

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

ANÁLISE NUMÉRICA DO ESCOAMENTO AO REDOR DE UMA TURBINA DARRIEUS
COM ESTATOR NO TOPO DE UMA EDIFICAÇÃO URBANA EM PORTO ALEGRE
COM AVALIAÇÃO DO TORQUE ESTÁTICO

por

Douglas Darlan Schuck

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 08 de novembro de 2017.

ANÁLISE NUMÉRICA DO ESCOAMENTO AO REDOR DE UMA TURBINA DARRIEUS COM
ESTATOR NO TOPO DE UMA EDIFICAÇÃO URBANA EM PORTO ALEGRE COM
AVALIAÇÃO DO TORQUE ESTÁTICO

por

Douglas Darlan Schuck

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof.^a Dr.^a Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

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

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof.^a Dr.^a Thamy Cristina Hayashi

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Msc. Eng. Leonardo Brito Kothe

Porto Alegre, 08 de novembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e minha irmã pelo apoio e incentivo durante todos os anos que estive na faculdade.

Ao professor Alexandre Vagtinski de Paula, pela orientação, dedicação na elaboração deste trabalho e pelo conhecimento transmitido.

A equipe do laboratório de Mecânica dos Fluidos (LMF) da UFRGS pela ajuda e por disponibilizar o suporte computacional.

Aos familiares, amigos e colegas que me apoiaram e incentivaram durante minha vida acadêmica.

DOUGLAS, D. S. **Análise Numérica do escoamento ao Redor de uma Turbina Darrieus com Estator no Topo de uma Edificação Urbana em Porto Alegre com Avaliação do Torque estático**. 2017. 26p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

A crescente geração de energia eólica no mundo representa um importante passo das fontes renováveis para superar a demanda energética mundial. A necessidade de tornar esse método de geração de energia cada vez mais eficiente está aproximando sua implementação em regiões urbanas onde grande parte da eletricidade produzida é consumida. A utilização de turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) nessas áreas pode simplificar o sistema de transmissão de energia e reduzir as perdas de energia. Este trabalho apresenta um estudo do efeito de uma edificação e de um estator sobre o escoamento e sua influência no desempenho de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo H-Darrieus de cinco pás com estator. O estudo empregou o uso da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para realizar uma análise numérica em regime permanente com o uso do modelo de turbulência *SST $k-\omega$* . Para simplificar o caso estudado e reduzir o custo computacional, foi realizada uma simulação para o edifício e outra para a turbina com estator. Foi obtido o perfil de velocidade no topo do prédio a fim de ser implementado como condição de entrada da simulação da turbina para quatro posições angulares diferentes das pás. A turbina e o estator foram baseados em estudos presentes na literatura e suas escalas geométricas foram aumentadas em dez vezes. Como resultado das simulações, se observou um aumento da velocidade do vento ocasionado pelo telhado e pelo estator e sua influência no torque estático nas pás da turbina. Foi possível notar o ponto de estagnação na superfície frontal do prédio que acelerou o escoamento de ar para cima do telhado devido a geração de um gradiente de pressão adverso. Também se verificou a contribuição do difusor de ar no aumento de torque no sentido de rotação das pás à medida que acelera e direciona o vento para as pás de avanço e bloqueia o escoamento de ar para as pás de retorno.

PALAVRAS-CHAVE: Turbina eólica, CFD, Turbina eólica montada em um edifício, Torque estático.

DOUGLAS, D. S. **Numerical Analysis of the Flow around a Darrieus Turbine with Stator at the Top of an Urban Building in Porto Alegre with Static Torque Evaluation.** 2017. 26p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The growing generation of wind energy in the world represents an important step for renewable energy sources to overcome the world energy demand. The need to make this method of energy generation even more efficient is approaching its implementation in urban regions where much of the electricity produced is consumed. The use of vertical axis wind turbines (VAWT) in these areas can simplify the power transmission system and reduce energy losses. This work presents a study of the effect of a building and a stator on the flow and its influence on the performance of a H-Darrieus vertical axis wind turbine of five blades with stator. The study used the computational fluid dynamics (CFD) to perform numerical analysis in a steady state with the use of the *SST $k-\omega$* turbulence model. To simplify the case studied and reduce the computational cost, a simulation was performed for the building and another for the turbine with stator. The velocity profile was obtained at the top of the building in order to be implemented as an inlet condition for the turbine simulation with four different angular positions of the blades. The turbine and stator were based on past studies and their geometric scales were increased ten times the original. As a result of the simulations, an increase in wind speed caused by the roof and the stator was observed and also its influence on the static torque in the turbine blades. It was possible to note the stagnation point on the front surface of the building that accelerated the wind flow up the roof due to the increase of an adverse pressure gradient. The contribution of the air diffuser in generating torque in the direction of rotation of the blades has also been verified as it accelerates and directs the wind to the advance blades and blocks the air flow to the return blades.

KEYWORDS: Wind turbine, CFD, Wind turbine mounted on a building, Static torque.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa	1
1.3 Objetivos.....	1
1.3.1. Objetivo Geral	1
1.3.2 Objetivos Específicos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
3.1 Torque	3
3.2 Turbinas Eólicas de Eixo Vertical.....	3
3.3 Turbinas Montadas/Integradas em Edificações Urbanas	4
3.4 Zonas de Recirculação de Vento em Prédios de Telhado Plano.....	4
4. METODOLOGIA	4
4.1 Localização	5
4.2 Modelagem da Geometria.....	5
4.3 Domínio Computacional.....	6
4.4 Malha Computacional	6
4.5 Condições de Contorno	7
4.6 Modelo de Turbulência.....	7
5. RESULTADOS.....	7
5.1 Qualidade de Malha	7
5.2 Simulações	9
6. CONCLUSÕES.....	13
6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
ANEXO I – MÉTODO DE GRID CONVERGENCE INDEX (GCI)	16
APÊNDICE I – DETALHES DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO	16
APÊNDICE II – DETALHE DA MALHA DAS PÁS DA TURBINA.....	18
APÊNDICE III – LINHAS DE CORRENTE NO TOPO DA EDIFICAÇÃO.....	18

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Com as crescentes evidências do impacto no meio ambiente devido ao uso de combustíveis fósseis para geração de energia elétrica [UCSUSA, 2017], a aplicação de energia renovável torna-se uma das questões mais focadas da sociedade, desempenhando um papel importante na superação da demanda energética [GE Renewable Energy, 2017].

Entre os meios de geração de energia com emissão zero de gases poluentes durante a operação e menor impacto ambiental está a energia eólica. Por essa característica, a utilização de turbinas eólicas para geração de eletricidade é uma alternativa viável à queima de combustível fóssil.

Na última década, o mundo experimentou um grande aumento no número de parques eólicos. Todos os anos, o número de turbinas eólicas instaladas aumenta exponencialmente [IEA, 2010]. Porém, a maioria delas é construída longe das áreas urbanas onde a maior parte da eletricidade produzida é gasta. A geração de energia do vento dentro de um ambiente urbano permite um método eficiente de geração de energia à medida que a energia é gerada no local. O sistema de transmissão de energia é muito mais simples e as perdas de energia podem ser minimizadas [Balduzzi, 2012]. Recentemente houve um aumento na implementação de turbinas eólicas em localidades urbanas e suburbanas, mas sua utilização nessas regiões ainda é negligenciada devido as condições do vento causadas por obstáculos como prédios, casas e árvores. Áreas urbanas são caracterizadas por baixas velocidades de vento em comparação com as zonas rurais, por consequência das restrições do escoamento de ar. A fim de maximizar a conversão de energia dentro do ambiente urbano, são utilizadas turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) que são instaladas no telhado a uma altura fora da zona de turbulência causada pelo edifício. Devido a sua configuração, as TEEVs podem gerar energia em condições turbulentas e possuem um baixo torque para iniciar a rotação, além de serem simples e de baixo custo [Manwell *et al.*, 2009; Rohatgi *et al.*, 1999].

Chong *et al.*, 2013, demonstraram que a utilização de estatores para o direcionamento do ar pode melhorar significativamente o desempenho de uma TEEV, ajudando na resolução do problema de baixa velocidade para a auto partida.

1.2 Justificativa

A compreensão dos padrões do escoamento de ar em regiões urbanas é crucial para a escolha do local da montagem da turbina eólica. Seu posicionamento em zonas de baixa turbulência e maior velocidade de vento pode melhorar seu desempenho e, assim, viabilizar sua utilização como um meio viável na geração de energia eólica para um futuro sustentável. Este estudo visa a compreensão do comportamento do escoamento e de sua influência sobre a performance de uma turbina eólica de eixo vertical instalada no topo de uma edificação urbana através do uso de ferramentas numéricas. A utilização da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) pode ser usado para fornecer informações mais exatas e rápidas, auxiliando nas previsões de desempenho de modelos em relação ao escoamento de ar, pressão, torque e parâmetros similares.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho de conclusão de curso é a realização de simulações numéricas para verificar a influência de uma edificação urbana e de um estator sobre o escoamento de ar nas pás de uma turbina eólica do tipo H-Darrieus e analisar seu torque estático. As simulações utilizaram as configurações em escala geométrica ampliada da turbina eólica construída por Fiabani, 2016, cujo estator foi projetado com base na versão proposta por Chong *et al.*, 2013.

A geometria da TEEV estudada nesse trabalho foi montada no topo de uma edificação urbana, com formato de bloco simples, e envolvida por um estator.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Construção da geometria de uma edificação urbana e da turbina com estator;
- Simulação da edificação e obtenção do perfil de velocidades no topo da estrutura;
- Análise da altura de recirculação no telhado;
- Simulação da turbina com estator no topo da edificação e obtenção do torque estático para diferentes posições das pás;
- Comparação dos resultados com estudos presentes na literatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Hemida *et al.*, 2015, realizaram medições de velocidade de vento sobre o topo de um edifício alto com telhado plano. O experimento foi conduzido no túnel de vento atmosférico de Ruhr-University Bochum onde a velocidade do ar foi medida em sete posições sobre o telhado de um modelo com escala de 1: 300 através do uso de um anemômetro de fio quente. Os testes avaliaram quatro ângulos de vento diferentes (0°, 15°, 30°, 45°) onde o histórico dos tempos de velocidade foi usado para calcular as principais velocidades e intensidades de turbulências, tanto na direção da corrente de ar como nas direções verticais, e para revelar as diferentes frequências do escoamento de ar acima do telhado. Os resultados mostraram que o escoamento se separa e volta a tocar o telhado do edifício para formar uma bolha de separação. A altura da separação apresentou ser de cerca de um terço da largura do edifício, sendo que o escoamento é altamente turbulento dentro da separação e na camada de cisalhamento, entre a região de separação e o núcleo do escoamento. Foi verificado um aumento médio da velocidade do vento de cerca de 1,2 vezes a da velocidade de referência logo acima da camada de cisalhamento, em uma altura de 0,3 vezes a largura do edifício, e a amplificação máxima ocorreu no meio do edifício.

Islam *et al.*, 2013, abordaram os fatores que afetam a localização de instalação de turbinas eólicas montadas em telhados de edifícios (formato do telhado, direção do vento, altura do prédio e configuração da região urbana). Através da utilização da dinâmica dos fluidos computacional (CFD), foi analisado o escoamento de ar sobre uma série de telhados de formatos comuns com o intuito de averiguar a localização de maior produção de energia para uma micro turbina eólica. Para todas as configurações de telhado se verificou que a região de máxima intensidade de turbulência se estende desde a base do telhado até a 1,3 vezes a altura do prédio, o que indica que uma turbina montada no topo de uma edificação deve ser posicionada a uma altura igual ou maior a esta. Em termos de velocidade, todos os formatos de telhados apresentaram um efeito de aceleração sobre a velocidade incidente do vento. O estudo concluiu que o posicionamento correto de uma turbina montada sobre um telhado, de formato particular, pode maximizar a geração de energia com a aceleração do vento sobre a edificação.

Chong *et al.*, 2011, conduziram um estudo de viabilidade técnica e econômica de um sistema híbrido, montado no topo de uma edificação, para geração de energia renovável visando suprir parte da demanda energética do prédio. O sistema proposto é composto por uma TEEV, painéis solares e coletores de água da chuva e é cercado por um estator com o objetivo de aumentar a velocidade de incidência sobre as pás da turbina e melhorar a auto partida do rotor. Em Chong *et al.*, 2013, foram realizados testes em túnel de vento junto com simulações numéricas do sistema proposto em 2011, onde foi analisado o desempenho da turbina com e sem o estator. O teste foi conduzido com o uso de um modelo em menor escala e com uma nova configuração de estator. O uso do estator resultou em um aumento de 182% da velocidade de rotação da turbina e elevou em 3,48 vezes a potência elétrica durante o torque máximo para uma velocidade de vento de 6 m/s.

Fiabani, 2016, construiu uma turbina eólica de cinco pás do tipo Darrieus com rotor H e realizou um experimento em túnel aerodinâmico para comparar o desempenho da turbina com um estator proposto por Chong *et al.*, 2013, e com um novo estator cujas pás guias foram

alteradas para um perfil que busca o aumento da velocidade do fluido por efeito Venturi. O estator modificado apresentou maior valor de potência convertida em relação ao original. Trevizan, 2016, simulou em escala reduzida a turbina desenvolvida por Fiabani, 2016, utilizando seu estator otimizado e o estator proposto por Chong *et al.*, 2013. As simulações compararam os resultados de torque estático da turbina sem e com os dois tipos de estatores para três posições diferentes das pás da turbina, utilizando um modelo de turbulência *k- ω SST*. O estator com guias modificadas resultou em um torque estático maior, tendo um aumento máximo de 182%.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Torque

O torque, também conhecido como momento de uma força, é uma medida da tendência de uma força provocar a rotação de um corpo em torno de um ponto ou eixo específico. De acordo com Luebkehan *et al.*, 1995, para o torque se desenvolver, a força deve atuar sobre o mesmo de tal maneira que o corpo comece a torcer. Isso ocorre toda vez que uma força é aplicada para que não passe pelo centróide do corpo. O torque é devido a uma força que não possui força de reação igual e oposta diretamente ao longo de sua linha de ação. O torque estático é dado por

$$\vec{T} = \vec{R}_{AB} \times \vec{F}_P \times \vec{R}_{AB} \times \vec{F}_Y, \quad (3.1)$$

em que A é o centro especificado do momento, B é a origem da força, \vec{T} é o torque (Nm), \vec{R}_{AB} é o vetor momento (m), \vec{F}_P é a força de pressão (N) e \vec{F}_Y é a força viscosa (N) [Fluent Theory Guide, 2013].

Para a comparação de desempenho entre turbinas eólicas é utilizado o coeficiente de torque, dado pela expressão

$$c_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho u^2 AR}, \quad (3.2)$$

na qual ρ é a massa específica do ar (kg/m^3), u é a velocidade do fluido (m/s), A é a área da seção da turbina (m^2), R é o raio da turbina (m) e T é o torque (Nm).

3.2 Turbinas Eólicas de Eixo Vertical

As turbinas eólicas podem ser classificadas de acordo com os tipos de forças aerodinâmicas usadas para converter energia do vento e a orientação do seu eixo de rotação, sendo essa a principal classificação das turbinas eólicas. A turbina eólica de eixo horizontal (TEEH) é uma turbina na qual o eixo de rotação do rotor é paralelo ao escoamento de ar e ao solo. TEEHs funcionam quando o vento passa sobre ambas superfícies da lâmina das pás, que possui perfil aerodinâmico, passando mais rapidamente no lado superior da lâmina. Assim, é criada uma área de baixa pressão acima do perfil aerodinâmico. A diferença nas pressões entre a superfície superior e inferior resulta em forças de sustentação ocasionando a rotação do eixo da turbina [Bajaro, 2011]. Turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV), ao contrário das TEEHs, rotacionam seu eixo na orientação vertical, que é perpendicular ao escoamento.

TEEHs são mais eficientes em comparação com as TEEVs, mas exigem ventos uniformes. Em áreas urbanas onde o vento não é uniforme e constante, TEEVs são mais benéficas devido à sua característica de baixo torque de partida e à outras vantagens, como o baixo custo de construção e o design simples [Manwell *et al.*, 2009]. TEEVs podem funcionar mesmo quando o escoamento é turbulento, tornando-as adequadas para aplicações urbanas e em pequena escala [Armstrong *et al.*, 2012].

Entre as turbinas de rotores verticais está a Darrieus, que é composta de pás com orientação vertical. A turbina Darrieus é rotacionada pelo torque produzido pelas forças de sustentação atuando no perfil aerodinâmico das pás. As lâminas das pás permitem que a turbina atinja velocidades superiores à velocidade real do vento, assim, tornando-as bem mais adequadas para a geração de eletricidade quando há escoamentos turbulentos [Bajaro, 2011].

3.3 Turbinas Montadas/Integradas em Edificações Urbanas

Representam turbinas eólicas que podem ser incorporadas em uma edificação de modo a maximizar a geração de energia. Atualmente existem três configurações possíveis para a implementação prática de turbinas eólicas dentro de uma área urbana [Campbell *et al.*, 2001]:

- Simplesmente montando (paisagismo) turbinas eólicas convencionais independentes em um ambiente urbano;
- Turbinas eólicas retro-ajustadas em edifícios existentes;
- Integração de turbinas eólicas em edifícios especialmente concebidos para esse propósito.

O último conceito é bastante complexo, devido a necessidade de estudos mais aprofundados sobre os padrões aerodinâmicos das formas dos edifícios para a otimização da integração da turbina. Já o encaixe das turbinas eólicas paisagísticas e retro-ajustadas dentro das áreas urbanas pode ser bastante direto ao considerar condições urbanas específicas [Mertens, 2003]. Turbinas montadas em prédios são ligadas diretamente à estrutura do edifício, sendo esse utilizado como uma torre para posicionar a turbina em escoamentos de ar favoráveis à geração de energia.

3.4 Zonas de Recirculação de Vento em Prédios de Telhado Plano

Zonas de recirculação ocorrem quando um escoamento de ar é afetado por um obstáculo e podem impactar na performance de uma turbina eólica. O cálculo para a altura de recirculação H_C é discutido no capítulo 45 do *ASHRAE Handbook*, 2011. Para um escoamento perpendicular a uma parede de construção, a altura H e a largura W de uma face frontal de uma edificação determina o tamanho de escala R que caracteriza a influência do edifício no escoamento do ar. De acordo com Wilson (1979),

$$H_C = 0,22R, \quad (3.3)$$

$$R = B_S^{0,67} B_L^{0,33}, \quad (3.4)$$

onde B_S é a menor dimensão (H ou W) da face do edifício contra o vento e B_L é a maior dimensão (H ou W) da face do edifício contra o vento.

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada para o presente trabalho consiste na realização de uma simulação numérica do escoamento de ar para a edificação e outra para a região no topo do prédio com a presença da turbina e do estator. A primeira simulação visa à obtenção do perfil de velocidades no topo do prédio e a segunda utilizará esse perfil como condição de contorno na entrada. Essa abordagem permite analisar a altura do telhado necessária para posicionar a turbina fora da região de recirculação e reduzir o tempo de processamento e o custo computacional quando comparada a uma única simulação. Foi feita a montagem das geometrias da turbina, estator e edificação seguido da construção da malha computacional, implementação das condições de contorno e a escolha do modelo computacional. A simulação da edificação urbana utilizou um caso fictício para o prédio, não havendo edifício construído no local como o que se estudou.

As simulações foram realizadas em regime permanente no software *Ansys Fluent* que utiliza o método de volumes finitos para resolver as equações de Navier-Stokes. Para computar as propriedades do escoamento em regime permanente se usou o modelo *pressure-based*

Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS). Foi utilizado um computador com 8 núcleos, 3,5 GHz, 64 bits e memória RAM de 64 GB pertencente ao Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS (LMF). Os passos utilizados para o estudo são descritos nas seções a seguir.

4.1 Localização

Para a simplificação do caso estudado, a escolha da localização da edificação foi realizada com base na menor quantidade de barreiras possível, como prédios e árvores ao seu redor, rugosidade do terreno, direção do vento e na velocidade média anual. A área escolhida para a localização da edificação se encontra na região sul de Porto Alegre, à beira do rio Guaíba, onde a velocidade média anual do vento é de 6 m/s. A rugosidade superficial da localidade é de 0,0005 m e a direção predominante do vento é Leste [Atlas eólico do Rio Grande do Sul, 2014]. Devido à baixa rugosidade da região, o perfil de velocidade é praticamente uniforme. A Figura 4.1 apresenta a localização do edifício.

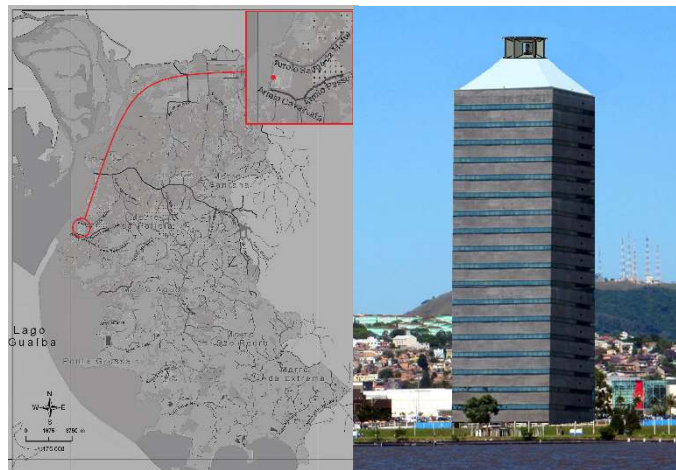
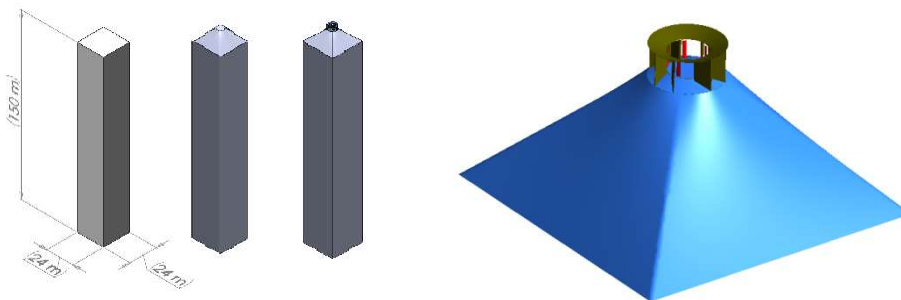


Figura 4.1 - Localização do edifício na cidade de Porto Alegre.

4.2 Modelagem da Geometria

A edificação possui formato de bloco simples (base de 24 m x 24 m e altura de 150 m), sem a presença do telhado que suportará a estrutura da turbina com estator. Isso se deve a necessidade de estudar a altura de recirculação causada pelo edifício sobre o escoamento de ar, para escolher o melhor posicionamento da turbina eólica e reduzir esse efeito sobre sua performance. Após a obtenção da altura de recirculação foi possível modelar a geometria do telhado, que possui formato piramidal, a fim de melhorar os efeitos aerodinâmicos. A Figura 4.2 apresenta a montagem da geometria do caso estudado e da simulação da turbina com estator no topo da edificação. O telhado que suporta o conjunto estator/turbina possui a mesma largura e comprimento do prédio e sua altura é de 10 m. O estator posicionado no topo do edifício tem 2,7 m de altura e 6 m de diâmetro e a turbina possui 1,5 m de altura e 3 m de diâmetro.



(a) Montagem completa do caso estudado. (b) Montagem da turbina com estator no topo da edificação.

Figura 4.2 – Detalhes da montagem da geometria do (a) caso estudado e da (b) simulação da turbina com estator no topo da edificação.

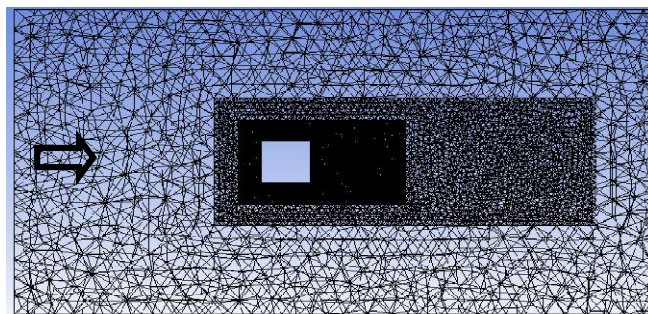
O estator e a turbina utilizados para o estudo foram baseados no modelo construído por Fiabani, 2016, e utilizaram o mesmo perfil aerodinâmico das pás, aerofólio WORTMANN FX 63-137, porém com corda de 0,3 m e altura das pás de 1,5 m. Foram retiradas partes estruturais da turbina para simplificar a simulação numérica do modelo, como o eixo e as hastes horizontais.

4.3 Domínio Computacional

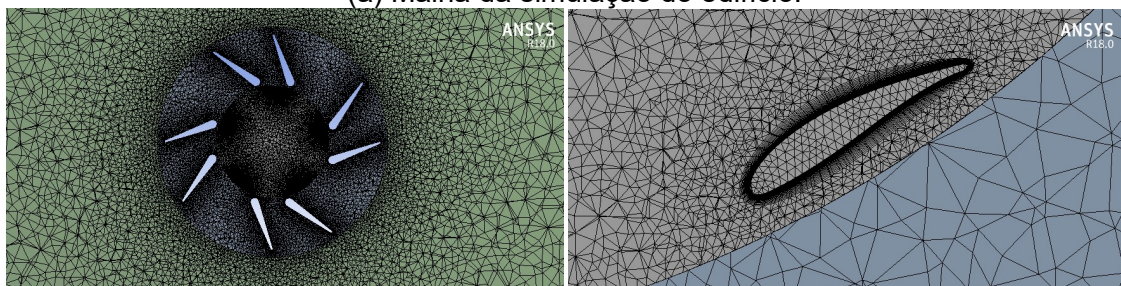
Para este trabalho foram realizadas uma série de simulações com diferentes tamanhos de domínios computacionais para criar um volume de domínio que fosse grande o suficiente para obter um nível satisfatório de resultados precisos e com custo computacional razoável. Os efeitos dos limites das paredes do volume computacional foram verificados para não interferirem com o resultado final e garantir que o vento flua naturalmente como em condições atmosféricas reais.

4.4 Malha Computacional

A criação das malhas computacionais foi realizada com a utilização do software *Workbench Mesh*, da Ansys. A Figura 4.3 apresenta os detalhes das malhas utilizadas nas simulações em ambos os casos estudados. Para a malha da simulação do edifício, foram criados dois sub-domínios retangulares que englobam o prédio a fim de melhorar a modelagem do escoamento. A lagura dos domínios a partir da face traseira do prédio é mais estendida visando melhorar a resolução da esteira criada pelo escoamento de ar ao contornar o edifício. O mesmo princípio foi utilizado no caso da turbina no topo da edificação, onde foram gerados dois sub-domínios: um que envolve a turbina e outro que engloba o estator. Foi realizado um aumento no refino da malha do maior sub-domínio para o menor com a utilização de elementos tetraédricos. Esses elementos são mais simples de criar e possuem a capacidade de preencher qualquer domínio. Os elementos das superfícies dos sólidos foram reduzidos a um menor tamanho máximo de elemento em comparação ao domínio e sub-domínio com a finalidade de servirem de ponto focal onde os elementos começam a crescer. Considerando a complexidade da geometria das pás, um esquema de grade híbrida foi utilizado para discretizar o domínio. Como pode ser visualizado na Figura 4.3c, a grade consiste em camadas de prismas estruturados em torno do perfil aerodinâmico e malhas tetraédricas para o resto do domínio. Uma malha fina com maior concentração de nós é necessária nessas regiões, pois elas são críticas para a observação da separação do fluxo e exigem maior resolução.



(a) Malha da simulação do edifício.



(b) Malha da simulação da turbina no telhado. (c) Malha híbrida no perfil aerodinâmico da pá.

Figura 4.3 – Detalhes das malhas da (a) simulação do edifício, (b) da simulação da turbina no telhado e (c) do perfil aerodinâmico da pá.

4.5 Condições de Contorno

De acordo com Franke, 2006, as condições de contorno representam a influência dos arredores que foram cortados pelo domínio computacional. Como elas determinam em grande extensão a solução dentro do domínio computacional, sua seleção adequada é muito importante em uma simulação CFD.

O presente trabalho utilizou como condição de entrada, funções definidas pelo usuário (UDF) que foram introduzidas no *Fluent* para representar os perfis de velocidade nas simulações. Na simulação da edificação foi introduzida uma UDF para o perfil de velocidades regida pela lei logarítmica, que é uma combinação de pesquisa teórica e empírica originada do escoamento da camada limite em dinâmica dos fluidos e é determinada pela seguinte equação

$$v(h) = v_{ref} \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(h_{ref}/z_0)}, \quad (4.1)$$

onde h_{ref} representa a altura de referência da medida da velocidade, v_{ref} a velocidade nesta altura de referência e z_0 é o comprimento de rugosidade. Já a simulação da turbina eólica utilizou uma UDF formada pelos dados de velocidade obtidos no topo do prédio para representar o perfil de velocidade na entrada do domínio. Em ambos os casos simulados, as paredes foram definidas com condições de contorno de não deslizamento e com pressão atmosférica na saída. As UDFs utilizadas são descritas no Apêndice I.

4.6 Modelo de Turbulência

O modelo de turbulência escolhido para o estudo é o modelo *SST k- ω* que possui características combinadas dos modelos de *k- ω* e *k- ϵ* . Essa combinação permite uma melhor capacidade de descrever a camada limite turbulenta próxima de superfícies e escoamentos com altos números de Reynolds. De acordo com Daí *et al.*, 2010, esse modelo providencia resultados superiores para escoamentos com forte gradiente adverso e separação em simulações de turbinas. A escolha se baseou nas recomendações do *Fluent Theory Guide*, 2013, que sugere a utilização deste modelo para analisar perfis aerodinâmicos. Foi utilizado as configurações padrões do *Fluent* para as constantes do modelo e para o método de solução.

5. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e analisados os resultados obtidos no término das simulações computacionais. Anteriormente à realização das simulações do prédio e da turbina no topo da edificação, foi conferida a qualidade da malha em ambos os casos para que em seguida fossem analisados os resultados das simulações. No caso da turbina no topo do prédio, foram realizadas quatro simulações para diferentes posições angulares da turbina, onde uma das pás é posicionada nos ângulos de 0°, 24°, 35° e 48°.

Todas as simulações foram realizadas até que ocorresse a estabilização dos critérios de convergência em função do tempo, sendo que os valores para os resíduos de continuidade foram de 10^{-3} e para o restante dos resíduos foram de 10^{-4} . Regiões onde ocorrem fenômenos mais complexos dificultam a convergência desse critério, exigindo um refino maior na malha e consequentemente de maior poder de processamento computacional. A simulação do caso da edificação e o caso da turbina no telhado do prédio levaram em média 12 e 8 horas, respectivamente.

5.1 Qualidade de Malha

A fim de alcançar resultados coerentes nas simulações, foram realizados estudos de dependência de malha para ambos os casos estudados. Foram executados três critérios diferentes para analisar a qualidade da malha.

No caso da simulação do prédio, foi escolhido a velocidade do vento ao longo de uma certa altura como critério de convergência. Após a simulação, foi obtida a velocidade do vento

na altura do prédio (150 m) ao longo da entrada do domínio computacional e a parte frontal da edificação. Assim foram criadas linhas de velocidade do vento em função da posição para comparar as soluções de uma malha grosseira (6.199.646 volumes) com uma intermediária (7.924.538 volumes) e de uma malha intermediária com uma malha fina (8.653.190 volumes). A Figura 5.1 apresenta a comparação dos resultados dos valores de velocidade do vento sobre as linhas para as diferentes malhas. Os resultados da malha fina e intermediária apresentam pouca variação dos valores, independente da quantidade de elementos em sua composição. Com base nesses resultados e por apresentar um menor número de elementos, foi escolhida a malha intermediária para realizar a simulação.

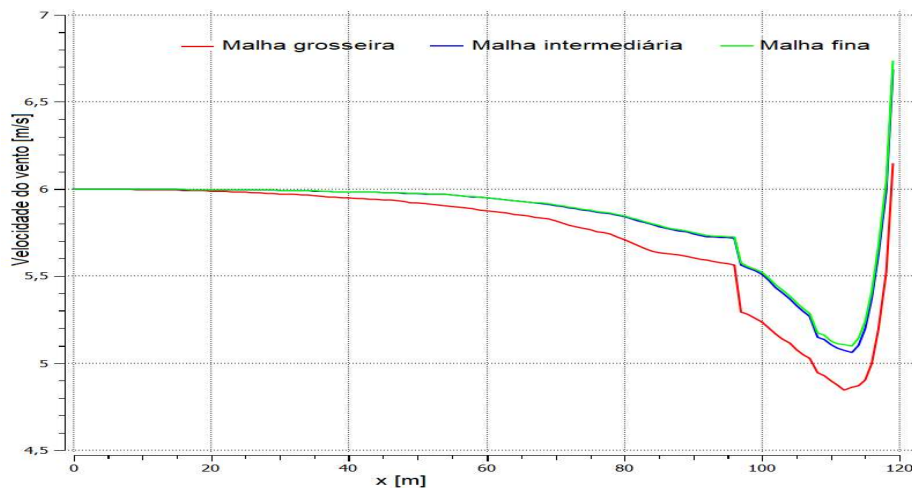


Figura 5.1 - Gráfico comparativo da velocidade do vento para diferentes malhas.

Para o caso da simulação da turbina no topo da edificação, foi adotado como critério de convergência a avaliação do y^+ e o método de *Grid Convergence Index* (GCI).

O GCI fornece uma abordagem assintótica objetiva para a quantificação da incerteza da convergência da malha. Ele permite uma interpretação uniforme dos resultados do refinamento de malha [NPARC, 2017]. As equações utilizadas no método de GCI são apresentadas no Anexo I.

O y^+ é um valor adimensional e indica a distância até a qual os efeitos da camada limite serão importantes. É utilizado para medir a resolução da malha na área próxima ao contorno de paredes. Um valor abaixo de 10 é considerado adequado para o modelo de turbulência *SST $k-\omega$* [Fluent Theory Guide, 2013] porém existem fontes na literatura que indicam valores menores.

Seguindo o mesmo passo do caso anterior, foram criadas três malhas distintas para a simulação. A Tabela 5.1 apresenta os resultados da aplicação de ambos os métodos utilizados para verificar a qualidade da malha da simulação da turbina no topo do prédio onde os valores para o coeficiente de torque estático foram retirados de uma das pás da turbina.

Tabela 5.1 – Resultado dos métodos de avaliação de qualidade da malha.

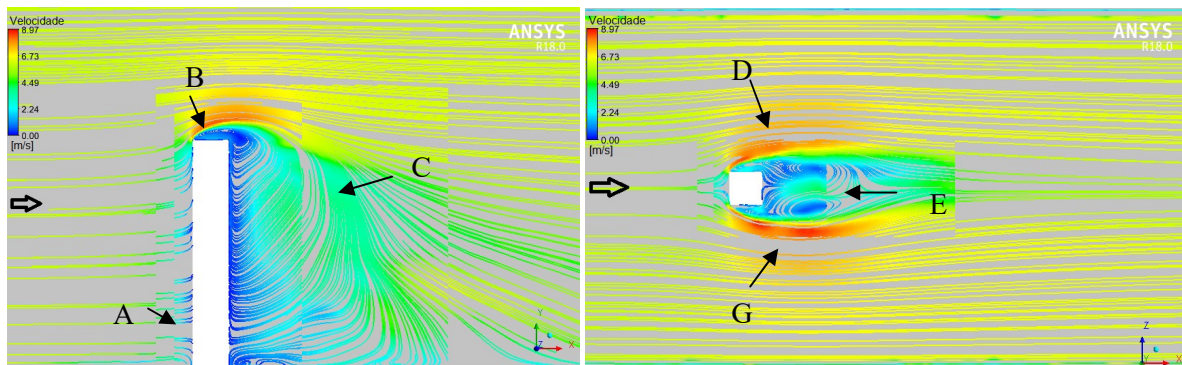
Malha	Número de elementos	y^+ máximo turbina	GCI	Coeficiente de Torque estático
Fina	10.537.209	5,698	5,13 %	0,04888
Intermediária	8.723307	8,984	25,82 %	0,04219
Grosseira	6.759.012	12,485	-	0,01315

Os valores de coeficiente de torque estático ficaram relativamente próximos para a malha fina e intermediária. O valor para o critério y^+ em ambas as malhas é considerado adequado. O baixo valor de GCI para a malha fina indica que a solução não está tão distante do valor assintótico, ou seja, a solução não irá variar muito com a implementação de um maior refinamento. Por esse motivo foi escolhida da malha fina para a simulação da turbina no topo do prédio.

5.2 Simulações

O caso da simulação computacional do prédio é apresentado na Figura 5.2, onde são visualizadas as linhas de corrente cuja a direção do escoamento ocorre da esquerda para a direita. É observada a divisão do escoamento de ar principal em três correntes: a primeira ocorre na região inferior em direção à parte frontal do prédio; a segunda desvia pelas laterais do prédio; a terceira passa por cima do telhado. A divisão do escoamento ocorre no ponto de estagnação (A) na região inferior da face do prédio. Esse ponto é um ponto de máxima pressão que, combinado com uma pressão mais baixa ao seu redor, gera um gradiente de pressão que acelera o escoamento de ar para cima do prédio. Uma zona de recirculação (B) com altura de 8,5 m é formada em cima do prédio, causada por um gradiente de pressão adverso que retrai o escoamento para a região de baixa pressão. Nessa zona o escoamento se separou ao tocar na borda do telhado e volta a entrar em contato em seguida. Também são formados vórtices (C,D,E e G) nas laterais e atrás do edifício, onde ocorre a formação de uma esteira. Para averiguar o resultado obtido na simulação, a altura da zona de recirculação foi comparada com o valor teórico através das equações (3.3) e (3.4). A solução dessas equações resultou em um valor de 9,6 m, o qual se aproxima do valor obtido na simulação. Com essas informações foi possível criar a geometria do telhado, escolhendo-se como altura o valor de 10 m para garantir o afastamento da turbina da zona de recirculação.

Para gerar um perfil de velocidade que represente os efeitos da presença da edificação e ser introduzido na simulação da turbina no telhado do prédio, foram utilizados os valores de velocidade a partir do início da base do telhado até a altura de 130 m. Com esses dados foi ajustada uma curva que foi introduzida na UDF da simulação da turbina como condição de entrada.



(a) Vista Lateral do prédio com $z = 0$ m.

(b) Vista Superior do prédio com $y = 100$ m.

Figura 5.2 - Linhas de corrente da simulação do prédio para a vista (a) lateral e (b) superior.

A simulação da turbina no topo do prédio foi realizada para quatro posições angulares das pás conforme ilustram as Figuras 5.3 e 5.4. Nestas imagens, tanto o plano quanto o contorno da velocidade para a turbina e o estator estão a uma altura de 111 m. A configuração da montagem das pás da turbina foi elaborado com a intenção destas girarem no sentido oposto à regra da mão direita, sentido anti-horário das figuras. É possível notar a perturbação do escoamento ao entrar pelo difusor de ar causando pequenos vórtices próximos aos direcionadores. O estator concentra parte do escoamento de ar na região onde há a movimentação das pás de avanço. Assim, é criado um efeito Venturi no difusor, que gera um aumento da velocidade do vento que entra na turbina. O escoamento ao entrar em contato com as superfícies das pás forma vórtices atrás das lâminas e gera uma diferença de pressão que ocasiona em uma força de sustentação. Isso contribui para a rotação da turbina à medida que exerce torque no sentido de giro. O estator também protege a região de movimentação das pás de retorno ao evitar a formação de forças de sustentação que favoreçam a rotação no sentido contrário.

A Figura 5.5 mostra a vista lateral do campo de velocidade do vento da simulação da turbina no topo do prédio em $z = 0$ m. É possível notar a perturbação do escoamento devido à presença do telhado e da turbina (A), assim como a formação de zonas de recirculação atrás

do telhado (B). O contorno das cores e sua inclinação (C) logo na entrada do domínio indica o efeito causado pela edificação no escoamento. A região verde na imagem (D) mostra um aumento da velocidade do escoamento ocasionado pela borda da edificação e pelo telhado que ocasionou a aceleração do vento. Esse escoamento de ar com maior velocidade é direcionado pelo estator para o interior da turbina. Também foi verificada a saída do escoamento na parte superior do estator onde houve a formação de uma pequena zona de recirculação.

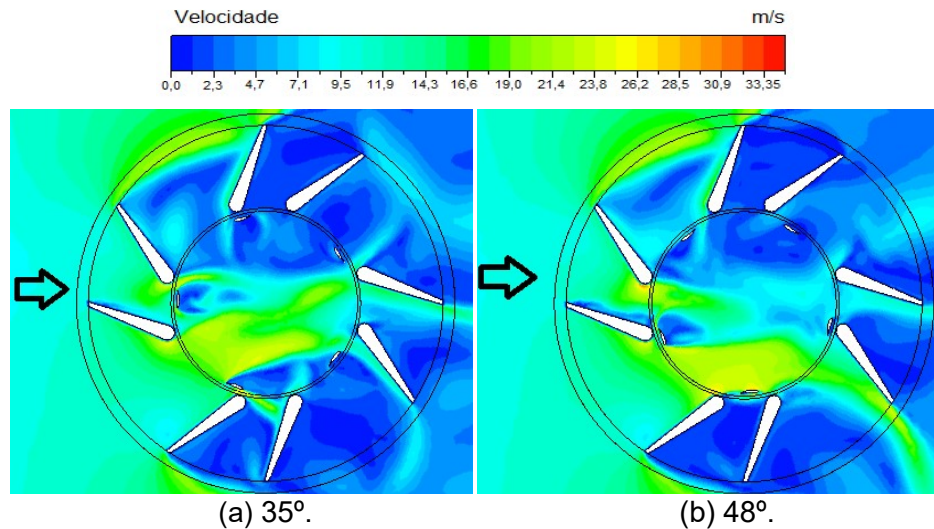


Figura 5.3 - Campo de velocidade do vento da simulação da turbina no topo do prédio em $y = 111$ m para as posições angulares da turbina de (a) 35° e (b) 48°.

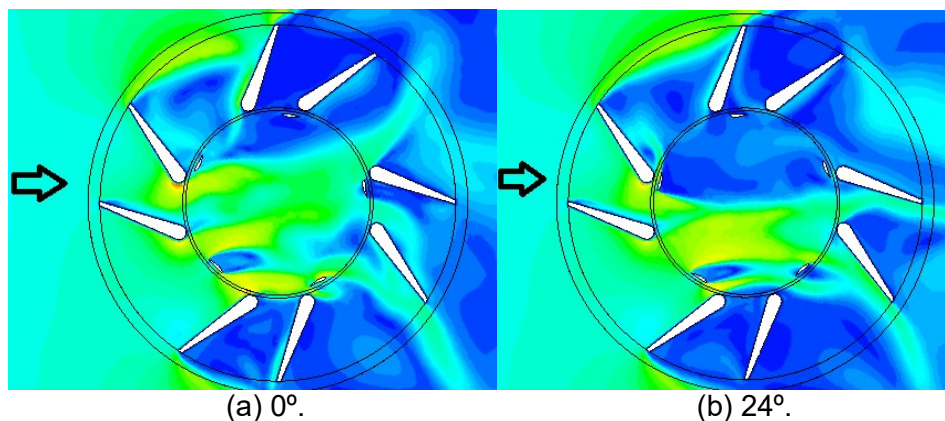


Figura 5.4 - Campo de velocidade do vento da simulação da turbina no topo do prédio em $y = 111$ m para as posições angulares da turbina de (a) 0° e (b) 24°.

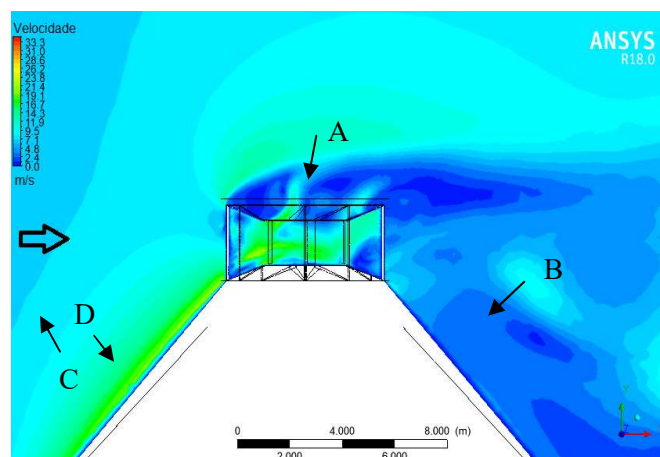


Figura 5.5 - Campo de velocidade do vento da simulação da turbina no telhado para $z = 0$ m.

A Figura 5.6 mostra a turbina na posição angular de 0° e o sentido de movimentação das pás em seu centro, onde a numeração das pás da turbina se dá em ordem crescente no sentido horário da imagem. As pás giram no sentido anti-horário ao das Figuras 5.3 e 5.4 à medida que o ângulo da posição angular da turbina aumenta.

A Figura 5.7 apresenta o gráfico dos valores de torque estático obtidos em cada pá para cada variação da posição angular da turbina. Os valores negativos indicam que o torque estático está sendo exercido no sentido da rotação. As variações das posições de uma pá cobrem em torno de um oitavo de volta da turbina. O torque gerado varia com a magnitude e orientação das forças de arrasto e sustentação causados pelo escoamento em cada uma das pás. É possível notar uma maior contribuição de torque no sentido de rotação vindo da pá 5. Isso ocorre devido à orientação dos difusores de ar do estator que direcionam o escoamento de ar para a região de avanço das pás onde a pá 5 se encontra. Ocorre um decréscimo do torque da pá 5 quando o escoamento sofre interferência em sua trajetória devido a pá 1, como mostrado na Figura 5.4a e 5.4b. A medida que aumenta o ângulo da posição angular da pá 1, seu valor de torque vai aumentando. É verificado que a pá 3 possui a menor contribuição de torque estático na turbina, sendo que grande parte desse torque é gerado no sentido contrário de rotação da turbina. Isso se deve ao fato da pá estar posicionada na região de retorno das pás, onde o escoamento de ar é contrário ao alinhamento de seu sentido de movimentação angular. A redução dos valores de torque da pá 4 mostra bem esse efeito, ao passo que o posicionamento da pá entra na zona de retorno das pás. A presença do estator reduz esse efeito de perda no torque ao proteger as pás do escoamento contrário a direção de movimento angular das pás.

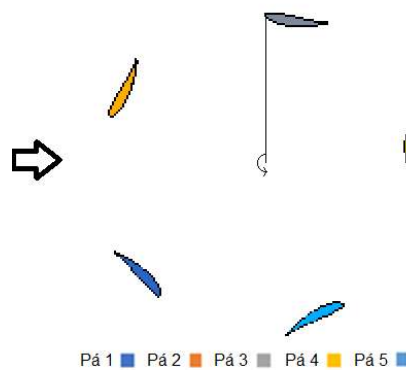


Figura 5.6 - Imagem da numeração das pás da turbina para a posição angular de 0° .

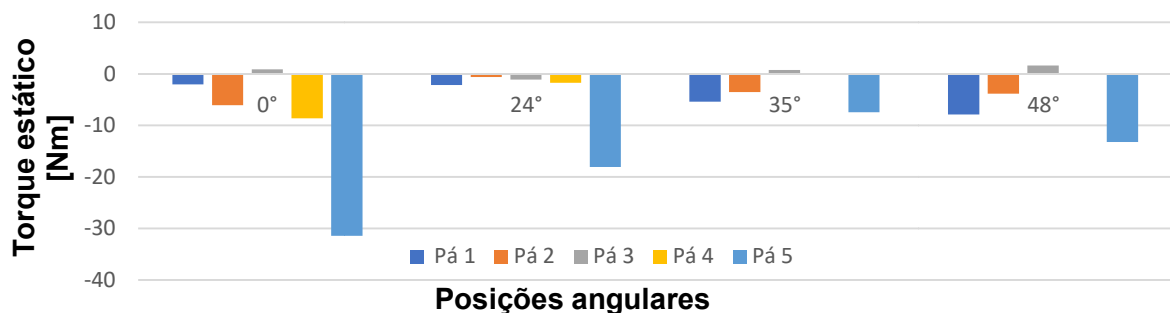


Figura 5.7 - Gráfico do torque estático em cada uma das pás para as diferentes posições angulares.

Para averiguar os resultados alcançados neste trabalho, foi realizada uma comparação analítica do caso simulado com estudos presentes na literatura. A Tabela 5.2 apresenta os dados de coeficiente de torque estático total para cada posição angular da turbina simulada nesse trabalho.

Trevizan, 2016, executou simulações, em regime permanente, de uma turbina de eixo vertical para diferentes posições angulares da turbina com três estatores diferentes e velocidade de vento de 8 m/s. Foi realizada a simulação do modelo de turbina projetado por

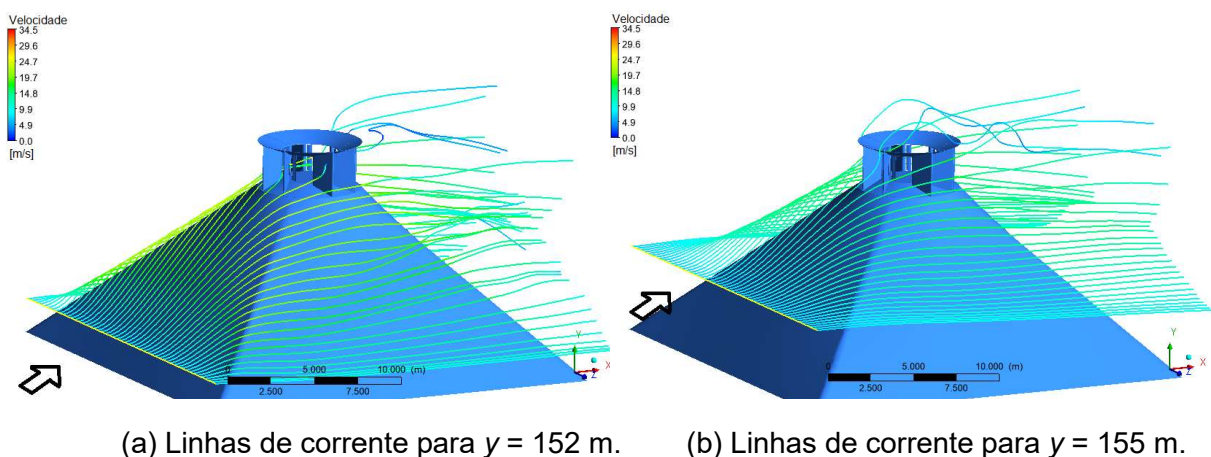
Fiabani, 2016, que corresponde a versão utilizada nesse trabalho com escala dez vezes menor. Para a mesma configuração de estator e posição das pás, o estudo do autor demonstrou os mesmos efeitos no escoamento verificados no presente trabalho, causados pelo estator. O direcionamento do vento pelo estator para a turbina ocasionou um efeito Venturi e houve um bloqueio do escoamento pelos difusores de ar na região referente as pás de retorno.

Alaimo *et al.*, 2015, realizou simulações numéricas para uma turbina do tipo H-Darrieus de três pás com 1,15 m de altura e 0,99 m de diâmetro. As simulações permanentes foram executadas para mudanças de 10° nas posições das pás em volta do eixo da turbina e com velocidade de vento de 7 m/s. Os resultados mostraram um coeficiente de torque estático médio de 0,107, mesma ordem de grandeza para os valores encontrados no presente trabalho.

Tabela 5.2 – Dados de coeficiente de torque estático para as posições estudadas.

Posições	Coeficiente de torque
0°	0,10673
24°	0,15764
35°	0,16663
48°	0,31916

Para verificação do comportamento do escoamento de ar na simulação da turbina no topo da edificação, foram traçadas diferentes linhas de corrente a partir da face de entrada do domínio. A Figura 5.8 mostra as linhas de correntes para altura de 152 m, 155 m e 158 m. Se verifica nas imagens o contorno suave do escoamento ao redor do telhado e seu aumento de magnitude à medida que percorre sua superfície. As linhas de corrente com maior altura sofrem pouca interferência do telhado em sua trajetória. A Figura 5.9 apresenta as linhas de corrente na simulação no topo da edificação que passam a uma distância de $x = 12$ m da face de entrada do domínio e a uma altura de $y = 111$ m e as que iniciam em $z = 0$ m. É possível notar que o escoamento é induzido para dentro da turbina através do estator. Esse efeito combinado com o aumento de velocidade do ar ao percorrer o telhado contribui para um maior torque positivo nas pás a medida que um maior volume do escoamento de ar é conduzido às pás. A Figura 5.9a mostra as linhas de corrente sendo direcionadas pelo estator para a turbina. Ao contornar o obstáculo, o escoamento de ar cria uma zona recirculação na parte traseira do telhado. Também é verificada uma zona de recirculação acima do estator, cujo escoamento de ar se origina do estator para a turbina e que se mantém retido devido ao escoamento de ar que contorna o estator por cima.



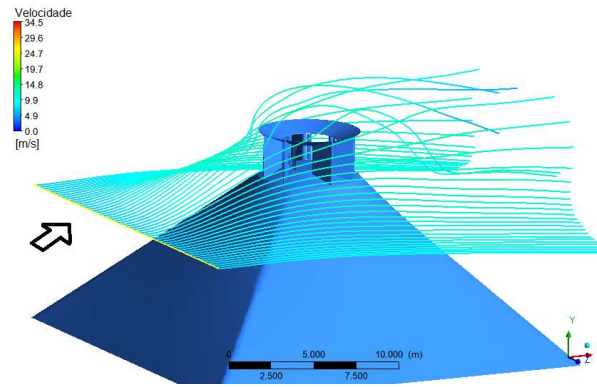
(c) Linhas de corrente para $y = 158$ m.

Figura 5.8 - Linhas de corrente na simulação no topo da edificação para (a) $y = 152$ m, (b) $y = 155$ m e (c) $y = 158$.

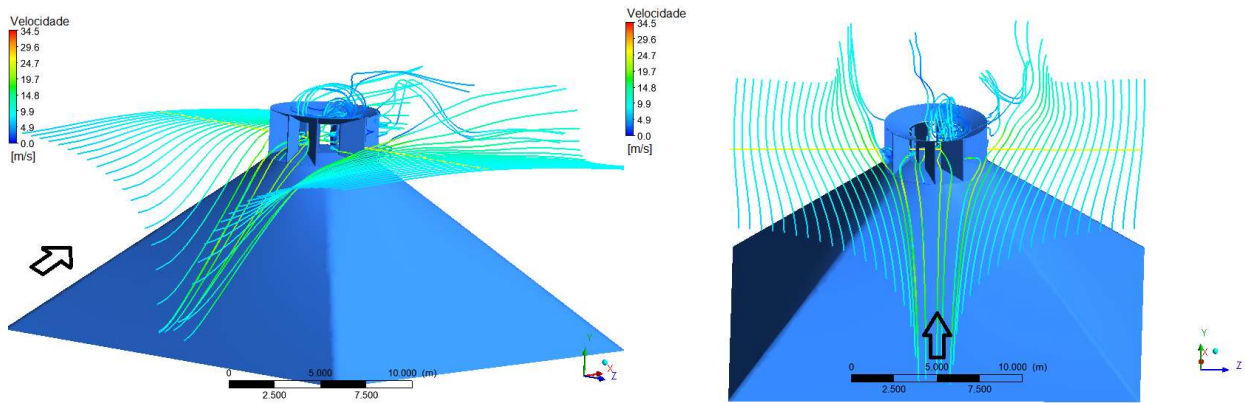
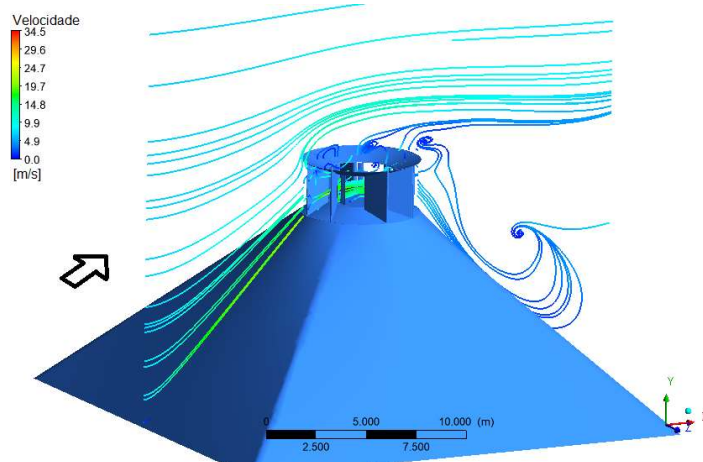
(a) Linhas de corrente para $y = 111$ m e $x = 12$ m.(b) Linhas de corrente para $z = 0$ m.

Figura 5.9 - Linhas de corrente na simulação no topo da edificação para (a) $y = 111$ m e $x = 12$ m e (b) $z = 0$ m.

6. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram realizadas simulações numéricas do escoamento de ar que incide sobre uma turbina eólica de eixo vertical com estator montada no topo de uma edificação. A metodologia adotada nesse estudo se mostrou satisfatória na representação do comportamento do escoamento, modificado pela presença de uma edificação urbana. A altura

da zona de recirculação no topo do prédio se mostrou condizente com a literatura, assim como os efeitos no escoamento causados pelo edifício. Foram executadas simulações para quatro posições angulares diferentes da turbina com a finalidade de verificar a influência do escoamento de ar nas diferentes pás da turbina e analisar o torque estático em cada uma destas. Os resultados mostraram que os difusores de ar do estator beneficiam a geração de torque no sentido de rotação das pás a medida que aceleram e direcionam o vento para as pás de avanço e bloqueiam o escoamento de ar para as pás de retorno. Foi verificado o aumento da velocidade do vento na turbina devido ao telhado e pelo efeito Venturi causado pelo estator. Não se observou os efeitos da zona de recirculação do topo do prédio na análise dos resultados das simulações da turbina. Os resultados encontrados neste trabalho foram coerentes com estudos presentes na literatura.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se:

- Estudar o desempenho de turbinas montadas em edifícios para diferentes telhados. O posicionamento correto de uma turbina instalada no topo de um prédio, para determinado formato de telhado, pode maximizar o ganho de energia da aceleração do vento acima do edifício.
- Realizar estudos do escoamento de ar em cima do telhado para diferentes alturas de prédio, com localização em um ambiente urbano.
- Otimizar o domínio computacional e a malha da simulação, a fim de reduzir o custo computacional e, ao mesmo tempo, manter a exatidão dos resultados. As regiões em torno do edifício e dos perfis aerodinâmicos requerem maior refinamento da malha para garantir a resolução dos efeitos no fluido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alaimo, A., Esposito, A., Messineo, A., Orlando, C., Tumino, D., “**3D CFD Analysis of a Vertical Axis Wind Turbine**”, *Energies*, 8, 3031-3033p, 2015.

Ansyst; “**Ansys Fluent 13.0 Theory Guide**”, Ansys, 2013.

Armstrong, S., Fiedler, A., Tullis, S. “**Flow separation on a high Reynolds number, high solidity vertical axis wind turbine with straight and canted blades and fences**”, *Renew. Energy* 41, 13–22p, 2012.

ASHRAE Handbook; “**Building air intake and exhaust design**”, HVAC Applications, 45-45.13p, 2011.

Atlas eólico do Rio Grande do Sul, “**Mapas eólicos**”, Atlas eólico, 73-76p, 2014.

Bajaro, D.C.M. “**Horizontal and Vertical Axis Wind Turbines**”, Mahatma Gandhi, 2011.

Balduzzi, F. “**Microeolic turbines in the built environment: Influence of the installation site on the potential energy yield**”, *Renewable Energy*, 163-174p, 2012.

Campbell, N., et al., “**Wind energy for the built environment (Project WEB)**”, Proc. European Wind Energy Conference, Copenhagen, Denmark, 2001.

Chong, W. T, Naghavi, M.S, Poh, S. C, Mahlia, T. M. I, Pan, K. C. “**Techno-economic analysis of a wind-solar hybrid renewable energy system with rainwater collection feature for urban high-rise application**”, *Applied Energy*, vol 88, 4067-4077p, 2011.

Chong, W. T, Fazlizan, A, Poh, S. C, Pan, K. C, Hew, W. P, Hsiao, F. B. **“The design, simulation and testing of an urban vertical axis wind turbine with the omni-direction-guide-vane”**, Applied Energy, vol 112, 601-609p, 2013.

Dai, Y.M., Gardiner, N. and Lam, W.H., **“CFD Modelling strategy of a straight-bladed vertical axis marine current turbine”**. Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, China, 767-773p, 2010.

Fiabani, A. **“Estudo de direcionadores de escoamento para turbinas eólicas de eixo vertical aplicadas em áreas urbanas”**, Relatório completo projeto de pesquisa PIBIC, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

Franke, J.; **“Recommendations of the Cost Action c14 on the use of CFD in Predicting Pedestrian Wind Environment”**, The 4th International Symposium on Computational Wind Engineering, Japan Association for Wind Engineering, pp. 529–532, 2006.

GERenewableEnergy. **“Wind energy: how it works”**, <https://www.gerenewableenergy.com/wind-energy/technology/what-is-wind-energy>. Acessado em: 03/11/2017.

Hemida H., Šarkić A., Gillmeiera S., Höffer R., **“Experimental investigation of wind flow above the roof of a high-rise building”**, Winercost workshop ‘trends and challenges for wind energy harvesting’, Coimbra, 25-34p, 2015.

IEA; **“Energy technology perspectives”**, OECD/IEA, Paris, France, 2010.

Islam A., Neveen H., Steven D., **“Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines”**, Renewable Energy 50, 1106e1118, 2013.

Luebkehan, Donald P., **“Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings”**, Renewable Energy, 34, 1407e12, 2009.

Manwell, J.F. McGowan, J.G. and Rogers, A.L. **“Wind Energy explained: Theory, Design and Application”**, 2nd Ed., John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK, 2009

Mertens, S., **“The energy yield of roof mounted wind turbines”**, Wind Engineering 27, 507-518p, 2003.

NPARC - National Project for Application-oriented Research in CFD; **“Examining Spatial (Grid) Convergence”**, <https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html> Acessado em: 05/10/2017.

Rohatgi, J. and Barbezier, G. **“Wind turbulence and atmospheric stability – their effect on wind turbine output”**, Journal of Renewable Energy, 16, 908-911p, 1999.

Trevizan, R. A. **“Análise numérica do torque estático de uma turbina darrieus na situação de partida para diferentes estatores”**, Trabalho de conclusão de curso, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

UCSUSA – Union of Concerned Scientists Science for a healthy planet and safer world; **“The Hidden Costs of Fossil Fuels”**, <https://www.ucsusa.org/clean-energy/coal-and-other-fossil-fuels/hidden-cost-of-fossils#.WhSWkDDJ3IU>. Acessado em: 02/11/2017.

Wilson, D.J. **“Flow patterns over flat roofed buildings and application to exhaust stack design”**. ASHRAE Transactions 85:284-295p, 1979.

ANEXO I – MÉTODO DE GRID CONVERGENCE INDEX (GCI)

O método de *Grid Convergence Index* para malhas finas é definido como

$$GCI_{fina} = \frac{F_S |\varepsilon|}{(r^p - 1)}, \quad (B.1)$$

onde F_S é o fator de segurança. O valor recomendado para o fator de segurança é de 1,25 para comparação de três malhas ou mais. Já p é a ordem de convergência, ε é o erro relativo e r é a razão de refinamento da grade e são representados pelas equações

$$p = \frac{\ln\left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1}\right)}{\ln(r)}, \quad (B.2)$$

$$\varepsilon = \frac{f_2 - f_1}{f_1}, \quad (B.3)$$

$$r = \frac{h_2}{h_1}, \quad (B.4)$$

onde h é espaçamento da grade da malha e f é um parâmetro a ser estudado e sua numeração indica o grau de refinamento da malha em ordem crescente.

No caso de malhas não estruturadas pode-se utilizar a razão efetiva de refinamento da grade r_{ef} , dada pela equação

$$r_{ef} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{1/D}, \quad (B.5)$$

onde N é o número total de nós da malha e D é a dimensão do domínio do escoamento.

O GCI para malhas grosseiras é dado pela equação

$$GCI_{fina} = \frac{F_S |\varepsilon| r^p}{(r^p - 1)}. \quad (B.6)$$

Para checar se o nível de refinamento da malha gerou uma solução na extensão assintótica de convergência é necessário observar dois valores de GCI calculados em três grades, de acordo com

$$\frac{GCI_{23}}{r^p GCI_{12}} \approx 1. \quad (B.7)$$

Caso a solução esteja na extensão assintótica de convergência, o lado esquerdo da equação (B.6) será aproximadamente igual a 1.

APÊNDICE I – CONDIÇÕES DE CONTORNO

Esta seção mostra as funções definidas pelo usuário (UDF) utilizados no *Fluent* como condições de entrada para a realização das simulações. A UDF utilizada para gerar um perfil de velocidade na simulação do prédio é mostrada a seguir:

```

#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(inlet_x_velocity,t,i)
{
real x[ND_ND];
face_t f;
real y,ro,yref,ln,lnref,vel;
vel = 6.0;
ro = 0.0002;
yref = 150;
lnref = log10(yref/ro);
begin_f_loop(f,t)
{
F_CENTROID(x,f,t);
y = x[1];
ln = log10(y/ro);
F_PROFILE(f,t,i) = (vel*ln)/lnref;;
}
end_f_loop(f,t)
}

```

Já a UDF introduzida como perfil de velocidade na simulação da turbina no topo do prédio é apresentada a baixo:

```

#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(inlet_x_velocity, thread, position)
{
real x[ND_ND];
face_t p;
real y,a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k,l;
a= -0.188678842845;
b= 11.4748538409;
c= -6.6768700471;
d= 2.0633462203;
e= -0.38556851533;
f= 0.046361955381;
g= -0.0037018187975;
h= 0.00019818819911;
i= -0.0000070296566762;
j= 0.00000015840303310;
k= -0.0000000020524940509;
l= 0.000000000011640869149;
begin_f_loop(p,thread)
{
F_CENTROID(x,p,thread);
y = x[1];
F_PROFILE(p,thread,position)=
a+b*pow(y,1)+c*pow(y,2)+d*pow(y,3)+e*pow(y,4)+f*pow(y,5)+g*pow(y,6)+h*pow(y,7)+i*
pow(y,8)+j*pow(y,9)+k*pow(y,10)+l*pow(y,11);
}
end_f_loop(p,thread)
}

```

O gráfico da Figura I.1 mostra os valores de velocidade do vento em função da altura para o topo do prédio. Esses dados foram utilizados no ajuste de curvas e esta retornou uma função polinomial de 9º grau que foi utilizada no UDF para condição de entrada na simulação da turbina no topo do prédio.

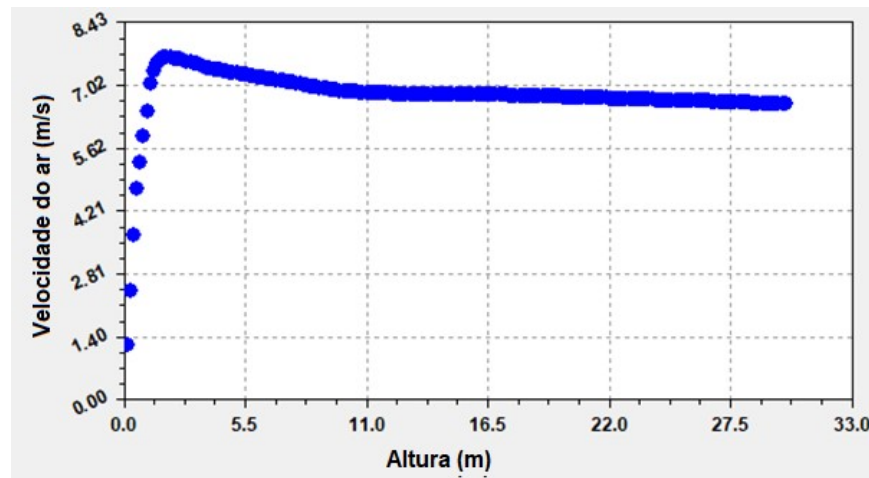


Figura I.1 - Gráfico da velocidade do ar em função da altura para o topo do prédio.

APÊNDICE II – DETALHE DA MALHA DAS PÁS DA TURBINA

Na Figura II.1 é mostrado em detalhes a malha híbrida utilizada para o perfil aerodinâmico. A grade consiste em camadas de prismas estruturados em torno do perfil aerodinâmico e malhas tetraédricas para o restante da domínio. O tamanho dos elementos da malha cresce de volume a partir da superfície da pá para melhorar a modelagem da geometria do perfil aerodinâmico e a exatidão da solução.

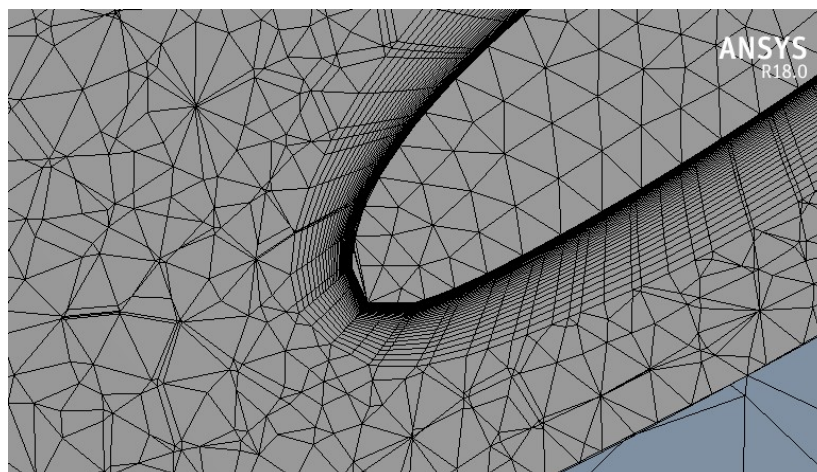


Figura II.1 - Malha computacional do perfil aerodinâmico utilizado para a pá da turbina.

APÊNDICE III – LINHAS DE CORRENTE NO TOPO DA EDIFICAÇÃO.

As Figuras III.1, III.2 e III.3 apresentam as linhas de corrente na altura 152 m, 155 m e 158 m, respectivamente, para a simulação da turbina no topo da edificação. As linhas de corrente iniciam a partir da face de entrada do domínio computacional.

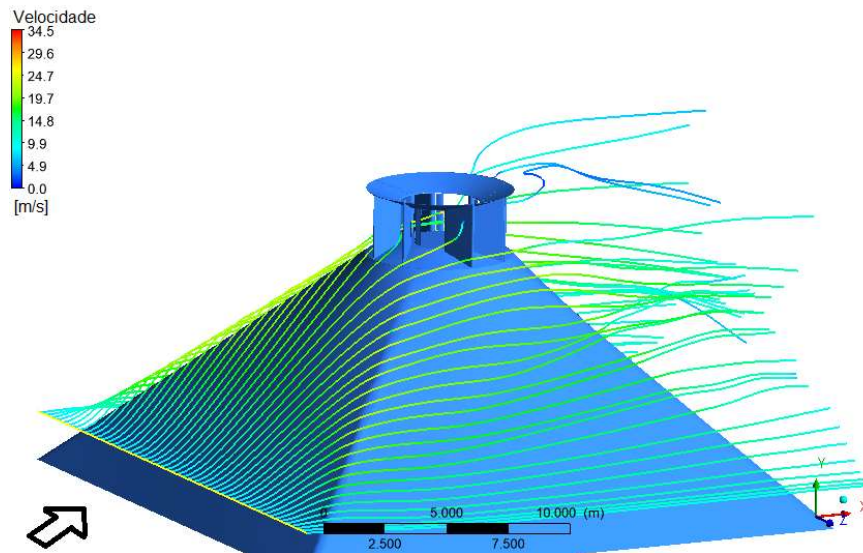


Figura III.1 - Linhas de corrente na simulação do topo da edificação para $y = 152$ m.

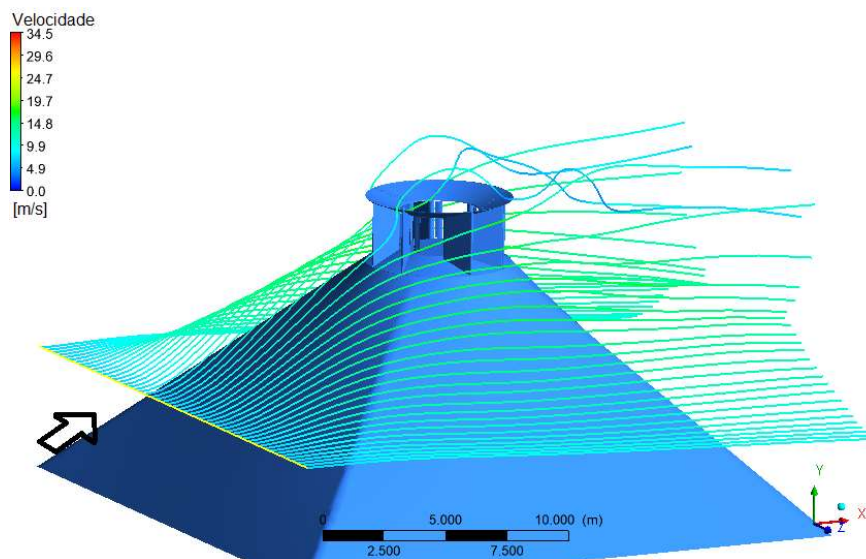
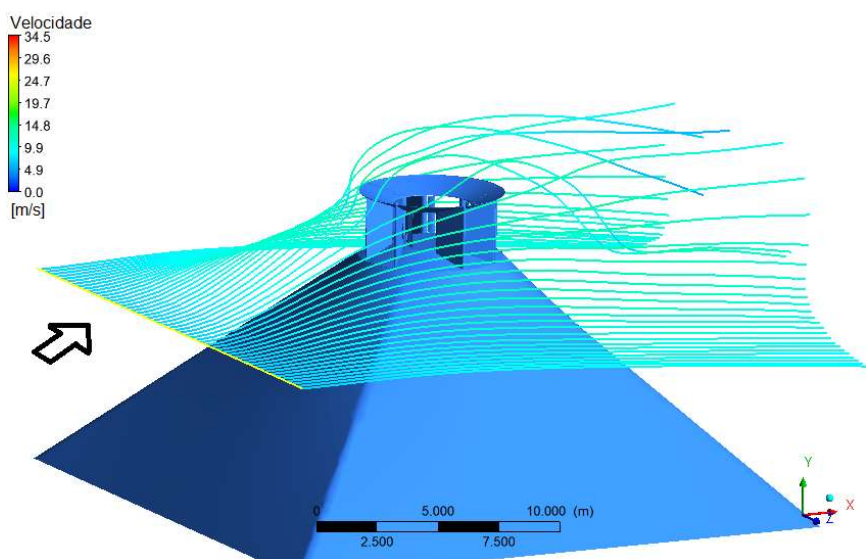


Figura III.2 - Linhas de corrente na simulação do topo da edificação para $y = 155$ m.



Figuras III.3 - Linhas de corrente na simulação do topo da edificação para $y = 158$ m.

Nas Figuras III.4 e III.5 são apresentadas as linhas de corrente obtidas na simulação do topo da edificação. A Figura III.4 mostra as linhas de corrente para a posição vertical que iniciam no meio da face de entrada do domínio, $z = 0$ m. As linhas de corrente que passam no centro da turbina, $x = 12$ m, a uma altura de 111 m são apresentadas na Figura III.5.

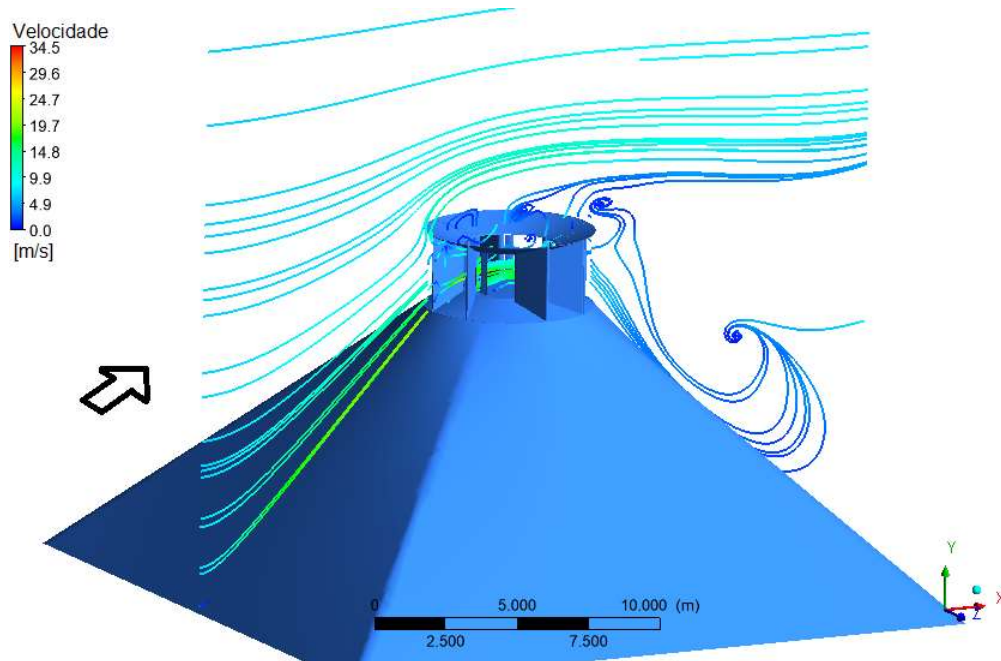


Figura III.4 - Linhas de corrente na simulação do topo da edificação para $z = 0$ m.

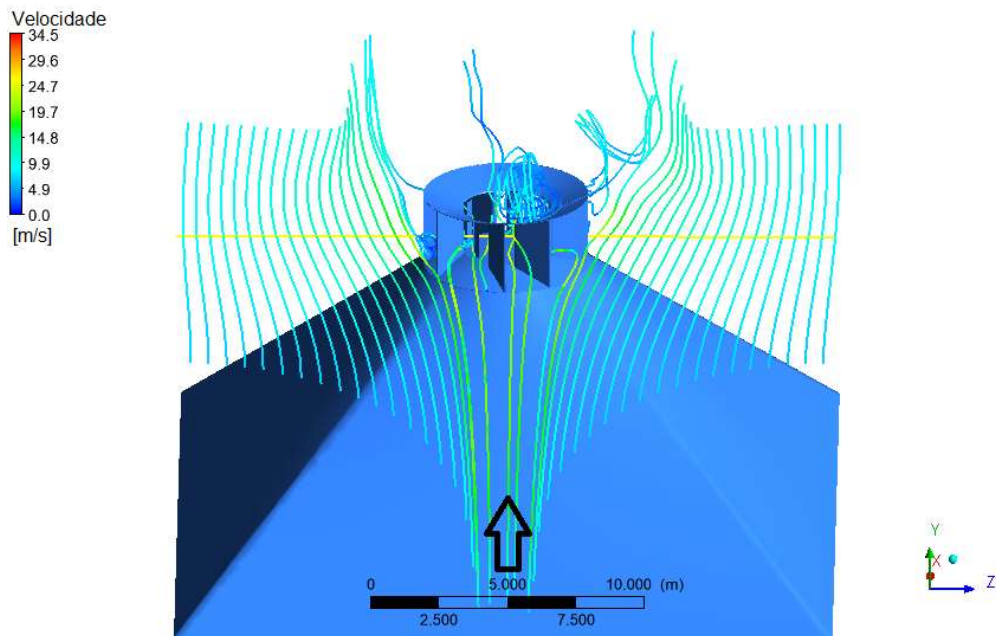


Figura III.5 - Linhas de corrente na simulação do topo da edificação para $y = 111$ m e $x = 12$ m.