DE ALTURA. ....                                                                                        | 20 |
| FIGURA 6 - PRINCIPAIS FORÇAS ATUANTES EM UMA PÁ DE TURBINA EÓLICA. ....                                                                                 | 22 |
| FIGURA 7 - TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL (A) E VERTICAL (B).....                                                                                  | 23 |
| FIGURA 8 – TURBINAS DE PEQUENO PORTE (A), MÉDIO PORTE (B) E GRANDE PORTE (C). ....                                                                      | 24 |
| FIGURA 9 – TURBINAS EÓLICAS ON-SHORE (A) E OFF-SHORE (B).....                                                                                           | 24 |
| FIGURA 10 – DIGRAMA BÁSICO DOS COMPONENTES DE UM SISTEMA EÓLICO. ....                                                                                   | 25 |
| FIGURA 11 – COMPONENTES PRINCIPAIS DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL. ....                                                                       | 25 |
| FIGURA 12 – GERADOR CONVENCIONAL.....                                                                                                                   | 26 |
| FIGURA 13 – VÁRIOS MODELOS DE PÁS EM UM PÁTIO.....                                                                                                      | 26 |
| FIGURA 14 – NACELE DE UM AEROGERADOR.....                                                                                                               | 27 |
| FIGURA 15 – ACOPLAMENTO DE TRANSMISSÃO.....                                                                                                             | 27 |
| FIGURA 16 – CONTROLE ELETRÔNICO. ....                                                                                                                   | 28 |
| FIGURA 17 – TORRE TRELIÇADA.....                                                                                                                        | 28 |
| FIGURA 18 – FLUXO NA SEÇÃO DA PÁ DE UM ROTOR DE UMA TURBINA EÓLICA DE SUSTENTAÇÃO.<br>.....                                                             | 29 |
| FIGURA 19 – FLUXOS DE AR NO PERFIL DE UMA PÁ.....                                                                                                       | 30 |
| FIGURA 20 – DESENVOLVIMENTO DA CAMADA-LIMITE DA VELOCIDADE EM UMA PLACA PLANA.<br>.....                                                                 | 31 |
| FIGURA 21 – DESENVOLVIMENTO DA CAMADA-LIMITE DE VELOCIDADE SOBRE UMA PLACA<br>PLANA. ....                                                               | 33 |
| FIGURA 22 – COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE VELOCIDADE NAS CAMADAS-LIMITE DE VELOCIDADE<br>LAMINAR E TURBULENTO PARA A MESMA VELOCIDADE NA CORRENTE LIVRE..... | 34 |
| FIGURA 23 - FORMAÇÃO E SEPARAÇÃO DA CAMADA-LIMITE SOBRE UM CILINDRO CIRCULAR EM<br>ESCOAMENTO CRUZADO. ....                                             | 35 |
| FIGURA 24 - PERFIL DE VELOCIDADE ASSOCIADO À SEPARAÇÃO SOBRE UM CILINDRO CIRCULAR<br>EM ESCOAMENTO CRUZADO.....                                         | 36 |
| FIGURA 25 - O EFEITO DA TURBULÊNCIA NA SEPARAÇÃO. ....                                                                                                  | 36 |
| FIGURA 26 – COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA ACOPLADO AOS<br>DISPOSITIVOS DE GERADOR DE VÓRTICES. ....                                 | 38 |
| FIGURA 27 – DIREÇÃO DE ROTAÇÃO DOS VÓRTICES PARA MATRIZ CO-ROTATIVA (A) E MATRIZ<br>CONTRA-ROTATIVA (B).....                                            | 38 |
| FIGURA 28 – PARÂMETROS DE ESPAÇAMENTO DAS MATRIZES DE VÓRTICES CO-ROTATIVA (A) E<br>CONTRA-ROTATIVA (B).....                                            | 39 |
| FIGURA 29 – PRINCIPAIS DIMENSÕES DO GERADOR DE VÓRTICE DE MATRIZ CONTRA-ROTATIVA.<br>.....                                                              | 39 |
| FIGURA 30 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS ADOTADAS PARA REALIZAÇÃO DO TRABALHO. ....                                                                            | 41 |

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 31- REPRESENTAÇÃO DA VARIAÇÃO DA CORDA E DA ANGULAÇÃO DOS PERFIS DO AEROGERADOR NACA 0010. ....         | 42 |
| FIGURA 32 – DIFERENTES VISTAS DA PÁ EÓLICA NACA 0010.....                                                      | 43 |
| FIGURA 33 – REPRESENTAÇÃO DOS AEROFÓLIOS DA PÁ EÓLICA NACA 0010. ....                                          | 44 |
| FIGURA 34 - CONFIGURAÇÃO ADOTADA PARA O DOMÍNIO DAS SIMULAÇÕES.....                                            | 45 |
| FIGURA 35 – RELAÇÃO ENTRE AS VELOCIDADES E AS ANGULAÇÕES. ....                                                 | 46 |
| FIGURA 36 - DOMÍNIO DA SIMULAÇÃO PARA O PERFIL 30 COM ÂNGULO DE ATAQUE DE 4°. ....                             | 47 |
| FIGURA 37 - DOMÍNIO DA SIMULAÇÃO PARA O PERFIL 3 COM ÂNGULO DE FLUXO DE 40,63°. ....                           | 47 |
| FIGURA 38 - DOMÍNIO DA SIMULAÇÃO PARA O PERFIL 12 COM ÂNGULO DE FLUXO DE 18,35°....                            | 48 |
| FIGURA 39 -DOMÍNIO DA SIMULAÇÃO PARA O PERFIL 30 COM ÂNGULO DE FLUXO DE 8,1°. ....                             | 48 |
| FIGURA 40 - CONFIGURAÇÃO DOS BOXES UTILIZADOS NA REGIÃO DO PERFIL (A) E NA REGIÃO POSTERIOR AO MESMO (B). .... | 49 |
| FIGURA 41 - LOCALIZAÇÃO DOS BOXES CONFIGURADOS DENTRO DO DOMÍNIO DA SIMULAÇÃO. ....                            | 49 |
| FIGURA 42 – TELA DE CONFIGURAÇÃO PARA O ADVECTION SCHEME.....                                                  | 50 |
| FIGURA 43 – TELA DE CONFIGURAÇÃO PARA O <i>MODEL TURBULENCE</i> . ....                                         | 50 |
| FIGURA 44 - MODELAGEM EM 3D DO AEROFÓLIO COM OS GERADORES DE TURBULÊNCIA DE MATRIZ CONTRA-ROTATIVA. ....       | 51 |
| FIGURA 45 – MODELAGEM EM 3D DO AEROFÓLIO COM OS GERADORES DE TURBULÊNCIA DE MATRIZ CO-ROTATIVA. ....           | 51 |
| FIGURA 46 – SIMULAÇÃO DO PERFIL 30 CONSIDERANDO A TORÇÃO, COM ÂNGULO DE ATAQUE DE 4°. ....                     | 52 |
| FIGURA 47 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO DO PERFIL 3 COM ÂNGULO DE FLUXO LOCAL DE 40, 63°. ....                      | 53 |
| FIGURA 48 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO DO PERFIL 12 COM ÂNGULO DE FLUXO LOCAL DE 18, 35°. ....                     | 54 |
| FIGURA 49 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO DO PERFIL 30 COM ÂNGULO DE FLUXO LOCAL DE 8, 1°. ....                       | 55 |
| FIGURA 50 – COMPORTAMENTO DOS VETORES DE VELOCIDADE DO PERFIL 12 COM ÂNGULO DE FLUXO DE 18,35°. ....           | 56 |
| FIGURA 51 - ESPESSURA DA CAMADA-LIMITE PARA O PERFIL 12 COM ÂNGULO DE FLUXO DE 18,35°. ....                    | 56 |
| FIGURA 52 - FORÇAS ATUANTES NO AEROFÓLIO 12 COM ÂNGULO DE FLUXO DE 18,35°. ....                                | 57 |
| FIGURA 53 – DIMENSÕES GEOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA O GERADOR DE VÓRTICE DE MATRIZ CONTRA-ROTATIVA. ....         | 58 |
| FIGURA 54 - DIMENSÕES GEOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA O GERADOR DE VÓRTICE DE MATRIZ CO-ROTATIVA. ....             | 58 |
| FIGURA 55 - COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO NO PERFIL 12 COM G.V CONTRA ROTACIONAL. ....                           | 59 |
| FIGURA 57 - DETALHAMENTO DO COMPORTAMENTO DAS LINHAS DE CORRENTE DE VELOCIDADE. ....                           | 60 |
| FIGURA 56 - COMPORTAMENTO DOS VETORES DE VELOCIDADE NO PERFIL 12 COM G.V DE MATRIZ CONTRA-ROTATIVA. ....       | 60 |
| FIGURA 58 - ESQUEMATIZAÇÃO DA RECIRCULAÇÃO DO FLUXO DE AR ATRAVÉS DAS LINHAS DE CORRENTE. ....                 | 60 |

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 59 – COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO DO PERFIL 12 COM GERADOR DE VÓRTICE DE MATRIZ CO-ROTATIVA. ....                    | 62 |
| FIGURA 60 - ESQUEMATIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS VETORES DE VELOCIDADE PARA O PERFIL 12 COM G.V DE MATRIZ CO-ROTATIVA. .... | 63 |
| FIGURA 61 - DETALHAMENTO DA RECIRCULAÇÃO DO FLUXO DE AR ATRAVÉS DAS LINHAS DE CORRENTE DE VELOCIDADE. ....                 | 63 |

## SUMÁRIO

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                                       | 13 |
| 1.1. OBJETIVOS .....                                                                                      | 14 |
| 1.1.1 Objetivo geral .....                                                                                | 15 |
| 1.1.2 Objetivos específicos .....                                                                         | 15 |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA .....                                                                            | 16 |
| 2.1 HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA .....                                                                      | 16 |
| 2.1.1 Formação dos ventos .....                                                                           | 17 |
| 2.1.2 Potencial eólico mundial e brasileiro .....                                                         | 18 |
| 2.1.3 Potência eólica extraída .....                                                                      | 21 |
| 2.2 TURBINAS EÓLICAS .....                                                                                | 22 |
| 2.2.1 Componentes das turbinas eólicas .....                                                              | 25 |
| 2.2.2 Potência da turbina eólica .....                                                                    | 29 |
| A FORÇA DE SUSTENTAÇÃO É DADA A PARTIR DA EQUAÇÃO 2.4. ....                                               | 29 |
| 2.3 ESCOAMENTO .....                                                                                      | 31 |
| 2.3.1 Camadas-limites de velocidade laminar e turbulenta .....                                            | 31 |
| 2.3.2 O cilindro em escoamento cruzado .....                                                              | 35 |
| 2.4 GERADORES DE VÓRTICES .....                                                                           | 37 |
| 3. METODOLOGIA .....                                                                                      | 41 |
| 3.1 DETERMINAÇÃO E MODELAGEM DA PÁ EÓLICA .....                                                           | 41 |
| 3.2 SELEÇÃO DO AEROFÓLIO .....                                                                            | 43 |
| 3.3 DEFINIÇÃO DOS GERADORES DE VÓRTICES E DOS PARÂMETROS<br>ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES FLUIDODINÂMICAS ..... | 44 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                                                                          | 52 |
| 4.1 ANÁLISE FLUIDODINÂMICA DOS PERFIS SELECIONADOS .....                                                  | 52 |
| 4.1.1 Análise computacional do perfil 12 .....                                                            | 56 |
| 4.2 DEFINIÇÕES GEOMÉTRICAS DOS GERADORES DE VÓRTICES .....                                                | 58 |
| 4.3 ANÁLISE DO PERFIL 12 COM O GERADOR DE VÓRTICE DE MATRIZ CONTRA-<br>ROTATIVA .....                     | 59 |
| 4.4 ANÁLISE DO PERFIL 12 COM O GERADOR DE VÓRTICE DE MATRIZ CO-<br>ROTATIVA .....                         | 62 |
| 5 CONCLUSÃO .....                                                                                         | 66 |
| REFERÊNCIAS .....                                                                                         | 67 |
| ANEXO A: INFORMAÇÕES RELEVANTES SOBRE O PROJETO DA PÁ EÓLICA<br>UTILIZADA .....                           | 70 |

## 1. INTRODUÇÃO

A constante busca por fontes energéticas, mesmo que através de métodos distintos, está marcada como fato comum dentre a história da construção das civilizações. Desde os primórdios, o homem vem desenvolvendo inúmeras técnicas com o intuito de aproveitar da natureza determinadas fontes de energia para o crescimento e desenvolvimento da sua comunidade.

Uma vez que o crescimento social e econômico do país está intimamente relacionado com a potência energética disponível pelo mesmo, a busca por matrizes energéticas inesgotáveis e sustentáveis tem-se tornado uma das questões mais debatidas na atualidade. Dentro desses parâmetros, a energia eólica tem-se mostrado uma das grandes apostas como fonte alternativa, uma vez que a mesma apresenta um alto potencial energético no Brasil (ANEEL, 2002).

Para transformar a potência do vento em energia elétrica são utilizados equipamentos denominados de aerogeradores. Segundo Wenzel (2007), turbinas eólicas são utilizadas em conjunto com geradores para produzir eletricidade, sendo possível também a utilização das mesmas em vários sistemas mecânicos, como é o caso do bombeamento.

Os geradores eólicos são constituídos basicamente por três componentes principais: o rotor, constituído principalmente pelas pás; o gerador, encarregado da conversão eletromecânica; e a torre, que tem por função suportar e estrutura e elevar o rotor a altura desejada.

Os aerogeradores podem ser classificados de acordo com a potência nominal de trabalho em: de grande porte, quando possuem potência acima de 1 MW; de médio porte, quando dispõem de uma potência no intervalo entre 50 a 1000 KW; e de pequeno porte, quando alcançam potências de até 50 KW (WENZEL, 2007). A contribuição da energia eólica no Brasil é oriunda em sua maioria das turbinas de médio e grande porte, que se encontram nos parques eólicos. A tecnologia utilizada em tais turbinas para a produção de energia encontra-se, atualmente, em um âmbito bastante desenvolvido. Porém, tal fato não condiz com a realidade no que se refere à produção energética residencial.

Um dos grandes empecilhos da difusão dos aerogeradores de pequeno porte para uso residencial, é ainda a relação pouco atrativa existente entre custo benefício, ou seja, não é viável economicamente a utilização de geradores eólicos de pequeno porte nas redes domésticas (GRIESER.B, et al, 2015).

O principal motivo do baixo custo benefício encontra-se atrelado às baixas e irregulares velocidades dos ventos nas regiões urbanas. Portanto faz-se necessário o desenvolvimento de modelos de aerogeradores capazes de operar com uma maior eficiência nas condições geográficas adversas das redes residenciais.

Visando aprimorar o desenvolvimento de aerogeradores de pequeno porte, é necessário desenvolver pesquisa em mecanismos que favoreçam o aumento da eficiência dos geradores nas condições urbanas que apresentam baixas velocidades e mudanças bruscas de vento. Uma das alternativas que podem ser desenvolvidas, é a utilização de dispositivos de geradores de vórtices utilizadas nas pás dos aerogeradores, com o intuito de otimizar o desempenho dos mesmos. Geradores de vórtices são pequenos dispositivos que produzem vórtice de fluxo, ocasionando assim um aumento da energia e velocidade na camada limite (DAYTON A., 1996).

Quando o fluxo de ar descola da superfície da pá a turbina eólica sofre com a perda de sustentação e energia. Os geradores de vórtice atrasam a separação do fluxo na região da camada limite, dessa forma tal dispositivo é capaz de aumentar o desempenho do aerogerador e conseqüentemente o rendimento energético.

Os geradores de turbulência são alternativas promissoras no que diz respeito à otimização do rendimento das turbinas de pequeno porte. Dessa forma, tais mecanismos podem proporcionar uma relação positiva de custo-benefício, favorecendo então a difusão das máquinas eólicas nas redes residenciais.

O presente trabalho visa desenvolver análises iniciais em relação a influência dos geradores de vórtices nas pás de um aerogerador doméstico, uma vez que os mesmos podem trazer benefícios promissores como saída fácil e de baixo custo para elevar o rendimento dos aerogeradores de pequeno porte.

## 1.1. OBJETIVOS

O TCC apresentado por meio deste trabalho, tem os seguintes objetivos gerais e específicos:

### **1.1.1 Objetivo geral**

Analisar o comportamento aerodinâmico das pás de um aerogerador de pequeno porte em função da influência geométrica dos dispositivos de geração de vórtice.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Realização da modelagem da pá eólica baseado em um modelo pré-definido;
- Definição e modelagem das geometrias dos geradores de vórtices;
- Análise computacional fluidodinâmica dos perfis da pá do aerogerador;
- Determinação e simulação do perfil da pá acoplado aos dispositivos de geradores de vórtices;
- Análise e comparação do desempenho do perfil do aerogerador aplicado nas condições com e sem geradores de vórtices em função da variação geométrica dos mesmos.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA

Ao longo dos anos, o homem notou a necessidade de utilização de uma fonte externa de energia para realização de suas atividades, favorecendo assim o crescimento e desenvolvimento da comunidade. As primeiras aplicações de mecanismos que utilizavam a força externa foram diretamente na agricultura.

Os primeiros moinhos de vento (Figura 1) foram desenvolvidos com o objetivo de facilitar a moagem dos grãos e o bombeamento de água, onde um eixo vertical era acionado através de uma longa haste, que por sua vez era movida por meio da força humana ou animal (CRESESB, 2018).

**Figura 1** - Moinhos de vento rudimentar.



Fonte: Atlas<sup>1</sup>.

O mecanismo de funcionamento do moinho de vento foi aperfeiçoado com o passar dos tempos, passando a utilizar a água como força motora. Um dos primeiros registros

---

<sup>1</sup> Disponível em: <http://www.atlas.cimal.pt/drupal/?q=pt-pt/node/290>. Acesso em: fev.2018

históricos da utilização dos cata-ventos foi na Pérsia, por volta do ano 200 a.C (CRESESB, 2008).

Apesar dos cata-ventos apresentarem um funcionamento primitivo, representaram em sua época um grande avanço na moagem de grãos e bombeamento de água, uma vez que os mesmos não necessitavam de acionamento por força humana ou animal, onde a movimentação era realizada através da força do vento.

A partir do desenvolvimento dos eixos horizontais e verticais, das pás e dos sistemas de controle, a utilização de tais moinhos de vento favoreceu e otimizou o desenvolvimento de inúmeras atividades utilizando a força motriz eólica (CRESESB, 2008).

O primeiro registro da utilização de cata-vento destinada a produção de energia elétrica foi datado no final do século XIX, no ano de 1888. Idealizado por Charles F. Brunch. O modelo produzido fornecia uma potência de 12 KW em corrente contínua, sendo realizado o carregamento de baterias destinadas ao fornecimento de energia a 350 lâmpadas incandescentes (CRESESB, 2008).

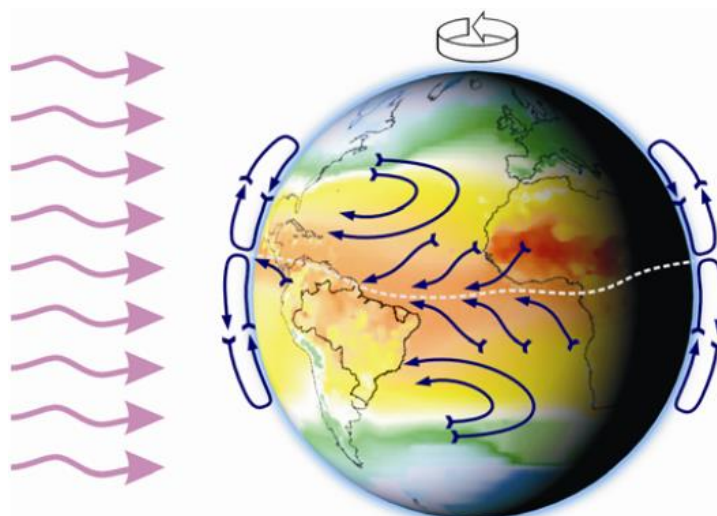
O cata-vento apresentado por Brunch representou, em sua época, um importante marco na história da energia eólica, pois foi o primeiro protótipo criado para obtenção final da energia elétrica utilizando como energia motriz a força do vento.

### **2.1.1 Formação dos ventos**

A energia eólica é oriunda da energia cinética presente nas massas de ar que estão em movimento, comumente denominadas de vento. O aproveitamento dessa energia ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação. Através dos aerogeradores é realizado a obtenção da carga elétrica (ANEEL, 2002).

A potência eólica é indiretamente proveniente da energia solar, uma vez que os ventos são oriundos da não uniformidade do aquecimento terrestre (CRESESB, 2008). O ar quente presente nas regiões tropicais tende a movimentar-se das baixas para as altas altitudes, por sua vez a massa de ar fria, proveniente das zonas polares, move-se para as baixas altitudes, como é apresentado na Figura 2.

**Figura 2** - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.



Fonte: CRESESB (2008).

As particularidades topográficas são fatores importantes que influenciam o comportamento dos ventos. Dessa forma, existem determinadas áreas que favorecem ventos com maiores ou menores velocidades (CRESESB, 2008). O fator velocidade de vento pode variar significativamente dentro de um pequeno intervalo de espaço. Entre as principais condições que influem no seu comportamento, destacam-se:

- A variação de velocidade com altura.
- A rugosidade topográfica.
- Presença de obstáculos nas proximidades.
- Efeito de aceleração ou desaceleração do relevo.

### 2.1.2 Potencial eólico mundial e brasileiro

Segundos dados da ANEEL (2002), a Dinamarca foi o primeiro país a instalar turbinas eólicas ligadas a rede elétrica pública, no ano de 1976. Atualmente, estima-se que existem cerca de 30 mil turbinas eólicas em operação ao redor do mundo.

Para realizar uma avaliação do potencial eólico de uma determinada região é necessário estudar minuciosamente todos os dados de velocidade e regimes do vento da localização, bem como todos os fatores que influenciam tais condições.

Segundo ANEEL (2002, apud Grubb and Meyer, 1993), para que o potencial eólico seja considerado aproveitável, é necessário que a densidade seja igual ou superior ao valor de

500 W/m<sup>2</sup> para uma altura de 50 metros. Isso corresponde a uma velocidade mínima dos ventos entre 7 e 8 m/s.

A Figura 3 apresenta a velocidade média dos ventos distribuída por área dos seguintes continentes:

**Figura 3** - Distribuição de ocorrência de velocidades de vento adequadas para aproveitamento eólico por continente.

| Região/Continente         | Velocidade do Vento (m/s) a 50 m de Altura |     |                                    |     |                                    |     |
|---------------------------|--------------------------------------------|-----|------------------------------------|-----|------------------------------------|-----|
|                           | 6,4 a 7,0                                  |     | 7,0 a 7,5                          |     | 7,5 a 11,9                         |     |
|                           | (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )         | (%) | (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> ) | (%) | (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> ) | (%) |
| África                    | 3.750                                      | 12  | 3.350                              | 11  | 200                                | 1   |
| Austrália                 | 850                                        | 8   | 400                                | 4   | 550                                | 5   |
| América do Norte          | 2.550                                      | 12  | 1.750                              | 8   | 3.350                              | 15  |
| América Latina            | 1.400                                      | 8   | 850                                | 5   | 950                                | 5   |
| Europa Ocidental          | 345                                        | 8,6 | 416                                | 10  | 371                                | 22  |
| Europa Oriental & ex-URSS | 3.377                                      | 15  | 2.260                              | 10  | 1.146                              | 5   |
| Ásia (excluindo ex-URSS)  | 1.550                                      | 6   | 450                                | 2   | 200                                | 5   |
| Total do Globo            | 13.650                                     | 10  | 9.550                              | 7   | 8.350                              | 6   |

Fonte: ANEEL (2002).

Estima-se que o potencial eólico mundial esteja na faixa dos 500.000 TWh por ano. Entretanto, devido a algumas questões políticas e ambientais, desse montante apenas 53.000 TWh são aproveitáveis (ANEEL, 2002). Um ponto importante a ser considerado, é o fato de que o potencial eólico líquido corresponde a cerca de quatro vezes o consumo mundial de eletricidade.

A Figura 4 apresenta estimativas do potencial eólico para as seguintes regiões do mundo:

**Figura 4** - Estimativas do potencial eólico mundial.

| Região                        | Porcentagem de Terra Ocupada <sup>[1]</sup> | Potencial Bruto (TWh/ano) | Densidade Demográfica (hab/km <sup>2</sup> ) | Potencial Líquido (TWh/ano) |
|-------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|
| África                        | 24                                          | 106.000                   | 20                                           | 10.600                      |
| Austrália                     | 17                                          | 30.000                    | 2                                            | 3.000                       |
| América do Norte              | 35                                          | 139.000                   | 15                                           | 14.000                      |
| América Latina                | 18                                          | 54.000                    | 15                                           | 5.400                       |
| Europa Ocidental              | 42                                          | 31.400                    | 102                                          | 4.800                       |
| Europa Oriental & ex-URSS     | 29                                          | 106.000                   | 13                                           | 10.600                      |
| Ásia (excluindo ex-URSS)      | 9                                           | 32.000                    | 100                                          | 4.900                       |
| Total do Globo <sup>[2]</sup> | 23                                          | 498.400                   | -                                            | 53.000                      |

Fonte: ANEEL (2002).

Segundo dados da ANEEL (2002), o potencial eólico brasileiro encontra-se na faixa de 60.000 MW. A região Nordeste foi pioneira no que diz respeito à investigação e análise do potencial eólico, com um potencial maior nas áreas litorâneas, onde a velocidade média do vento a uma altura de 50 metros é superior a 8 m/s.

Dentre as regiões que apresentam vantagens quanto ao potencial eólico, além do litoral nordestino, destacam-se: O Vale do São Francisco, o Sudoeste do Paraná e o Litoral Sul do Rio Grande do Sul. A Figura 5 retrata a velocidade média dos ventos, a 50 metros de altura, em função do território brasileiro.

Figura 5 - Velocidade média anual do vento a 50m de altura.



| Velocidade média do vento (m/s)<br>50 m acima do nível da superfície |           |              |               |           |            |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|--------------|---------------|-----------|------------|
|                                                                      | Mata      | Campo Aberto | Zona Costeira | Morro     | Montanha   |
| 4                                                                    | > 6,0     | > 7,0        | > 8,0         | > 9,0     | > 11,0     |
| 3                                                                    | 4,5 - 6,0 | 6,0 - 7,0    | 6,0 - 7,0     | 7,5 - 9,0 | 8,5 - 11,0 |
| 2                                                                    | 3,0 - 4,5 | 4,5 - 6,0    | 4,5 - 6,0     | 6,0 - 7,5 | 7,0 - 8,5  |
| 1                                                                    | < 3,0     | < 4,5        | < 4,5         | < 6,0     | < 7,0      |

**NOTAS:**  
Mata indica áreas de vegetação nativa, com arbustos e árvores altas.  
Campo aberto refere-se a áreas planas de pastagens, plantações e/ou vegetação baixa, sem muitas árvores altas.  
Zonas costeiras são áreas de praia, normalmente com larga faixa de areia, onde o vento incide predominantemente no sentido mar-terra.  
Morros são áreas de relevo levemente ondulado, relativamente complexo e de pouca vegetação ou pasto.  
Montanhas representam áreas de relevo complexo com altas montanhas. O potencial eólico é dado para locais nos topos das montanhas em condições favoráveis para o fluxo de vento.

Fonte: ANEEL (2002).

### 2.1.3 Potência eólica extraída

Quando a massa de ar passa pelas turbinas eólicas a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica por consequência da rotação das pás, porém o aproveitamento do potencial cinético não ocorre em sua totalidade, ou seja, apenas parte da sua energia é aproveitada.

O índice  $c_p$  denominado de coeficiente de potência é definido como a fração correspondente à energia eólica disponível que é extraída através das pás do rotor (CRESESB, 2008).

Assumindo que os efeitos de redução de pressão do ar são desprezíveis e considerando a densidade do ar constante, pode-se afirmar que a energia cinética extraída pela turbina eólica é resultado da diferença das energias cinéticas a montante ( $v_1$ ) e a jusante das pás ( $v_3$ ), respectivamente, dessa forma a energia extraída é dada através da Equação 2.1.

$$E_{ex} = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_3^2) \quad \text{Eq. 2.1}$$

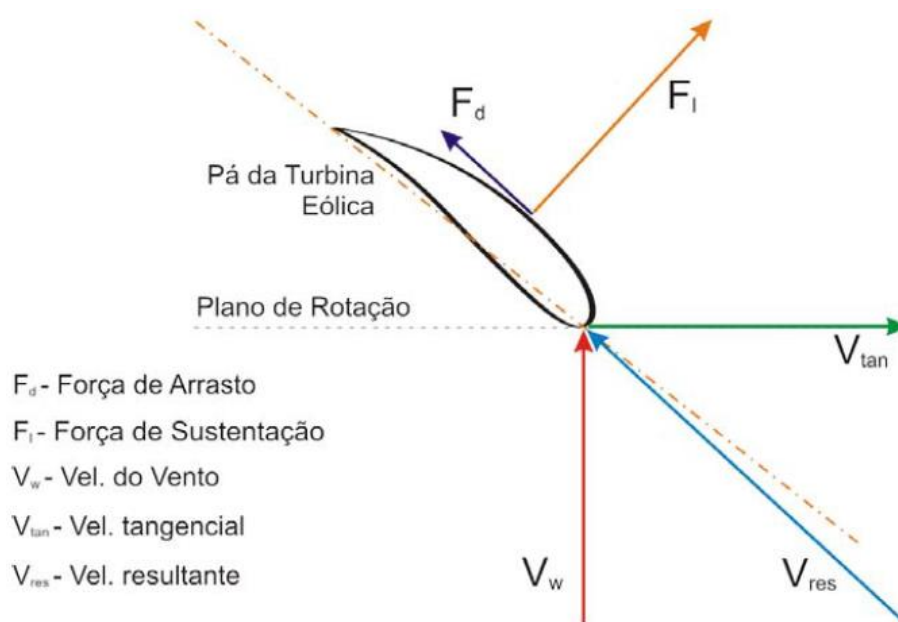
Em função da equação 2.1, existem duas situações extremas nas quais não é extraído energia do vento, a primeira situação ocorre caso as velocidades do vento  $v_1$  e  $v_3$  forem iguais e a segunda condição acontece se o módulo da velocidade  $v_3$  for igual a zero, pois nesse caso o fluxo de massa de ar é nulo.

De acordo com as duas condições apresentadas acima, pode-se estabelecer a seguinte premissa: o máximo valor de potência que pode ser extraído da energia do vento, encontra-se no intervalo de valores entre as velocidades  $v_1$  e  $v_3$ , para determinar o módulo da energia extraída deve-se conhecer a velocidade  $v_2$  do rotor (CRESESB, 2008).

Analisando assim as forças atuantes em uma pá genérica de uma turbina eólica (Figura 6), pode-se afirmar que a força de sustentação se encontra perpendicular ao fluxo de massa de ar resultante que passa pelas pás ( $V_{res}$ ). A velocidade resultante é determinada a partir da diferença vetorial entre a velocidade do vento incidente ( $V_w$ ) e a velocidade tangencial da pá do aerogerador ( $V_{tan}$ ), tal como representada na Equação 2.2 (CRESESB, 2008).

$$\vec{V}_{res} = \vec{V}_w - \vec{V}_{tan} \quad \text{Eq. 2.2}$$

**Figura 6** - Principais forças atuantes em uma pá de turbina eólica.



Fonte: MONTEZANO (2008).

Analisando a Figura 6, pode-se notar que a força de arrasto se dá na mesma direção da velocidade resultante. O torque gerado na turbina eólica é consequência da força resultante das componentes das forças de sustentação e arrasto (CRESESB, 2008).

## 2.2 TURBINAS EÓLICAS

Turbinas eólicas são equipamentos capazes de converter a energia presente no vento em energia elétrica. Segundo Hansen (2001), tais equipamentos vêm sendo utilizados há mais de dois milênios. Eles são impulsionados pelo vento, com o intuito de realizar determinadas tarefas, tais como: bombeamento de água, moagem de grãos e deslocamento de navios.

Atualmente existem inúmeros modelos de turbinas eólicas, que podem ser classificados quanto à orientação do eixo do rotor em relação ao solo em: turbinas eólicas de eixo horizontal, e turbinas eólicas de eixo vertical, conforme ilustrado na Figura 7.

As turbinas mais utilizadas são as de eixo horizontal, onde o eixo de rotação encontra-se paralelo a direção do vento. Uma de suas principais vantagens é a capacidade de alcançar ventos mais potentes devido à altura mais elevada da sua torre, entretanto, necessitam de um sistema de controle a fim de garantir que o rotor esteja posicionado da direção da predominância do vento (VERDUM, 2013).

**Figura 7** - Turbinas eólicas de eixo horizontal **(a)** e vertical **(b)**.



Fonte: SILVA (2013).

A configuração das pás das turbinas horizontais, dá-se de modo adjacente ao centro de gravidade, o que confere as mesmas, maiores estabilidades. Uma das desvantagens dessas turbinas é o baixo desempenho que apresentam quando trabalham nas condições do vento próximo ao solo. Outro aspecto importante são os altos custos e a dificuldade de instalação (VERDUM, 2013).

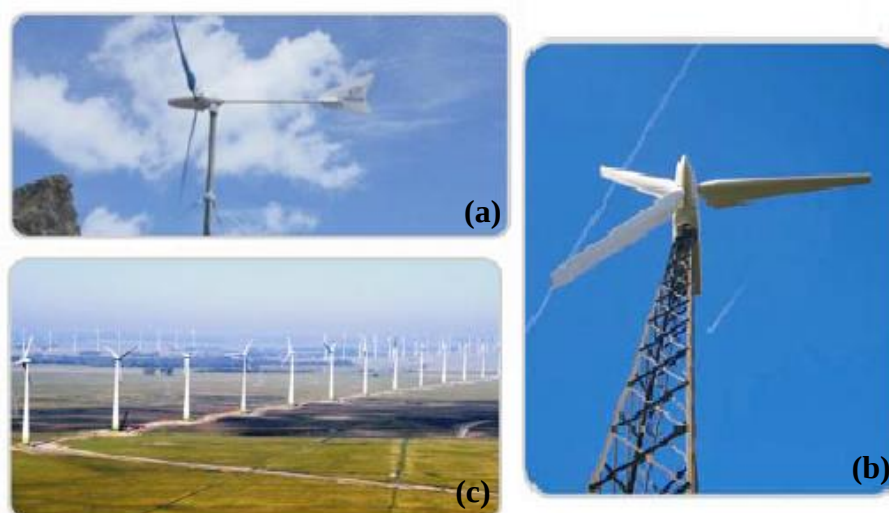
As turbinas eólicas de eixo vertical são movidas através da força de sustentação, quando as pás estão submetidas ao fluxo de ar na direção perpendicular, e através da força de arrasto, quando o fluxo de ar atua na direção paralela as pás. Um aspecto negativo em tais turbinas é a baixa eficiência quando comparadas as de eixo horizontal (MACHADO, 2014).

A principal vantagem das turbinas de eixo vertical deve-se ao funcionamento dela independente da direção do vento. Outra característica importante é o fato das mesmas requererem estruturas de sustentação relativamente simples se comparadas as de eixo horizontal (MACHADO, 2014).

As turbinas eólicas podem ser classificadas também em função do seu porte, ou seja, de acordo com a potência nominal apresentada, como ilustrado na Figura 8. Turbinas de até 50 KW de potência são classificadas na categoria de pequeno porte. As turbinas de médio porte

apresentam uma potência nominal dentro o intervalo de 50 a 1000 KW. E por fim, as máquinas de grande porte trabalham com um rendimento acima de 1 MW (WENZEL, 2007).

**Figura 8** – Turbinas de pequeno porte (a), médio porte (b) e grande porte (c).



Fonte: CRESESB (2008).

As turbinas de pequeno porte podem ser utilizadas na geração de energia elétrica em residências, fazendas, entre outros tipos de aplicações remotas. As turbinas que apresentam potência intermediária são largamente aplicadas na geração de energia distribuída e sistemas híbridos. Já as máquinas de grande porte podem ser utilizadas na geração distribuída, bem como em grandes parques eólicos (CRESESB, 2008).

Por fim, pode-se especificar as turbinas eólicas quanto ao local de instalação, como apresentado na Figura 9. As turbinas instaladas em terra firme são denominadas de on-shore, já as máquinas off-shore são instaladas em ambiente aquático (ANEEL, 2002).

**Figura 9** – Turbinas eólicas on-shore (a) e off-shore (b).



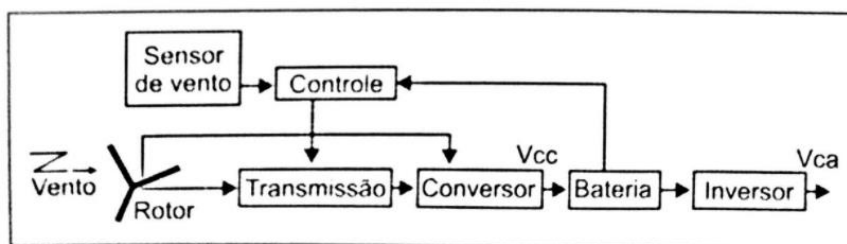
Fonte: ANEEL (2002).

### 2.2.1 Componentes das turbinas eólicas

Segundo o autor Lopez (2012) o projeto de uma turbina eólica engloba os seguintes componentes principais: gerador, pás, eixo, Nacele, caixa de engrenagens, unidade de controle eletrônico, controlador, torre, equipamentos eletrônicos.

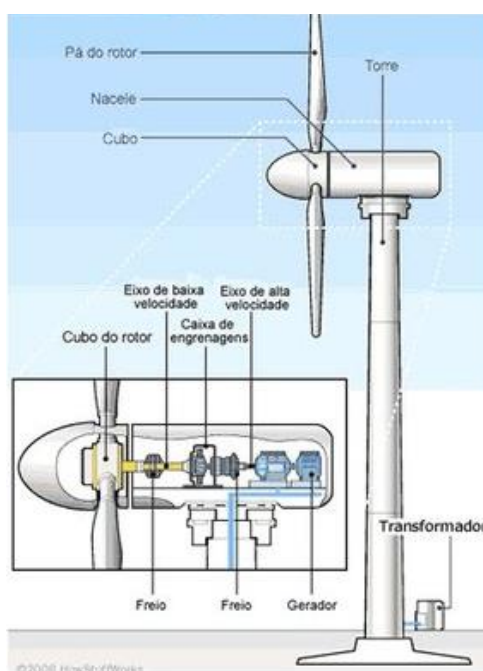
As Figuras 10 e 11 apresentam, respectivamente, o diagrama básico do sistema eólico e os componentes principais do mesmo.

**Figura 10** – Diagrama básico dos componentes de um sistema eólico.



Fonte: LOPEZ (2012).

**Figura 11** – Componentes principais de uma turbina eólica de eixo horizontal.



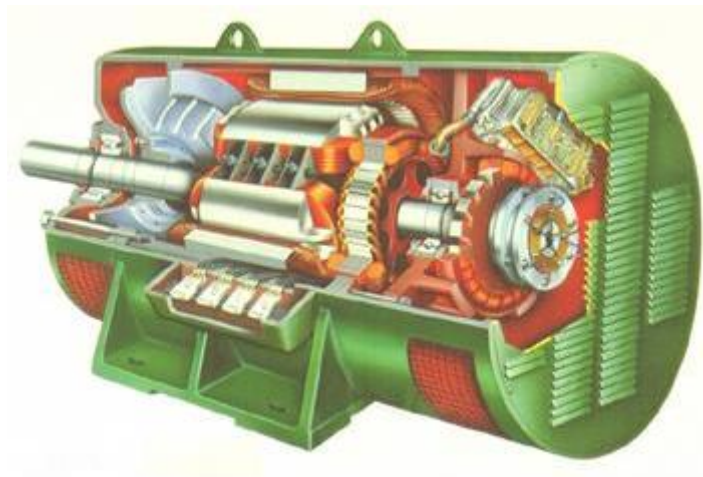
Fonte: Microeólica<sup>2</sup>

O gerador ilustrado na Figura 12, é o equipamento responsável pela produção de energia elétrica. Convencionalmente podem ser do tipo síncrono e assíncrono em função do modelo e potência, onde a energia rotacional do eixo é convertida em eletricidade através do

<sup>2</sup> Disponível em: <https://microeolica.weebly.com/constituiccedilatildeo-de-uma-teh.html>. Acesso em: fev.2018

eletromagnetismo. De acordo com os modelos das turbinas eólicas pode-se utilizar mais de um gerador. (LOPEZ, 2012).

**Figura 12** – Gerador convencional.



Fonte: CRESESB (2008).

As pás, representadas na Figura 13, constituem o formato do perfil aerodinâmico da turbina, onde ambas são responsáveis pela interação com as massas de ar e a transformação da energia cinética do vento em energia mecânica rotacional (LOPEZ, 2012).

**Figura 13** – Vários modelos de pás em um pátio.



Fonte: CRESESB (2008).

A Nacele ilustrada na Figura 14, é um compartimento de proteção responsável por abrigar os demais componentes da turbina. A mesma contém engrenagens, eixos de baixa e alta velocidade, gerador, controlador e freio (LOPEZ, 2012).

**Figura 14** – Nacele de um aerogerador.



Fonte: TREEHUGGER<sup>3</sup>

A caixa de engrenagens ou transmissão, apresentado na Figura 15, é o dispositivo responsável por transmitir energia mecânica, elevando a velocidade do eixo entre o cubo do rotor e o gerador, uma vez que tal aumento se faz necessário para que o gerador convencional seja capaz de produzir eletricidade (LOPEZ, 2012).

**Figura 15** – Acoplamento de transmissão.



Fonte: TREEHUGGER<sup>4</sup>

A unidade de controle eletrônico, ilustrado na Figura 16, é responsável pelo monitoramento do sistema, desligando e alinhando a turbina eólica com o vento sempre que houver necessidade, dessa forma tal equipamento é encarregado do comando de parada,

---

<sup>3</sup> Disponível em: <https://www.treehugger.com/renewable-energy/wind-power-number-of-the-day-593.html>. Acesso em: fev.2018

<sup>4</sup> Disponível em: [http://brevini.com.br/pt-br/products\\_category/industrial-planetary-gearboxes-pt-br/](http://brevini.com.br/pt-br/products_category/industrial-planetary-gearboxes-pt-br/). Acesso em: fev.2018

prevenindo a sobrevelocidade e os problemas de vibração na ocorrência de ventos demasiados fortes (LOPEZ, 2012).

**Figura 16** – Controle eletrônico.



Fonte: ALIEXPRESS<sup>5</sup>

A torre de uma turbina eólica apresentada na Figura 17, é um elemento estrutural que tem por finalidade garantir a sustentação dos componentes, bem como possibilitar altura suficiente entre as pás e o solo. As torres podem ser: tubular cônica e treliçada, e ambas são fabricadas, respectivamente, com aço ou concreto e aço (LOPEZ, 2012).

**Figura 17** – Torre treliçada.



Fonte: BRAMETAL<sup>6</sup>

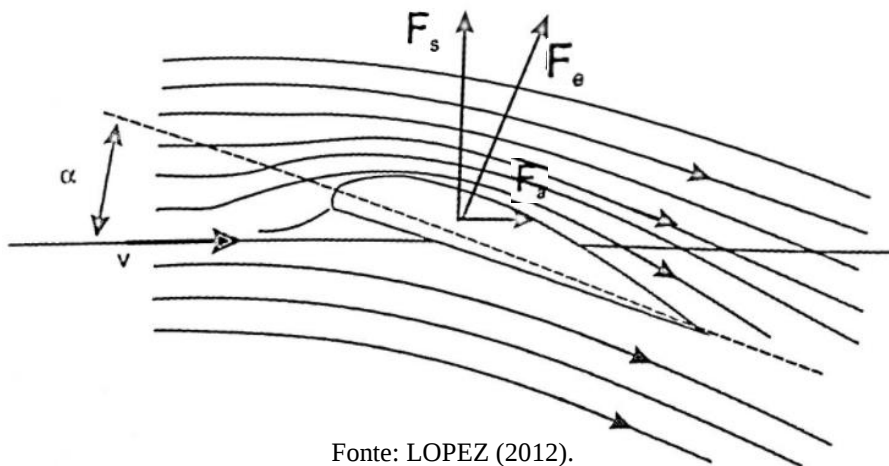
<sup>5</sup> Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/400W-12V-or-24V-Built-in-rectifier-module-wind-turbine-generator-only-2m-s-start-wind/32784839582.html>. Acesso em: fev.2018

<sup>6</sup> Disponível em: <http://www.brametal.com.br/produto/3/>. Acesso em: fev.2018

### 2.2.2 Potência da turbina eólica

O fluxo de ar incidente age sobre a turbina com um determinado ângulo  $\alpha$  em relação ao eixo da pá. A massa de ar é então forçada a mudar de direção, ocasionando assim a variação de velocidade da mesma, provocando uma força de empuxo (segundo as leis de Newton). De acordo com Lopez (2012) a força de empuxo pode ser decomposta em duas componentes, são elas: força de sustentação, responsável pela sustentação aerodinâmica nas pás da turbina eólica e força de arrasto. A Figura 18 apresenta a esquematização de tal processo.

**Figura 18** – Fluxo na seção da pá de um rotor de uma turbina eólica de sustentação.



Fonte: LOPEZ (2012).

A força de arrasto é consequência da desaceleração que ocorre na passagem do vento incidente nas pás. O arrasto é perpendicular à superfície da pá, e o coeficiente de arrasto é dado em função da geometria da mesma (LOPEZ, 2012). A força de arrasto proveniente da passagem de uma determinada massa de ar pelas pás de uma turbina eólica é dada pela Equação 2.3.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_a A v^2 \quad \text{Eq. 2.3}$$

onde

$F_a$  é a força de arrasto aerodinâmico [N],  $\rho$  é a massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>],  
 $v$  é a velocidade do vento [m/s],

$C_a$  é o coeficiente de arrasto, e  $A$  é a área varrida pelas pás [m<sup>2</sup>].

A força de sustentação é dada a partir da Equação 2.4.

$$F_s = \frac{1}{2} \rho C_s A_s v^2 \quad \text{Eq. 2.4}$$

onde

$F_s$  é a força de sustentação [N],

$\rho$  é a massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>],

$v$  é a velocidade do vento [m/s],

$C_s$  é o coeficiente de sustentação e

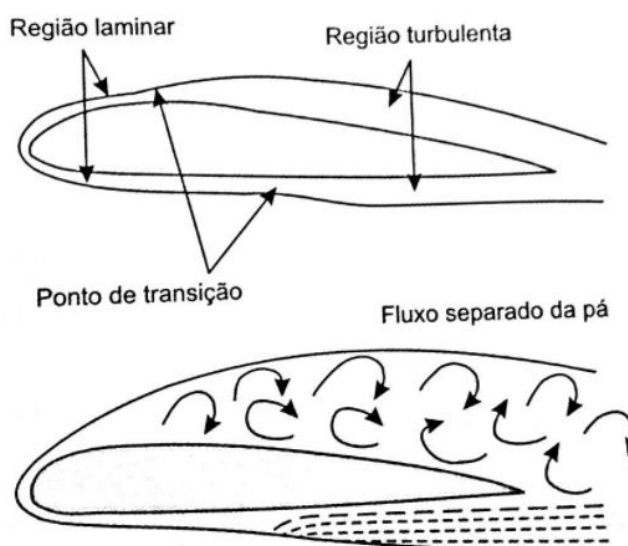
$A_s$  é a área da superfície superior da pá [m<sup>2</sup>].

O coeficiente de sustentação, denominado também como coeficiente de empuxo, varia em função da geometria e das características aerodinâmicas da seção da pá, podendo variar ao longo do comprimento longitudinal da mesma (LOPEZ, 2012).

O formato da pá, bem como sua inclinação em relação a direção da massa de ar incidente, deve ser projetado de forma a direcionar convenientemente a força de empuxo resultante sobre a pá no sentido da rotação do rotor, provocando assim um trabalho (LOPEZ, 2012).

Segundo Lopez (2012) a incidência do vento sobre as pás de uma turbina, conforme apresentado na Figura 19, provocam um deslocamento do fluxo de ar em função do ângulo de incidência da mesma, da geometria e formato da pá e da velocidade do vento.

**Figura 19** – Fluxos de ar no perfil de uma pá.



Fonte: LOPEZ (2012).

A Figura 19 apresenta duas regiões de fluxo de ar distintas sobre a superfície da pá. Na primeira região, o fluxo de ar se comporta de maneira laminar aderindo a superfície. Porém, na segunda região, o fluxo apresenta turbulência e eventual descolamento da superfície da pá.

A força de sustentação é maior na superfície do fluxo laminar, ocasionando em tal seção maior transferência de potência do vento. Na região que apresenta o descolamento do ar a força de sustentação é nula, desse modo não ocorre transferência de potência do vento para a turbina eólica (LOPEZ, 2012).

A potência de uma turbina eólica é dada por:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho C_p A_r v^3 \quad \text{Eq. 2.5}$$

Analizando a Equação 2.5 pode-se afirmar que a potência de uma turbina eólica é dada em função do cubo da velocidade do vento e o diâmetro do rotor (LOPEZ, 2012). Comumente a variação de potência de uma turbina é apresentada em gráficos denominados por: curva de potência da turbina.

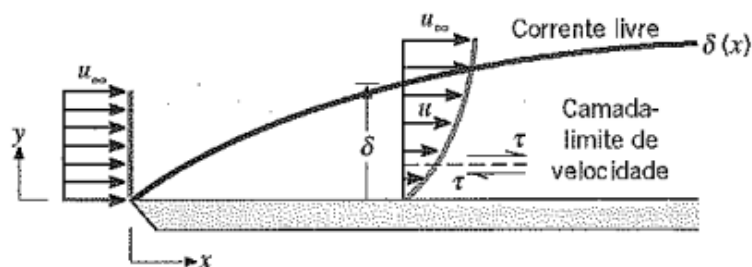
## 2.3 ESCOAMENTO

### 2.3.1 Camadas-limites de velocidade laminar e turbulenta

Em um determinado escoamento, as partículas de um fluido que estão sujeitas ao contato com uma superfície passam a apresentar velocidade nula, dessa forma as mesmas atuam no retardamento das camadas limites adjacentes de maneira sucessiva, até que o efeito se torne desprezível a uma distância  $\delta$  da superfície (INCROPERA, *et al*, 2008).

Segundo INCROPERA, *et al*. (2008), o efeito que ocasiona o retardamento do fluido está associado as tensões de cisalhamento  $\tau$  que agem em planos paralelos a velocidade do fluido, conforme o efeito esquematizado na Figura 20. “Com o aumento da distância  $y$  da superfície, o componente  $x$  da velocidade do fluido,  $u$ , deve, então, aumentar até atingir o valor da corrente  $u_{\infty}$ ” (INCROPERA, *et al*, 2008, p.221).

**Figura 20** – Desenvolvimento da camada-limite da velocidade em uma placa plana.



Fonte: INCROPERA (2008).

<sup>7</sup> O símbolo  $\infty$  é utilizado para indicar a corrente livre, fora da região da camada limite.

O módulo de  $\delta$  é definido como a espessura da camada-limite, onde é calculada para o valor de  $\gamma$  quando  $u = 0,99u_\infty$ . O perfil de velocidade apresentado na camada-limite, refere-se à variação de velocidade  $u$  em função de  $\gamma$ . O escoamento de um fluido pode ser caracterizado por duas regiões distintas, a primeira representada como a região onde prevalece a camada-limite, na qual os gradientes de velocidades e tensões cisalhantes assumem altos módulos, e por último, a região onde a influência do gradiente de velocidade e tensão cisalhante pode ser desprezada (INCROPERA, *et al*, 2008).

O coeficiente de atrito local pode ser utilizado como parâmetro para determinar o arrasto viscoso na superfície sujeita ao escoamento externo, apresentado na Equação 2.6.

$$C_f = \frac{\tau_s}{\frac{\rho u_\infty^2}{2}} \quad \text{Eq. 2.6}$$

onde

$C_f$  é o coeficiente de atrito local,  $\tau_s$  é a tensão cisalhante [N/m<sup>2</sup>],  $u_\infty$  é a velocidade da corrente livre [m/s] e

$\rho$  é a massa específica do fluido [kg/m<sup>3</sup>].

Supondo um fluido Newtoniano, a tensão de cisalhamento que age na superfície pode ser determinada em função do gradiente de velocidade na superfície, conforme apresentado na Equação 2.7.

$$\tau_s = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad \text{Eq. 2.7}$$

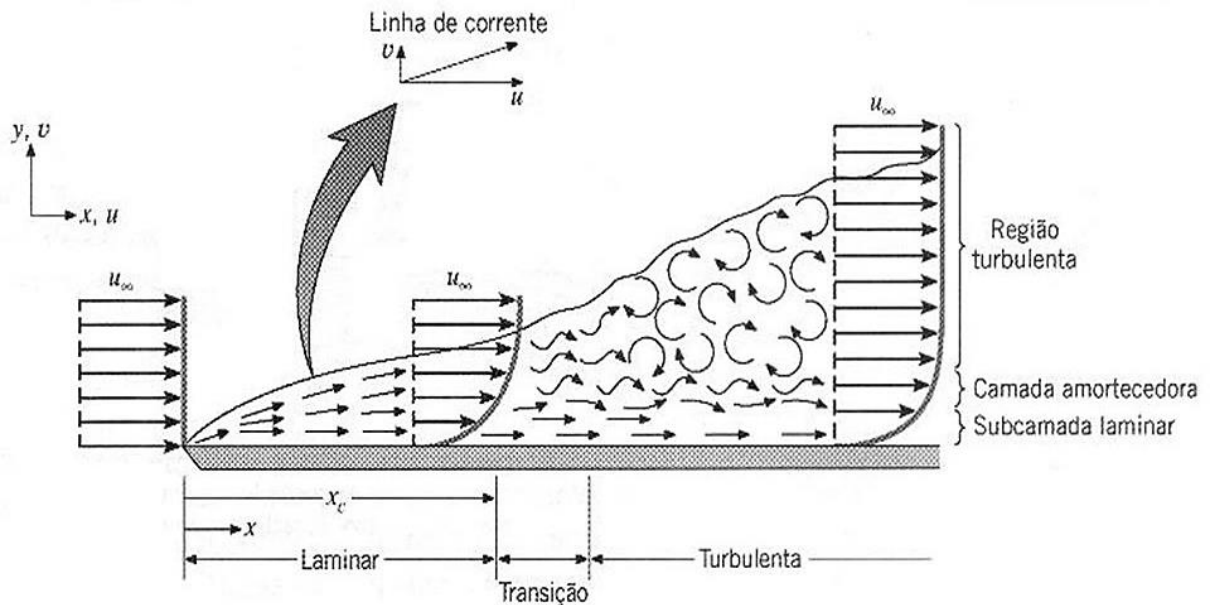
onde

$\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido [Ns/m<sup>2</sup>] e  $\frac{\partial u}{\partial y}$  é o gradiente de velocidade.

De acordo com INCROPERA, *et al* (2008), e considerando uma determinada camada-limite de velocidade, o gradiente de velocidade da superfície varia em função da distância  $x$  da aresta frontal da placa, desse modo tal efeito ocorre também para a tensão cisalhante da superfície e para o coeficiente de atrito.

Comumente, em situações de escoamento que apresentam a condição de camada-limite de velocidade, ocorrem simultaneamente as condições de escoamento laminar e turbulento, como representado na Figura 21. Segundo INCROPERA, *et al*, (2008, p.227), “o movimento do fluido é caracterizado por componentes de velocidade nas direções  $x$  e  $y$ ”.

**Figura 21** – Desenvolvimento da camada-limite de velocidade sobre uma placa plana.



Fonte: INCROPERA (2008).

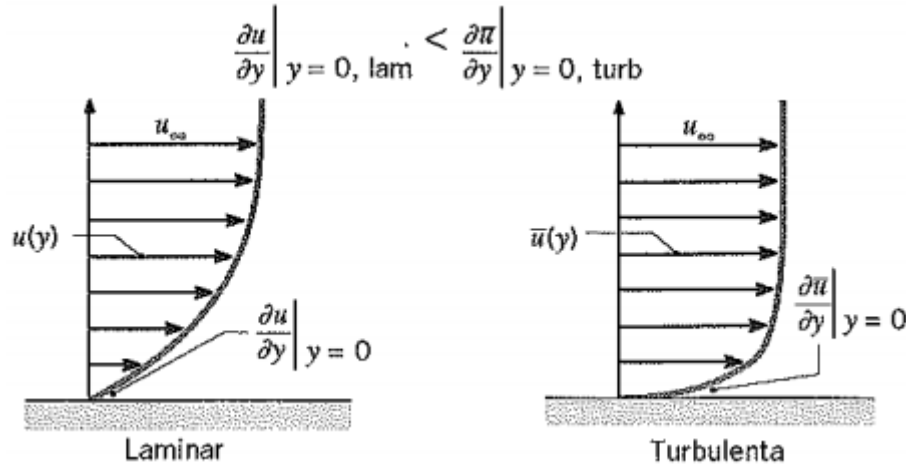
Observa-se na Figura 21 que o fluido se afasta da superfície, tal situação ocorre devido à desaceleração do fluido próximo a parede em função do crescimento da camada-limite na direção  $x$ .

Na parcela da camada-limite laminar o fluido comporta-se de modo ordenado, onde torna-se possível identificar nitidamente o desenvolvimento das linhas de corrente. Segundo INCROPERA, *et al*, (2008), o comportamento laminar do fluido permanece até o limite de transição ser atingido, onde inicia a transformação das condições laminares para as turbulentas.

O escoamento na camada-limite turbulenta comporta-se de maneira completamente desordenada, onde o movimento do fluido é caracterizado como tridimensional e aleatório. Segundo INCROPERA, *et al*, (2008), o fluido turbulento apresenta alta velocidade e desloca-se na direção da superfície do sólido, transferindo assim o fluido que apresenta velocidade inferior para a região superior de corrente livre.

Ainda de acordo com INCROPERA, *et al*, (2008), qualquer ponto na região interior da camada-limite turbulenta está sujeito a flutuações de velocidade e de pressão. A Figura 22 esquematiza a comparação entre os perfis de velocidade das camadas limites laminar e turbulenta. Observa-se que o perfil de velocidade turbulento é aproximadamente plano em função da mistura do fluido que ocorre na região dos vórtices, o que torna  $\tau_s$  maior para tal situação.

**Figura 22** – Comparação dos perfis de velocidade nas camadas-limite de velocidade laminar e turbulenta para a mesma velocidade na corrente livre.



Fonte: INCROPERA (2008).

A mudança de comportamento da região laminar para a turbulenta pode ocorrer naturalmente devido as interações das estruturas transientes do escoamento, ou devido a pequenos distúrbios existentes no interior da camada limite (INCROPERA, *et al*, 2008). Os distúrbios podem ser oriundos das flutuações das correntes livres, rugosidades da superfície ou vibrações que interfiram no escoamento.

Segundo INCROPERA, *et al*, (2008, p.228), “o início da turbulência depende da amplificação dos mecanismos de gatilho (distúrbios) na direção do escoamento do fluido, o que, por sua vez, depende do número de Reynolds<sup>8</sup>. O número de Reynolds<sub>8</sub> é um parâmetro adimensional que pode ser determinado através da Equação 2.8.

$$R_{ex} = \frac{\rho u_{\infty} X}{\mu} \quad \text{Eq. 2.8}$$

onde

$R_{ex}$  é o número de Reynolds para uma placa plana,

$X$  é o comprimento característico [m],

$\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido [Ns/m<sup>2</sup>],

$u_{\infty}$  é a velocidade da corrente livre [m/s] e

$\rho$  é a massa específica do fluido [kg/m<sup>3</sup>].

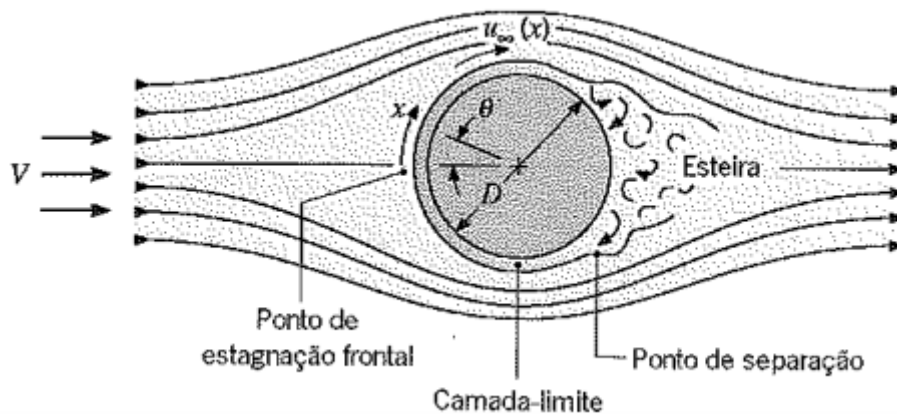
<sup>8</sup> Para uma placa plana o comprimento característico é dado por  $X$ .

O número de Reynolds representa a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas. Segundo INCROPERA, *et al*, (2008, p.228), “para um Reynolds pequeno, as forças de inércia serão insignificantes em relação as forças viscosas, dessa forma os distúrbios são dissipados e o escoamento permanece laminar. Para um Reynolds alto as forças de inércia podem ser suficientes para amplificar os distúrbios e a transição para a turbulência ocorre.”

### 2.3.2 O cilindro em escoamento cruzado

Em um escoamento externo em relação ao eixo de um cilindro circular (Figura 23), ocorre o repouso do fluido da corrente livre no ponto de estagnação frontal. Segundo INCROPERA, *et al*, (2008), a partir de tal ponto a pressão decai com o aumento de  $x$ . Assim, as linhas de corrente e a camada-limite se desenvolvem em função da influência favorável do gradiente de pressão ( $\frac{dp}{dx} < 0$ ). Porém, na região a jusante do cilindro o desenvolvimento da camada-limite ocorre em condição de gradiente de pressão adversa ( $\frac{dp}{dx} > 0$ ), visto que a pressão assume seu módulo mínimo.

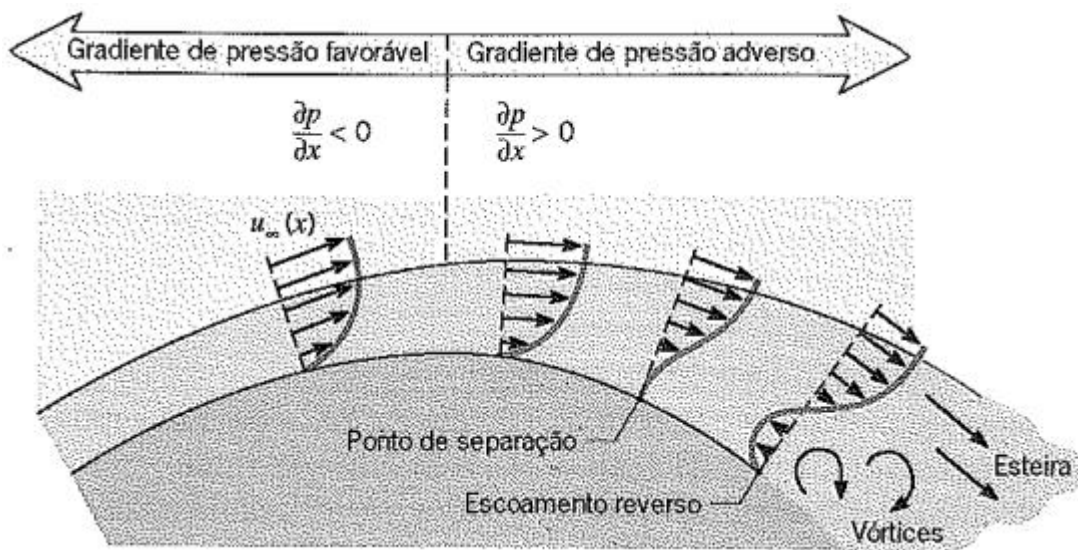
**Figura 23** - Formação e separação da camada-limite sobre um cilindro circular em escoamento cruzado.



Fonte: INCROPERA (2008).

Segundo INCROPERA, *et al*, (2008), em função de desaceleração do fluido, o gradiente de velocidade na superfície torna-se nulo  $\frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0}$  em determinado local. Tal coordenada é denominada de ponto de separação (Figura 24). O fluido próximo a superfície necessita de um módulo de momento suficiente a fim de vencer o gradiente de pressão e então continuar o movimento a jusante do cilindro.

**Figura 24** - Perfil de velocidade associado à separação sobre um cilindro circular em escoamento cruzado.

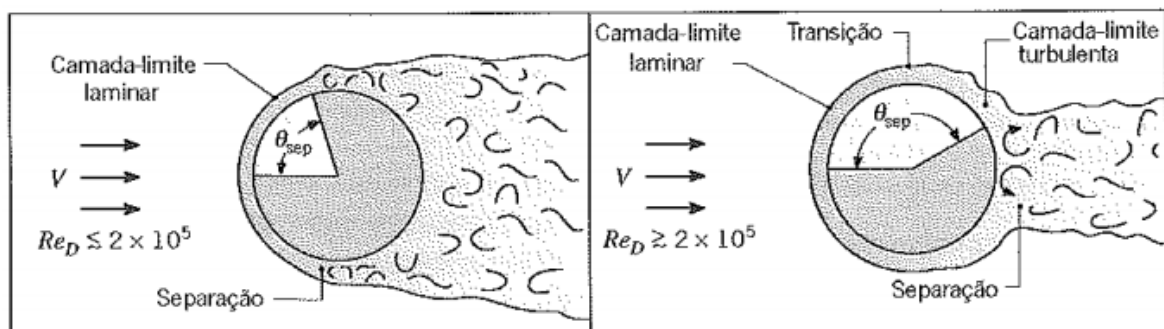


Fonte: INCROPERA (2008).

De acordo com INCROPERA, *et al*, (2008, p.265), “uma vez que o fluido, ao chegar continuamente a esse ponto, obstrui o escoamento na direção inversa, tem que haver a separação da camada-limite”. A situação descrita acima descreve o fenômeno de esteira, que ocorre na região a jusante, onde tal escoamento é caracterizado pela presença dos vórtices de turbulência. A transição da camada-limite é dada em função do número de Reynolds, onde é possível determinar a coordenada do ponto de separação

Na camada-limite turbulenta, o momento do fluido é superior comparando-o como o momento da camada-limite laminar, por isso espera-se que a transição detenha a ocorrência da separação. Segundo INCROPERA, *et al*, (2008, p.265), “se  $Re_D \leq 2 \times 10^5$ , a camada limite permanece laminar e a separação ocorre em  $\theta \cong 80^\circ$  (Figura 25), porém se  $Re_D \geq 2 \times 10^5$ , ocorre transição na camada-limite e a separação é retardada até  $\theta \cong 140^\circ$ ”.

**Figura 25** - O efeito da turbulência na separação.



Fonte: LOPEZ (2012).

Com o aumento do número de Reynolds, o efeito da separação e o arraso se tornam demasiadamente importantes, dessa forma é importante analisar as consequências ocasionadas a partir da separação do fluxo.

## 2.4 GERADORES DE VÓRTICES

As turbinas eólicas de pequeno porte operam em ventos com baixas velocidades, onde o fluxo pode não apresentar energia cinética suficiente a fim de vencer o gradiente de pressão adverso, o que ocasiona o deslocamento e consequentemente o decréscimo de sustentação das pás.

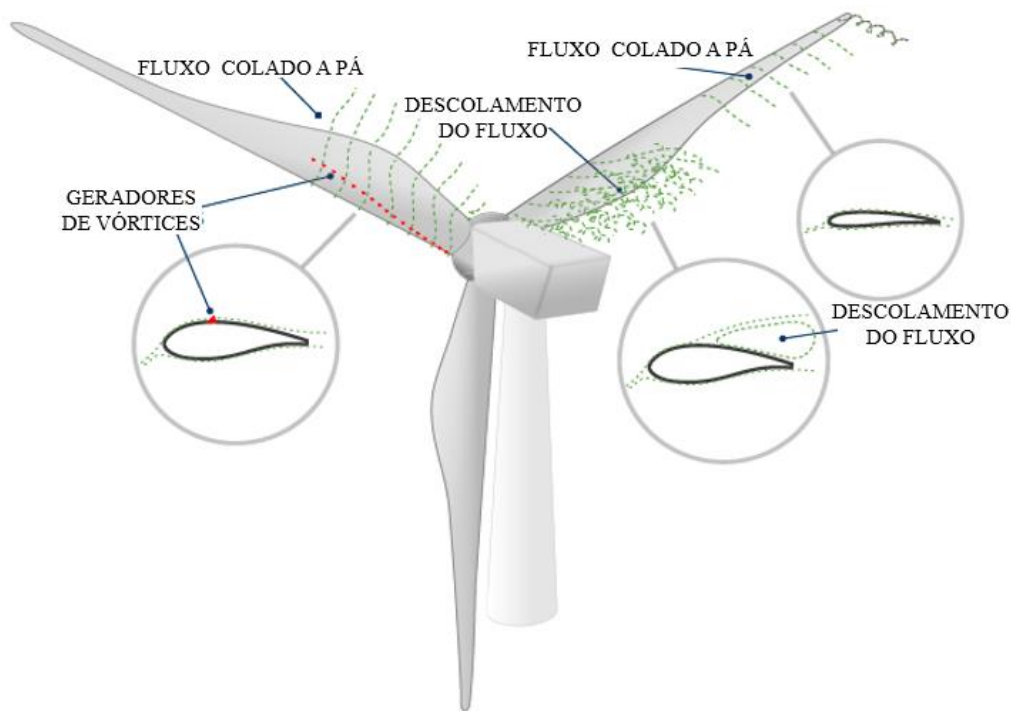
Os geradores de vórtices são dispositivos que podem ser utilizados com o intuito de amenizar os efeitos do descolamento, pois a partir da formação de turbulência o fluido adquire energia suficiente para vencer o gradiente de pressão adverso e retardar o descolamento do fluxo de ar.

O escoamento do ar através das pás das turbinas eólicas é influenciado por alguns fatores, tais como: rugosidade do material da superfície da pá e geometria do bordo de ataque. Esses fatores podem induzir a separação do fluxo de ar sobre a pá o que, consequentemente, acarreta na diminuição do desempenho aerodinâmico (SMART BLADE, s.d.).

Segundo SMART BLADE (s.d.) os geradores de vórtices são projetados com o intuito de atrasar o descolamento do ar em relação às pás e consequentemente elevar a eficiência da turbina eólica. A Figura 26 apresenta a esquematização dos geradores de vórtices acoplado ao aerogerador eólico.

De acordo com Griffin (1996) os geradores de vórtices são pequenos protótipos cuja finalidade é produzir corrente de turbulência, provocando assim uma mistura entre o ar e a camada-limite da superfície. Com o aumento da energia, a camada-limite suporta maiores gradientes de pressões adversos, retardando assim a separação do fluxo.

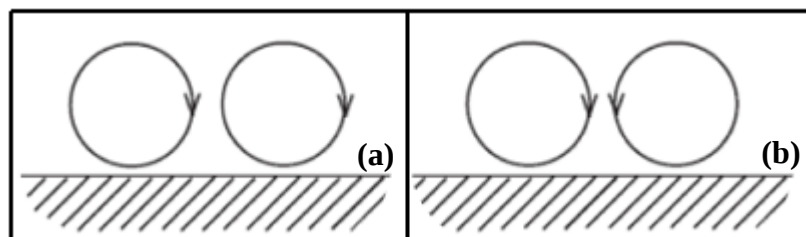
**Figura 26** – Comportamento do escoamento de uma turbina eólica acoplado aos dispositivos de gerador de vórtices.



Fonte: Adaptado de (SMART BLADE, s.d.).

Os geradores de vórtices podem ser classificados basicamente em dois tipos, são eles: matriz co-rotativa, onde ambos os vórtices produzidos se encontram no mesmo sentido de rotação e matriz contra-rotativa, onde os pares de vórtices apresentam direções opostas de rotação (GRIFFIN, 1996). A Figura 27 indica a direção de rotação dos vórtices para os tipos de matrizes apresentadas.

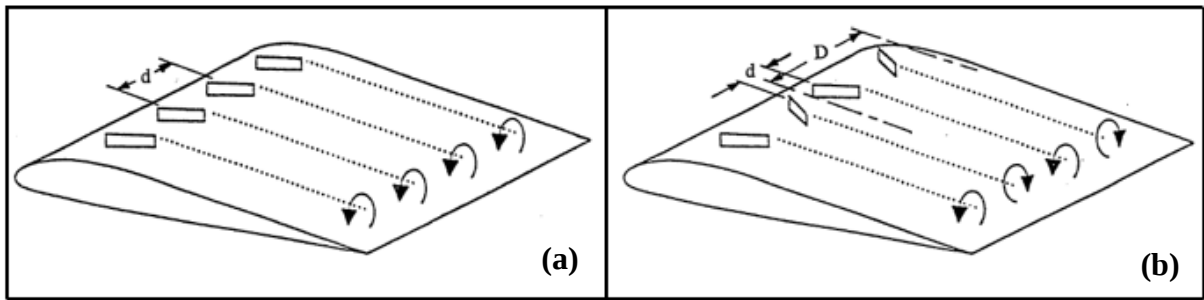
**Figura 27** – Direção de rotação dos vórtices para matriz co-rotativa (a) e matriz contra-rotativa (b).



Fonte: Adaptado de (LOGDBERG, 2006).

A Figura 28 apresenta a geometria dos modelos de geradores de vórtices citados. Segundo Griffin (1996), para a matriz co-rotação o principal parâmetro a ser determinado é a distância  $d$  entre os geradores de vórtices que formam um par. Para a matriz contra-rotação é necessário informar o módulo de  $d$ , como também o espaçamento  $D$  entre cada par dos geradores.

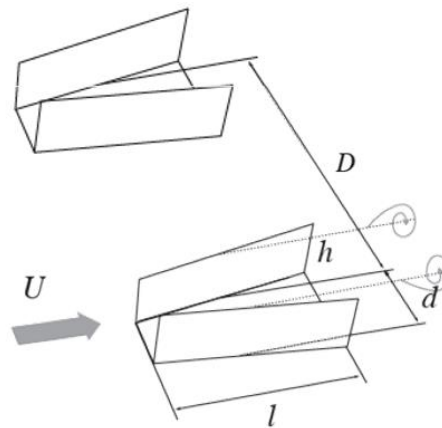
**Figura 28** – Parâmetros de espaçamento das matrizes de vórtices co-rotativa (a) e contra-rotativa (b).



Fonte: Adaptado de (GRIFFIN, 1996).

Outros parâmetros geométricos que devem ser definidos para ambos os geradores de vórtices são: a altura  $h$ , o comprimento  $l$  e o ângulo de ataque dos mesmos, como esquematizado na Figura 29. A Tabela 01 apresenta as principais relações geométricas dos geradores de acordo com o trabalho de Logdberg (2006).

**Figura 29** – Principais dimensões do gerador de vórtice de matriz contra-rotativa.



Fonte: LOGDBERG (2006).

**Tabela 01 - Parâmetros geométricos dos geradores de vórtices (G.V)**

| Definição do parâmetro           | Símbolo        | Relação                                                  |
|----------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------|
| Altura do G.V                    | $h$            | Intervalo entre 10% a 50 % da espessura da camada limite |
| Distância entre cada par dos G.V | $D$            | $D \approx 10 \times h$                                  |
| Distância entre os G.V           | $d$            | $d \approx D/4$                                          |
| Comprimento dos G.V              | $l$            | $l \approx 4 \times h$                                   |
| Ângulo dos G.V                   | $\alpha_{G.V}$ | Intervalo entre 15° a 25°                                |

Fonte: Adaptado de (LOGDBERG, 2006).

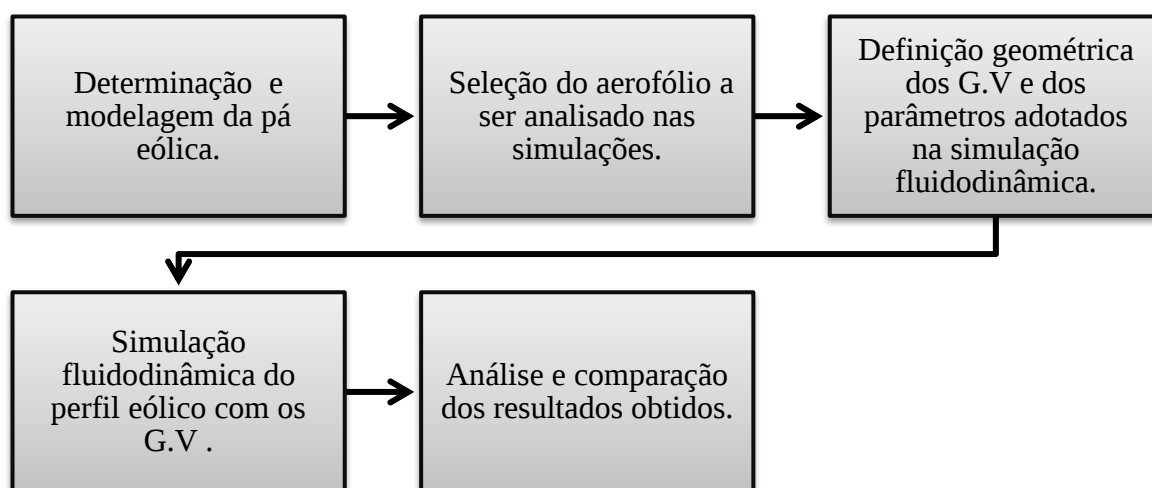
Segundo o trabalho apresentado por Griffin (1996) os geradores de vórtices apresentam uma influência positiva, em relação a elevação da sustentação, aplicado ao aerofólio S815, na região de ângulo de ataque pertencente ao intervalo entre  $8^{\circ}$  a  $20^{\circ}$ .

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado na Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Caraúbas-RN, onde o mesmo foi dividido em duas etapas principais, na primeira fase foi realizada toda pesquisa bibliográfica necessária, a fim de fundamentar a metodologia abordada e os parâmetros adotados. Na segunda etapa, realizada com o auxílio do programa computacional Autodesk CFD, foi executado a simulação fluidodinâmica do aerofólio definido, com o intuito de analisar e comparar os efeitos geométricos dos geradores de vórtices.

A Figura 30 apresenta o diagrama referente as etapas da metodologia que foram adotadas.

**Figura 30** – Fluxograma das etapas adotadas para realização do trabalho.



Fonte: O autor (2018).

#### 3.1 DETERMINAÇÃO E MODELAGEM DA PÁ EÓLICA

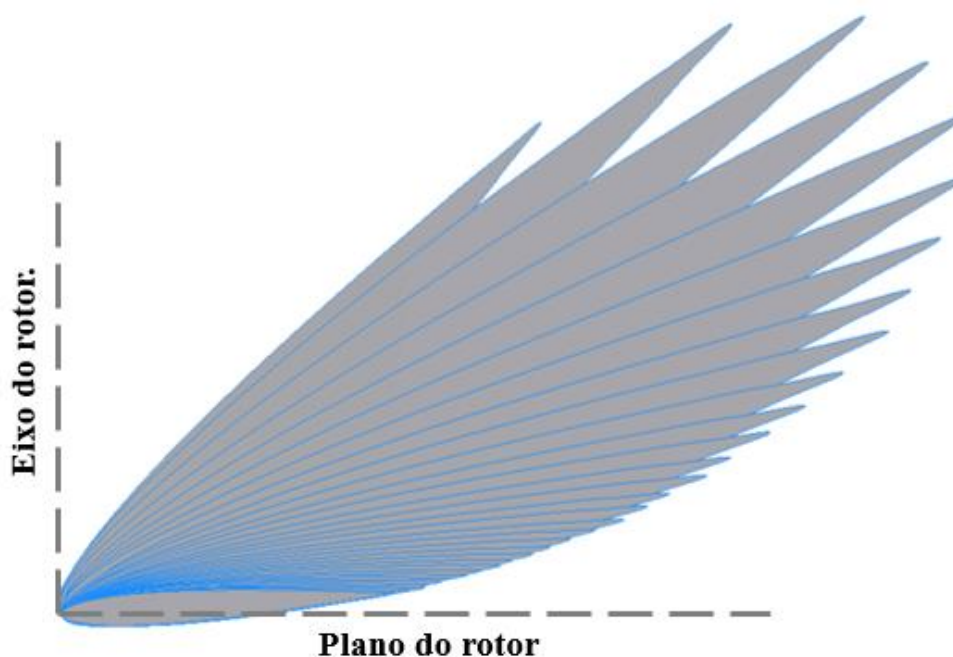
O modelo da pá eólica definido para a análise do presente trabalho, foi o perfil NACA 0010, onde o projeto da mesma foi desenvolvido na instituição de ensino citada. Dentre as principais características adotadas, encontram-se:

- Perfil NACA 0010;
- Raio da pá de 1m;
- Velocidade nominal de 10 m/s;
- Rotação nominal de aproximadamente ~477 rpm, 50 rad/s;

- Coeficiente de potência,  $C_p$ , de 0,4;
- Rendimento de 80%;
- Potência nominal de 630 W.

O projeto da pá eólica foi constituído por 32 seções de perfis, nas quais foram determinados suas respectivas cordas e angulações. A Figura 31 apresenta a esquematização dos perfis e suas referidas características.

**Figura 31-** Representação da variação da corda e da angulação dos perfis do aerogerador NACA 0010.

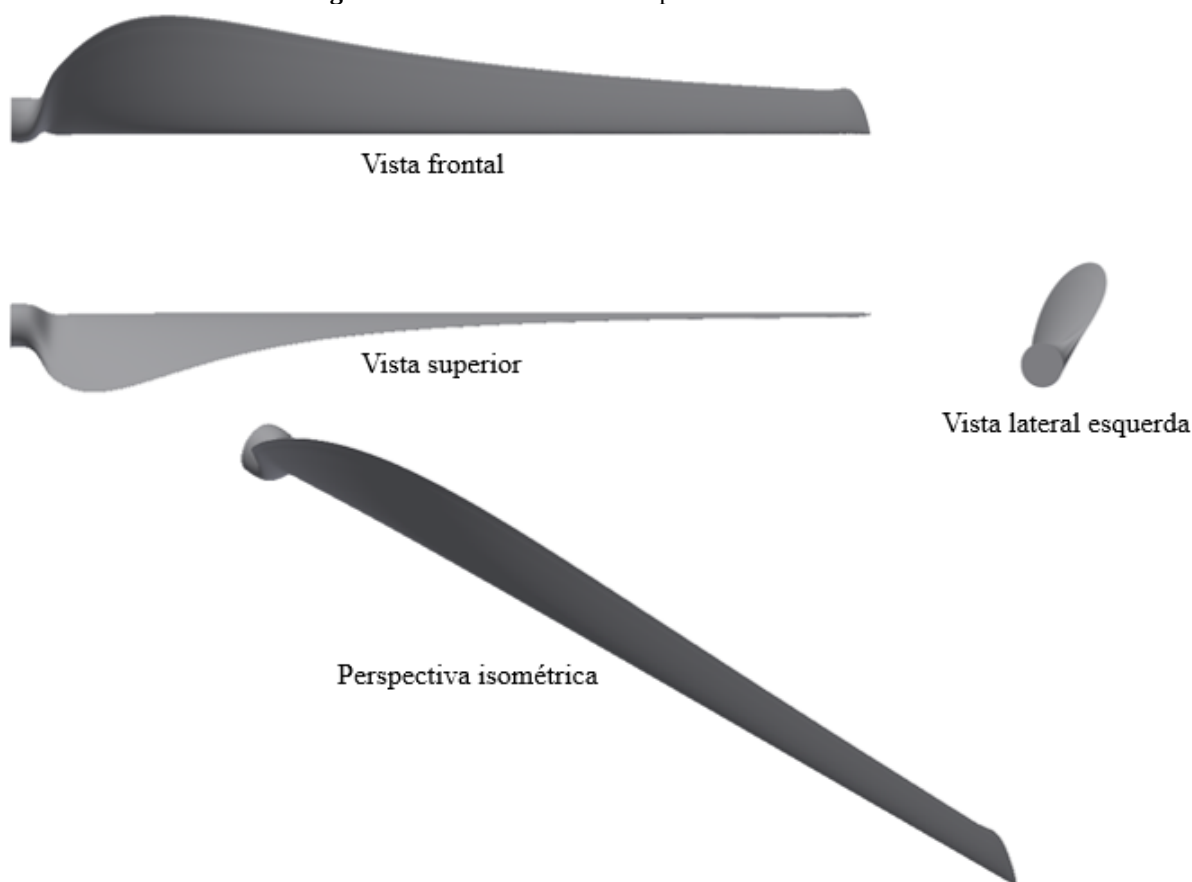


Fonte: O autor (2018).

A Figura 32 apresenta a modelagem 3D da pá eólica, realizada através do *software* Inventor, e suas respectivas vistas. Todos os parâmetros utilizados para a representação da pá, como os ângulos de ataque e fluxo, as cordas, entre outros, encontram-se no **ANEXO A** do presente trabalho.

Posterior a etapa de modelagem, foram realizadas inúmeras simulações com o intuito de definir os parâmetros adequados ao projeto, com o objetivo de garantir resultados mais precisos e confiáveis. Após a determinação das especificações necessárias deu-se início a simulação computacional.

**Figura 32** – Diferentes vistas da pá eólica NACA 0010.



Fonte: O autor (2018).

### 3.2 SELEÇÃO DO AEROFÓLIO

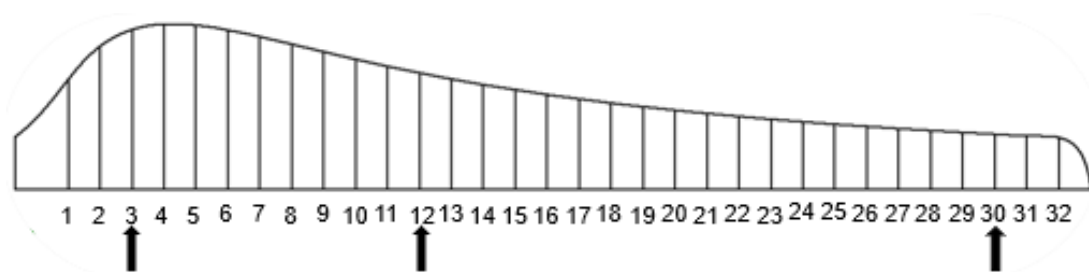
Devido à limitação computacional do laboratório da universidade, tornou-se necessário realizar uma simplificação adequada da pá eólica NACA 0010. Para determinar os parâmetros apropriados a serem utilizados na plataforma do *software* Autodesk CFD, foram realizadas diversas investigações variando o refinamento da malha, as condições de velocidade, corda, ângulo, dentre outras, a fim de definir os últimos critérios e iniciar as simulações.

Após comparação de diversos critérios, decidiu-se utilizar a simplificação da pá através dos aerofólios da mesma, desse modo foram selecionados 3 perfis da pá a fim de realizar 4 simulações. A primeira simulação foi realizada considerando os efeitos da torção. Desse modo, o ângulo de ataque de  $4^\circ$ , calculado no projeto é comum para todos os perfis da pá. Optou-se por escolher o perfil 30, pois o mesmo apresenta um dos valores máximos do raio e consequentemente maior velocidade relativa e número de Reynolds, dessa forma o aerofólio 30 apresenta maior probabilidade de ocorrência de turbulência e descolamento.

As simulações posteriores foram realizadas desconsiderando os efeitos da torção, dessa forma foi utilizado como parâmetro da simulação o ângulo de fluxo, onde o mesmo varia em função do perfil analisado. Os aerofólios selecionados foram os perfis 3 com ângulo de fluxo de  $40,63^\circ$  e perfil 30 com angulação de  $8,1^\circ$ , uma vez que ambos estão localizados nas extremidades da pá eólica. O perfil 12 com ângulo de  $18,35^\circ$ , foi o último a ser adotado, onde o mesmo encontrava-se localizado na região central e apresentava uma angulação de fluxo média da pá.

A Figura 33 esquematiza a configuração dos 32 perfis da pá NACA 0010 e indica os aerofólios que foram escolhidos para análise.

**Figura 33** – Representação dos aerofólios da pá eólica NACA 0010.



Fonte: O autor (2018).

Após a determinação dos parâmetros e dos perfis a serem utilizados na simulação, foram realizadas as respectivas modelagens, assumindo uma largura de 150 mm para os aerofólios, com o intuito de amenizar o efeito das pontas das asas.

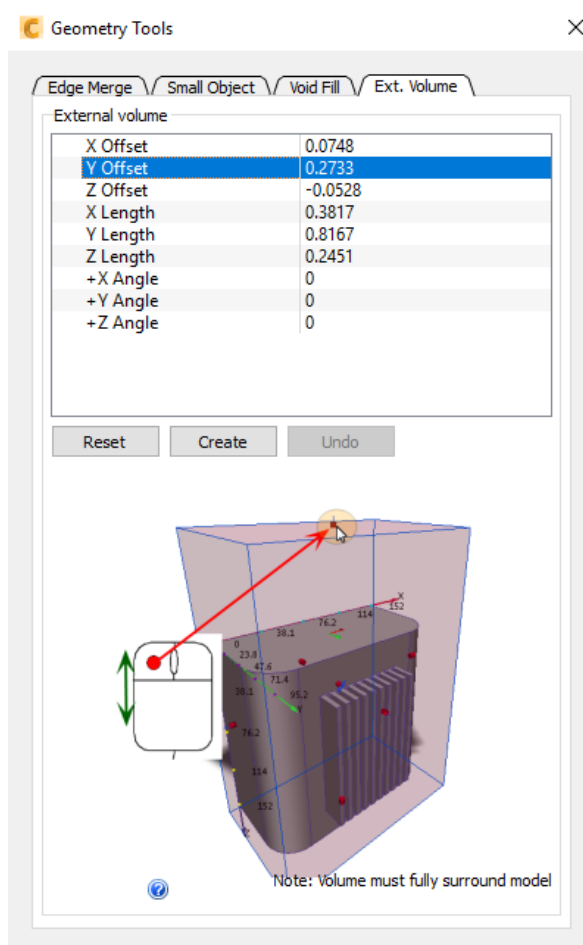
### 3.3 DEFINIÇÃO DOS GERADORES DE VÓRTICES E DOS PARÂMETROS ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES FLUIDODINÂMICAS

Baseados na literatura abordada, foram definidas as duas geometrias dos geradores de vórtice a serem utilizadas nas simulações, são elas: matriz contra-rotativa e matriz co-rotativa. Os valores numéricos das dimensões baseiam-se em função do resultado da espessura da camada-limite, obtido através das simulações computacionais, dessa forma suas grandezas são aproximações empíricas que variam em função das condições abordadas no projeto. A posição dos geradores de vórtices, foi adotada como 25% da corda a partir do bordo de ataque, uma vez que os dispositivos devem estar posicionados a montante da perturbação.

Fundamentado no trabalho apresentado por Logdberg (2006), a altura do gerador de vórtice foi admitida como 10 % da espessura da camada-limite, simulada para o perfil sem o dispositivo, e o ângulo de ataque do G.V definido como 20°.

O domínio definido para realizar as simulações dos perfis selecionados, foi adotado em função da geometria do perfil, de modo a englobar a região do escoamento onde apresentaria maiores perturbações. O domínio foi padronizado para todas as simulações fluidodinâmicas no *software* CFD. A Figura 34 apresenta a janela com as configurações, indicando os valores numéricos utilizados.

**Figura 34** - Configuração adotada para o domínio das simulações.

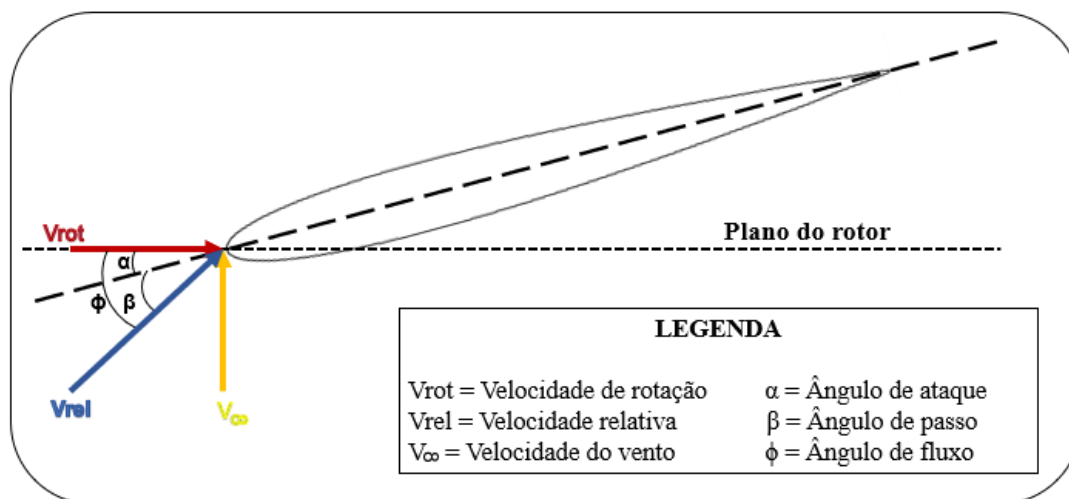


Fonte: O autor (2018).

A velocidade de entrada do vento foi determinada em função da condição das turbinas eólicas de pequeno porte, assumindo uma condição crítica, onde o fluxo de ar apresenta uma velocidade de 3 m/s. Considerou-se a influência da angulação de fluxo local, dessa forma, foi calculada a velocidade relativa a fim de garantir uma incidência no perfil a um ângulo de ataque de 4°. A velocidade relativa foi utilizada como um dos parâmetros de entrada nas simulações

realizadas dentre os perfis selecionados. A Figura 35 ilustra a relação existente entre as velocidades e os ângulos.

**Figura 35** – Relação entre as velocidades e as angulações.



Fonte: O autor (2018).

A velocidade de rotação foi definida a partir da Equação 3.1

$$\mathbf{Vrot} = \mathbf{R}\omega \quad \text{Eq.3.1}$$

onde:

R é o raio do perfil e

$\omega$  é a rotação do rotor.

A velocidade relativa foi determinada através da aplicação do teorema de Pitágoras (Equação 3.2).

$$\mathbf{Vrel} = \sqrt{\mathbf{V}_{\infty}^2 + \mathbf{Vrot}^2} \quad \text{Eq.3.2}$$

A Tabela 02 apresenta os valores das velocidades de rotação e relativa, determinados para os perfis selecionados, assumindo a velocidade do vento de 3 m/s e a rotação do rotor como 15 rad/s.

**Tabela 02 - Velocidades de rotação e relativa dos aerofólios selecionados**

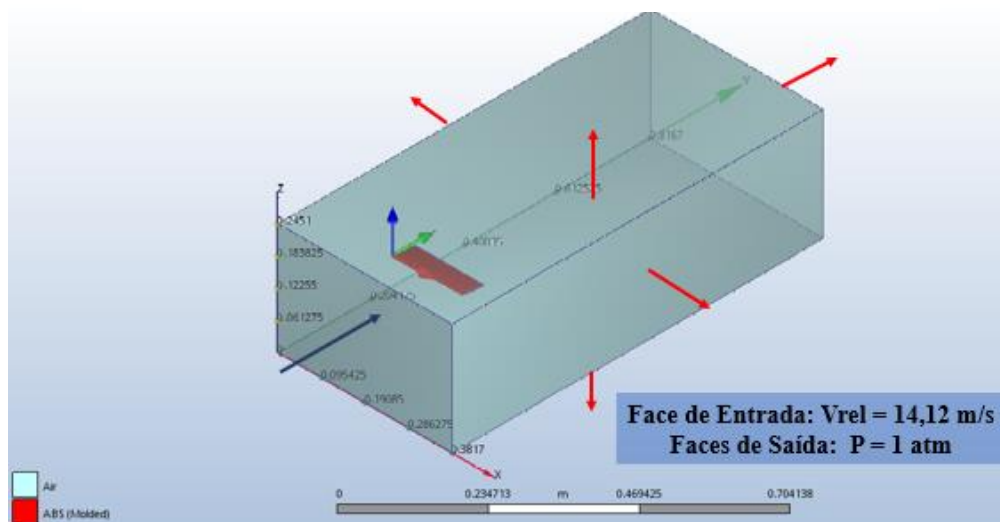
| Identificação do perfil                 | Raio (m) | Vrot (m/s) | Vrel (m/s) |
|-----------------------------------------|----------|------------|------------|
| Perfil 30 com ângulo de ataque de 4°    | 0,92     | 13,8       | 14,12      |
| Perfil 3 com ângulo de fluxo de 40,63°  | 0,11     | 1,65       | 3,42       |
| Perfil 12 com ângulo de fluxo de 18,35° | 0,38     | 5,7        | 6,44       |
| Perfil 30 com ângulo de fluxo de 8,1°   | 0,92     | 13,8       | 14,12      |

Fonte: O autor (2018).

As condições de contorno do domínio foram determinadas em função das variações de velocidades para cada perfil selecionado e da pressão do sistema, dessa forma, a face frontal apresentou a condição de entrada como a velocidade relativa do fluxo de ar, e as demais faces determinaram as condições de saída, onde a pressão absoluta adotada foi de 1 atm.

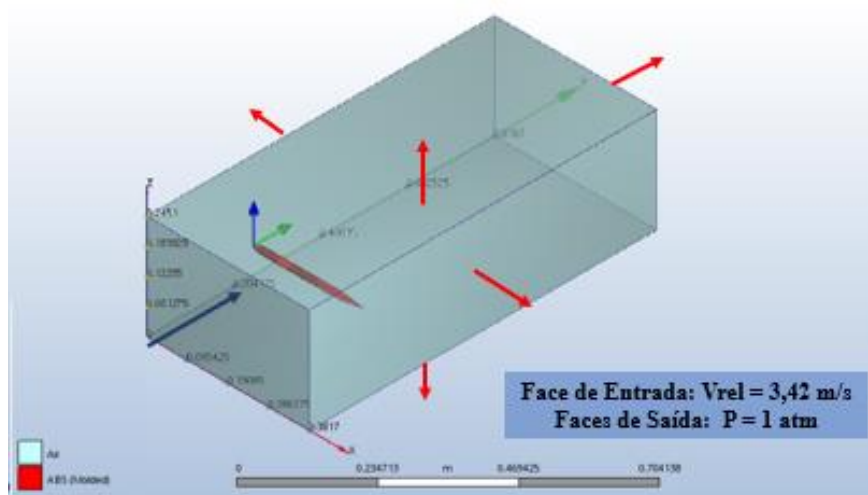
As Figuras 36 à 39 apresentam as configurações de entrada e saída adotadas no domínio para cada um dos aerofólios selecionados.

**Figura 36** - Domínio da simulação para o perfil 30 com ângulo de ataque de  $4^\circ$ .



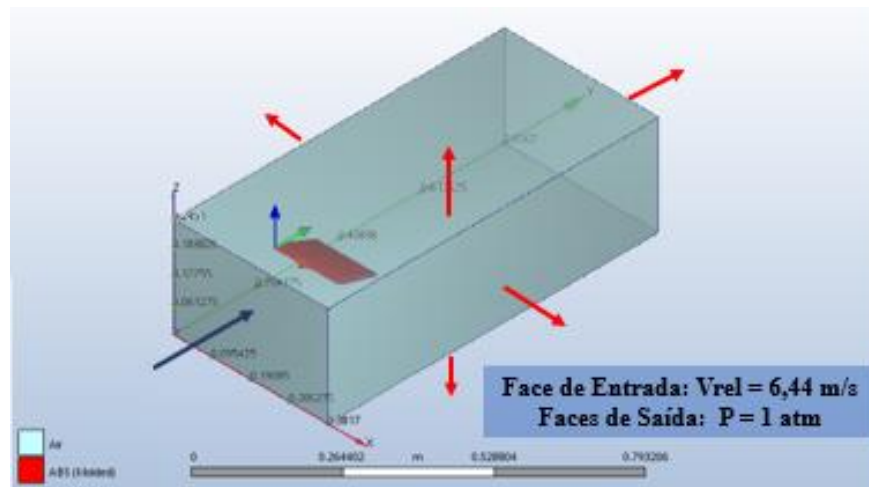
Fonte: O autor (2018).

**Figura 37** - Domínio da simulação para o perfil 3 com ângulo de fluxo de  $40,63^\circ$ .



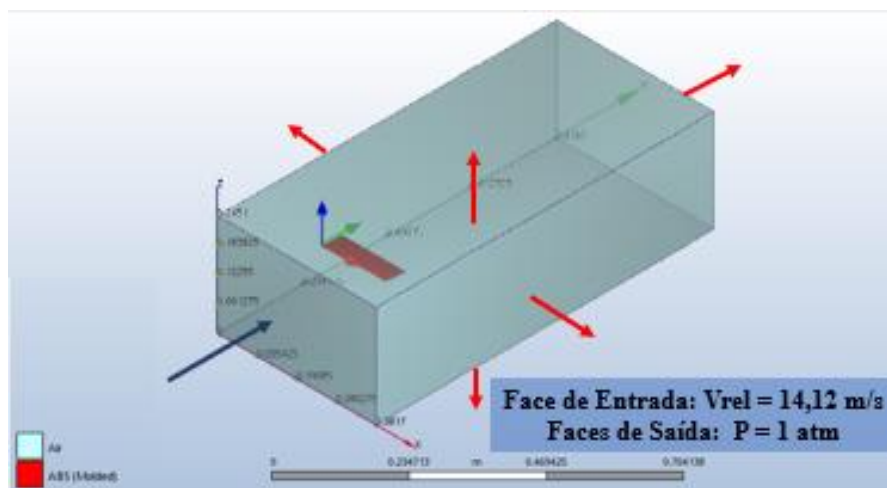
Fonte: O autor (2018).

**Figura 38** - Domínio da simulação para o perfil 12 com ângulo de fluxo de  $18,35^\circ$ .



Fonte: O autor (2018).

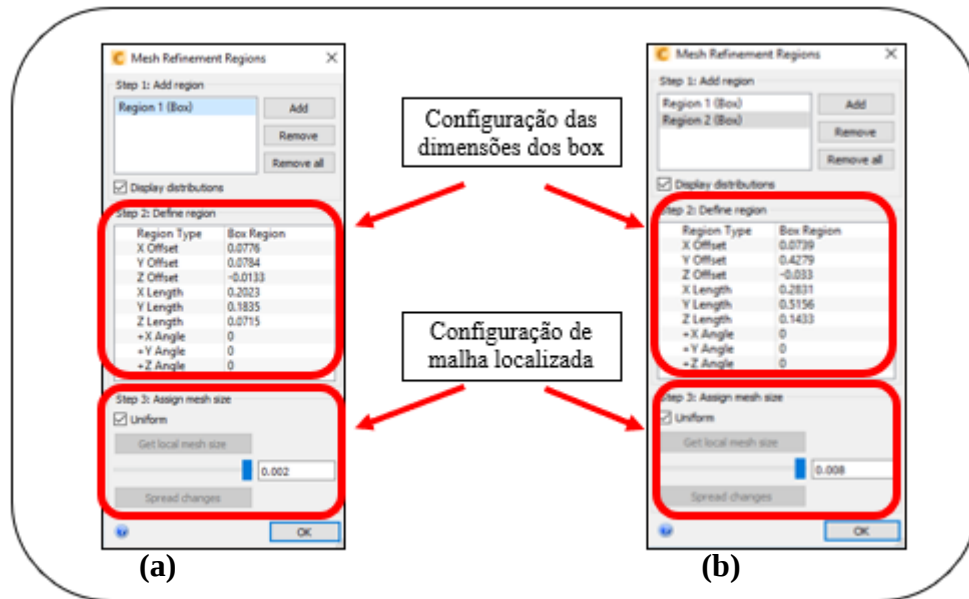
**Figura 39** - Domínio da simulação para o perfil 30 com ângulo de fluxo de  $8,1^\circ$ .



Fonte: O autor (2018).

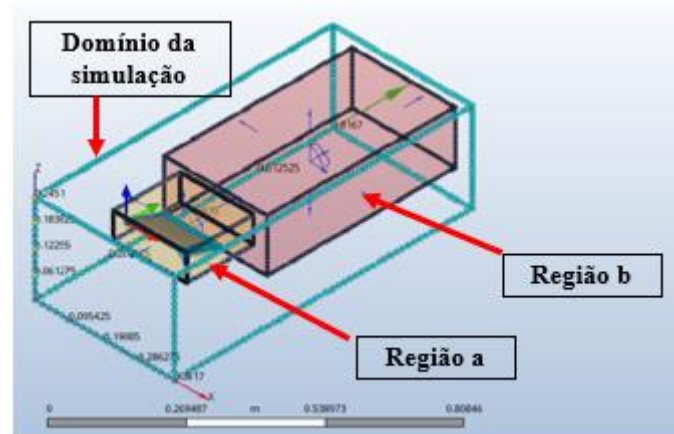
A criação da *mesh* foi realizada a partir da função de geração automática oferecida pelo próprio software. Foi aplicada também a função de refinamento da malha: *surface refinement*, com o intuito de garantir um melhor refinamento na superfície do aerofólio. A fim de obter resultados mais precisos do comportamento do escoamento próximo ao perfil, foram criados dois boxes, onde o primeiro ficou localizado na região de contorno do aerofólio e o segundo na seção de saída do bordo de fuga até próximo ao final do domínio. Os parâmetros utilizados foram adotados para todas as simulações. As Figuras 40 e 41 ilustram as configurações de box citadas.

**Figura 40** - Configuração dos boxes utilizados na região do perfil **(a)** e na região posterior ao mesmo **(b)**.



Fonte: O autor (2018).

**Figura 41** - Localização dos boxes configurados dentro do domínio da simulação.



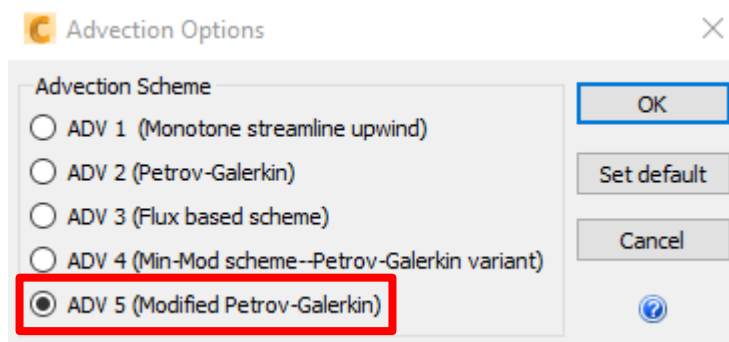
Fonte: O autor (2018).

Após concluída as configurações citadas acima foram realizadas as especificações do *solver* na plataforma do software CFD, adotou-se a condição do fluido como regime incompressível, utilizando o valor de 800 como a quantidade de iterações a serem realizadas pelo programa.

Foi selecionada a opção de avaliação de convergência automática, com o intuito de otimizar o tempo despendido nas simulações. Foi selecionado para o mecanismo numérico de quantidade de transporte a opção de ADV 5 (*Modified Petrov-Galerkin*) na função do *Advection Scheme*. Tal configuração possibilita uma estabilidade numérica moderada, menores difusões em malhas aleatórias, maiores precisões e estabilidade do fluxo, previsões de queda de pressão,

dentre outros. A opção selecionada é muito utilizada a nível mundial devido a apresentação de resultados mais conservadores (AUTODESK, s.d. A). A Figura 42 exibe a tela de configuração para o *Advection Scheme*.

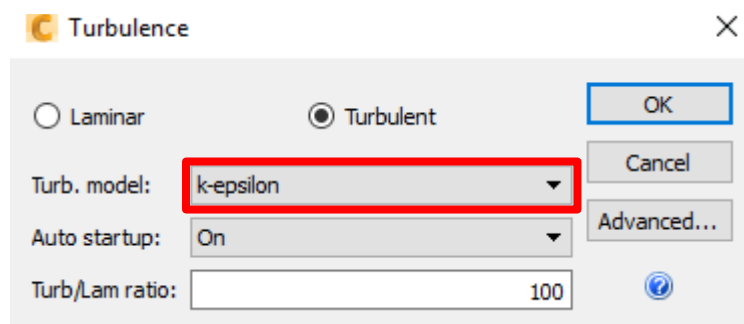
**Figura 42** – Tela de configuração para o Advection Scheme.



Fonte: O autor (2018).

O modelo de turbulência foi definido através da opção *k-epsilon*, uma vez que o mesmo corresponde ao padrão do *software*, apresenta menor robustez de processamento se comparado aos outros modelos, porém, garante bons resultados, além de malhas consideradas estáveis (AUTODESK, s.d. B). A Figura 43 exibe a tela de configuração para o *Model Turbulence* apresentado na plataforma do CFD.

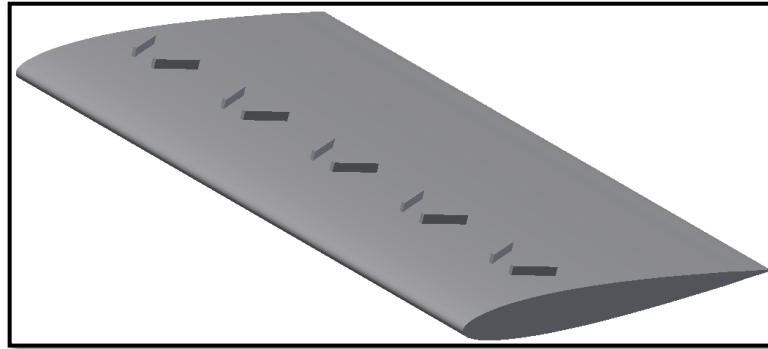
**Figura 43** – Tela de configuração para o Model Turbulence.



Fonte: O autor (2018).

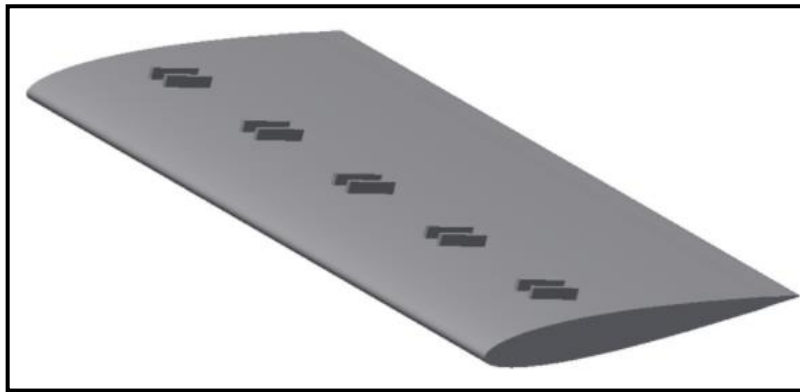
Após a seleção e escolha de todos os parâmetros necessários, deu-se início ao processo das simulações fluidodinâmicas para os perfis adotados, sem a utilização dos geradores de vórtices. Em seguida a escolha do perfil mais adequado, foram realizadas novas simulações com os G.V selecionados, a fim de obter dados para posteriores comparações. As Figuras 44 e 45 apresentam as modelagens do aerofólio com os geradores de turbulência de matriz contra-rotativa e matriz co-rotativa, respectivamente, ambos a 25% da corda do perfil.

**Figura 44** - Modelagem em 3D do aerofólio com os geradores de turbulência de matriz contra-rotativa.



Fonte: O autor (2018).

**Figura 45** – Modelagem em 3D do aerofólio com os geradores de turbulência de matriz co-rotativa.



Fonte: O autor (2018).

Por fim, os resultados obtidos por meio das simulações foram analisados a fim de identificar os efeitos da variação geométrica dos geradores de vórtices, analisando também a influência de tais dispositivos na eficiência das turbinas eólicas de pequeno porte.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

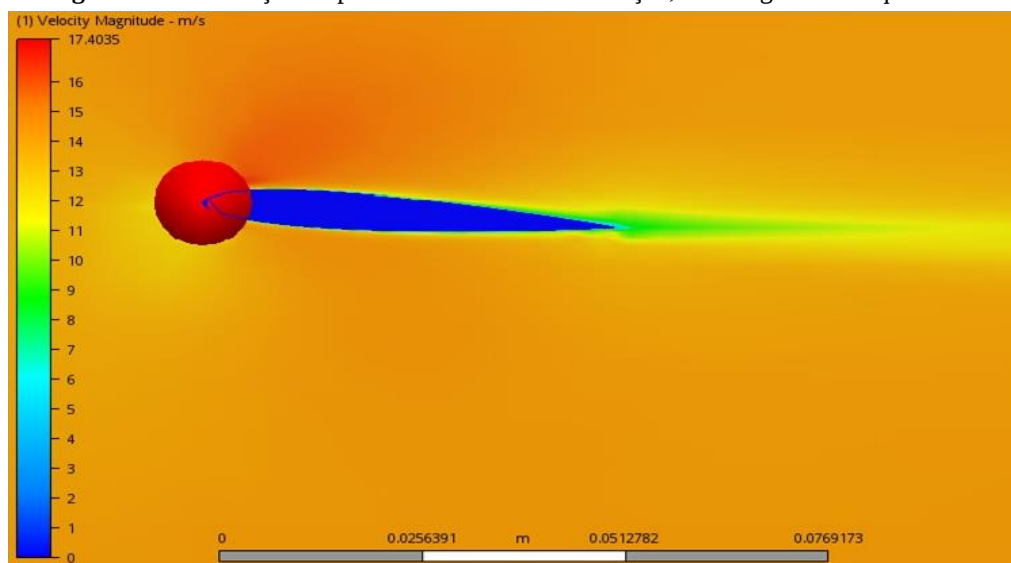
Seguindo a metodologia abordada foi utilizado o *software* Autodesk CFD, para realização das simulações fluidodinâmicas, após definir todos os parâmetros necessários no programa, deu-se início a simulação através dos cálculos das iterações até a convergência dos valores. A partir dos critérios estabelecidos na metodologia do presente trabalho, foi possível determinar, após todo procedimento computacional, os seguintes resultados:

### 4.1 ANÁLISE FLUIDODINÂMICA DOS PERFIS SELECIONADOS

De acordo com a metodologia aplicada foi selecionado o perfil 30, considerando os efeitos de torção, dessa forma o vento incide ao longo do comprimento da pá com um ângulo de  $4^\circ$ , que corresponde ao ângulo de ataque do respectivo projeto. Tal perfil foi selecionado uma vez que apresenta maior raio e consequentemente máxima velocidade, dessa forma o mesmo encontra-se sujeito a maior probabilidade de formação de esteira.

A análise foi realizada com o intuito de verificar o comportamento do fluxo de ar e determinar se o mesmo apresenta viabilidade para a aplicação dos geradores de vórtices. A Figura 46 apresenta os resultados obtidos, em função dos parâmetros já determinados, relacionando o comportamento do escoamento, da camada-limite e das velocidades.

**Figura 46** – Simulação do perfil 30 considerando a torção, com ângulo de ataque de  $4^\circ$ .



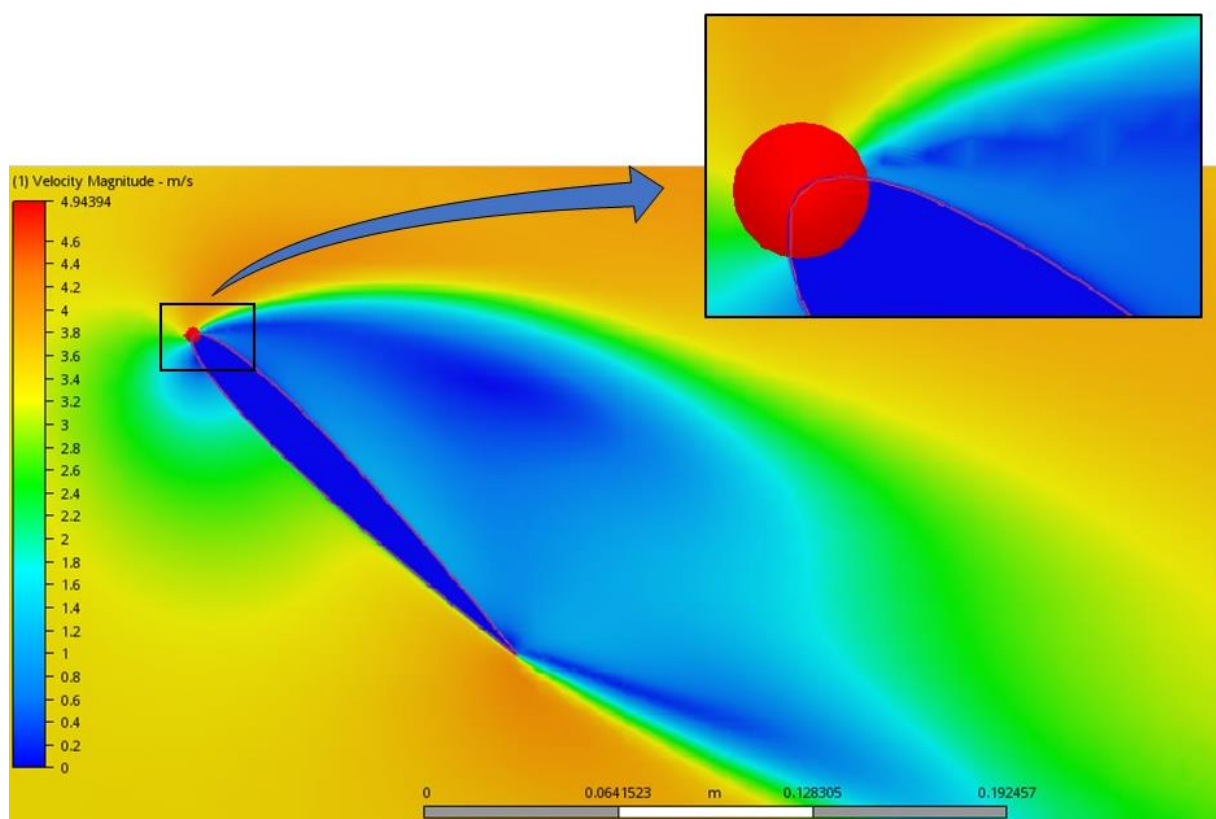
Fonte: O autor (2018).

De acordo com os resultados exibidos na Figura 46 pode-se constatar que apesar do perfil apresentar a condição de maior velocidade relativa, o escoamento do fluido não indicou perturbação suficiente, a fim de justificar a utilização dos geradores de vórtices, uma vez que a variação de velocidade durante o escoamento sob o perfil é relativamente baixa.

Pode-se observar que o valor da espessura da camada-limite é muito pequeno, onde a mesma ocorreu na região próximo ao borde de fuga. Tal condição pode ter ocorrido em função do baixo ângulo de ataque, uma vez que o módulo do mesmo não demonstra ter relevada influência sobre o escoamento, tampouco causa turbulência e descolamento do fluxo de ar. Dessa forma a utilização dos geradores de vórtice poderiam causar uma turbulência maléfica, gerando assim influência negativa na pá.

Foram realizadas as simulações fluidodinâmicas para os perfis 3, 12 e 30, desconsiderando os efeitos da torção, onde ambos apresentam os valores de ângulo de fluxo local, respectivamente,  $40,63^\circ$ ,  $18,35^\circ$  e  $8,1^\circ$ . De acordo com os parâmetros estabelecidos na metodologia, foram realizadas as simulações e dessa forma obtidos os resultados apresentados nas Figuras 47, 48 e 49, respectivamente.

**Figura 47** – Resultado da simulação do perfil 3 com ângulo de fluxo local de  $40,63^\circ$ .

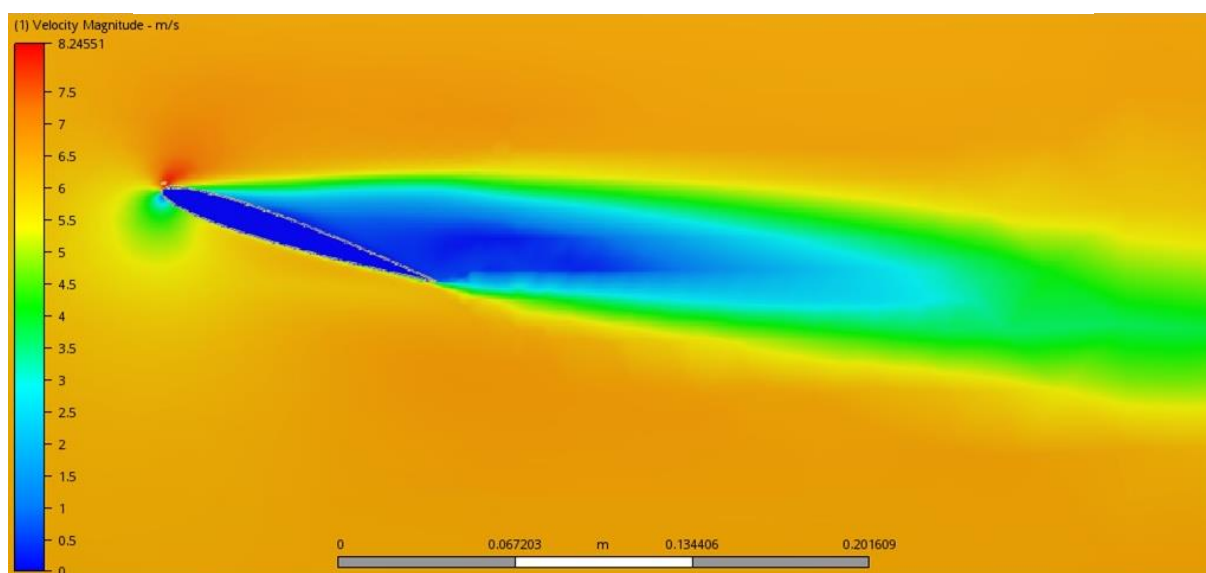


Fonte: O autor (2018).

O resultado ilustrado na Figura 47, com o perfil 3, demonstra a inviabilidade da utilização dos geradores de vórtices, uma vez que a perturbação do escoamento sob a superfície do perfil ocorre de modo demasiado. Pode-se verificar a presença de turbulência no bordo de ataque do aerofólio, de tal forma que impossibilita o posicionamento do G.V, uma vez que o mesmo deve ser fixado na região a montante da perturbação.

A elevada espessura da camada-limite e as variações de velocidade observadas nos resultados podem ser consequências da influência do ângulo de fluxo local, uma vez que o mesmo é bastante elevado se comparado aos demais. Apesar da não ocorrência do descolamento, de modo geral, a região de perturbação do escoamento apresenta-se de forma extensa, dessa forma os geradores de vórtices poderiam não ter efeito suficiente a fim de promover resultados desejados.

**Figura 48** – Resultado da simulação do perfil 12 com ângulo de fluxo local de 18, 35°.



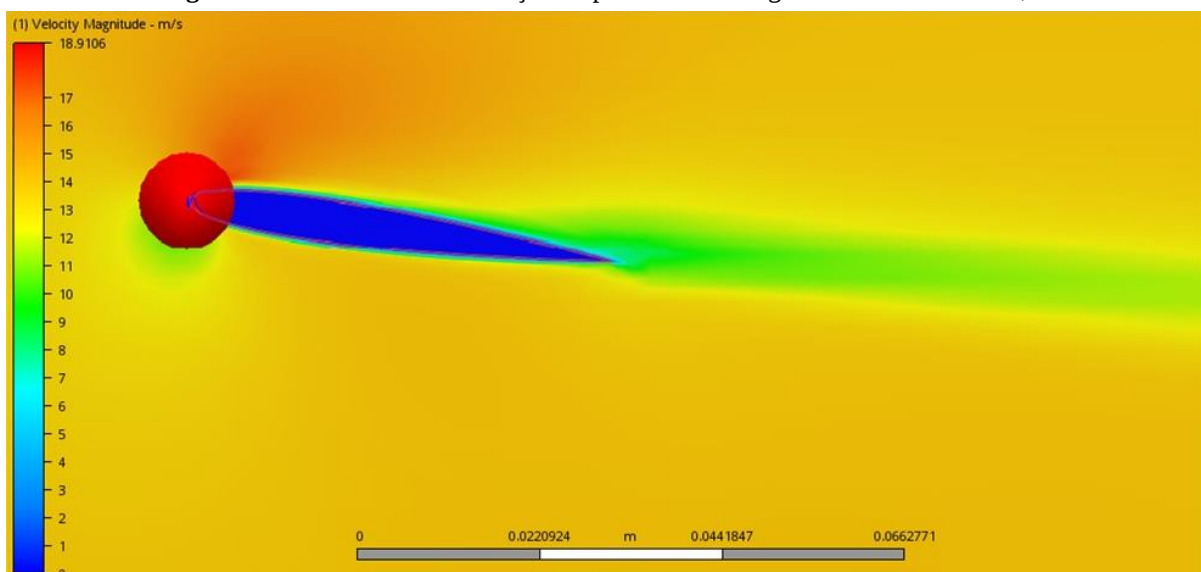
Fonte: O autor (2018).

A Figura 48 apresenta o resultado da simulação do perfil 12, a um ângulo de fluxo de 18,35°, pode-se observar a formação da camada-limite com uma espessura intermediária entre o perfil 3 com 40,63° e o perfil 30 com 4°. A perturbação do escoamento apresenta uma formação de turbulência na saída do bordo de fuga do aerofólio, observa-se também uma variação da velocidade favorável a aplicação dos geradores de vórtices, uma vez que a velocidade na região do bordo de fuga aproxima-se ao módulo de zero.

A ocorrência do descolamento não foi verificada no aerofólio, porém tal fato pode ter sucedido em razão das simplificações adotadas para o procedimento computacional. Apesar do não surgimento do descolamento a simulação indica aspectos favoráveis para a aplicação dos

geradores de vórtices, uma vez que tais dispositivos podem influenciar positivamente no aumento da sustentação. O resultado encontrado coincide com as análises citadas no referencial teórico, uma vez que o ângulo de fluxo do perfil 12 pertence ao intervalo de angulação das pás onde os geradores de vórtices ensaiados apresentaram resultados benéficos em relação a eficiência das turbinas eólicas.

**Figura 49** – Resultado da simulação do perfil 30 com ângulo de fluxo local de 8,1°.



Fonte: O autor (2018).

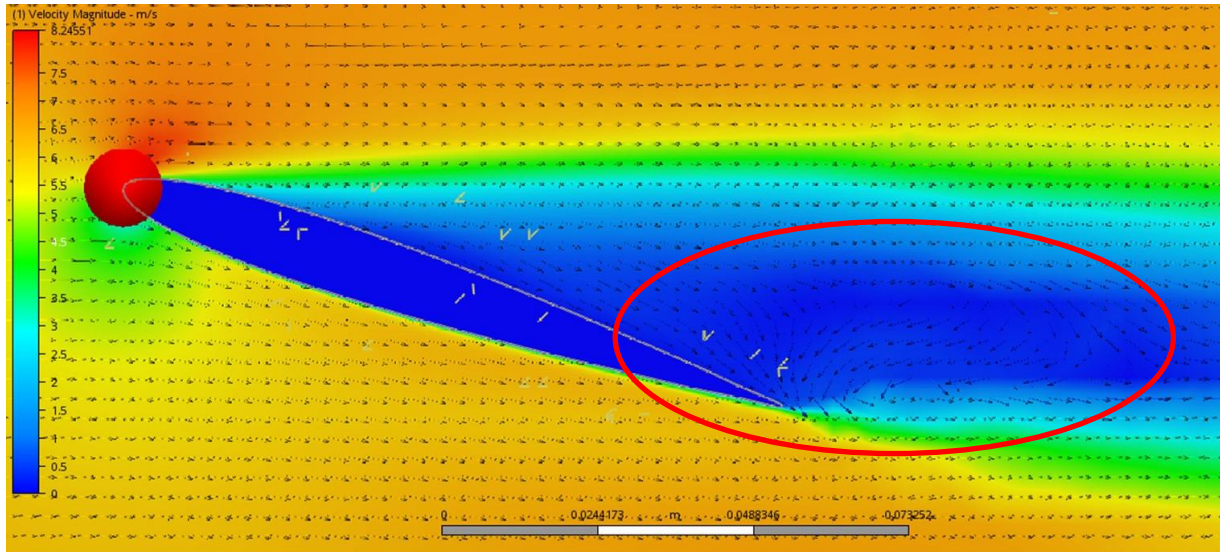
O perfil 30 com angulação de fluxo local de 8,1° (Figura 49), apresentou pouca perturbação do escoamento do fluido, a camada-limite formou-se no bordo de fuga do aerofólio com uma espessura muito pequena, as variações de velocidade ocorreram de forma moderada, dessa forma tais características não fundamentam a utilização dos geradores de vórtices.

Dentre as quatro simulações realizadas verificou-se que a principal influência sobre o escoamento foi em função da angulação dos aerofólios selecionados, onde notou-se que o perfil mais adequado para a utilização dos geradores de turbulência foi o aerofólio 12, dessa forma o mesmo foi selecionado para as posteriores simulações.

#### 4.1.1 Análise computacional do perfil 12

A partir da seleção do perfil 12 pode-se detalhar o comportamento dos vetores de velocidade, bem como determinar a espessura da camada-limite. As Figuras 50 e 51 apresentam, respectivamente, o detalhamento dos parâmetros citados.

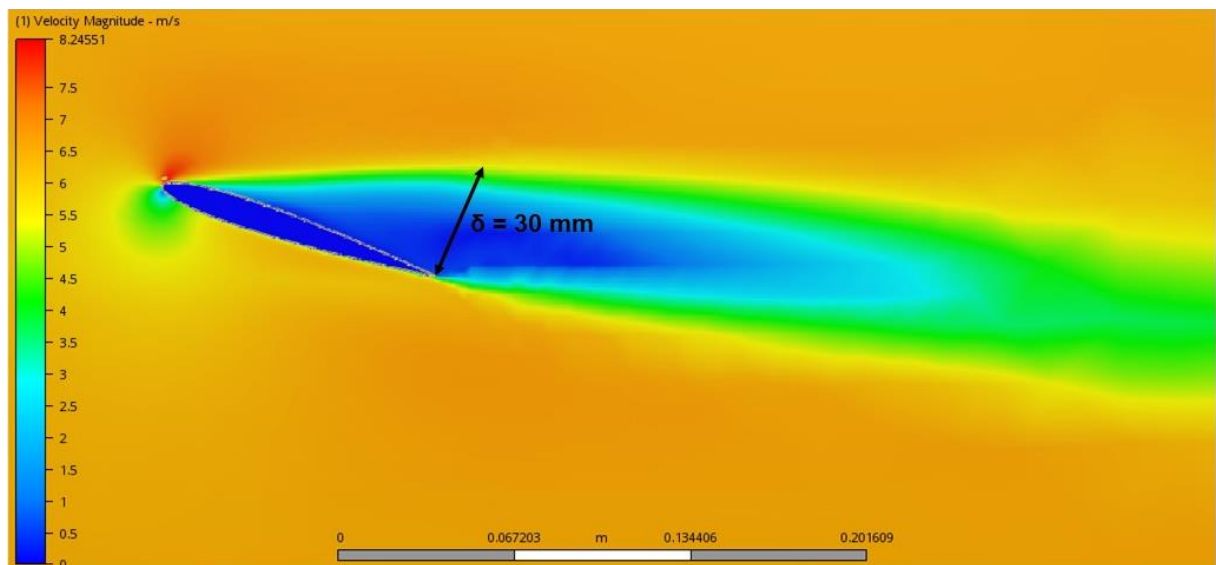
**Figura 50** – Comportamento dos vetores de velocidade do perfil 12 com ângulo de fluxo de  $18,35^\circ$ .



Fonte: O autor (2018).

De acordo com a Figura 50 é possível notar o comportamento de turbulência na saída do bordo de fuga do aerofólio, bem como a perturbação causada no escoamento do fluido. A partir da simulação realizada obteve-se o módulo de aproximadamente 30 mm de espessura da camada limite (Figura 51).

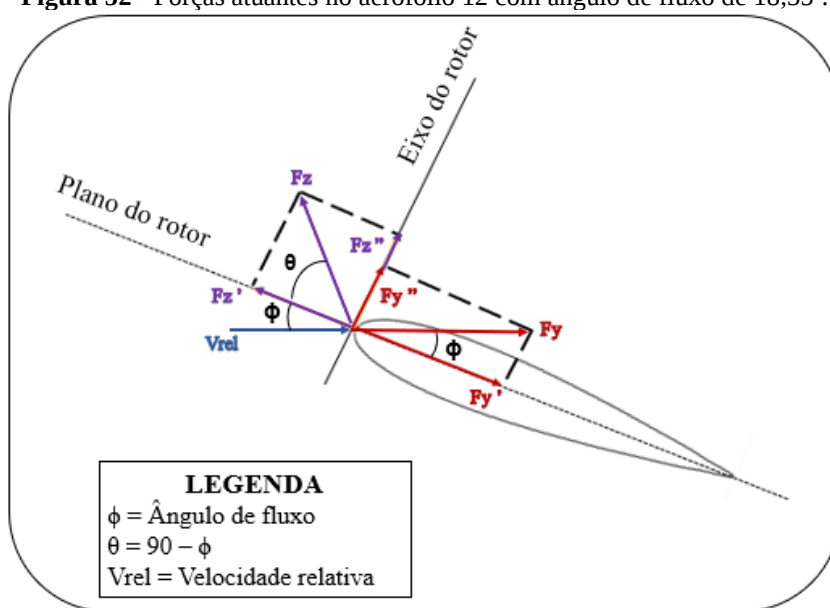
**Figura 51** - Espessura da camada-limite para o perfil 12 com ângulo de fluxo de  $18,35^\circ$ .



Fonte: O autor (2018).

A Figura 52 apresenta os esforços atuantes no aerofólio selecionado e suas respectivas componentes vetoriais. A superfície do perfil está sujeita a ação das forças de sustentação e arrasto, nos eixos z e y, respectivamente. No plano do rotor estão as componentes  $Fz'$  e  $Fy'$ , onde atuam no sentido de aceleração ( $Fz'$ ) e desaceleração ( $Fy'$ ) na velocidade de rotação da pá, a resultante de ambas ( $Fr$ ) influencia diretamente no desempenho e eficiência da turbina eólica. As componentes  $Fz''$  e  $Fy''$  atuam no eixo do rotor, e sua resultante ( $Fd$ ) age como esforço de deflexão na pá. Com os dados das forças  $Fz$  e  $Fy$ , gerados a partir da simulação e os valores dos ângulos é possível determinar os principais esforços que atuam na superfície do aerofólio, conforme apresentado na Tabela 02.

**Figura 52** - Forças atuantes no aerofólio 12 com ângulo de fluxo de  $18,35^\circ$ .



Fonte: O autor (2018).

**Tabela 02** - Forças atuantes no aerofólio 12

| Parâmetro                                                  | Símbolo | Magnitude (N) |
|------------------------------------------------------------|---------|---------------|
| Força de sustentação no eixo z                             | $Fz$    | 0,1551        |
| Força de arrasto no eixo y                                 | $Fy$    | 0,0617        |
| Componente da força $Fz$ no eixo do rotor                  | $Fz''$  | 0,1472        |
| Componente da força $Fz$ no plano do rotor                 | $Fz'$   | 0,0488        |
| Componente da força $Fy$ no eixo do rotor                  | $Fy''$  | 0,0194        |
| Componente da força $Fy$ no plano do rotor                 | $Fy'$   | 0,0586        |
| Resultante das forças que agem no eixo do rotor            | $Fd$    | 0,1666        |
| Resultante das forças que agem no plano do rotor           | $Fr$    | - 0,0098      |
| Resultante das forças que agem no eixo e no plano do rotor | $Ft$    | 0,1669        |

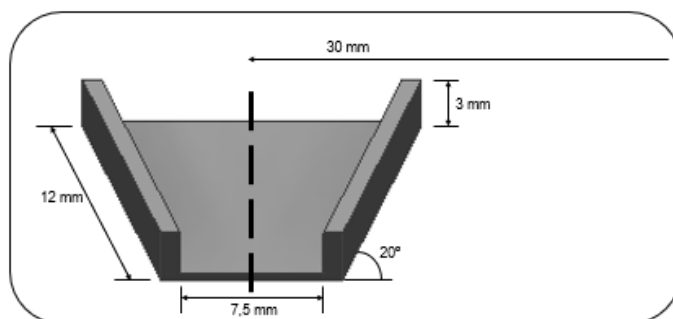
Fonte: O autor (2018).

De acordo com os resultados obtidos através da simulação é possível afirmar que a força de sustentação é superior a força de arrasto. Observa-se que a resultante negativa das forças que agem no plano do rotor ( $F_r$ ), indica que o arrasto ocasionado pelo escoamento está diminuindo a velocidade de rotação do aerofólio, ocasionando assim uma desaceleração na velocidade de rotação da pá, dessa forma pode-se afirmar que a eficiência do perfil será prejudicada. A resultante das forças que agem no eixo do rotor ( $F_d$ ) apresenta o esforço de deflexão na qual o aerofólio estará submetido.

#### 4.2 DEFINIÇÕES GEOMÉTRICAS DOS GERADORES DE VÓRTICES

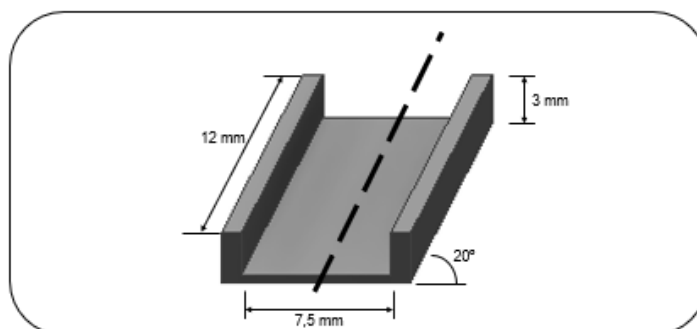
Os parâmetros geométricos estabelecidos para os geradores de vórtices foram baseados nas definições detalhadas no referencial teórico e na metodologia, dessa forma, utilizando a espessura da camada-limite apresentada do perfil 12, foram realizadas as modelagens em 3D dos G.V através do *software* Inventor. As Figuras 53 e 54 apresentam, respectivamente, as dimensões atribuídas aos geradores de matriz contra-rotativa e co-rotativa.

**Figura 53** – Dimensões geométricas utilizadas para o gerador de vórtice de matriz contra-rotativa.



Fonte: O autor (2018).

**Figura 54** - Dimensões geométricas utilizadas para o gerador de vórtice de matriz co-rotativa.

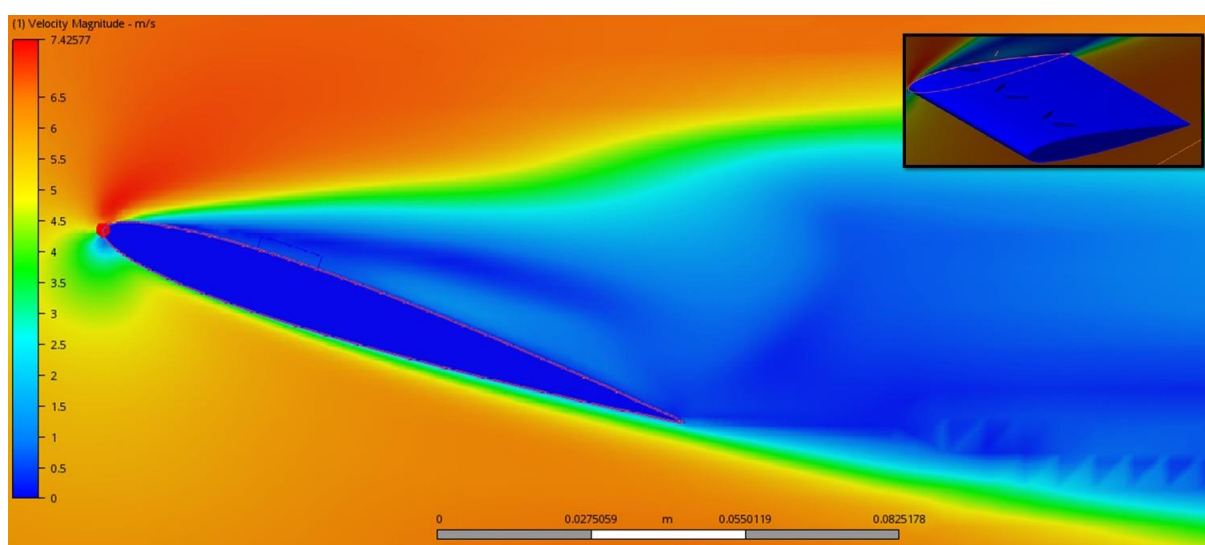


Fonte: O autor (2018).

### 4.3 ANÁLISE DO PERFIL 12 COM O GERADOR DE VÓRTICE DE MATRIZ CONTRA-ROTATIVA

Após a determinação do perfil mais adequado a ser utilizado nas simulações, foram acrescentados os geradores de vórtices de matriz contra-rotativa na posição de 25 % da corda e deu-se início as simulações utilizando os parâmetros determinados na metodologia. A Figura 55 apresenta o comportamento do escoamento sob a influência do G.V.

**Figura 55** - Comportamento do escoamento no perfil 12 com G.V contra rotacional.

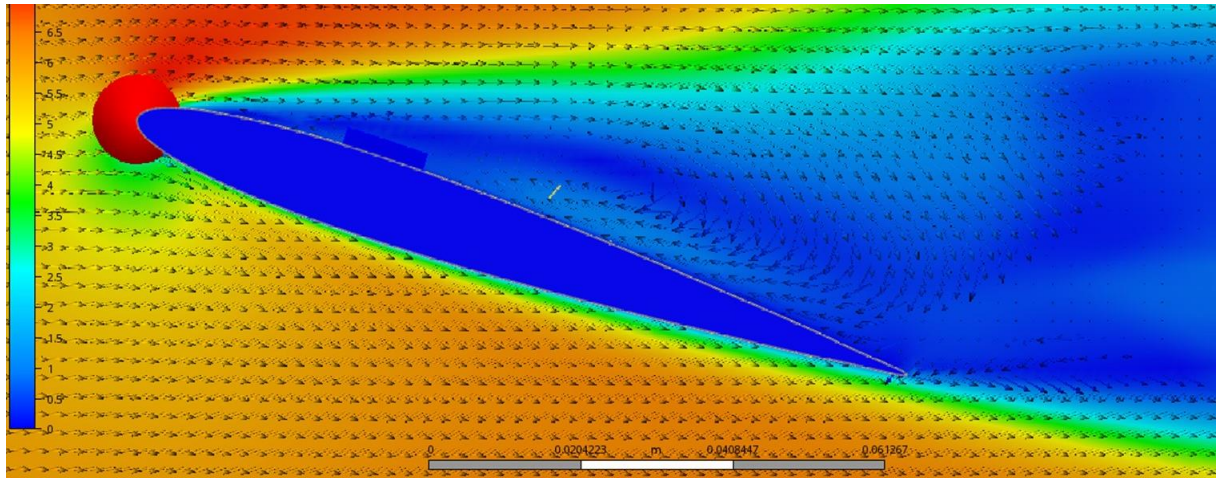


Fonte: O autor (2018).

Comparando os resultados obtidos do escoamento do perfil 12 sem G.V, pode-se notar que a adição do gerador de vórtice de matriz contra-rotativa apresentou um aumento significativo na espessura da camada-limite, dessa forma o escoamento do fluxo de ar exibiu maior perturbação. A região central em direção ao bordo de fuga do extradorso do aerofólio apresentou uma elevação da energia cinética, dessa forma é possível notar a influência do gerador de vórtice no comportamento da velocidade do fluxo. A Figura 56 apresenta as orientações mais detalhadas dos vetores de velocidade.

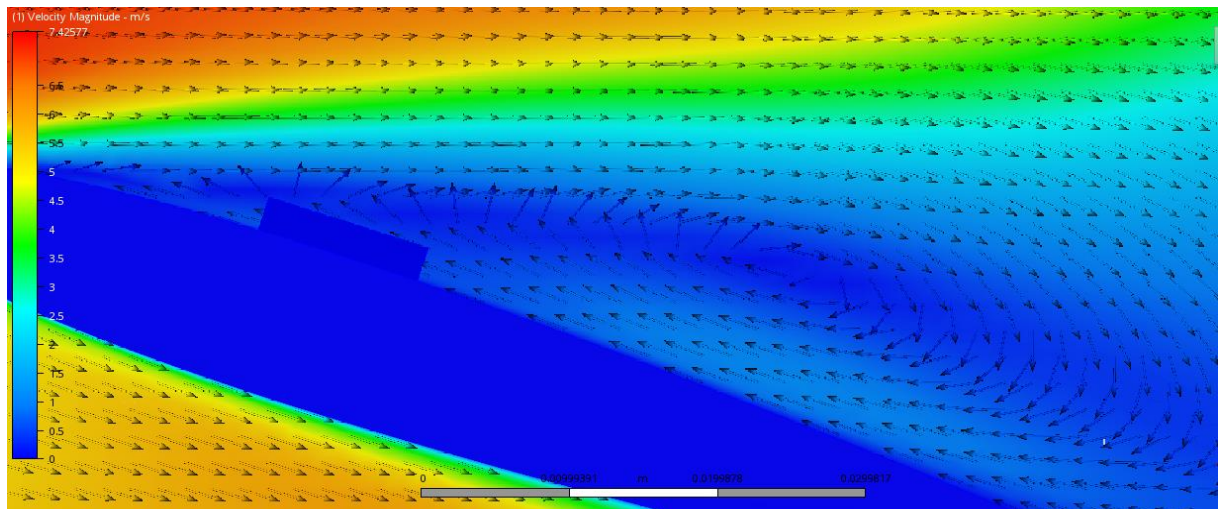
Observa-se nas Figura 57 e 58 que o fluxo de ar passa por cima dos geradores de vórtices, porém ao longo do escoamento o mesmo não possui energia suficiente a fim de vencer o gradiente de pressão adverso e retorna passando pelo G.V na região de maior dimensão. Após a saída do fluxo de ar da região de menor abertura dos geradores de vórtices, o fluido recircula realizando novamente o percurso semelhante.

**Figura 56** -Comportamento dos vetores de velocidade no perfil 12 com G.V de matriz contra-rotativa.



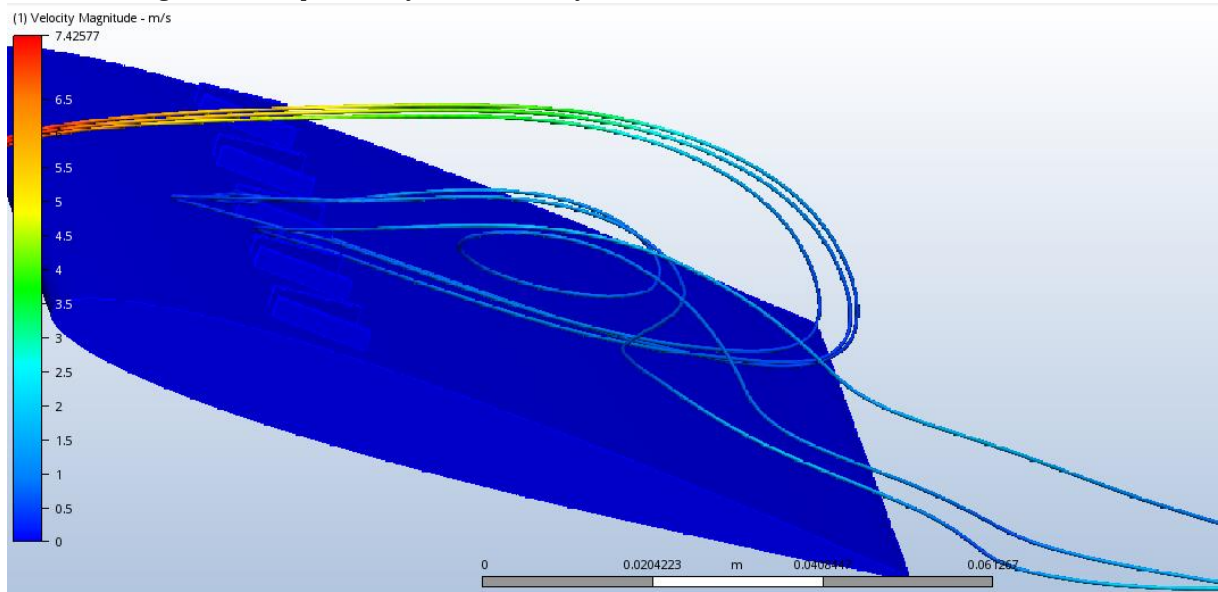
Fonte: O autor (2018).

**Figura 57** - Detalhamento do comportamento das linhas de corrente de velocidade.



Fonte: O autor (2018).

**Figura 58** - Esquematização da recirculação do fluxo de ar através das linhas de corrente.



Fonte: O autor (2018).

A determinação dos esforços atuantes na superfície do aerofólio foi definida através do procedimento explanado no tópico 4.1.1. A partir da simulação realizada foi possível encontrar os valores das forças de sustentação ( $F_z$ ) e arrasto ( $F_y$ ), e assim deu-se início as sequências dos procedimentos realizados nos cálculos. A Tabela 03 indica os valores numéricos encontrados.

**Tabela 03 - Forças atuantes no aerofólio 12 com G.V de matriz contra-rotativa**

| <b>Parâmetro</b>                                           | <b>Símbolo</b> | <b>Magnitude (N)</b> |
|------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|
| Força de sustentação no eixo z                             | $F_z$          | 0,1369               |
| Força de arrasto no eixo y                                 | $F_y$          | 0,0591               |
| Componente da força $F_z$ no eixo do rotor                 | $F_z''$        | 0,1299               |
| Componente da força $F_z$ no plano do rotor                | $F_z'$         | 0,0431               |
| Componente da força $F_y$ no eixo do rotor                 | $F_y''$        | 0,0186               |
| Componente da força $F_y$ no plano do rotor                | $F_y'$         | 0,0561               |
| Resultante das forças que agem no eixo do rotor            | $F_d$          | 0,1485               |
| Resultante das forças que agem no plano do rotor           | $F_r$          | - 0,0130             |
| Resultante das forças que agem no eixo e no plano do rotor | $F_t$          | 0,1491               |

Fonte: O autor (2018).

Ao analisar os resultados indicados na Tabela 03, pode-se constatar que a utilização dos geradores de vórtice de matriz contra-rotativa não obteve a eficiência desejada, uma vez que houve um decréscimo na força de sustentação, se comparado ao resultado do mesmo perfil sem os dispositivos e a força de arrasto apresentou uma redução insignificante.

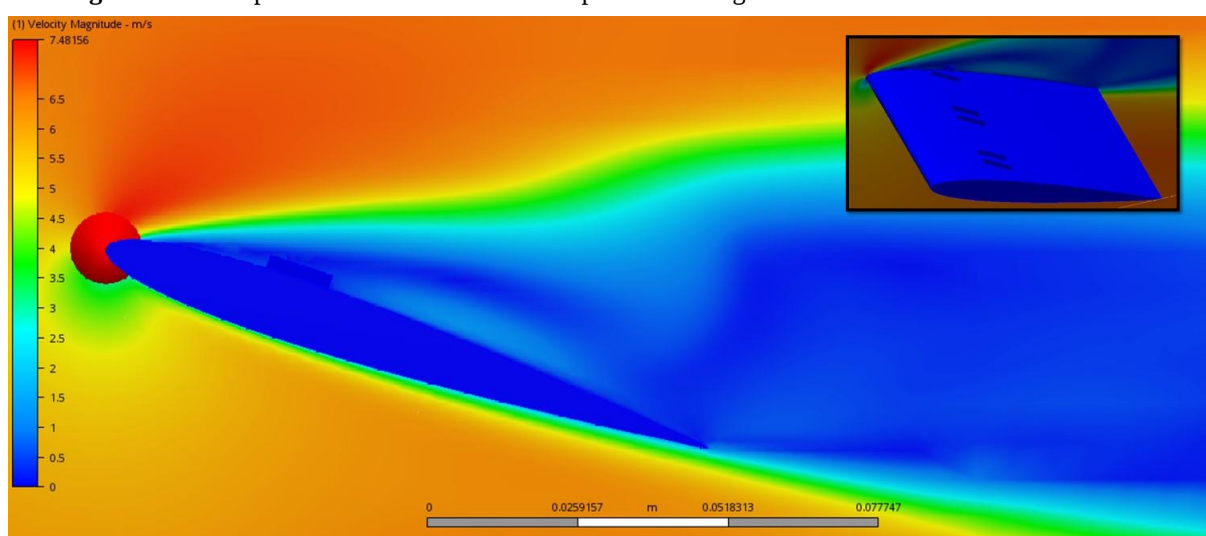
A resultante das forças que agem no plano do rotor ( $F_r$ ), apresentou também um valor negativo e com um módulo maior se comparada ao perfil sem os G.V, dessa forma o aerofólio estará sujeito a uma força de desaceleração superior ao resultado obtido no tópico anterior, comprometendo ainda mais a eficiência do perfil, dessa forma pode-se confirmar a inviabilidade de utilização dos dispositivos no projeto.

Respeitando os parâmetros adotados não é justificável a utilização dos G.V, porém é válido notar que a aplicação dos mesmos demonstrou uma leve queda no esforço de deflexão que age no perfil da pá.

#### 4.4 ANÁLISE DO PERFIL 12 COM O GERADOR DE VÓRTICE DE MATRIZ CO-ROTATIVA

Utilizando o perfil 12 com ângulo de fluxo de  $18,35^\circ$ , foram acrescentados os geradores de vórtices de matriz co-rotativa na posição de 25 % da corda do aerofólio, e deu-se início as simulações utilizando os parâmetros determinados na metodologia. A Figura 59 apresenta o comportamento do escoamento sob a influência do G.V.

**Figura 59** – Comportamento do escoamento do perfil 12 com gerador de vórtice de matriz co-rotativa.

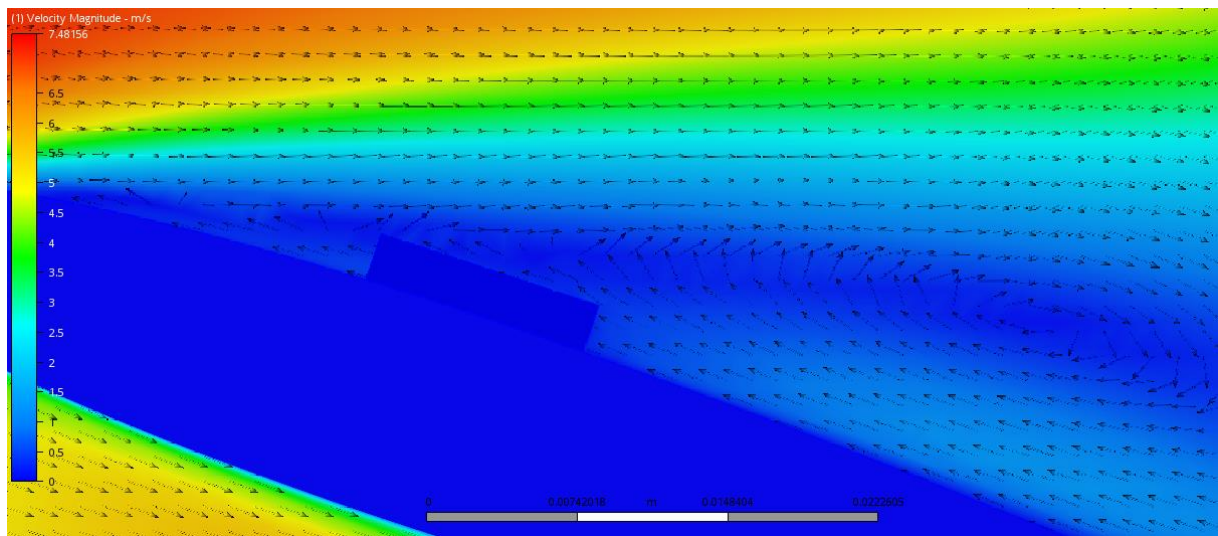


Fonte: O autor (2018).

Comparando os resultados obtidos do escoamento do perfil 12 sem G.V, é possível identificar que a adição dos geradores de vórtices de matriz co-rotativa influenciou no aumento da espessura da camada-limite, resultando então na elevação da perturbação do escoamento do fluxo de ar. A área próxima ao bordo de fuga do extradorso do aerofólio apresentou uma leve elevação da energia cinética, dessa forma é possível identificar uma influência do gerador de vórtice no comportamento da velocidade do fluxo. A Figura 60 apresenta o comportamento dos vetores de velocidade.

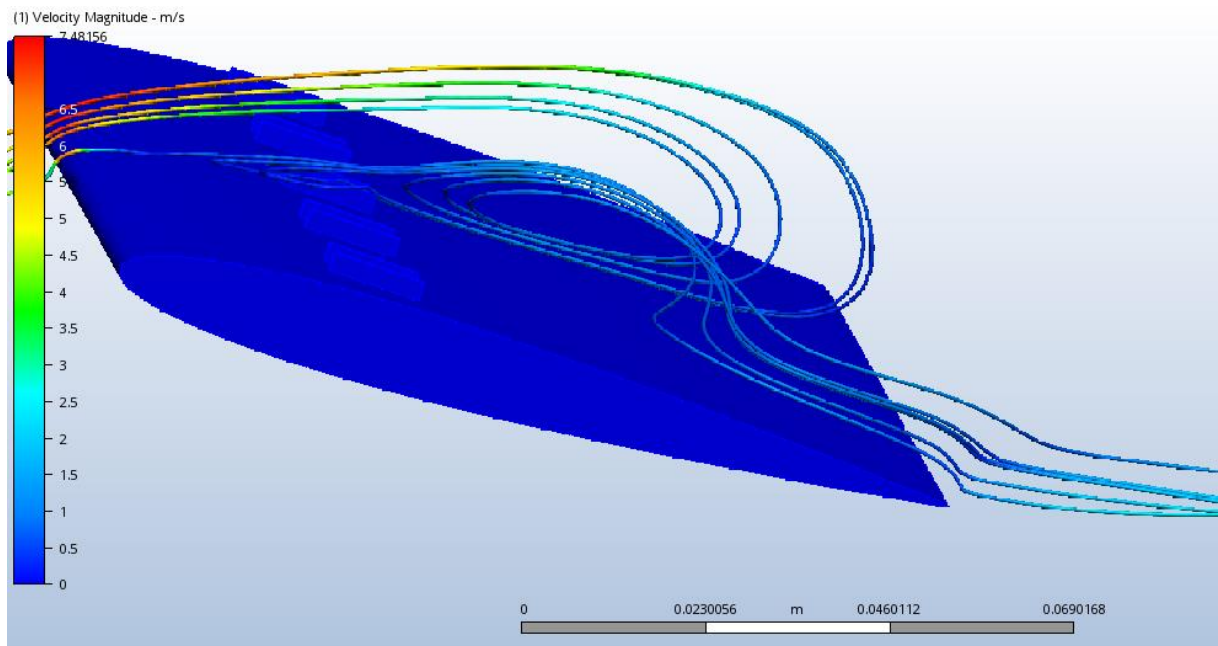
É possível notar que o comportamento do escoamento do ar é bastante semelhante ao apresentado no perfil 12 com G.V de matriz contra-rotativa, onde o fluxo de ar passa sob os geradores e retornam por dentro dos G.V em direção ao bordo de ataque, após não terem energia suficiente para vencer o gradiente de pressão, reiniciando assim o percurso. Pode-se observar a presença de uma moderada turbulência na região interna dos geradores de vórtices. A Figura 61 detalha o comportamento do fluxo através das linhas de corrente.

**Figura 60** - Esquematisação do comportamento dos vetores de velocidade para o perfil 12 com G.V de matriz co-rotativa.



Fonte: O autor (2018).

**Figura 61** - Detalhamento da recirculação do fluxo de ar através das linhas de corrente de velocidade.



Fonte: O autor (2018).

A determinação das forças que agem na superfície do aerofólio, foi definida através do procedimento explanado no tópico 4.1.1. A partir da simulação realizada foi possível encontrar os valores das forças de sustentação ( $F_z$ ) e arrasto ( $F_y$ ), posteriormente foram iniciados os cálculos necessários nas análises. A Tabela 04 apresenta os valores numéricos encontrados.

**Tabela 04 - Forças atuantes no aerofólio 12 com G.V de matriz co-rotativa**

| <b>Parâmetro</b>                                           | <b>Símbolo</b> | <b>Magnitude (N)</b> |
|------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|
| Força de sustentação no eixo z                             | Fz             | 0,140391             |
| Força de arrasto no eixo y                                 | Fy             | 0,0601742            |
| Componente da força Fz no eixo do rotor                    | Fz''           | 0,133252273          |
| Componente da força Fz no plano do rotor                   | Fz'            | 0,044198016          |
| Componente da força Fy no eixo do rotor                    | Fy''           | 0,018944094          |
| Componente da força Fy no plano do rotor                   | Fy'            | 0,057114408          |
| Resultante das forças que agem no eixo do rotor            | Fd             | 0,152196367          |
| Resultante das forças que agem no plano do rotor           | Fr             | -0,012916392         |
| Resultante das forças que agem no eixo e no plano do rotor | Ft             | 0,152743469          |

Fonte: O autor (2018).

Comparando os resultados obtidos na tabela 04 com os dados encontrados para o perfil 12 sem o gerador de vórtice (Tabela 02), pode-se notar que a aplicação dos dispositivos no perfil resultou em um decréscimo na força de sustentação e uma pequena queda na força de arrasto. A resultante das forças que agem no plano do rotor, também continuou apresentando um valor negativo e seu módulo foi superior se comparado ao mesmo perfil sem a presença dos G.V, indicando assim a ocorrência de desaceleração na rotação da pá, portanto os resultados apresentados não sustentam a justificativa da utilização dos geradores de vórtices de matriz co-rotativa.

A resultante das forças que agem no eixo do rotor, e gera a deflexão na pá, apresentou um valor inferior se comparado a situação do aerofólio sem os dispositivos, isso indica que o perfil sofrerá menor esforço de deflexão com a utilização dos G.V, porém tal situação não proporciona motivação suficiente a fim de fundamentar o emprego dos geradores.

Comparando as duas geometrias dos geradores de vórtices analisados, verifica-se que a matriz contra-rotativa apresentou melhor desempenho em relação a força de deflexão, porém a resultante que gera a desaceleração do perfil apresentou um módulo superior se comparado a utilização da matriz co-rotativa. Observou-se que as diferenças numéricas dos resultados obtidos entre as duas geometrias dos G.Vs, foram relativamente pequenas, dessa forma não houve uma preferência de utilização entre as duas geometrias.

A principal hipótese que justificaria o baixo desempenho dos geradores de vórtice, seria o fato do fluxo de ar não passar inicialmente por entre a estrutura dos G.Vs, em ambos os casos, uma vez que ambos os escoamentos, apresentam o fenômeno de recirculação do ar (Figuras 52

e 55). O fenômeno da recirculação pode ter sido gerado em função da posição escolhida para o acoplamento dos G.V, dessa forma espera-se que a instalação dos geradores de vórtices em localização inferiores a 25% da corda produza os resultados esperados. Outro aspecto que pode ter influenciado negativamente, foi a não ocorrência de descolamento do fluxo de ar sob a superfície do perfil 12.

Por fim acredita-se que todos as simplificações realizadas ao longo do trabalho e os parâmetros escolhidos possam ter influenciado nos resultados das simulações, dessa forma espera-se que utilizando outros critérios, os geradores de vórtices apresentem um comportamento benéfico em relação a otimização da eficiência das turbinas eólicas de pequeno porte. Tal expectativa é fundamentada no fato dos resultados numéricos, apesar de não serem os desejados, foram similares as análises realizadas no perfil sem os geradores.

## 5 CONCLUSÃO

Conclui-se que as análises aerodinâmicas realizadas apresentaram resultados importantes em relação ao comportamento das pás de uma turbina eólica, associados a utilização de mecanismos de geração de turbulência. Apesar dos resultados não serem os esperados, pôde-se observar quais parâmetros garantem maior influência no comportamento do escoamento e consequentemente quais critérios podem ser adotados a fim de aumentar a eficiência dos aerofólios.

Comparando as duas estruturas geométricas, dos geradores de vórtices analisados, é possível afirmar que o resultado de ambas se comportou de maneira semelhante, dessa forma não há uma preferência da utilização de uma determinada matriz em relação a outra, porém é importante ressaltar que tal fato ocorre apenas nas condições averiguadas.

Dentre os parâmetros estabelecidos é possível afirmar que o perfil irá apresentar o melhor desempenho na condição de não utilização dos geradores de vórtices, porém é necessário realizar outras investigações, a fim de afirmar qual a real influência de tais dispositivos aplicados a turbinas eólicas de pequeno porte.

Baseado nos resultados encontrados, deixa-se como sugestões para trabalhos futuros a verificação da influência do posicionamento dos geradores de vórtices, bem como maiores análises em função da variação de angulação dos perfis e por fim, a utilização de um modelo mais real em relação ao comportamento da pá de uma turbina eólica.

## REFERÊNCIAS

III ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO DO VALE DO ITAJAÍ, 3., 2009, Vale do Itajaí. **GERADOR EÓLICO DE BAIXO CUSTO PARA USO RESIDENCIAL...**, 2009. 9 p.

ANEEL, A. N. D. E. E. **Atlas de Energia Elétrica**. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2002.

AUTODESK. Advection Schemes. **AUTODESK**, s.d. A. Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/SimCFD/files/GUID-F691B334-CCE2-47E9-B6C4-21666712C163-htm.html>>. Acesso em: 15 março 2018.

AUTODESK. Turbulence. **AUTODESK**, s.d. B. Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/SimCFD/files/GUID-E9E8ACA1-8D49-4A49-8A35-52DB1A2C3E5F-htm.html>>. Acesso em: 15 março 2018.

CRESESB. Centro e Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Eólica**, s.d. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 06 dez. 2017.

CRESESB, C. D. R. P. A. E. S. E. E. D. S. B. Tipos de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica. **Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica de S. Brito**, 2008. Disponível em: <[http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=231](http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=231)>. Acesso em: 09 fev. 2018.

DAYTON, Griffm A. **Investigation of Vortex Generators for Augmentation of Wind Turbine Power Performance**. Colorado: R. Lynette & Associates, Inc., 1996. 80 p.

Economics of small wind turbines in urban settings: Grieser,B, et al. - An empirical investigation for Germany. *Renewable Energy* n 78, 2015.

EVOLUTION BUSINESS AND TECHNOLOGY FROM SKF. FLEXIBLE CHOICE FOR RELIABLE GEARBOX SOLUTIONS. **EVOLUTION Business and Technology from SKF**, 2012. Disponível em: <<http://evolution.skf.com/flexible-choice-for-reliable-gearbox-solutions/>>. Acesso em: 09 fev. 2018.

GRIFFM, D. A. **Investigation of Vortex generators for augmentation of wind turbine power performance**. National Renewable Energy Laboratory. Colorado, p. 88. 1996.

GRUBB, M.J. e MEYER, N.I. Wind Energy: Resources, Systems, and Regional Strategies. In: JOHANSSON, T. B; KELLY H; REDDY, A; WILLIAMS, R. *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*. Washington, D.C: Island Press, , 1993

HANSEN, L.H., *et al.* **Conceptual Survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines**. RISO National Laboratory. Roskilde, Dinamarca, p.105. 2001.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Tradução de Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrine Pessoa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

LOGDBERG,. **Vortex generators and turbulent boundary layer**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica ) - KTH. Estocolmo, p. 118. 2006.

LOPES, R. A. **Energia Eólica**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2012.

MACHADO, Caio Filippio de Faria. **PROJETO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL**. 2014. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

NASA, N. A. A. S. A. **Micro-Vortex Generators**. Langley Research Center. Hampton, p. 2. s.d.

Nunes Junior, Éden Rodrigues Metodologia de projeto de turbinas eólicas de pequeno porte. / Éden Rodrigues Nunes Junior. - 2008 188 f.:il.

PINTO, M. D. O. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

RODRIGUES, Rafael Valotta. **SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE**. 2014. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

SILVA, Amanda Briggs da. **PROJETO AERODINÂMICO DE TURBINA EÓLICA**. 2013. 93 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SHEPHERD, D. G. Historical Development of the Windmill. **Wind Turbine**, New York, 1994. 1-46.

SILVA, A. B. D. **Projeto Aerodinâmico de Turbinas Eólicas**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 93. 2013.

SMART BLADE. **Vortex Generators for performance improvement**. Smart Blade GmBh. Havensburg, p. 8. s.d.

SOUZA, F. N. F. E. T. M. DISPONIBILIDADE DE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL. **Revista SODEBRAS**, v. 5, n. 55, p. 08-14, jul. 2010. ISSN 1809-3957.

TONG, W. **Wind power generation and wind turbine design**. USA: Wit Press, 2010.

UDRIS, A. Vortex Generators: Preventing Stalls At High And Low Speeds. **Boldmethod**, 2015. Disponível em: <<http://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aerodynamics/vortex-generators/>>. Acesso em: 09 mar. 2018.

VERDUM, Valdirene. **Projeto de aerogerador com segurança inerente para aplicação urbana**. 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

WANG, H. et al. Flow control on the NREL S809 wind turbine airfoil using vortex. **Elsevier**, China, v. 118, p. 1210-1221, jan. 2017.

WENZEL, Guilherme München. **PROJETO AERODINÂMICO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**. 2007. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

**ANEXO A: INFORMAÇÕES RELEVANTES SOBRE O PROJETO DA PÁ EÓLICA  
UTILIZADA**

| <b>Elemento<br/>de pá</b> | <b>Raio<br/>(r)(m)</b> | <b>Ângulo de<br/>fluxo local (<math>\Phi</math>)<br/>(°)</b> | <b>Corda<br/>(c) (m)</b> |
|---------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1                         | 0,05                   | 50,55                                                        | 0,1029                   |
| 2                         | 0,08                   | 45,33                                                        | 0,1341                   |
| 3                         | 0,11                   | 40,63                                                        | 0,1497                   |
| 4                         | 0,14                   | 36,49                                                        | 0,1549                   |
| 5                         | 0,17                   | 32,9                                                         | 0,1539                   |
| 6                         | 0,2                    | 29,81                                                        | 0,1494                   |
| 7                         | 0,23                   | 27,15                                                        | 0,1431                   |
| 8                         | 0,26                   | 24,86                                                        | 0,136                    |
| 9                         | 0,29                   | 22,88                                                        | 0,1288                   |
| 10                        | 0,32                   | 21,16                                                        | 0,1218                   |
| 11                        | 0,35                   | 19,66                                                        | 0,1152                   |
| 12                        | 0,38                   | 18,35                                                        | 0,1091                   |
| 13                        | 0,41                   | 17,18                                                        | 0,1033                   |
| 14                        | 0,44                   | 16,15                                                        | 0,098                    |
| 15                        | 0,47                   | 15,23                                                        | 0,0932                   |
| 16                        | 0,5                    | 14,40                                                        | 0,0887                   |
| 17                        | 0,53                   | 13,66                                                        | 0,0846                   |
| 18                        | 0,56                   | 12,98                                                        | 0,0808                   |
| 19                        | 0,59                   | 12,37                                                        | 0,0773                   |
| 20                        | 0,62                   | 11,81                                                        | 0,0741                   |
| 21                        | 0,65                   | 11,29                                                        | 0,0711                   |
| 22                        | 0,68                   | 10,82                                                        | 0,0683                   |
| 23                        | 0,71                   | 10,39                                                        | 0,0657                   |
| 24                        | 0,74                   | 9,99                                                         | 0,0633                   |
| 25                        | 0,77                   | 9,61                                                         | 0,061                    |
| 26                        | 0,8                    | 9,27                                                         | 0,0589                   |
| 27                        | 0,83                   | 8,94                                                         | 0,057                    |
| 28                        | 0,86                   | 8,64                                                         | 0,0551                   |
| 29                        | 0,89                   | 8,36                                                         | 0,0534                   |
| 30                        | 0,92                   | 8,1                                                          | 0,0518                   |
| 31                        | 0,95                   | 7,85                                                         | 0,0502                   |
| 32                        | 0,98                   | 7,61                                                         | 0,0488                   |