



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

Título: Simulação Numérica do Escoamento do Vento no Campus Gama da Universidade de Brasília

Autor: Mylena Araujo Valadares
Orientador: Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto

Brasília, DF
2023



Mylena Araujo Valadares

**Título: Simulação Numérica do Escoamento do Vento no
Campus Gama da Universidade de Brasília**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia de Energia) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia de Energia).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto

Brasília, DF

2023

Mylene Araujo Valadares

Título: Simulação Numérica do Escoamento do Vento no Campus Gama da
Universidade de Brasília/ Mylena Araujo Valadares. – Brasília, DF, 2023-
92 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noleto

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Ação do Vento. 2. Dinâmica dos Fluidos Computacional. I. Prof. Dr.
Luciano Gonçalves Noleto. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB
Gama. IV. Título: Simulação Numérica do Escoamento do Vento no Campus
Gama da Universidade de Brasília

CDU 02:141:005.6

Mylena Araujo Valadares

Título: Simulação Numérica do Escoamento do Vento no Campus Gama da Universidade de Brasília

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia de Energia) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia de Energia).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, –:

Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto
Orientador

**Prof. Dr. Augusto César de Mendonça
Brasil**
Convidado 1

Prof. Dr. Felipe Chagas Storti
Convidado 2

Brasília, DF
2023

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que me ajudaram nessa jornada acadêmica.

Primeiramente, aos meus pais, Robson e Suene, e ao meu irmão João Igor, agradeço por todo o apoio, carinho e ajuda durante o curso. Sem vocês, essa conquista não seria possível.

Às minhas amigas Letícia, Iara e Letycia, obrigada pelo companheirismo, apoio e pelos conselhos preciosos ao longo desses últimos anos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano Noletto, sou grata por me conceder a oportunidade de realizar este trabalho e por sua paciência ao longo desses semestres.

E a todos os meus amigos, familiares e colegas que de alguma forma contribuíram positivamente na minha jornada acadêmica, o meu muito obrigada.

Vocês foram fundamentais para essa conquista e levarei cada um de vocês no meu coração.

*“A verdadeira sabedoria está em reconhecer a sua ignorância.”
(Sócrates)*

Resumo

O avanço da utilização da energia eólica e sua maior participação na matriz elétrica brasileira, mostra o quão é importante o estudo acerca do escoamento do vento e os efeitos que sua velocidade causa na potência de geração eólica. Entender como ocorre o comportamento predominante do vento em relação a sua direção, velocidade e tipo de escoamento ajudam a entender quais os efeitos que o vento pode causar. Para isto, análises devem ser realizadas, como forma mais fácil, prática e com menor custo, utiliza-se a ferramenta da dinâmica computacional (CFD). Deste modo, o presente trabalho terá como base a análise referente ao efeito que as ações do vento causam nas quatro principais edificações da Universidade de Brasília – Faculdade do Gama (FGA). Para isso por meio do software Ansys será simulado o comportamento das ações dos ventos nas 8 direções cardeais no volume de controle que engloba os domínios da FGA, para simulação algumas condições de contorno e simplificações foram adotadas.

Palavras-chaves: Ação do Vento. Dinâmica dos Fluidos Computacional. Energia Eólica.

Abstract

The advance in the use of wind energy and its greater participation in the Brazilian electricity matrix shows how important it is to study wind flow and the effects that its speed causes on wind power generation. Understanding how the predominant behavior of the wind occurs in relation to its direction, speed and type of flow helps to understand the effects that the wind can cause. For this, analyzes must be carried out, as an easier, more practical and less costly way, the tool of computational dynamics (CFD) is used. In this way, the present work will be based on the analysis referring to the effect that the actions of the wind cause in the four main buildings of the University of Brasília – Faculdade do Gama (FGA). For this, through the Ansys software, the behavior of the actions of the winds in the 8 cardinal directions will be simulated in the control volume that encompasses the domains of the FGA, for simulation some boundary conditions and simplifications were adopted.

Key-words: Wind Action. Computational Fluid Dynamics. Wind Energy.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Parque Eólico de Osório, no Rio Grande do Sul	27
Figura 2 – Área construída da FGA	33
Figura 3 – Rosa dos Ventos	34
Figura 4 – Modelagem da Região Construída	36
Figura 5 – Malha dos prédios e do volume de controle	37
Figura 6 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido na direção Norte	39
Figura 7 – Escoamento do vento no domínio da FGA Norte	39
Figura 8 – Turbulências no UED Norte	40
Figura 9 – Turbulências no UAC Norte	40
Figura 10 – Linhas de velocidade	41
Figura 11 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Norte	41
Figura 12 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Norte	42
Figura 13 – variação da velocidade UAC Norte	42
Figura 14 – variação da velocidade entre os edifícios UAC MESP Norte	43
Figura 15 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e LDTEA Norte	43
Figura 16 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED Norte	44
Figura 17 – variação de energia cinética UAC Norte	44
Figura 18 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Norte	45
Figura 19 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA Norte	45
Figura 20 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Nordeste	46
Figura 21 – Escoamento do vento no domínio da FGA Nordeste	46
Figura 22 – Turbulências no UED Nordeste	47
Figura 23 – Turbulências no UAC Nordeste	47
Figura 24 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Nordeste	47
Figura 25 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Nordeste	48
Figura 26 – variação da velocidade UAC Nordeste	48
Figura 27 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Nordeste	49
Figura 28 – variação da velocidade entre os edifícios UED e LDTEA Nordeste	49
Figura 29 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED Nordeste	50
Figura 30 – variação de energia cinética turbulenta UAC Nordeste	50
Figura 31 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Nordeste	51

Figura 32 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA Nordeste	51
Figura 33 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Leste	52
Figura 34 – Escoamento do vento no domínio da FGA Leste	52
Figura 35 – Turbulências no UED e UAC Leste	52
Figura 36 – Turbulências no LDTEA Leste	53
Figura 37 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Leste	53
Figura 38 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Leste	54
Figura 39 – variação da velocidade UAC Leste	54
Figura 40 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Leste	55
Figura 41 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e LDTEA Leste	55
Figura 42 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED Leste	56
Figura 43 – variação de energia cinética turbulenta UAC Leste	56
Figura 44 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Leste	57
Figura 45 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA Leste	57
Figura 46 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Sudeste	58
Figura 47 – Escoamento do vento no domínio da FGA Sudeste	58
Figura 48 – Turbulências no UAC Sudeste	58
Figura 49 – Turbulências nos prédios Sudeste	59
Figura 50 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Sudeste	59
Figura 51 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Sudeste	60
Figura 52 – variação da velocidade UAC Sudeste	60
Figura 53 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Sudeste	61
Figura 54 – variação da velocidade entre os edifícios UED e LDTEA Sudeste	61
Figura 55 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED Sudeste	62
Figura 56 – variação de energia cinética turbulenta UAC Sudeste	62
Figura 57 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Sudeste	63
Figura 58 – Variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LD- TEA Sudeste	63
Figura 59 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Sul	64
Figura 60 – Escoamento do vento no domínio da FGA Sul	64
Figura 61 – Turbulências nos prédios Sul	64
Figura 62 – Turbulências no LDTEA Sul	65
Figura 63 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Sul	65

Figura 64 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Sul	66
Figura 65 – variação da velocidade UAC Sul	66
Figura 66 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Sul	67
Figura 67 – variação da velocidade entre os edifícios UED e LDTEA Sul	67
Figura 68 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e UAC Sul	68
Figura 69 – variação de energia cinética turbulenta UAC Sul	68
Figura 70 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Sul	69
Figura 71 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA Sul	69
Figura 72 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Sudoeste . .	70
Figura 73 – Escoamento do vento no domínio da FGA Sudoeste	70
Figura 74 – Turbulências nos prédios Sudoeste	70
Figura 75 – Turbulências no LDTEA Sudoeste	71
Figura 76 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Sudoeste	71
Figura 77 – variação da velocidade entre os edifícios UED e UAC Sudoeste	72
Figura 78 – variação da velocidade UAC Sudoeste	72
Figura 79 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Sudoeste	73
Figura 80 – variação da velocidade entre os edifícios UED e LDTEA Sudoeste . . .	73
Figura 81 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED Sudoeste	74
Figura 82 – variação de energia cinética turbulenta UAC Sudoeste	74
Figura 83 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Sudoeste	75
Figura 84 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA Sudoeste	75
Figura 85 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Oeste	76
Figura 86 – Escoamento do vento no domínio da FGA Oeste	76
Figura 87 – Turbulências no UED Oeste	76
Figura 88 – Turbulências nos prédio Oeste	77
Figura 89 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Oeste	77
Figura 90 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Oeste	78
Figura 91 – variação da velocidade UAC Oeste	78
Figura 92 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Oeste	79
Figura 93 – variação da velocidade entre os edifícios UED e LDTEA Oeste	79
Figura 94 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED Oeste	80
Figura 95 – variação de energia cinética turbulenta UAC Oeste	80

Figura 96 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP	
Oeste	81
Figura 97 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA	
Oeste	81
Figura 98 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Noroeste . . .	81
Figura 99 – Escoamento do vento no domínio da FGA Noroeste	82
Figura 100 – Turbulências no UED Noroeste	82
Figura 101 – Turbulências no UAC Noroeste	83
Figura 102 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Noroeste	83
Figura 103 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Noroeste	84
Figura 104 – variação da velocidade UAC Noroeste	84
Figura 105 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Noroeste	85
Figura 106 – variação da velocidade entre os edifícios UED e LDTEA Noroeste	85
Figura 107 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED	
Noroeste	86
Figura 108 – variação de energia cinética turbulenta UAC Noroeste	86
Figura 109 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP	
Noroeste	87
Figura 110 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA	
Noroeste	87

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dimensões dos prédios da FGA	33
Tabela 2 – Direções e velocidades dos ventos na FGA	34

Lista de abreviaturas e siglas

ABEEÓLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CLA	Camada Limite Atmosférica
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
CFD	Computacional Fluid Dynamics
CO_2	Dióxido de carbono
E	Leste
GEE	Gases do efeito estufa
FGA	Universidade de Brasília - Faculdade do Gama
H_2O	Água
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LDTEA	Laboratório de Desenvolvimento de Transportes e Energias Alternativas
m	Metros
MESP	Módulo de Serviços e Equipamentos Esportivos
mmHg	Milímetros de Mercúrio
N_2	nitrogênio
NE	Nordeste
NW	Noroeste
N	Norte
NBR	Norma brasileira
S	Sul
SE	Sudeste

SW	Sudoeste
O_2	Oxigênio
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PROEÓLICA	Programa Emergencial de Energia Eólica
s	Segundos
SST	<i>Shear Stress Transpor</i>
UAC	Unidade Acadêmica
UED	Unidade de Ensino e Docência
W	Oeste

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Motivação	23
1.2	Objetivo Geral	24
1.3	Objetivos Específicos	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	Vento	25
2.2	Energia eólica no Brasil	25
2.2.1	Vantagens da energia eólica	27
2.2.2	Desvantagens da energia eólica	27
2.3	Efeito do vento em edificações	28
2.3.1	NBR 6123:1988	29
2.3.2	Turbulência na NBR 6123/88	29
2.3.3	Efeitos de vizinhança	30
3	MODELAGEM	31
3.1	Dinâmica dos fluidos computacional	31
3.2	Escoamento incompressível e isotérmico	31
3.3	Modelo de simulação SST	32
3.4	Região de interesse	32
3.5	Regime de ventos na região	33
3.6	Requisitos de solução	35
3.7	Domínio computacional	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	Geração de malha	37
4.2	Condições de contorno	37
4.3	Solução	38
4.4	Simulação nas 8 direções	38
4.4.1	Comportamento do vento Norte	39
4.4.2	Perfis de velocidade Norte	40
4.4.3	Perfis de Energia Cinética Turbulenta Norte	43
4.4.4	Comportamento do vento Nordeste	45
4.4.5	Perfis de velocidade Nordeste	47
4.4.6	Perfis de Energia Cinética Turbulenta Nordeste	49
4.4.7	Comportamento do vento Leste	51

4.4.8	Perfis de velocidade Leste	53
4.4.9	Perfis de Energia Cinética Turbulenta Leste	55
4.4.10	Comportamento do vento Sudeste	57
4.4.11	Perfis de velocidade Sudeste	59
4.4.12	Perfis de Energia Cinética Turbulenta Sudeste	61
4.4.13	Comportamento do vento Sul	63
4.4.14	Perfis de velocidade Sul	65
4.4.15	Perfis de Energia Cinética Turbulenta Sul	67
4.4.16	Comportamento do vento Sudoeste	69
4.4.17	Perfis de velocidade Sudoeste	71
4.4.18	Perfis de Energia Cinética Turbulenta Sudoeste	73
4.4.19	Comportamento do vento Oeste	75
4.4.20	Perfis de velocidade Oeste	77
4.4.21	Perfis de Energia Cinética Turbulenta Oeste	79
4.4.22	Comportamento do vento Noroeste	81
4.4.23	Perfis de velocidade Noroeste	83
4.4.24	Perfis de Energia Cinética Turbulenta Noroeste	85
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo irá constar os aspectos referentes a motivação, o trabalho e os objetivos que serão utilizados para a realização do mesmo.

1.1 Motivação

O vento é um fenômeno meteorológico natural que pode ser descrito como um movimento da massa de ar em razão das mudanças de pressão e temperatura na atmosfera. O fato de o ar possuir energia cinética faz com que ocorra inércia às mudanças de deslocamento.([LEÃO; ARAGÃO, 2013](#)).

O regime e o comportamento de ventos no Brasil são diferentes do vento europeu e o dos Estados Unidos, para se realizar um estudo mais aprofundado da ação do vento em edifício seria necessário um túnel de vento. Infelizmente, no Brasil é difícil encontrar um túnel de vento que possa simular modelos reduzidos no formato de maquete ([WATANABE, 2021](#)).

Os estudos experimentais em campo têm uma desvantagem significativa, que é o seu custo elevado e o tempo requerido para sua realização. Para contornar essas limitações, a simulação numérica de dinâmica de fluidos computacional (CFD) se apresenta como uma ferramenta útil, pois permite realizar análises de forma mais rápida e precisa de sistemas complexos, com baixo custo e a possibilidade de fazer eventuais modificações com facilidade ([MACEDO, 2021](#)).

A utilização do Ansys se deve, além disso, como uma forma de determinar visualmente onde ocorre a recirculação dos ventos, a turbulência entre os edifícios da FGA, as linhas de velocidade dos ventos nas oito direções cardeais da rosa dos ventos e determinar a carga em carga dos ventos nas paredes dos edifícios.

A utilização do software Ansys também permite visualizar a recirculação dos ventos, a turbulência entre os edifícios, as linhas de velocidade dos ventos em todas as direções da rosa dos ventos.

O objetivo principal deste trabalho é analisar as características de escoamento, turbulência e velocidade do vento na região de interesse, a Universidade de Brasília - Faculdade do Gama (FGA).

Desta forma, é possível avaliar a influência dessas características do fluido na parede externa dos edifícios e os efeitos da turbulência do fluido em sua vizinhança.

Entretanto, o estudo do escoamento dos ventos também é de fundamental im-

portância e pode ser utilizado para a indústria da energia eólica, já que a eficiência e a capacidade de produção de energia de uma usina eólica dependem diretamente do comportamento dos ventos em seu entorno. A compreensão dos padrões de escoamento de ar é crucial para o planejamento e o projeto de parques eólicos, pois permite prever como os ventos serão afetados por obstáculos no terreno, como montanhas ou prédios, e como isso afetará a produção de energia.

A importância do estudo em relação do setor eólico, tanto quanto a prática na área se deve ao fato da energia eólica dentro do cenário brasileiro estar ganhando cada vez mais espaço. Segundo dados do governo federal, em 2021 a energia proveniente da geração eólica, representou 10,9% da matriz elétrica brasileira. A tendência é que o setor sofra com expansão no país principalmente porque a partir de 2022 será possível a geração em modalidade *offshore* no Brasil (ONS, 2022).

Com isso é importante que os graduandos do curso de engenharia de energia – FGA possam ter mais contato com esta fonte e com o estudo do escoamento dos ventos, de forma mais prática, a fim de estarem mais preparados para o mercado de trabalho.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral consiste em simular numericamente o escoamento do vento nos domínios da FGA sob determinadas condições, analisando por meio da dinâmica computacional dos fluidos (CFD), os padrões de escoamento do vento, circulação, e as suas influências nos edifícios da Universidade de Brasília - Faculdade do Gama.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho fazem a inclusão dos seguintes itens:

- Identificar perfil de intensidade de turbulência;
- Analisar a topologia do escoamento;
- Analisar como a velocidade causada pelo escoamento do vento pode gerar algum tipo de influência nas edificações do domínio de análise assim como a influência gerada ao redor das edificações;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vento

O vento pode ser descrito como o movimento de parcelas de ar na atmosfera do planeta. O vento pode ser classificado geralmente em movimento vertical e movimento horizontal, mas para fins de estudos o vento que será trabalhado vai ser o vento horizontal, que é paralelo a superfície terrestre. Alguns fatores são responsáveis pela movimentação dos ventos entre elas os fatores de convecção térmica. Quando se trata da variação na quantidade de movimento, que as parcelas de ar experimentam é decorrente da resultante vetorial de todas as forças que atuam sobre elas (MARTINS F.R., 2008).

Em relação a sua composição, o ar presente na atmosfera é composto em sua maior parte por oxigênio (O_2) cerca de 20,99 % e por nitrogênio (N_2) cerca de 78,01% (HILSDORF et al., 2014), mas no restante do percentual também tem em sua composição uma baixa porcentagem de água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2). Já quanto as direções horizontais, que são a do movimento analise, podem ser divididas em oito direções fundamentais: norte (N), sul (S), leste (E), oeste (W), nordeste (NE), noroeste (NW), sudeste (SE) e sudoeste (SW).

Para fins de entendimento será útil separar o movimento horizontal do vertical, a componente vertical é importante para análises meteorológicos principalmente na formação de nuvens, mas a componente do movimento horizontal é muito mais forte em termos de força (GRIMM, 1999). A partir disso o termo “vento” usado ao longo do trabalho deve ser entendido como o vento de movimento horizontal.

2.2 Energia eólica no Brasil

A energia eólica tem o começo de sua utilização no mundo por volta de 5000 a.C onde era utilizada para impulsionar barcos pelo rio Nilo. Bombas de água foram movidas na China e moinhos com lâminas moíam grão na Pérsia e no Oriente Médio por volta de 200 a.C. No século XI as bombas eólicas foram usadas para a produção de alimentos e drenagem de lagos e pântanos. Séculos depois nos Estados Unidos os moinhos de ventos eram utilizados por muitos fazendeiros, entre o final dos anos 1800 e início de 1900, geradores de energia eólica foram amplamente utilizados por eles.(EIA, 2022)

Trazendo o contexto para o contexto brasileiro de uso desta fonte de energia, no Brasil a geração de energia elétrica por meio dos ventos veio praticamente 100 anos depois dos primeiros aerogeradores usados nos Estados Unidos.

O primeiro aerogerador instalado no Brasil foi localizado em Fernando de Noronha no ano de 1992, sua instalação foi resultado de uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), que possuiu ajuda financeira do Folkecenter, um instituto de pesquisas dinamarquês. Após isso os dez anos seguintes a energia eólica cresceu pouco, em razão da falta de políticas no setor e principalmente pelo alto custo da tecnologia (ABEEÓLICA, 2022).

Em 2001 houve uma crise energética no país. Nesse cenário ocorreu a tentativa de incentivar o uso na energia eólica, criando-se então o Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA), no entanto este programa não obteve resultados satisfatórios e foi substituído pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica PROINFA (ABEEÓLICA, 2022).

O PROINFA tem o objetivo de aumentar a participação de fontes renováveis, como Pequenas Centrais Hidrelétricas, eólicas e térmicas a biomassa na produção de energia elétrica.(CCEE, 2022) o PROINFA foi instituído pela Lei nº 10.438/2002. É considerado o Maior programa do mundo de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica, o programa ajudou na diversificação da matriz energética nacional possibilitando a redução de emissões de gases de efeito estufa(ELETROBRAS, 2022).

No início do PROINFA a energia eólica ainda possuía um elevado custo, o primeiro leilão de comercialização voltado exclusivamente para o setor eólico ocorreu em 2009, seu sucesso abriu caminho para novos leilões. Depois disso o setor de geração eólica apresentou um bom crescimento, deixou de ser considerado uma fonte alternativa e hoje é a segunda fonte da matriz elétrica brasileira. A energia eólica representou cerca de 10,9% de participação na matriz elétrica brasileira em dezembro de 2021(ABEEÓLICA, 2022) (ONS, 2022).

Em relação ao futuro da geração eólica, no final do mês de janeiro de 2022, o Governo Federal publicou o Decreto Nº 10.946, que autoriza a utilização dos recursos naturais no mar para geração de energia em empreendimentos *offshore*. Porém o decreto só começa a entrar em vigor em junho de 2022. O que demonstra que o potencial deste tipo de energia tende ao crescimento (ABEEÓLICA, 2022).

Figura 1 – Parque Eólico de Osório, no Rio Grande do Sul.



Fonte: VEJA

2.2.1 Vantagens da energia eólica

A inserção da energia eólica na matriz elétrica brasileira traz inúmeros benefícios, como a complementaridade com o regime hídrico e a manutenção do caráter limpo e renovável da matriz energética (RAMPINELLI G. A.; ROSA JÚNIOR, 2012).

A fonte eólica é inesgotável e gratuita, além de não liberar gases de efeito estufa (GEE) e não gerar resíduos, tornando-se uma opção energética sustentável. Além disso, o custo de operação e o tempo de construção da energia eólica são considerados baixos, o que torna essa fonte ainda mais atrativa. (COPEL, 2022)

2.2.2 Desvantagens da energia eólica

Uma das desvantagens mais evidentes no processo de geração de energia eólica é o impacto na paisagem natural. Grandes estruturas destacam-se na paisagem, especialmente em regiões de dunas, devido a sua construção, o que pode resultar em compactação de dunas e mudanças na topografia do terreno. Essa descaracterização da paisagem pode ter um impacto negativo na estética e no equilíbrio ecológico dessas áreas.

Danos a fauna: aves são atingidos pelas pás devido as torres ficarem localizadas em rotas de migração, esse dano pode ser reduzido com um planejamento adequado em área que não estão sujeitas a migração das aves (BARBOSA, 2008).

Geração de ruídos: são produzidos devido a rotação das pás eólicas, o ruído estrutural devido as vibrações e o ruído mecânico que se deve ao atrito entre as peças. Dessa

forma as torres dos geradores não podem ser construídas próximas a áreas residenciais (JR, 2004).

interferência eletromagnética: a interferência eletromagnética pode ocasionar perfurações em sistemas de transmissão e telecomunicação, principalmente em rádio e televisão (BARBOSA, 2008).

2.3 Efeito do vento em edificações

Segundo Çengel e Cimbala (2015) o movimento altamente ordenado dos fluidos caracterizado por camadas suaves de fluido e denominado laminar já o movimento altamente desordenado dos fluidos que ocorre em altas velocidades e e caracterizado por flutuações de velocidade e chamado de turbulento. O escoamento vento o qual será tratado ao logo do trabalho será no regime turbulento.

A turbulência é uma das principais características da circulação dos fluidos e tem relação com o número de Reynolds. O número de Reynolds é uma medida da relação entre as forças inerciais e as forças viscosas em um fluido em movimento, e é amplamente utilizado para caracterizar o regime de turbulência em uma dada situação.

Quando o número de Reynolds é pequeno, o fluido apresenta uma circulação laminar e as perturbações são rapidamente suprimidas pela viscosidade. Já quando o número de Reynolds é grande, o fluido geralmente apresenta uma circulação turbulenta, com grandes variações de velocidade e pressão. A turbulência neste caso é uma consequência da interação entre as forças inerciais e viscosas, que resultam em uma circulação complexa e não-homogênea (ROBERT et al., 2018).

Nos níveis mais baixos da atmosfera, ocorre atrito fornecido pela superfície isto gera modificações no equilíbrio de forças. A formação do relevo, os obstáculos e o formato dos obstáculos modificam a forma como o escoamento de ar se comporta sobre a superfície terrestre, gerando turbulências no escoamento.

Para o estudo será analisada a camada limite atmosférica, que é onde maior parte das construções ficam compreendidas, define-se CLA como a região compreendida entre a superfície e uma altura variável entre 100 e 3000 m de altura e que apresenta um comportamento diferente do restante da atmosfera devido às interações superfície-atmosfera

Segundo GARRISONN (2018) se estamos falando de estrutura, lidamos com 3 tipos de cargas a Carga morta (permanente), a Carga viva (imposta) e a Carga de vento ou eólica (lateral). Para a análise deste trabalho será observada apenas o efeito desta última carga.

A Carga de vento ou eólica é considerada um exemplo de carga lateral, diferente das outras duas cargas citadas anteriormente. As cargas do tipo eólicas atuam horizontalmente

ou também em ângulos agudos em relação à horizontal, esse tipo de carga irá variar conforme a sua região geográfica e de acordo com o tipo de ambiente físico de análise.

A fim de regulamentar a ação do vento em edificações, temos a norma brasileira NBR 6123:1988 que será detalhada no tópico a seguir.

2.3.1 NBR 6123:1988

Quando se trata especificamente dos ventos que agem diretamente na edificação temos a Norma NBR 6123:1988 [ABNT NBR 6123/88 \(1988\)](#) - Forças Devidas ao Vento em Edificações - É a norma brasileira que possui como objetivo fixar as condições exigíveis para o cálculo da ação estática e dinâmica do vento em edificações, sendo ela aplicada apenas para edificações de arquitetura comum.

Esta norma utiliza os seguintes termos para o efeito do vento nas estruturas:

- Barlavento: região de onde o vento é soprado, causando um efeito de sobre pressão na edificação;
- Sota-vento: região oposta de onde o vento é soprado (oposto do barlavento), causando esforço de sucção na edificação;
- Sobre pressão: pressão efetiva acima da pressão atmosférica de referência
- Sucção: pressão efetiva abaixo da pressão atmosférica de referência.
- Reticulado: estrutura de linhas retas.
- Vento de alta turbulência: o vento é considerado de alta turbulência caso a edificação não exceda duas vezes a altura média de suas edificações vizinhas.
- Vento de baixa turbulência: casos que não se encaixam em vento básico e vento de alta turbulência.

A norma também estabelece outros parâmetros que serão vistos e aprofundados posteriormente ao logo do trabalho

2.3.2 Turbulência na NBR 6123/88

A ação do vento sobre a estrutura pode ser de baixa turbulência ou alta turbulência. Segundo o item 6.5.3 da [ABNT NBR 6123/88 \(1988\)](#) Uma edificação poderá ser considerada dentro de vento de alta turbulência quando sua altura não excede duas vezes a altura média das edificações nas suas vizinhanças, estendendo-se éstas, na direção e no sentido do vento incidente, a uma distância mínima de:

- 500 m, para uma edificação de até 40 m de altura;
- 1000 m, para uma edificação de até 55 m de altura;
- 2000 m, para uma edificação de até 70m de altura;
- 3000 m, para uma edificação de até 80 m de altura.

Vento com baixa turbulência tende a possuir maiores valores de coeficientes de arrasto, ou seja, valores maiores da força de vento.

2.3.3 Efeitos de vizinhança

Segundo a [ABNT NBR 6123/88 \(1988\)](#) existem situações se deve considerar como haverá influência de aumento das forças do vento em decorrência da presença de outras edificações

Podem ser classificados de 3 modos a causa do amento de forças pela norma:

Por efeito Venturi: Edificações vizinhas podem, por suas dimensões, forma e orientação, causar um “afunilamento” do vento, acelerando o fluxo de ar, com consequente alteração nas pressões. Este efeito aparece principalmente em edificações muito próximas, caso em que já foram observados coeficientes de pressão negativos (sucções) excedendo, em módulo, o valor 2,0. Estas pontas de sucção verificaram-se nas paredes confrontantes das duas edificações, próximo à aresta de barlavento.

Por deflexão do vento na direção vertical: Edificações altas defletem para baixo parte do vento que incide em sua fachada de barlavento, aumentando a velocidade em zonas próximas ao solo. Edificações mais baixas, situadas nestas zonas, poderão ter as cargas do vento aumentadas por este efeito, com os coeficientes de forma atingindo valores entre - 1,5 e - 2,0,

Pela turbulência da esteira: Uma edificação situada a sota-vento de outra pode ser afetada sensivelmente pela turbulência gerada na esteira da edificação de barlavento, podendo causar efeitos dinâmicos (efeitos de golpe) consideráveis e alterações nas pressões. Estas são particularmente importantes em edificações com coberturas e painéis de vedação feitos de materiais leves.

Valores positivos dos coeficientes de forma externo e interno correspondem a sobrepressões, e valores negativos correspondem a sucções.

3 MODELAGEM

3.1 Dinâmica dos fluidos computacional

O CFD teve sua origem a partir da junção de duas disciplinas: o cálculo numérico e a mecânica dos fluidos. Quando se procura alguma ferramenta que possua um foco voltado exclusivamente para a solução em CFD temos o exemplo dos softwares Ansys Fluent e Ansys CFX. Estas ferramentas podem realizar análises relacionadas a aero acústica, modelar o fluxo de fluidos, reações químicas, transferência de calor, turbo máquinas, turbulência, etc. (ESSS, 2022)

Uma simulação CFD pode ser dividida em 3 etapas (ESSS, 2016):

- Pré-Processamento: Nesta etapa, o modelo geométrico é criado ou importado. O modelo é mesclado com as condições de contorno e as propriedades físicas do fluido são definidas. Além disso, a malha é gerada e ajustada para obter uma resolução adequada..
- Processamento: Durante este passo, as equações são resolvidas numericamente para simular a dinâmica do fluido. Isso pode ser feito usando solvers explícitos ou implícitos, dependendo das necessidades do problema.
- Pós-Processamento: Nesta etapa, os resultados da simulação são analisados e visualizados. Os resultados incluem informações sobre a velocidade, pressão, temperatura e outras propriedades do fluido. Essas informações são usadas para entender o comportamento do fluido e para validar a simulação.

O presente trabalho se encontra nas três etapas, Pré-Processamento, processamento e pós processamento. Onde, em resumo, se foi analisado a melhor malha a se usar em relação a capacidade computacional, foi inserido na simulação as condições de contorno específica para cada direção simulada (totalizando 8 simulações), feita a análise do tempo que levou cada simulação e por fim as análises dos resultados apresentados pelo *software*.

3.2 Escoamento incompressível e isotérmico

O escoamento incompressível é um tipo de escoamento em que a densidade do fluido permanece constante e variações na massa específica são desprezíveis. Isso significa que a variação da pressão não afeta significativamente a densidade do fluido (ROBERT

et al., 2018). As equações da mecânica dos fluidos são simplificadas e o volume ocupado pelo fluido permanece constante.

O escoamento isotérmico é um tipo de escoamento em que a temperatura do fluido permanece constante. Isso significa que a quantidade de calor transferida para ou do fluido é pequena ou inexistente (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

3.3 Modelo de simulação SST

Para a simulação numérica o modelo de simulação escolhido foi o modelo de simulação SST (Shear Stress Transport) devido ele ser um modelo consolidado na maioria dos códigos industriais, comerciais e de pesquisa, ele surgiu como uma extensão do modelo $k-\omega$ de Wilcox. O modelo $k-\omega$ foi desenvolvido na década de 1980. No entanto, o modelo $k-\omega$ apresentava algumas limitações em escoamentos com separação de fluxo (MENTER, 1994).

Para superar essas limitações, o modelo SST foi desenvolvido na década de 1990 por M. Menter. O modelo SST é uma combinação do modelo $k-\omega$ com um modelo de turbulência de primeira geração, chamado modelo $k-\varepsilon$. A combinação destes dois modelos permite que o modelo SST forneça uma representação mais precisa da turbulência em escoamentos complexos, incluindo escoamentos com separação de fluxo.

O modelo foi desenvolvido devido a necessidade de previsão de fluxos aeronáuticos com fortes gradientes de pressão, por bastante tempo outros modelos não conseguiam calcular esses fluxos. inicialmente foi utilizado para aplicações no ramo da aeronáutica, mas ao longos destas três décadas foi abrindo caminho em grande parte dos códigos comerciais, industriais e de pesquisa (MENTER; KUNTZ; LANGTRY, 2003).

3.4 Região de interesse

A região de análise que será inserida no domínio computacional da simulação numérica será a região da Faculdade do Gama – FGA, que pode ser observada na Figura 2, a Faculdade do Gama possui ao todo um terreno de $335.534,00 \text{ m}^2$ e de área construída $6.723,48 \text{ m}^2$, mas para a análise do trabalho será considerado apenas a região construída onde estão compreendidos os edifícios.

Os edifícios em questão são: Unidade Acadêmica (UAC), Unidade de Ensino e Docência (UED), Módulo de Serviços e Equipamentos Esportivos (MESP) e o Laboratório de Desenvolvimento de Transportes e Energias Alternativas (LDTEA).

Para tirar as medidas de cada prédio foi utilizado a ferramenta de régua do *Google Earth*. Lembrando que essas medidas são aproximações baseadas nos dados fornecidos

Figura 2 – Área construída da FGA



Fonte: EDRA

pelo *Google Earth*. Como apresentado na Tabela 1.

Edifício	Dimensões em metros
UAC	57x71x10
UED	85x36x10
MESP	38x24x5
LDTEA	22x55x10

Tabela 1 – Dimensões dos prédios da FGA

3.5 Regime de ventos na região

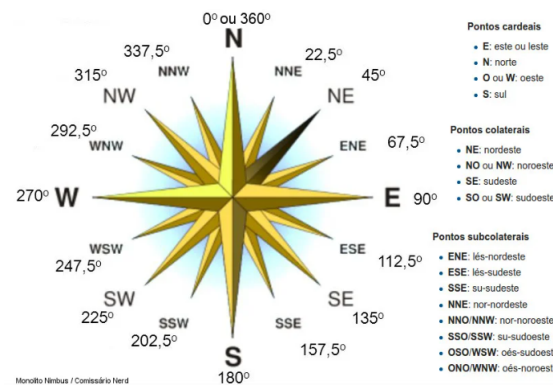
Nem sempre é possível fazer uma medição local exata do comportamento dos ventos então nesse caso se deve utilizar os dados já coletados mais próximos do local de análise.

Para a coleta de dados referentes a velocidade e direção predominante dos ventos, na região da FGA foram utilizados os dados do site do Instituto Nacional de Meteorologia INMET, referente aos anos de 2021 e 2022. Estes dados foram coletados Estação Meteorologia Automática Gama localizada na Ponte Alta.

Quanto aos dados do INMET estes foram tratados por meio do Excel. Em relação aos dados tratados no Excel, foram utilizados os dados de meteorologia do site referente aos anos de 2021 e 2022. A partir desse dados foram usados os dados referentes a coluna de velocidade do vento e a de direção do vento. As velocidades informadas no site estão em m/s e a direção em graus (de 0° a 360°). a simulação pretende mostrar como será o comportamento do vento nas 8 direções, para isso foi dividida a rosa dos ventos em 8 partes, cada uma em 45 graus.

Em relação ao tratamento dos dados, foi realizado o seguinte processo: todos os dados dentro de uma faixa de 45 graus foram filtrados e a partir disso, foi feita uma média das velocidades. Como exemplo, para a direção nordeste, foram selecionadas todas as velocidades que estavam compreendidas entre a faixa do ângulo de 22,5 e 67,5 graus, e assim foi feita a média. O mesmo procedimento foi realizado para as outras direções da rosa dos ventos utilizadas na simulação, como para a direção leste, onde foi utilizada a faixa de 67,5 a 112,5 graus e assim por diante seguindo os ângulos em sentido horário. Isso fica mais visível observando a figura 3 abaixo.

Figura 3 – Rosa dos Ventos



Fonte: Monolito Nimbus

Com isso foi feita uma média das velocidades compreendidas a cada ângulo de 45 graus, a Tabela 2 mostra a velocidade média e máxima para cada uma das oito faixas.

Direção	Velocidade Média	Velocidade Máxima	Taxa de Ocorrência em %
Norte	1,42	7,20	14,81
Nordeste	3,17	11,00	19,27
Leste	3,27	11,20	14,82
Sudeste	2,10	7,60	9,08
Sul	1,90	6,40	8,31
Sudoeste	1,50	9,50	5,95
Oeste	1,68	9,60	6,36
Noroeste	1,81	6,40	21,42

Tabela 2 – Direções e velocidades dos ventos na FGA

Para as condições de entrada para a simulação foram escolhidas as velocidades médias, pois esses valores representam a tendência geral do comportamento do vento na região de interesse. Além disso, trabalhar com velocidades médias possibilita uma análise mais geral, já que minimiza o impacto de eventuais flutuações de curto prazo na velocidade do vento.

3.6 Requisitos de solução

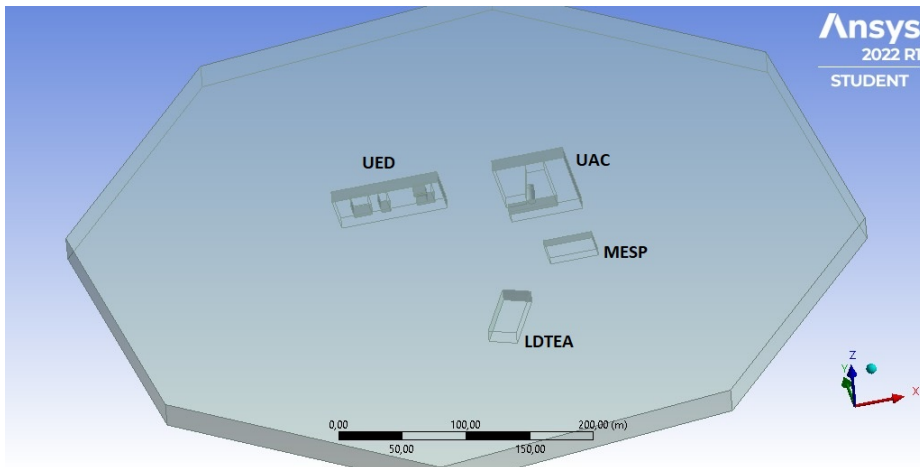
As análises presentes no trabalho serão realizadas por meio de simulação numérica, mais especificamente em CFD no software Ansys. O Ansys é um software de elementos finitos, que pode ser utilizado em outros ramos de engenharia, mas para o trabalho em questão foi utilizado o módulo fluent e na versão estudantil para o estudo de escoamento dos ventos.

- Serão simulados os efeitos dos ventos nas 8 direções da rosa dos ventos a fim de verificar o efeito que o escoamento reage em todos os períodos do ano;
- Será incluído na análise alguma permeabilidade presente nas edificações;
- Algumas hipóteses de simplificação foram adotadas para realizar a simulação;
- O nível topográfico foi considerado o mesmo em toda o domínio da análise, uma vez que esse tipo de elemento incluído na simulação gera mais esforço computacional e não apresenta mudanças significativas no resultado final da simulação,;
- Não foram considerados os contêineres na simulação já que uma parte está em transição para ser retirada;
- A simulação será realizada em condições normais de temperatura e pressão, CNTP;
- Será considerado uma simulação em modelo isotérmico e incompressível;
- Os prédios serão modelados sem a presença de todas as aberturas presentes em sua arquitetura original;
- As edificações foram consideradas com formatos retangulares simples com características bem marcada, sem a presença de detalhamentos superficiais em suas paredes externas.

3.7 Domínio computacional

A área de domínio computacional, como é possível observar na Figura 4, foi modelada no *software* Ansys em formato octogonal e sem a presença de variação em sua topografia, dessa forma é possível que se realize a simulação nas oito direções cardeais das rosas dos ventos (norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste).

Figura 4 – Modelagem da Região Construída



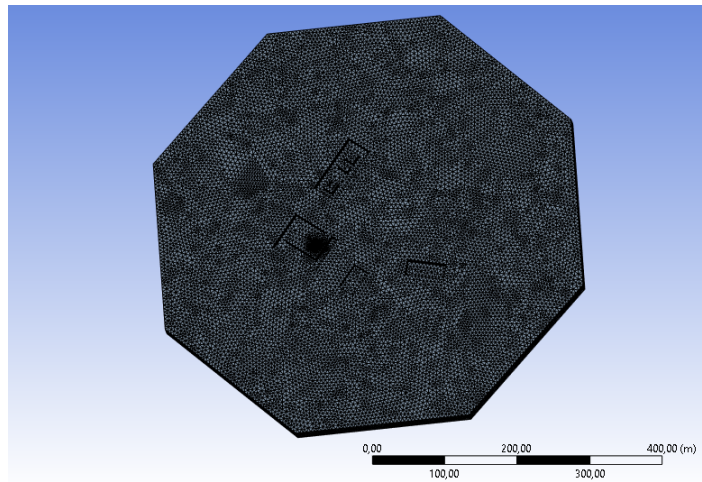
4 Resultados e Discussões

4.1 Geração de malha

A geração de malha é usada na simulação numérica para dividir o domínio de interesse em pequenas regiões, chamadas de elementos, permitindo a aproximação matemática da simulação. A malha é importante porque influencia diretamente na precisão e eficiência da simulação.

A malha foi gerada automaticamente pelo programa com o refinamento padrão que o próprio Ansys sugere para a versão estudantil. Era possível realizar um refinamento na malha, o que aumentaria a precisão da simulação, mas devido à capacidade computacional da máquina utilizada na simulação, o tamanho extenso do domínio e o equilíbrio entre tempo de simulação e precisão de resultado, foi feito o uso da malha padrão. A Figura 5 indica como a malha ficou ao final, onde obteve-se um número de 64.603 nós e 307.864 elementos.

Figura 5 – Malha dos prédios e do volume de controle



4.2 Condições de contorno

Como princípio inicial das condições de contorno adotadas nesta simulação, foi adotado o escoamento incompressível e isotérmico, com uma atmosfera padrão. Para o ar também foram definidos volumes de controle, tais como a temperatura de 25°C e pressão de 1 atm (760 mmHg). Em relação ao tipo de escoamento utilizado como parâmetro da modelagem foi escolhido o SST, que é um tipo de simulação para escoamento turbulento considerado adequado para o trabalho.

4.3 Solução

Para a realização da simulação o *software* ANSYS R2 2022 *Academic* CFX foi o responsável pela resolução do conjunto de equações que comandam a simulação, onde foram realizadas 300 iterações em 30 minutos. Lembrando que, foram realizadas 8 simulações, todas elas passaram pelo processo de 300 iterações, o tempo de 30 minutos é uma estimativa, algumas levaram mais outras menos tempo.

O recurso computacional utilizado para este processamento e pós-processamento é um computador pessoal com processador Intel Core I5-7200U de 2.50GHz com 8GB de memória RAM e placa de vídeo integrada Intel HD *Graphics* 620.

4.4 Simulação nas 8 direções

Com a finalidade de não se tornar repetitivo algumas informações referente ao tópico relacionado ao "Comportamento do vento" serão apresentadas nos tópicos abaixo, essas considerações válidas a todas as direções:

- Independente da direção do vento, o interior do UAC sofrerá com a formação de turbilhões, que são causados pela interferência da continuidade do escoamento do fluxo de ar.
- Da mesma forma, o interior do UED também experimenta a formação de turbilhões em seu interior, embora em menor intensidade em comparação ao UAC. Esses turbilhões são resultantes das interferência da continuidade do escoamento do fluxo de ar, assim como ocorre no UAC.
- Nas regiões à esquerda e à direita da direção de entrada do vento, sempre é observada a formação de vórtices, que são áreas de turbulência do fluxo de ar, devido à ausência de obstáculos.
- Quando há interferência entre dois ou mais prédios, a formação de vórtices é causada pelo fenômeno que é conhecido como escoamento de interferência de esteira.

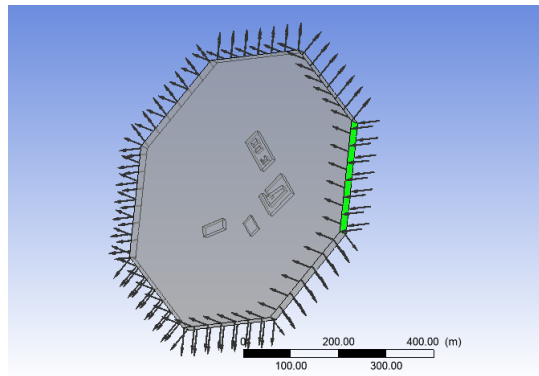
Algumas informações referente ao tópico relacionado ao "Perfil de velocidade" serão apresentadas nos tópicos abaixo, essas considerações válidas a todas as direções:

- Todos os gráficos de velocidade do edifício da UAC apresentam o mesmo formato, com algumas variações na intensidade das turbulências. Isso é causado pela presença da caixa d'água, que impede a circulação de ar internamente, agindo como uma barreira para o fluxo de ar. Como resultado, as correntes de ar se tornam instáveis e propensas a formação de turbilhões.

4.4.1 Comportamento do vento Norte

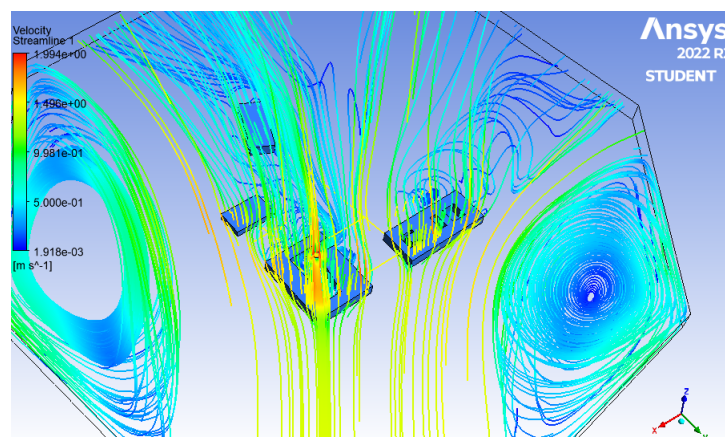
Inicialmente a simulação começa pela direção Norte como direção de entrada dos ventos e as outras 7 direções foram consideradas como saídas, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido na direção Norte



Nas figuras que se sucedem serão demonstrados os resultados em relação ao comportamento do vento incidente sobre o domínio descrito da FGA com ventos incidindo da direção Norte. Na Figura 7 observa-se as linhas de velocidade do vento em todo o domínio dos prédios da FGA e seu volume de controle.

Figura 7 – escoamento do vento no domínio da FGA Norte



Com as imagens abaixo é possível ver as formas de escoamento de forma mais detalhada. Em relação a figura que apresenta toda a região da simulação é possível ver que se apresenta um escoamento visualmente laminar do ar até ele encostar nos edifícios, onde a partir daí começa a gerar uma mudança no escoamento, isso fica visível principalmente nas regiões opostas a incidência do vento e entre os edifícios. De forma mais detalhada é possível ver os turbilhões entre no UED e o UAC na Figura 8 Figura 9.

Figura 8 – Turbulências no UED Norte

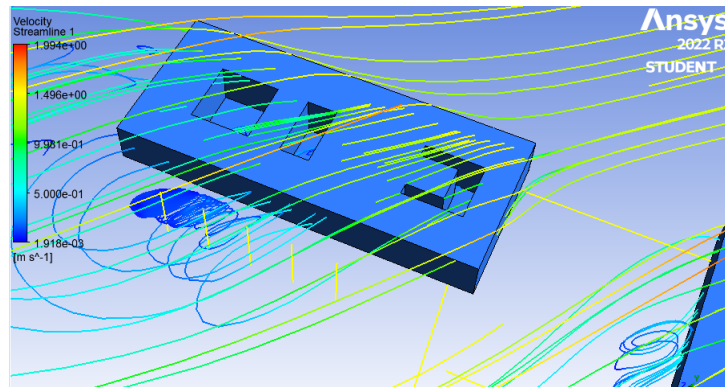
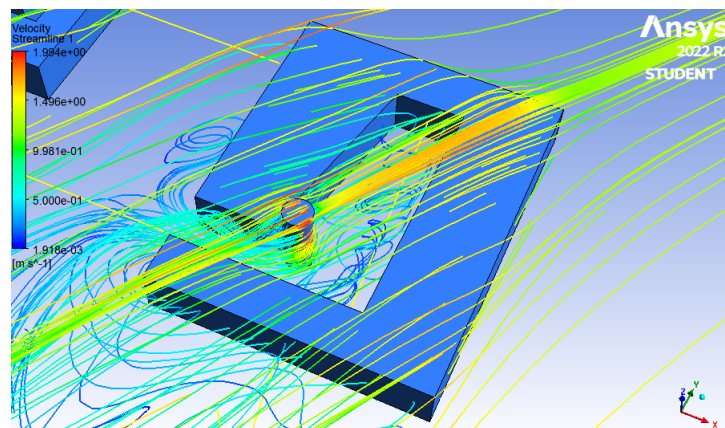


Figura 9 – Turbulências no UAC Norte

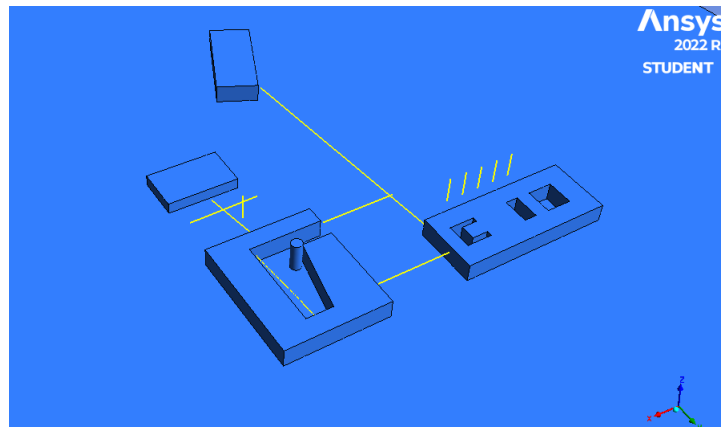


4.4.2 Perfis de velocidade Norte

Em relação ao perfil de velocidade, será possível analisar a existência de turbulências significativas ao longo do espaço entre os prédios e internamente no UAC.

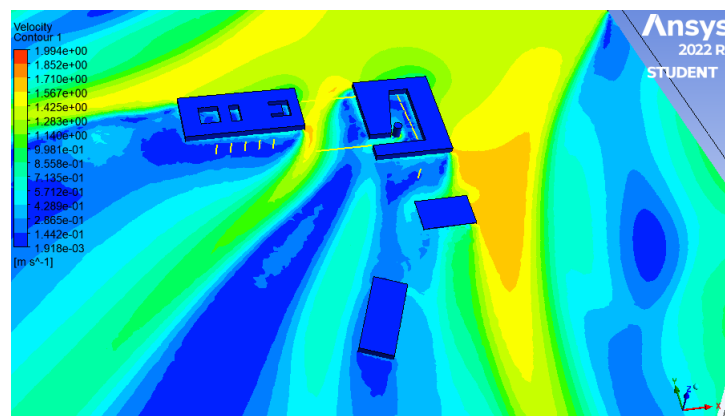
As linhas geradas na simulação serão usadas para analisar os locais de análise da melhor forma, a fim de identificar o início e o fim das séries (curvas) que apareceram nos gráficos a seguir. A Figura 10 é válida para todas as 8 direções simuladas ao longo do trabalho.

Figura 10 – Linhas de velocidade



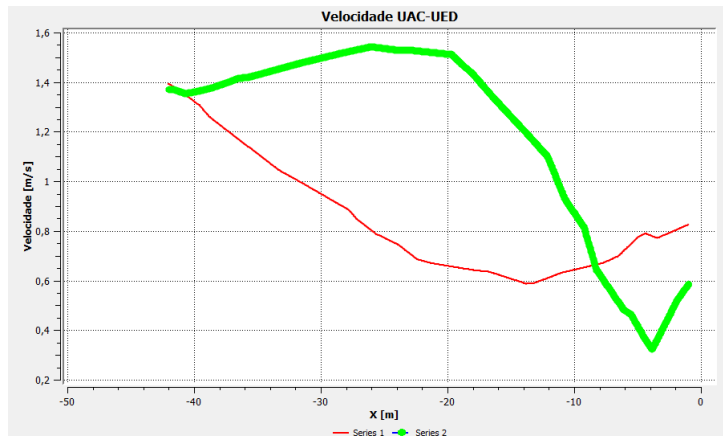
Na Figura 11 é possível observar o contorno de velocidade, onde a velocidade do escoamento aumenta ao lado do UAC e MESP e diminui nas faces opostas a incidência dos ventos em todos os prédios.

Figura 11 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Norte



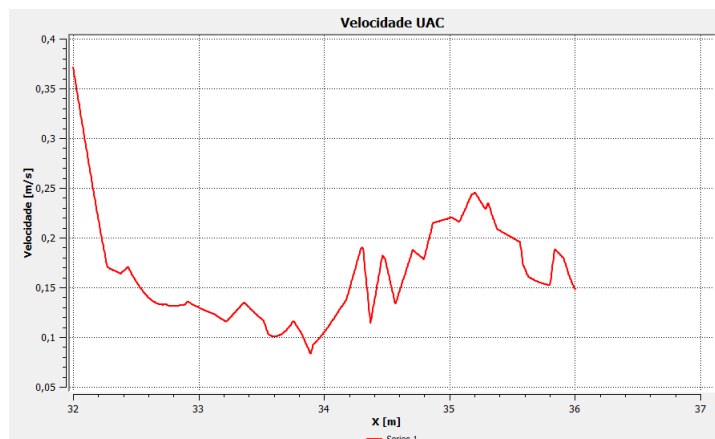
O gráfico da Figura 12 indica 2 perfis de velocidade existentes entre a UAC e a UED onde as duas séries dão início praticamente juntas a uma altura de 1,4m. As linhas de análise estão dispostas na face onde está localizada a entrada da UAC, onde ocorre a maior turbulência, e em uma das laterais da UED. A falta de oscilações mostram que a região não apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção.

Figura 12 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Norte



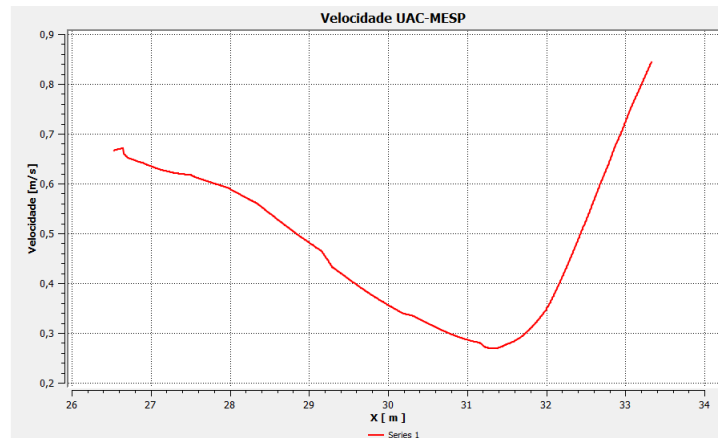
O gráfico da Figura 13 indica 1 perfil de velocidade existente internamente na UAC onde a série tem origem em 0,4m. A curva apresenta muitas oscilações o que é um forte indício de turbulência na região interna da UAC. O que é visível nas imagens onde mostram a turbulência na região.

Figura 13 – variação da velocidade UAC Norte



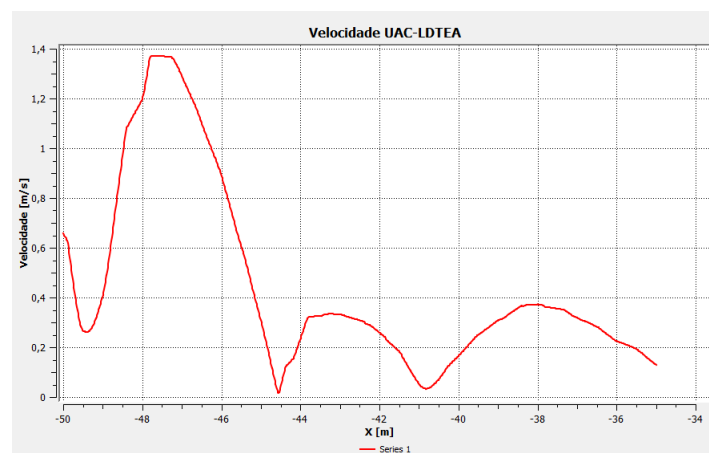
O gráfico da Figura 14 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UAC e o MESP onde a série tem origem cerca de 0,7 m. A curva não apresenta oscilações, a falta de oscilações mostram que a região não apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção.

Figura 14 – variação da velocidade entre os edifícios UAC MESP Norte



O gráfico da Figura 15 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UED e o LDTEA onde a série tem um pico em cerca de 1,4m. A curva assim como a maior parte das anteriores não apresentam oscilações, a falta de oscilações demonstra que a região não apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção.

Figura 15 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e LDTEA Norte

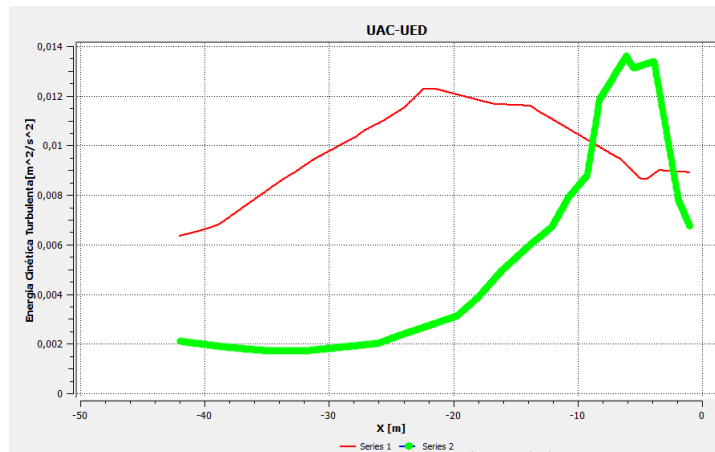


4.4.3 Perfis de Energia Cinética Turbulenta Norte

Sobre a energia cinética turbulenta, ela representa a intensidade da turbulência ao longo das distâncias entre os prédios. A partir disso, é possível analisar como a turbulência aumenta ou diminui ao longo do percurso entre os quatro edifícios e no interior do UAC.

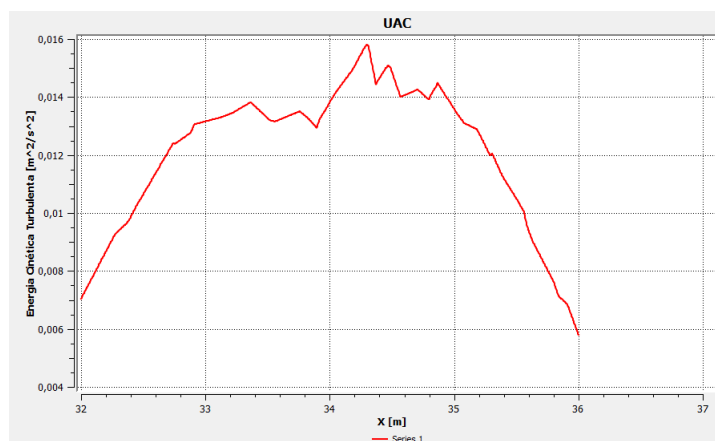
Nas figuras a seguir são apresentados os resultados dos perfis de energia cinética turbulenta sobre o domínio da FGA para ventos incidentes na direção Norte. O gráfico da Figura 16 indica 2 perfis de energia cinética turbulenta existentes entre a UAC e a UED. As 2 séries apresentadas possuem flutuações, a série 1 apresenta uma oscilação brusca logo no seu início já a série 2 vai ter uma oscilação brusca após a segunda metade do gráfico, passando os valores da série 1.

Figura 16 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED Norte



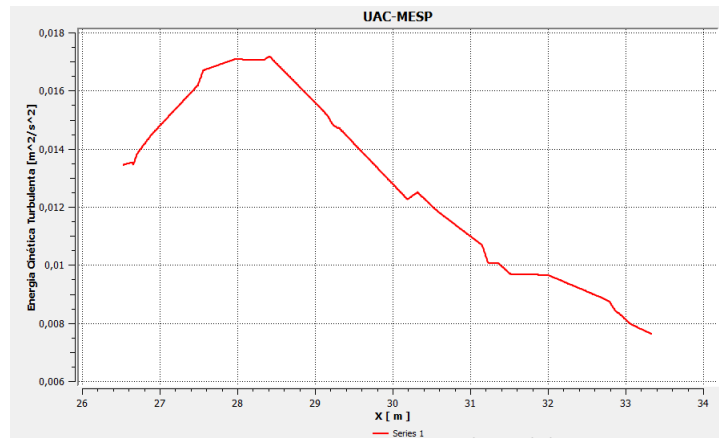
Já as outras 3 figuras apresentam apenas uma série em seus gráficos. O gráfico da Figura 17 apresenta o perfil de turbulência interna do UAC. Os dados apresentados neste gráfico reforçam a presença de turbulências no interior da UAC.

Figura 17 – variação de energia cinética UAC Norte



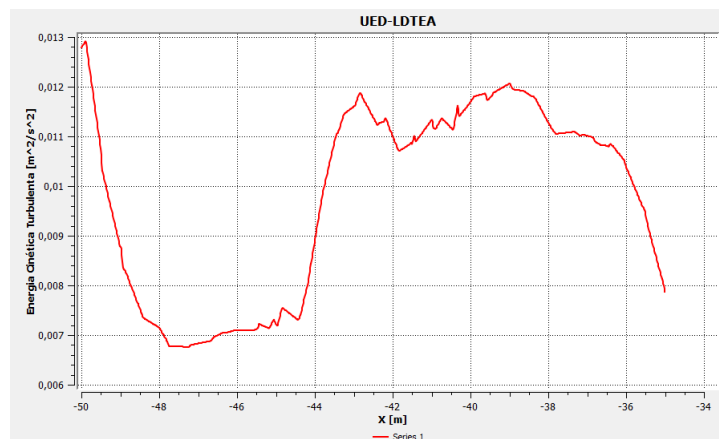
Já na Figura 18, ele mostra que a energia cinética entre o UAC e o MESP vai diminuindo ao longo do espaço entre os dois prédios.

Figura 18 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Norte



Em relação ao UED e LDTEA, Figura 19, observa-se que se inicia com uma energia cinética turbulenta mais alta e vai sofrendo oscilações bruscas em todo o espaço entre os dois prédios.

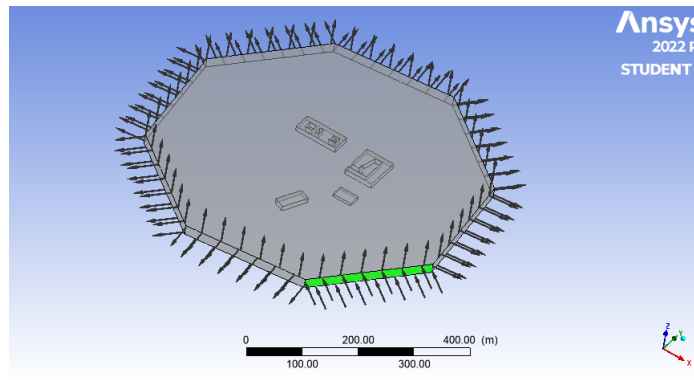
Figura 19 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA Norte



4.4.4 Comportamento do vento Nordeste

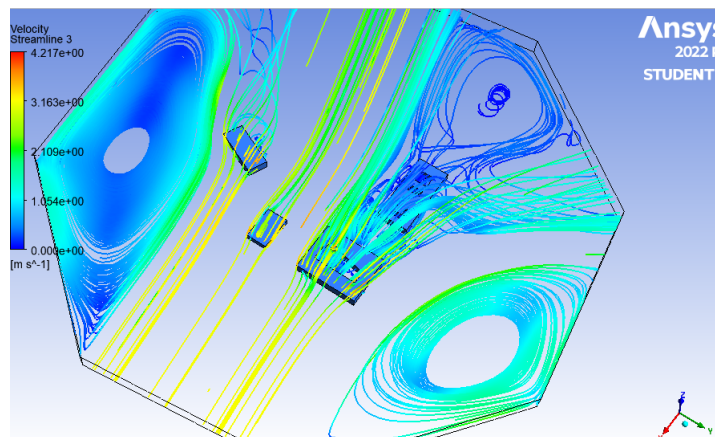
Simulação pela direção Nordeste como direção de entrada dos ventos e as outras 7 direções consideradas como saídas, como mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Nordeste



Em relação às imagens abaixo é possível ver na Figura 21 que se apresenta um escoamento visualmente laminar onde tem a entrada do ar, esse escoamento permanecerá longo do MESP e mesmo após cruzar todo o telhado ainda continua sem a formação de turbilhões.

Figura 21 – Escoamento do vento no domínio da FGA Nordeste



Em relação ao LDTEA nele ocorre a formação de pequenos turbilhões na região onde é a entrada do prédio. agora em relação ao UED e UAC a formação de turbilhões fica muito visível. No UAC ocorre a formação de turbilhões internos e na face oposta a direção de incidência do vento. Na UED ocorre turbilhões em todas as suas laterais. Na Figura 22 e na Figura 23 é possível visualizar com mais detalhes a turbulência.

Figura 22 – Turbulências no UED Nordeste

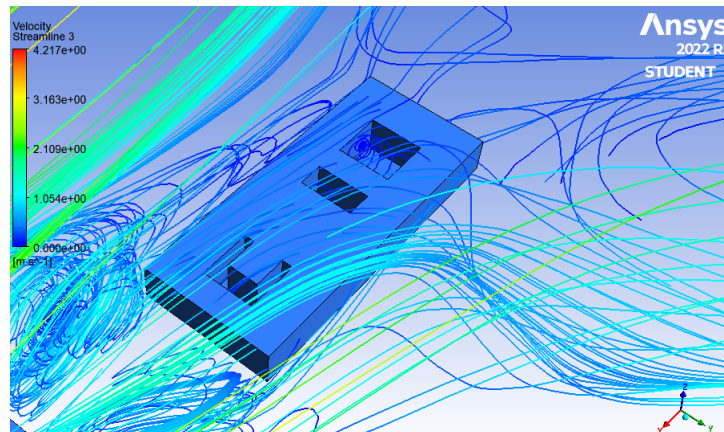
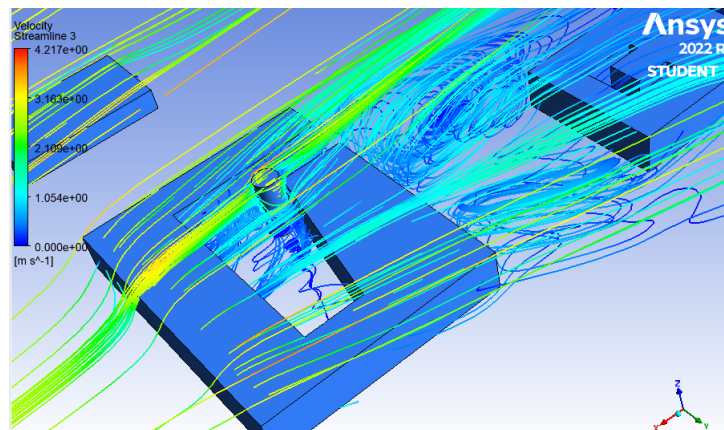


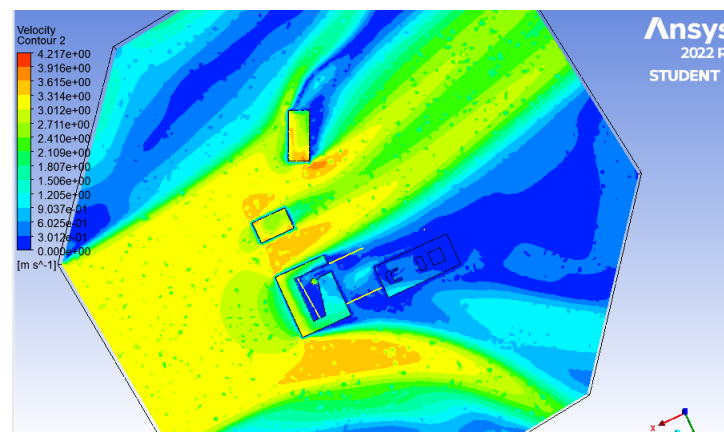
Figura 23 – Turbulências no UAC Nordeste



4.4.5 Perfis de velocidade Nordeste

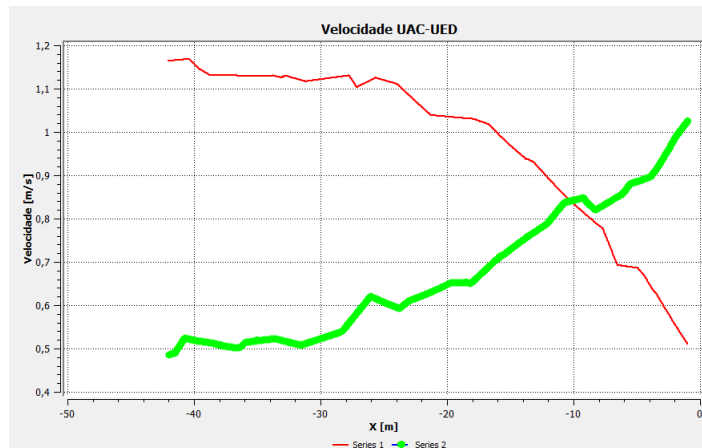
Na Figura 24 é possível observar o contorno de velocidade, onde a velocidade do escoamento aumenta ao lado do UAC, entre a UAC e o MESP e entre o MESP e o LDTEA. A velocidade diminui bastante na região da UED e internamente na UAC.

Figura 24 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Nordeste



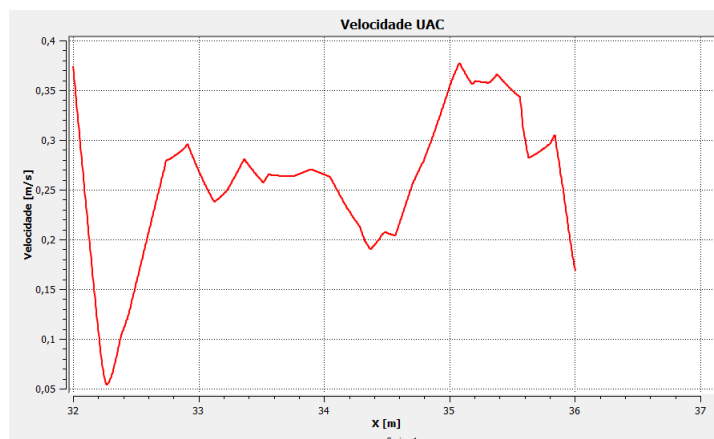
O gráfico da Figura 25 indica 2 perfis de velocidade existentes entre a UAC e a UED, a série 1 tem seu início em 1,2m já a série 2 em 0,5m. as duas séries possuem oscilações pequenas onde uma aumenta sua velocidade (série 2) e outra diminui (série 1). A presença de oscilações mostram que a região apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção.

Figura 25 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Nordeste



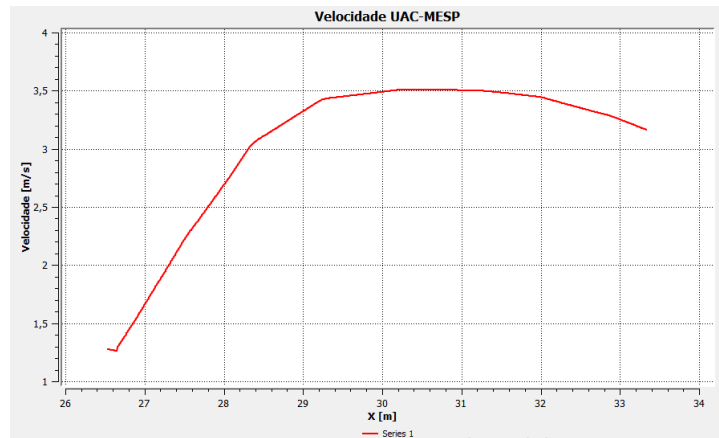
O gráfico da Figura 26 indica 1 perfil de velocidade existente internamente na UAC onde a série tem origem em 0,4m. A curva apresenta muitas oscilações o que é um forte indício de turbulência na região interna da UAC. O que é visível nas imagens onde mostram a turbulência na região.

Figura 26 – variação da velocidade UAC Nordeste



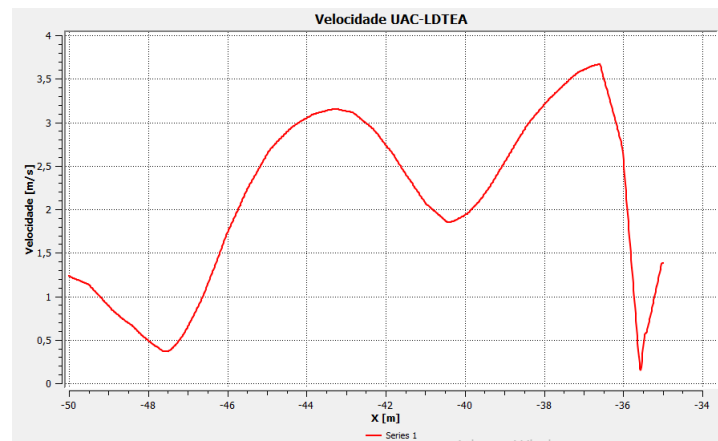
O gráfico da Figura 27 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UAC e o MESP onde a série tem origem cerca de 1,3m chegando até 3,5m . A curva não apresenta oscilações, a falta de oscilações mostram que a região não apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção.

Figura 27 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Nordeste



O gráfico da Figura 28 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UED e o LDTEA onde a série tem o início em 1,5m chegando até em quase 4m. A curva assim como a maior parte das anteriores não apresenta oscilações, a falta de oscilações demonstra que a região não apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção.

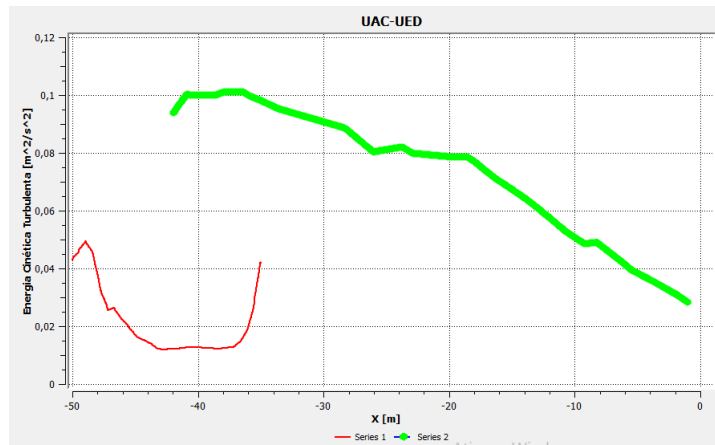
Figura 28 – variação da velocidade entre os edifícios UED e LDTEA Nordeste



4.4.6 Perfis de Energia Cinética Turbulenta Nordeste

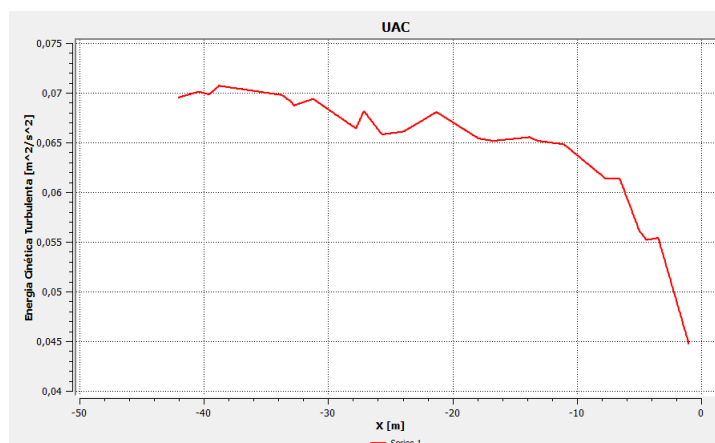
Nas figuras a seguir são apresentados os resultados dos perfis de energia cinética turbulenta sobre o domínio da FGA para ventos incidentes na direção Nordeste. O gráfico da Figura 29 indica 2 perfis de energia cinética turbulenta existentes entre a UAC e a UED. as séries apresentam comportamento curioso quando se comparado às outras direções, a série 1 forma uma parábola com concavidade voltada para cima, já a série dois apresenta valores mais altos de energia cinética turbulenta do que os da série 1 e apresenta uma sem oscilações significativas ao longo do trecho entre os dois prédios.

Figura 29 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED Nordeste



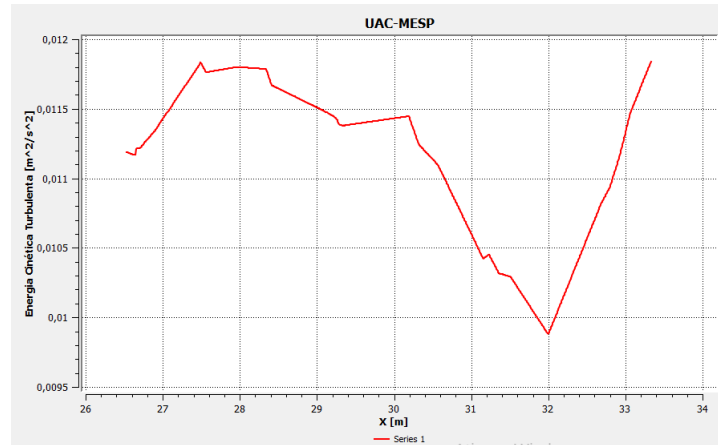
Já as outras 3 figuras apresentam apenas uma única série em seus gráficos. O gráfico da Figura 30 apresenta o perfil de turbulência interna do UAC. Os dados apresentados neste gráfico mostram que seus valores de energia cinética turbulenta permanecem altos e a queda ao longo do gráfico se apresenta bem suave até 10m, daí em diante se torna mais brusca isso mostra que existe turbulência interna no UAC.

Figura 30 – variação de energia cinética turbulenta UAC Nordeste



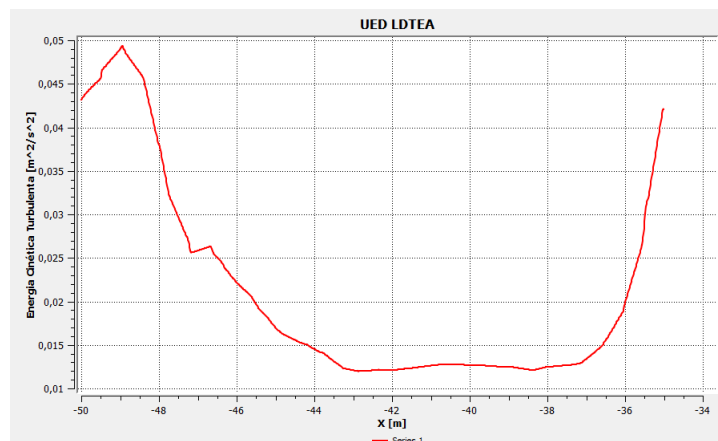
já na Figura 31, ele mostra que a energia cinética entre o UAC e o MESP vai sofrendo com oscilações mais acentuadas ao longo do gráfico.

Figura 31 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Nordeste



Em relação ao UED e LDTEA, Figura 32, observa-se que a curva forma uma parábola com concavidade voltada para cima bem semelhante ao formato e valores da série 1 do gráfico da UAC e a UED, porém nesse serie a energia ocupa o gráfico do início ao fim, os valores iniciais são próximos ao valor final.

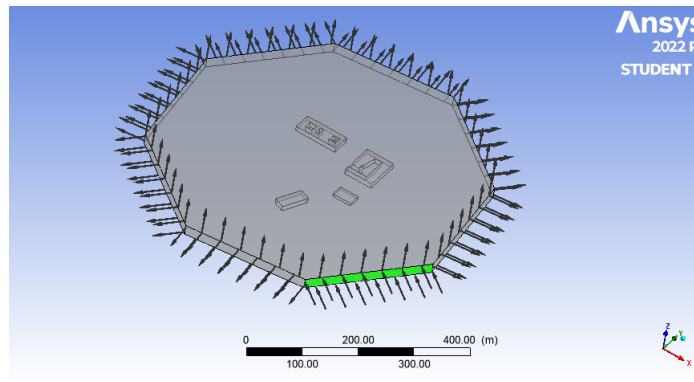
Figura 32 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA Nordeste



4.4.7 Comportamento do vento Leste

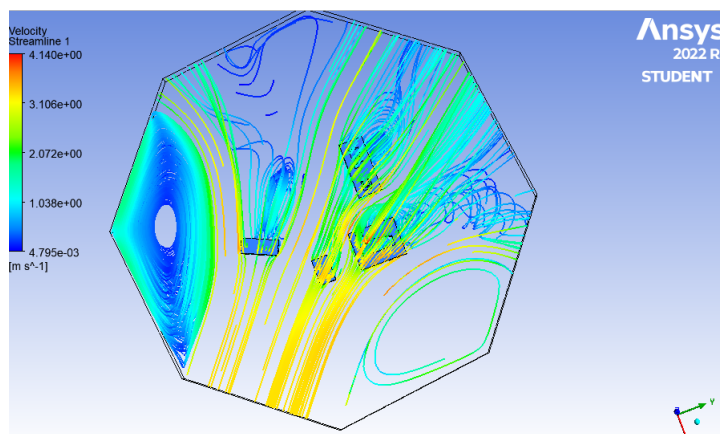
Agora adotando a direção Leste como direção de entrada dos ventos, as outras 7 direções foram consideradas como saídas, como mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Leste



Na Figura 34 observa-se as linhas de velocidade do vento em todo o domínio dos prédios da FGA na direção Leste. O escoamento permanece laminar na entrada e por cima dos telhados dos edifícios, apenas nas faces opostas são formados turbilhões alongados que vão até o final do volume de controle, com exceção do MESP que não apresenta na simulação a formação de turbilhões ao longo das suas laterais.

Figura 34 – Escoamento do vento no domínio da FGA Leste



Na Figura 35 e na Figura 36 é possível ver de forma mais detalhada os turbilhões.

Figura 35 – Turbulências no UED e UAC Leste

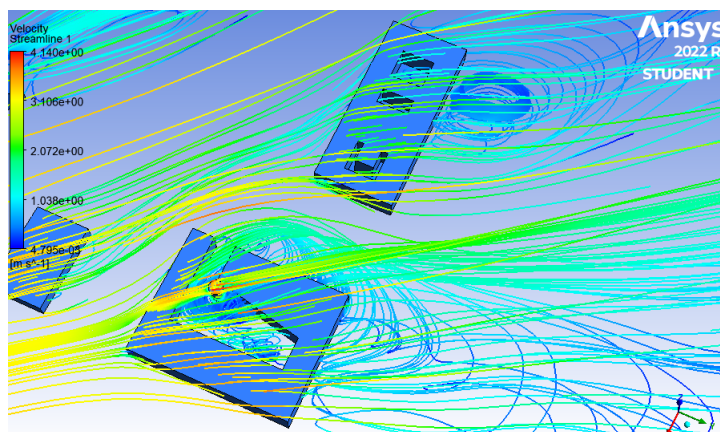
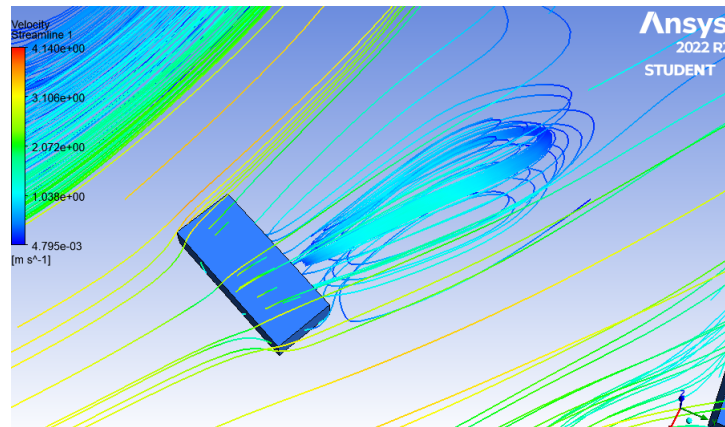


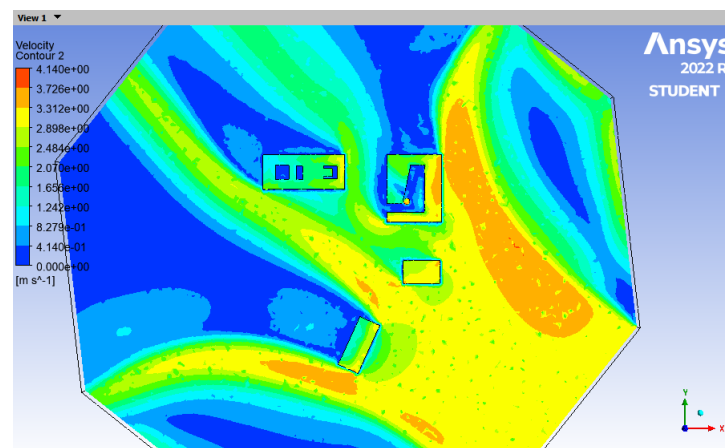
Figura 36 – Turbulências no LDTEA Leste



4.4.8 Perfis de velocidade Leste

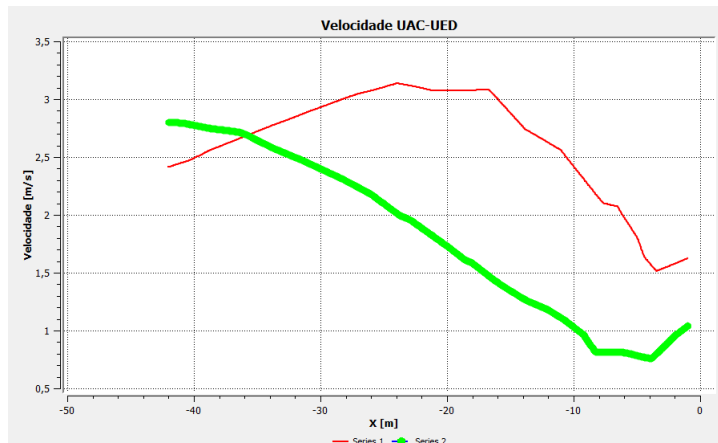
Na Figura 37 é possível observar o contorno de velocidade, onde a velocidade do escoamento aumenta nas laterais do UAC e do LDTEA e também entre o MESP e LDTEA, A velocidade diminui nas fases opostas a incidência dos ventos.

Figura 37 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Leste



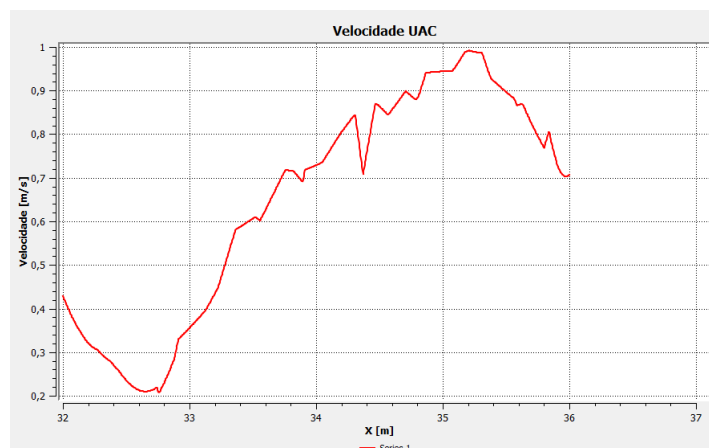
O gráfico da Figura 38 indica 2 perfis de velocidade existentes entre a UAC e a UED onde a série 1 tem início em 2,4m e a série 2 tem seu início em 2,8m. A falta de oscilações significativas demonstra que a região não apresenta pouca turbulência para ventos incidindo nesta direção.

Figura 38 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Leste



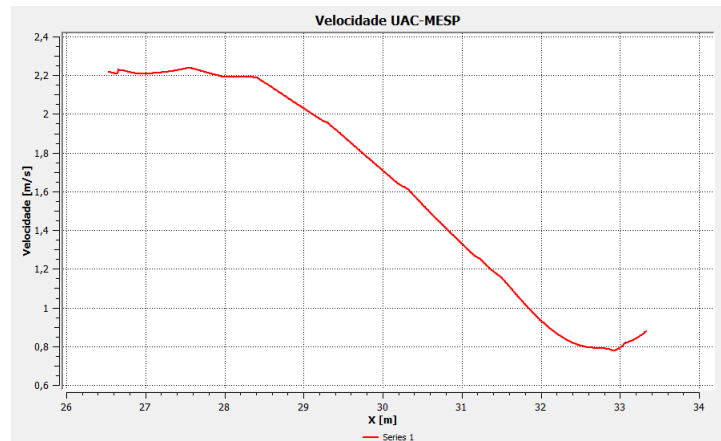
O gráfico da Figura 39 indica 1 perfil de velocidade existente internamente na UAC onde a série tem origem em 0,42m chegando até a 1m. A curva apresenta muitas oscilações o que é um forte indicio de turbulência na região interna da UAC. O que é visível nas imagens onde mostram a turbulência na região.

Figura 39 – variação da velocidade UAC Leste



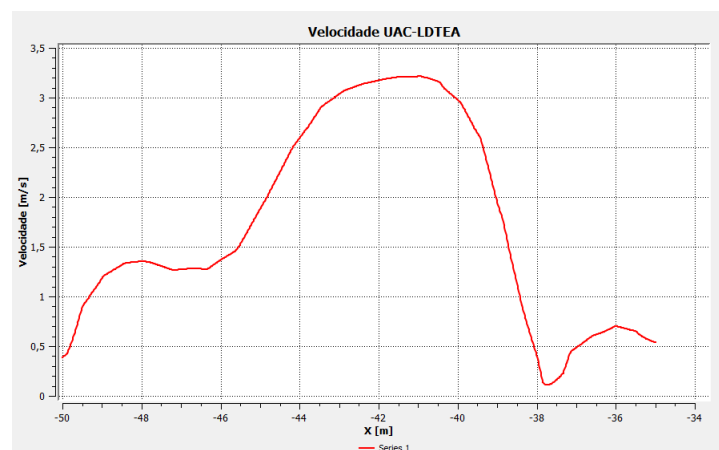
O gráfico da Figura 40 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UAC e o MESP onde a série tem origem cerca de 2,2 m. A curva não apresenta muitas oscilações, a falta de oscilações significativas demonstra que a região não apresenta muitas turbulências para ventos incidindo nesta direção.

Figura 40 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Leste



O gráfico da Figura 41 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UED e o LDTEA onde a série tem um pico em cerca de 3m. As curvas assim como a maior parte das anteriores não apresentam oscilações, a falta de oscilações demonstra que a região não apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção. O aumento da velocidade próximo ao LDTEA pode indicar a influência do prédio como um obstáculo.

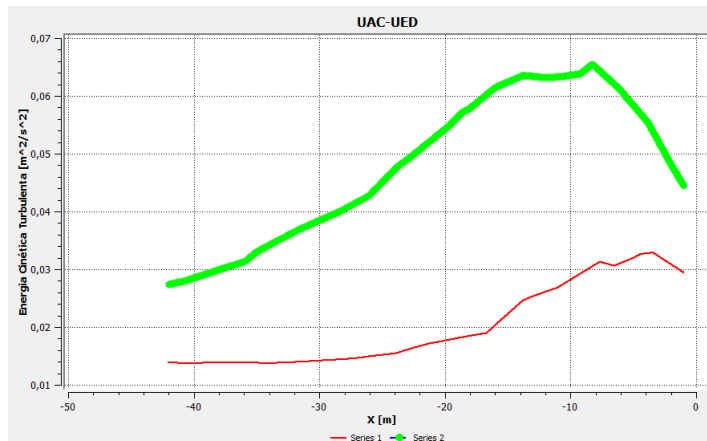
Figura 41 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e LDTEA Leste



4.4.9 Perfis de Energia Cinética Turbulenta Leste

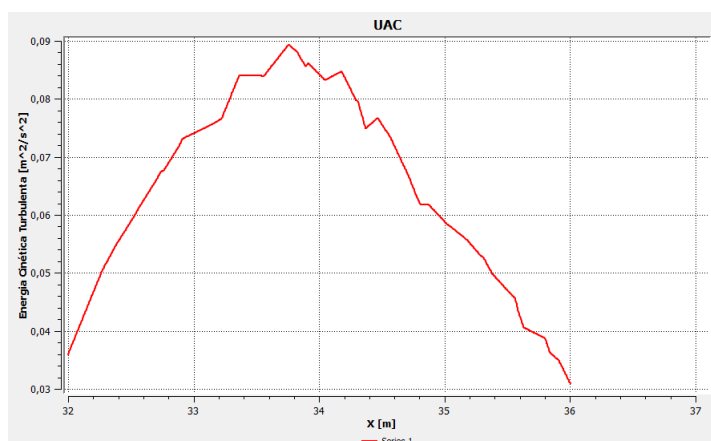
Nas figuras a seguir são apresentados os resultados dos perfis de energia cinética turbulenta sobre o domínio da FGA para ventos incidentes na direção Leste. O gráfico da Figura 42 indica 2 perfis de energia cinética turbulenta existentes entre a UAC e a UED. As 2 séries apresentadas não possuem grandes flutuações, a série 2 apresenta valores de energia cinética turbulenta maiores do que a série 1, mas as duas curvas são bastante semelhantes.

Figura 42 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED Leste



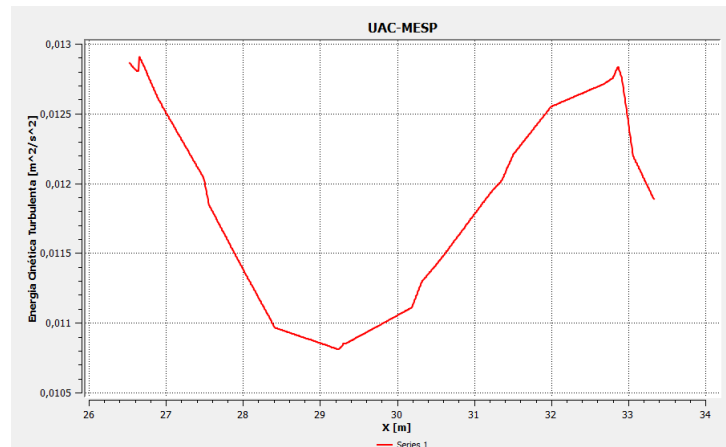
Já as outras 3 figuras apresentam apenas uma série em seus gráficos. O gráfico da Figura 43 apresenta o perfil de turbulência interna do UAC. nele é possível observar o comportamento de uma parábola com concavidade voltada para baixo, os valores iniciais de energia cinética turbulenta se tornam muito parecidos com os valores finais.

Figura 43 – variação de energia cinética turbulenta UAC Leste



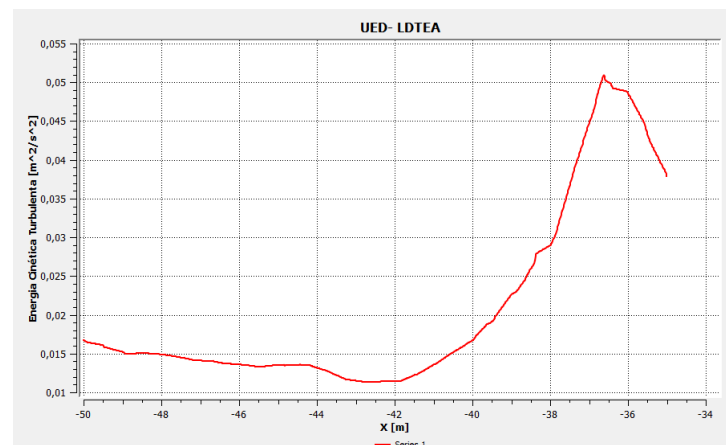
Já na Figura 44, ele mostra que a energia cinética entre o UAC e o MESP vai sofrendo oscilações ao longo das distâncias entre os prédios.

Figura 44 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Leste



Em relação ao UED e LDTEA, Figura 45, observa-se que se inicia com uma energia cinética turbulenta mais baixa que permanece constante até cerca de 42m, ali em diante apresenta crescimento linear sem oscilações ao longo dos dados do gráfico.

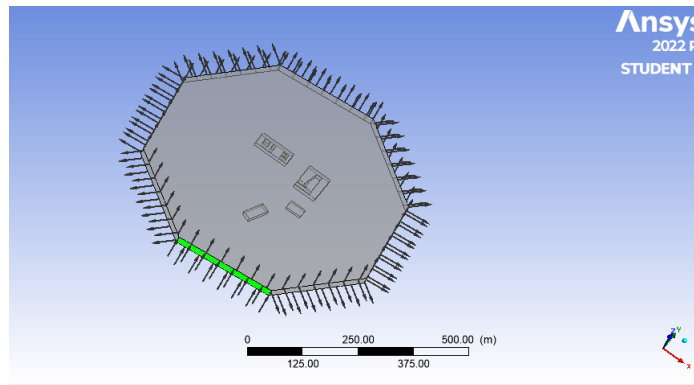
Figura 45 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA Leste



4.4.10 Comportamento do vento Sudeste

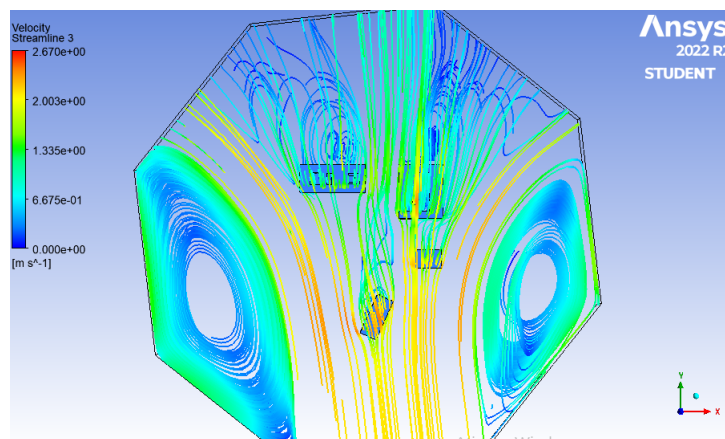
Agora adotando a direção Sudeste como direção de entrada dos ventos, as outras 7 direções foram consideradas como saídas, como mostrado na Figura 46.

Figura 46 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Sudeste



Na Figura 47 observa-se as linhas de velocidade do vento em todo o domínio dos prédios da FGA na direção sudeste. O escoamento permanece laminar desde a entrada até encostar nos prédios e por cima dos edifícios, no MESP não tem formação de turbilhões.

Figura 47 – Escoamento do vento no domínio da FGA Sudeste



Turbilhões alongados aparecem apenas nas faces opostas dos outros prédios. Na Figuras 48 e Figura 49 é possível ver de forma mais detalhada os turbilhões

Figura 48 – Turbulências no UAC Sudeste

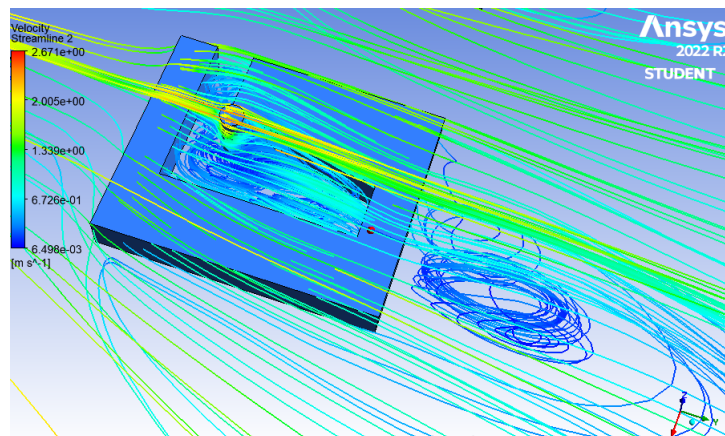
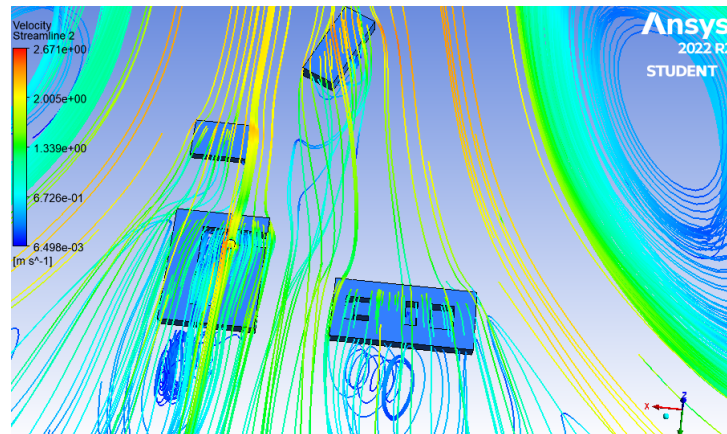


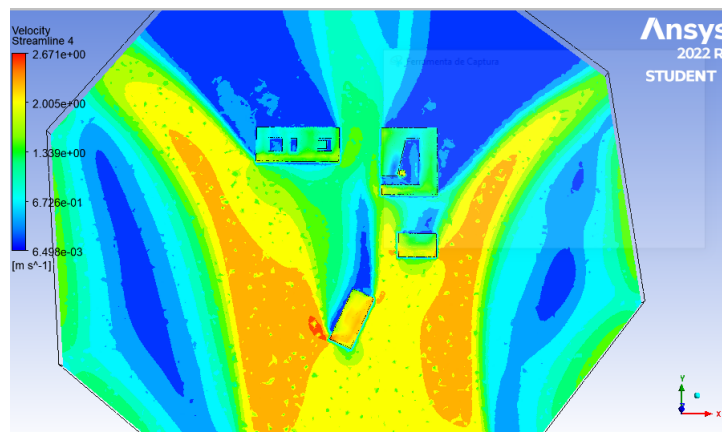
Figura 49 – Turbulências nos prédios Sudeste



4.4.11 Perfis de velocidade Sudeste

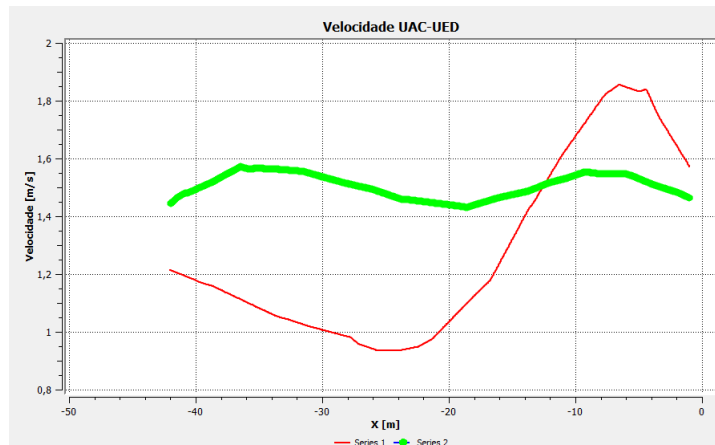
Na Figura 50 é possível observar o contorno de velocidade, onde a velocidade do escoamento aumenta ao lado do LDTEA e MESP e diminui nas fases opostas a incidência dos ventos em todos os prédios.

Figura 50 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Sudeste



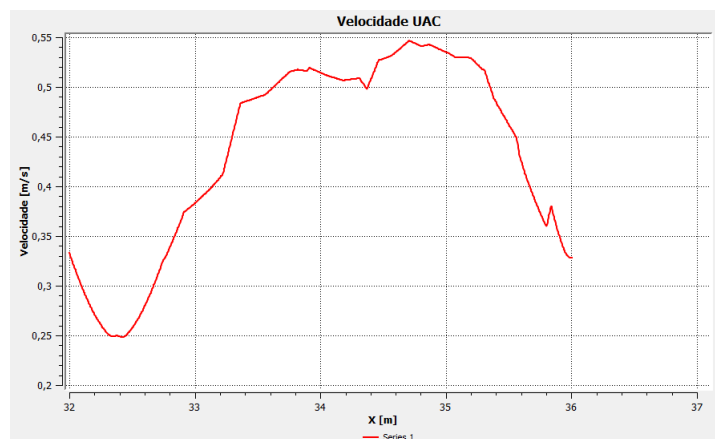
O gráfico da Figura 51 indica 2 perfis de velocidade existentes entre a UAC e a UED onde a série 1 tem início em 1,2m e a série 2 tem seu início em 1,5m. As curvas são regulares e não apresentam oscilações. A falta de oscilações mostram que a região não apresenta turbulências significativas para ventos incidindo nesta direção.

Figura 51 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Sudeste



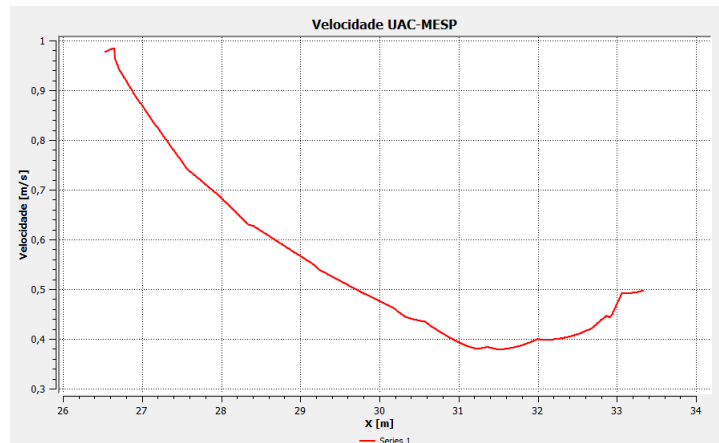
O gráfico da Figura 52 indica 1 perfil de velocidade existente internamente na UAC onde a série tem origem em 0,35m. As curvas apresentam muitas oscilações o que é um forte indício de turbulência na região interna da UAC. O que é visível nas imagens onde mostram a turbulência na região.

Figura 52 – variação da velocidade UAC Sudeste



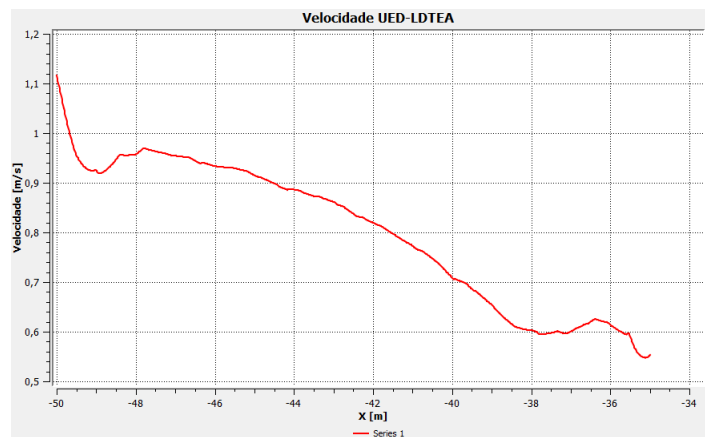
O gráfico da Figura 53 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UAC e o MESP onde a série tem origem cerca de 1 m. A curva não apresenta poucas oscilações, pouca quantidade de oscilações demonstram que a região não apresenta muita turbulências para ventos incidindo nesta direção.

Figura 53 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Sudeste



O gráfico da Figura 54 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UED e o LDTEA onde a série tem um pico em cerca de 1,2m. A curva diferente da maioria das direções até então apresentam oscilações, a presença de oscilações demonstra que a região apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção, a queda na velocidade demonstra que nessa direção não possui obstáculos significativos.

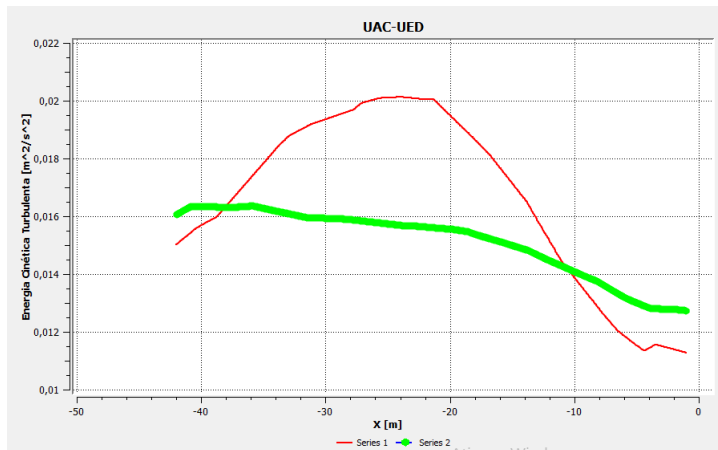
Figura 54 – variação da velocidade entre os edifícios UED e LDTEA Sudeste



4.4.12 Perfis de Energia Cinética Turbulenta Sudeste

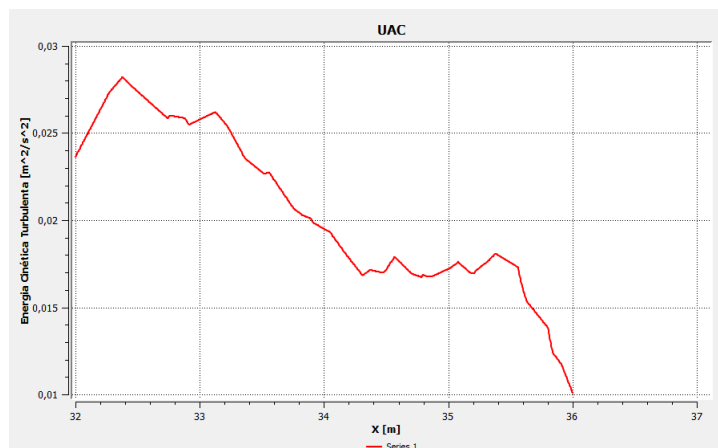
Nas figuras a seguir são apresentados os resultados dos perfis de energia cinética turbulenta sobre o domínio da FGA para ventos incidentes na direção Sudeste. O gráfico da Figura 55 indica 2 perfis de energia cinética turbulenta existentes entre a UAC e a UED. As 2 séries não apresentam oscilações, a série 1 apresenta uma aparência de parábola com concavidade para baixo, já a série 2 vai ter uma queda pequena aparentemente linear.

Figura 55 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED Sudeste



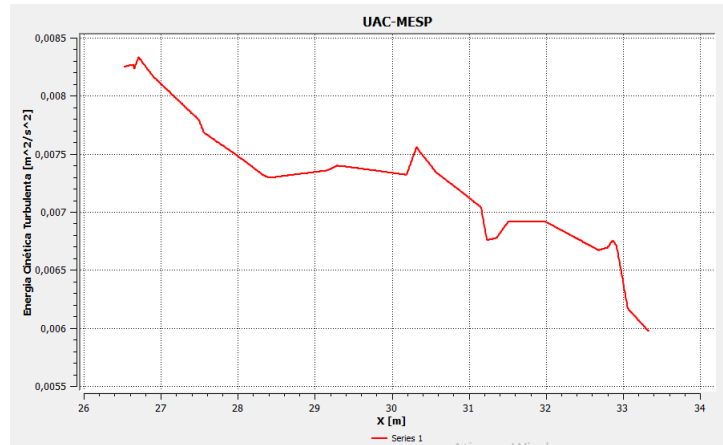
Já as outras 3 figuras apresentam apenas uma série em seus gráficos. O gráfico da figura 56 apresenta o perfil de turbulência interna do UAC. Os dados apresentados neste gráfico mostram uma curva que vai decrescendo sua energia cinética turbulenta com pequenas oscilações que são presentes em toda a curva.

Figura 56 – variação de energia cinética turbulenta UAC Sudeste



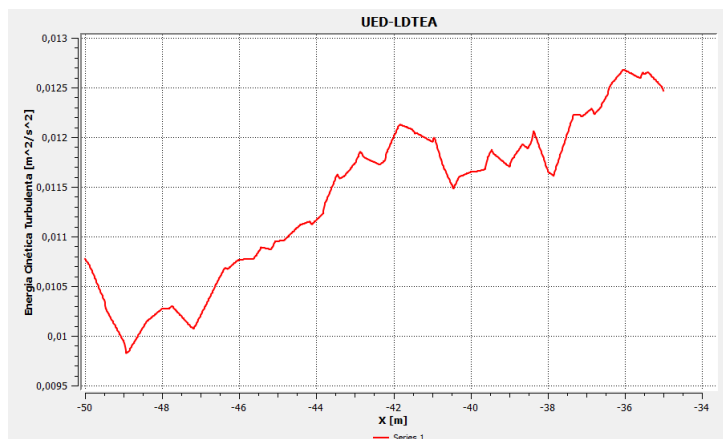
Já na figura 57, ele mostra que a energia cinética entre o UAC e o MESP que também apresenta uma curva com queda com algumas pequenas oscilações ao longo do espaço entre os dois prédios.

Figura 57 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Sudeste



Em relação ao UED e LDTEA, Figura 58, observa-se que se inicia com uma energia cinética turbulenta mais baixa e vai sofrendo pequenas oscilações bruscas enquanto aumenta sua energia ao longo dos metros.

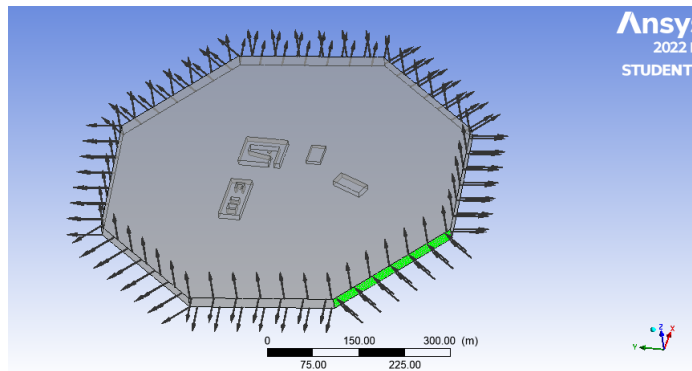
Figura 58 – Variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA Sudeste



4.4.13 Comportamento do vento Sul

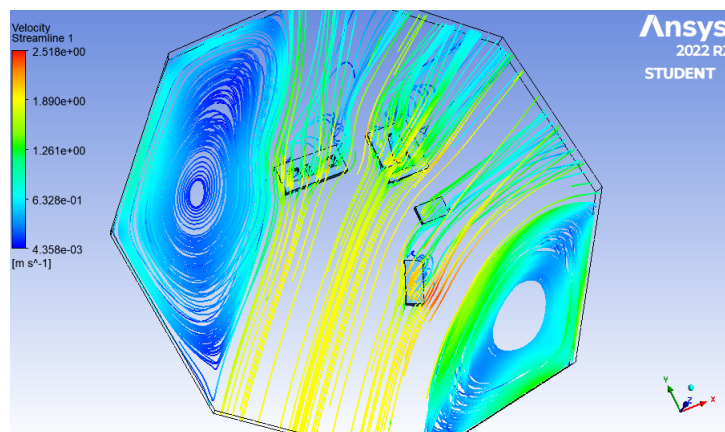
Agora adotando a direção Sul como direção de entrada dos ventos, as outras 7 direções foram consideradas como saídas, como mostrado na Figura 59.

Figura 59 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Sul



Na Figura 60 observa-se as linhas de velocidade do vento em todo o domínio dos prédios da FGA na direção Sul. O escoamento permanece laminar em cima dos edifícios, continua laminar na face oposta do MESP, na face opostas e nas laterais dos outros prédios ocorre a presença de turbilhões, mas com intensidade baixa.

Figura 60 – Escoamento do vento no domínio da FGA Sul



Na Figura 61 e Figura 62 é possível ver de forma mais detalhada os turbilhões.

Figura 61 – Turbulências nos prédios Sul

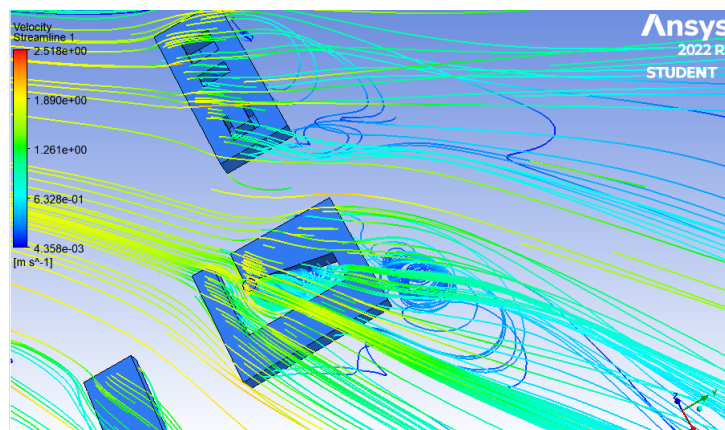
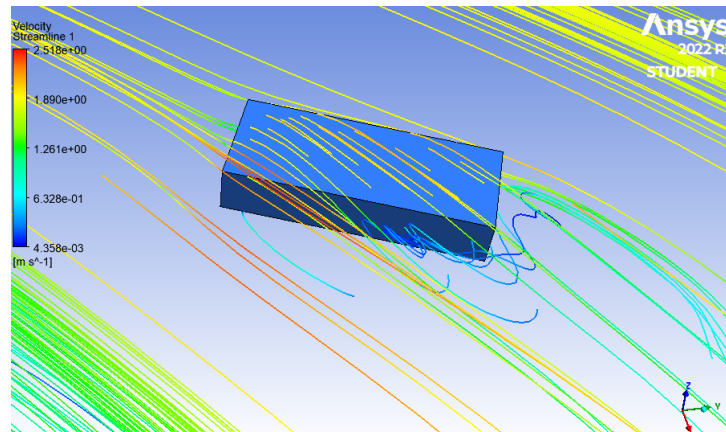


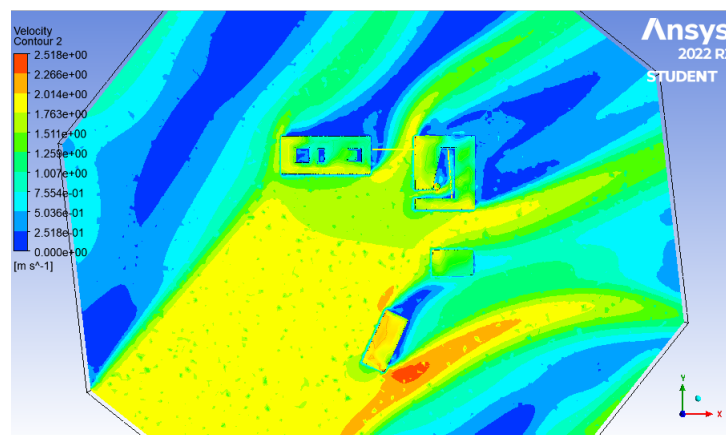
Figura 62 – Turbulências no LDTEA Sul



4.4.14 Perfis de velocidade Sul

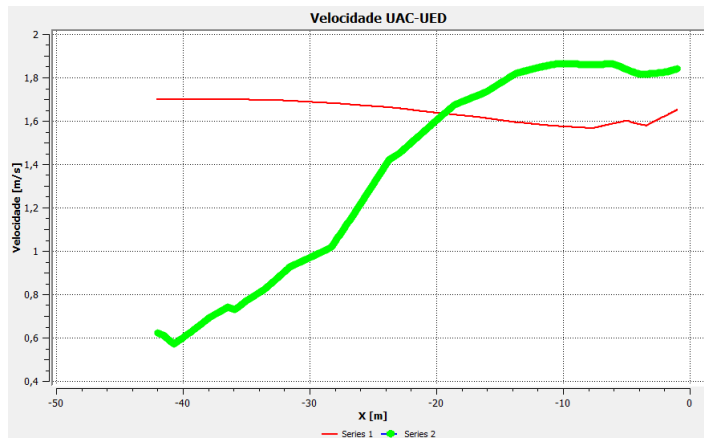
Na Figura 63 é possível observar o contorno de velocidade, onde a velocidade do escoamento aumenta principalmente no LDTEA e diminui nas fases opostas a incidência dos ventos, exceto em relação ao MESP.

Figura 63 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Sul



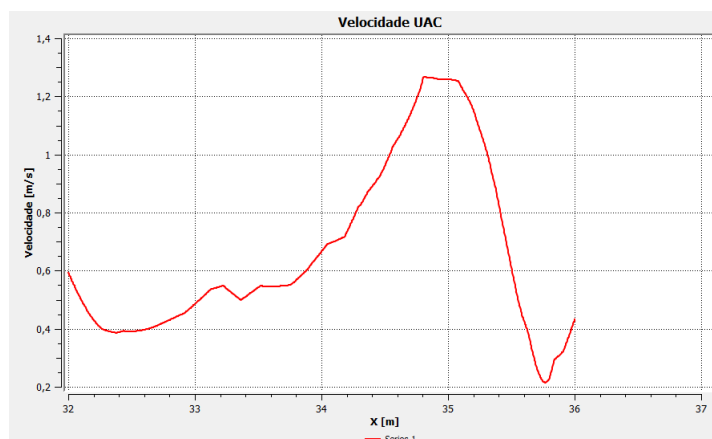
O gráfico da Figura 64 indica 2 perfis de velocidade existentes entre a UAC e a UED onde a série 1 tem início em 1,7m e a série 2 tem seu início em 0,7m. As curvas são regulares e não apresentam oscilações. A falta de oscilações mostram que a região não apresenta turbulências significativas para ventos incidindo nesta direção.

Figura 64 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Sul



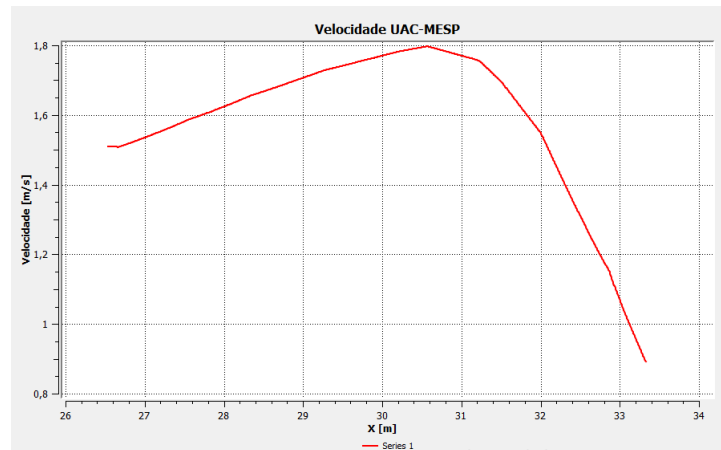
O gráfico da Figura 65 indica 1 perfil de velocidade existente internamente na UAC onde a série tem origem em 0,6m. A curva apresenta algumas oscilações o que é um forte indício de turbulência na região interna da UAC. O que é visível nas imagens onde mostram a turbulência na região.

Figura 65 – variação da velocidade UAC Sul



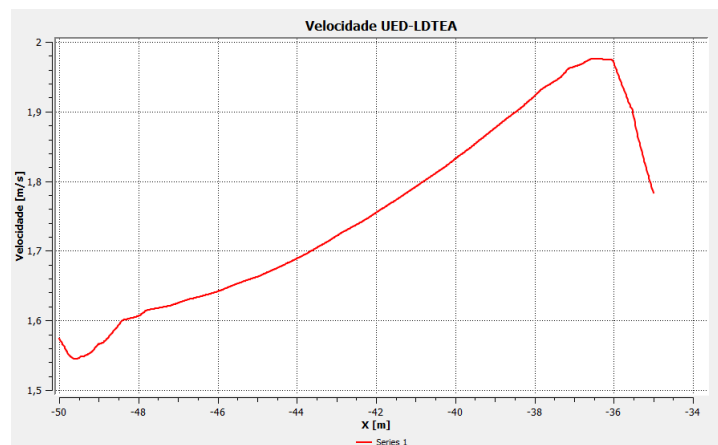
O gráfico da Figura 66 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UAC e o MESP onde a série tem origem cerca de 1,5m chegando até a 1,8m. A curva não apresenta oscilações, a falta de oscilações mostram que a região não apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção.

Figura 66 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Sul



O gráfico da Figura 67 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UED e o LDTEA onde a série se inicia em 1,5m e tem um pico em cerca de 2m. A curva assim como a maior parte das anteriores não apresenta muitas oscilações, a falta de mais oscilações demonstra que a região não apresenta muita turbulências para ventos incidindo nesta direção.

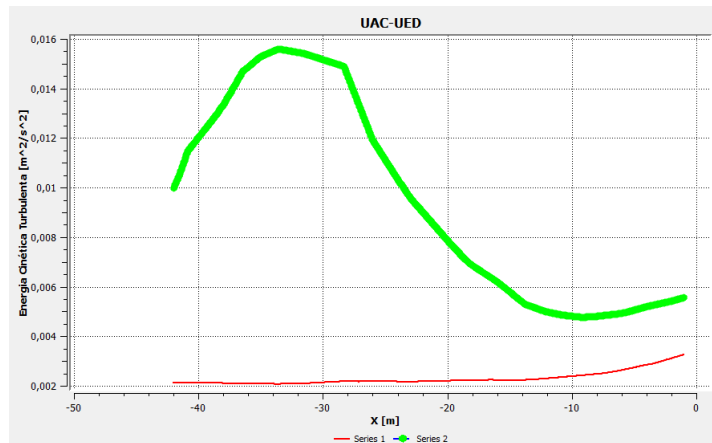
Figura 67 – variação da velocidade entre os edifícios UED e LDTEA Sul



4.4.15 Perfis de Energia Cinética Turbulenta Sul

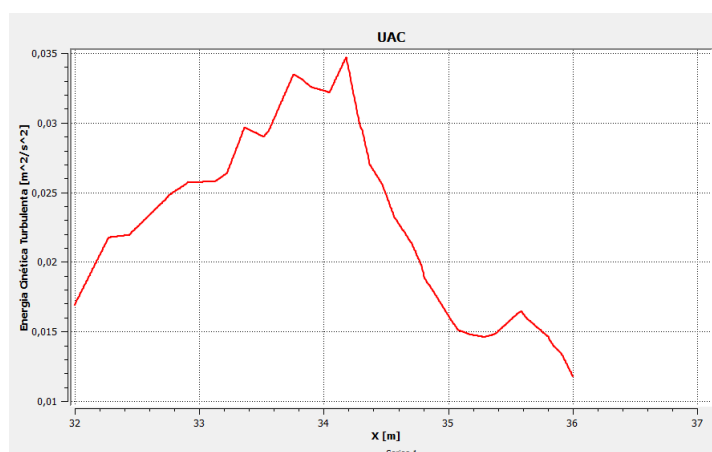
Nas figuras a seguir são apresentados os resultados dos perfis de energia cinética turbulenta sobre o domínio da FGA para ventos incidentes na direção Sul. O gráfico da Figura 68 indica 2 perfis de energia cinética turbulenta existentes entre a UAC e a UED. A série 1 não apresenta flutuação, ela permanece praticamente como uma linha reta ao longo do gráfico, já a série 2 apresenta uma flutuação no seu início e depois passa a sofrer uma queda em sua curva sem nenhuma oscilação.

Figura 68 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e UAC Sul



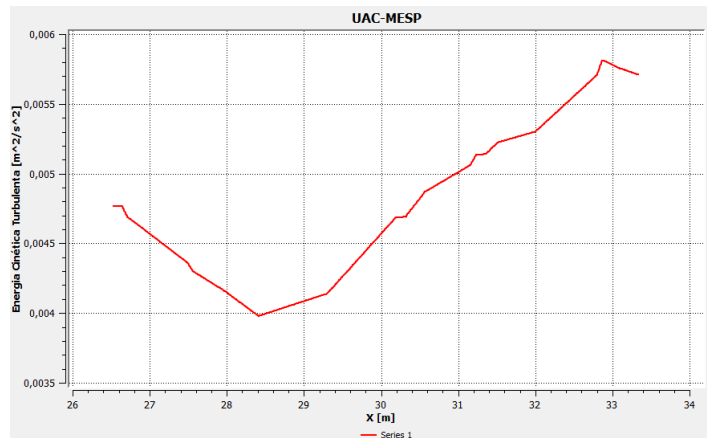
Já as outras 3 figuras apresentam apenas uma série em seus gráficos. O gráfico da Figura 69 apresenta o perfil de turbulência interna do UAC. Os dados apresentados neste gráfico mostram a presença de turbulências no interior da UAC onde sua curva vai subindo com várias oscilações ao longo do gráfico assim como apresenta um comportamento de queda quando se passa de 34m, e como a sua subida a descida apresenta várias oscilações.

Figura 69 – variação de energia cinética turbulenta UAC Sul



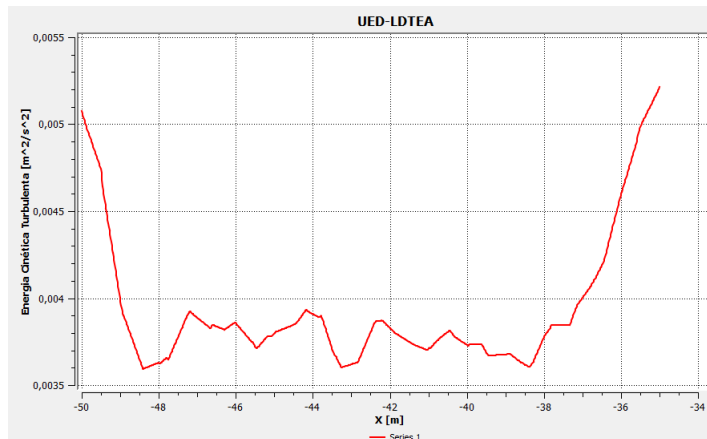
Já na Figura 70, ele mostra que a energia cinética entre o UAC e o MESP vai aumentando linearmente ao longo do espaço entre os dois prédios.

Figura 70 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Sul



Em relação ao UED e LDTEA, Figura 71, observa-se que se inicia com queda em sua energia cinética turbulenta após a queda brusca os valores ficam numa faixa próxima e sofrendo com várias oscilações até aumentar bruscamente no final do gráfico.

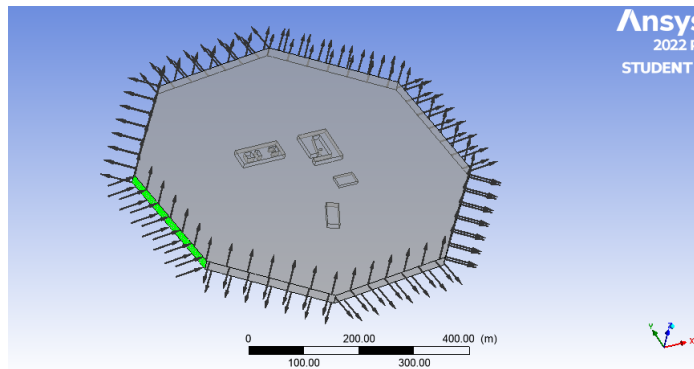
Figura 71 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA Sul



4.4.16 Comportamento do vento Sudoeste

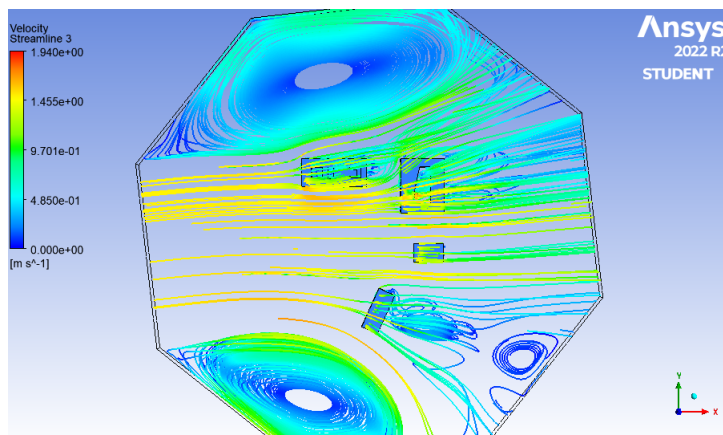
Agora adotando a direção Sudoeste como direção de entrada dos ventos, as outras 7 direções foram consideradas como saídas, como mostrado na Figura 72.

Figura 72 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Sudoeste



Na Figura 73 observa-se as linhas de velocidade do vento em todo o domínio dos prédios da FGA na direção Sudoeste. O escoamento permanece laminar desde a entrada até por cima dos edifícios, continua laminar na face oposta do MESP, na face opostas e nas laterais dos outros prédios formação de turbilhões que se alongam. turbilhões ocorrem entre o UED, UAC e o MESP.

Figura 73 – Escoamento do vento no domínio da FGA Sudoeste



Já o UAC e o MESP apresentam turbilhões até o final do volume de controle. Na Figura 74 e Figura 75 é possível ver de forma mais detalhada os turbilhões.

Figura 74 – Turbulências nos prédios Sudoeste

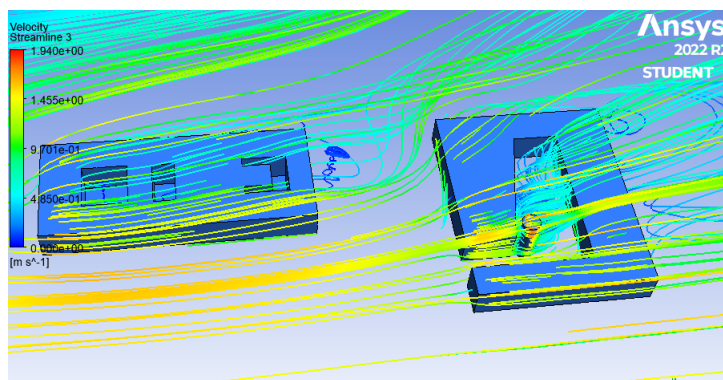
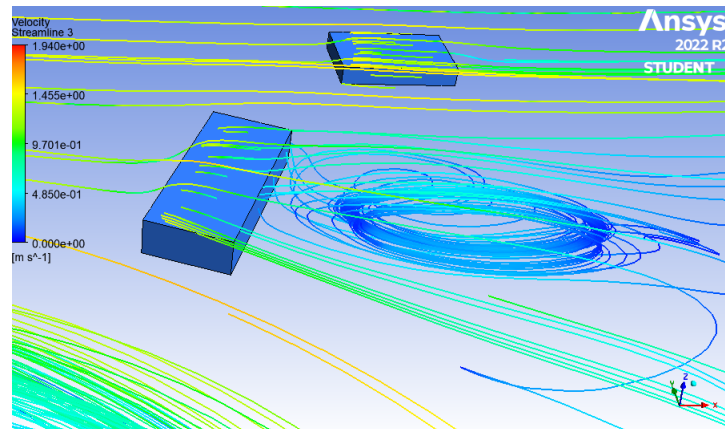


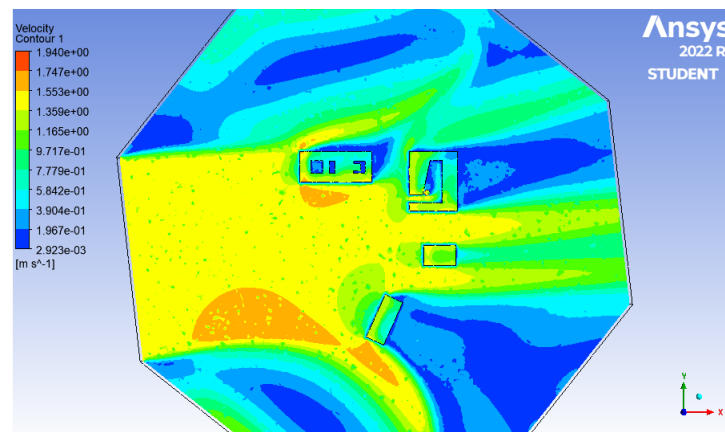
Figura 75 – Turbulências no LDTEA Sudoeste



4.4.17 Perfis de velocidade Sudoeste

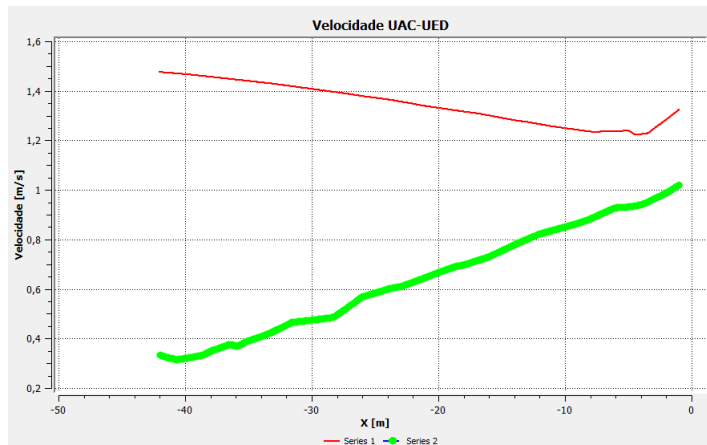
Na Figura 76 é possível observar o contorno de velocidade, onde a velocidade do escoamento aumenta ao lado do UED e LDTEA e diminui nas fases opostas a incidência dos ventos, exceto em relação ao MESP.

Figura 76 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Sudoeste



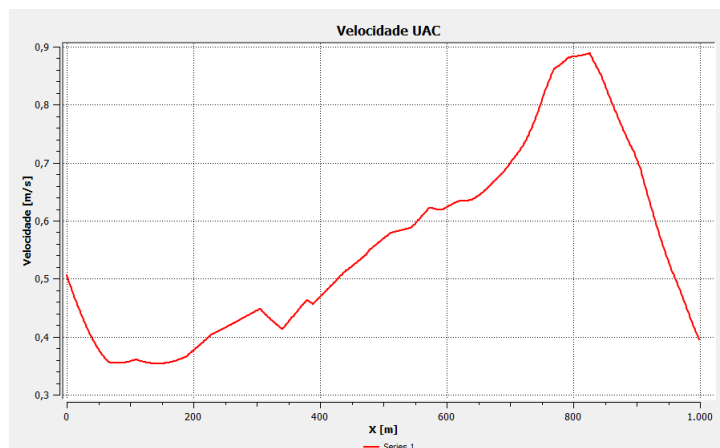
O gráfico da Figura 77 indica 2 perfis de velocidade existentes entre a UAC e a UED onde a série 1 tem início em 1,5m e a série 2 tem seu início em 0,3m. As curvas são regulares e apresentam poucas oscilações. A pouca presença de oscilações mostram que a região não apresenta grande quantidade de turbulência para ventos incidindo nesta direção.

Figura 77 – variação da velocidade entre os edifícios UED e UAC Sudoeste



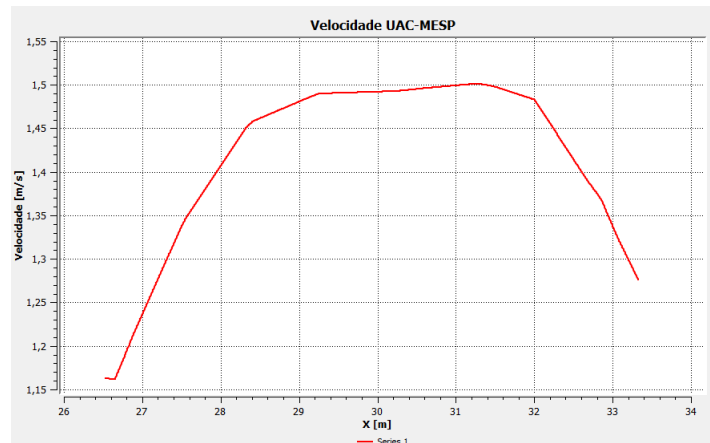
O gráfico da Figura 78 indica 1 perfil de velocidade existente internamente na UAC onde a série tem origem em 0,5m. A curva apresenta muitas oscilações o que é um forte indício de turbulência na região interna da UAC. O que é visível nas imagens onde mostram a turbulência na região.

Figura 78 – variação da velocidade UAC Sudoeste



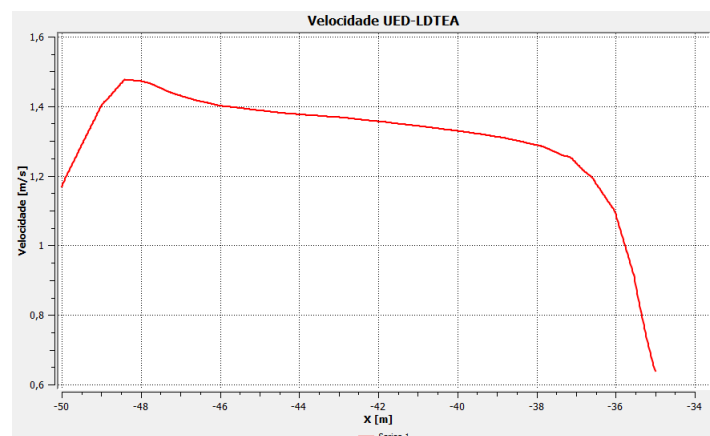
O gráfico da Figura 79 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UAC e o MESP onde a série tem origem cerca de 1,16 m. A curva é regular com formato de concavidade voltada para baixo e não apresenta oscilações, a falta de oscilações mostram que a região não apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção.

Figura 79 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Sudoeste



O gráfico da Figura 80 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UED e o LDTEA onde a série tem início em 1,2 um pico em cerca de 1,5m. A curva assim como a maior parte das anteriores não apresentam oscilações, a falta de oscilações demonstra que a região não apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção.

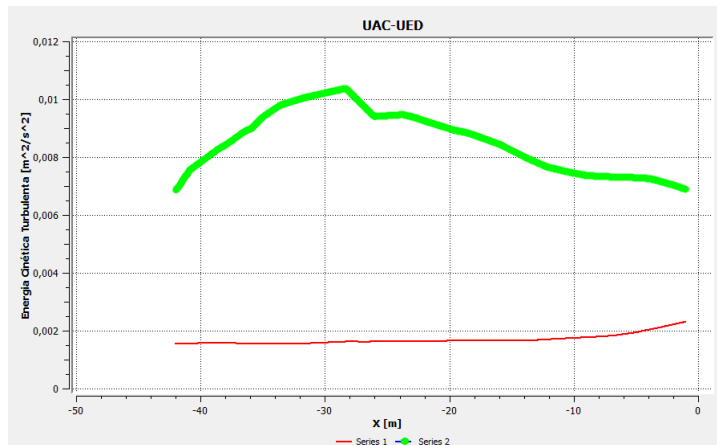
Figura 80 – variação da velocidade entre os edifícios UED e LDTEA Sudoeste



4.4.18 Perfis de Energia Cinética Turbulenta Sudoeste

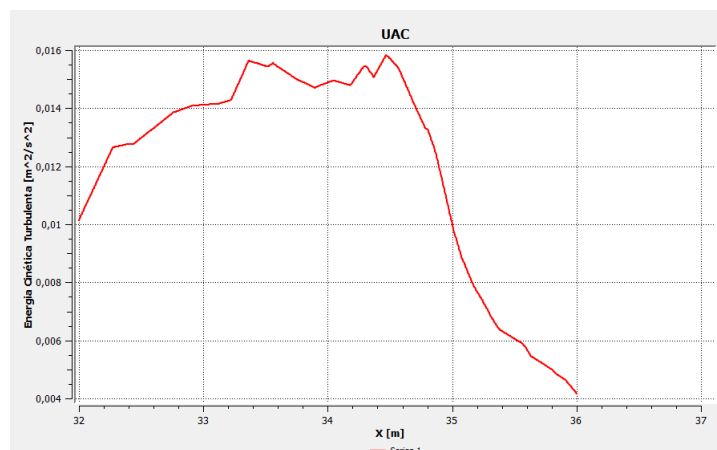
Nas figuras a seguir são apresentados os resultados dos perfis de energia cinética turbulenta sobre o domínio da FGA para ventos incidentes na direção Sudoeste. O gráfico da Figura 81 indica 2 perfis de energia cinética turbulenta existentes entre a UAC e a UED. A série 1 não apresenta flutuação, ela permanece praticamente como uma linha reta ao longo do gráfico, bem parecido com o comportamento do Sul. Já a série 2 apresenta uma curva com aumento e diminuição da energia de forma bem suave.

Figura 81 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED Sudoeste



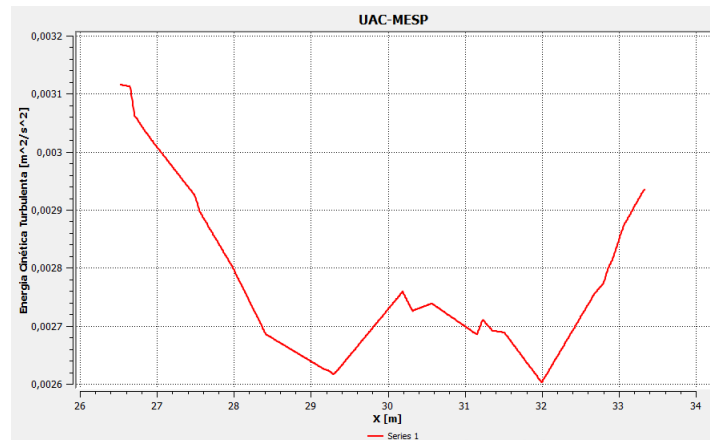
Já as outras 3 figuras apresentam apenas uma série em seus gráficos. O gráfico da Figura 82 apresenta o perfil de turbulência interna do UAC. Os dados apresentados neste gráfico apresentam um leve aumento da energia cinética turbulenta, mas após os 34m apresenta uma queda brusca.

Figura 82 – variação de energia cinética turbulenta UAC Sudoeste



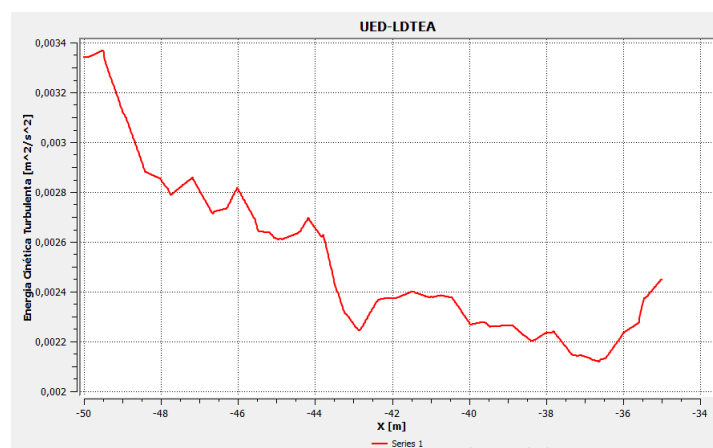
Já na Figura 83, ele mostra que a energia cinética entre o UAC e o MESP vai diminuindo ao longo do espaço entre os dois prédios após a faixa de valor ficar constante com oscilações e sobe um pouco no fim do gráfico.

Figura 83 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Sudoeste



Em relação ao UED e LDTEA, Figura 84, observa-se que se inicia com uma energia cinética turbulenta mais alta e vai sofrendo oscilações bruscas de queda, resultado bem parecido com o início dos dados do gráfico do Sul.

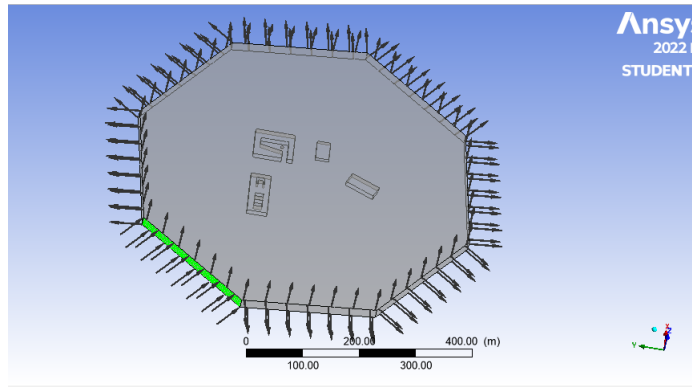
Figura 84 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA Sudoeste



4.4.19 Comportamento do vento Oeste

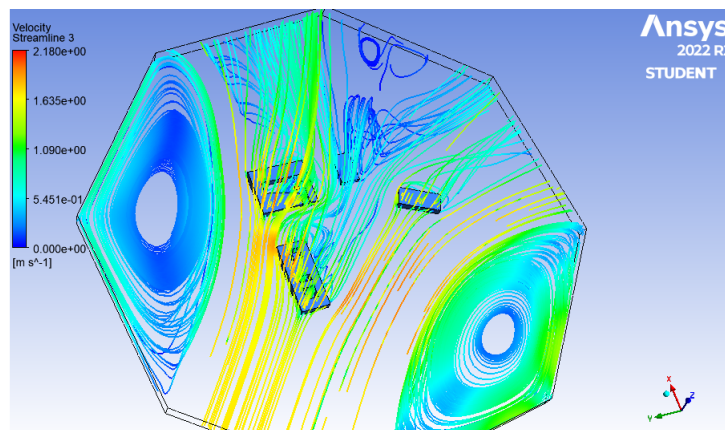
Agora adotando a direção Oeste como direção de entrada dos ventos, as outras 7 direções foram consideradas como saídas, como mostrado na Figura 85.

Figura 85 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Oeste



Na Figura 86 observa-se as linhas de velocidade do vento em todo o domínio dos prédios da FGA na direção Oeste. O escoamento da entrada permanece laminar até os telhados, ocorre formação de turbilhões em todas as duas faces opostas ao vento e a formação de turbilhões entre os três prédios UAC, UED e MESP ao mesmo tempo.

Figura 86 – Escoamento do vento no domínio da FGA Oeste



Na Figura 87 e Figura 88 é possível ver de forma mais detalhada os turbilhões.

Figura 87 – Turbulências no UED Oeste

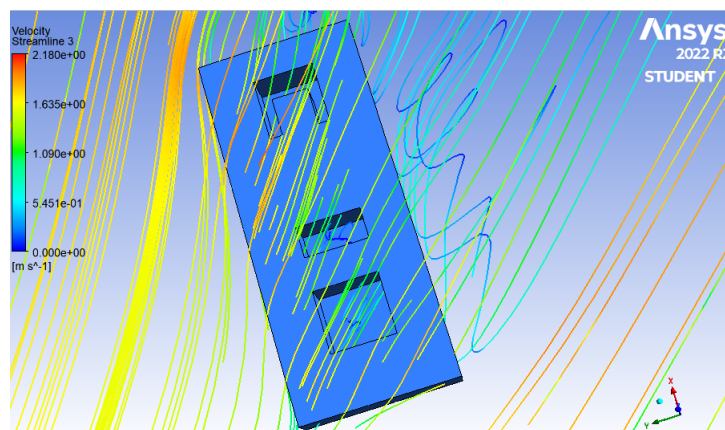
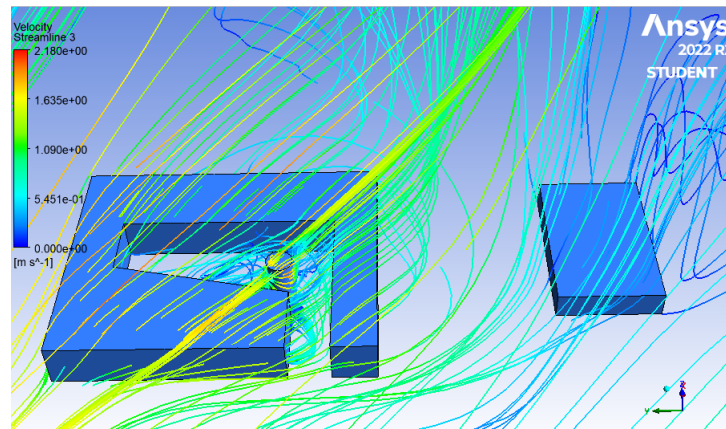


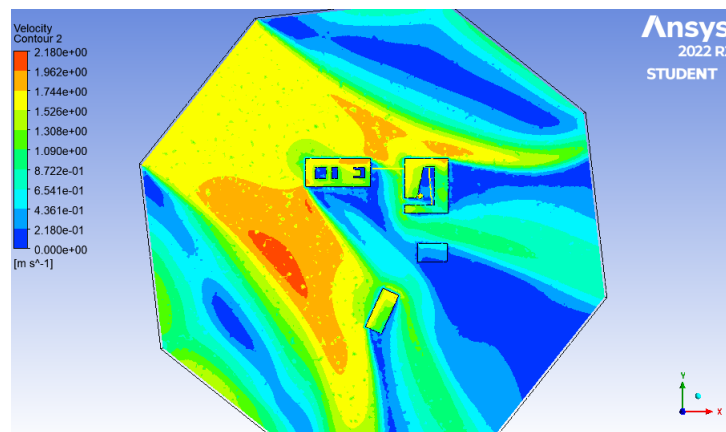
Figura 88 – Turbulências nos prédio Oeste



4.4.20 Perfis de velocidade Oeste

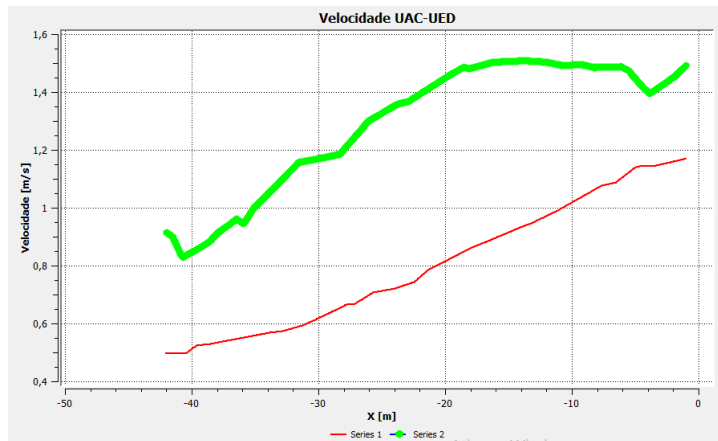
Na Figura 89 é possível observar o contorno de velocidade, onde a velocidade do escoamento aumenta ao lado do UED e o LDTEA, embora seja em um local um pouco mais longe do que em comparação às outras direções e a velocidade diminui nas fases opostas a incidência dos ventos de todos os prédios.

Figura 89 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Oeste



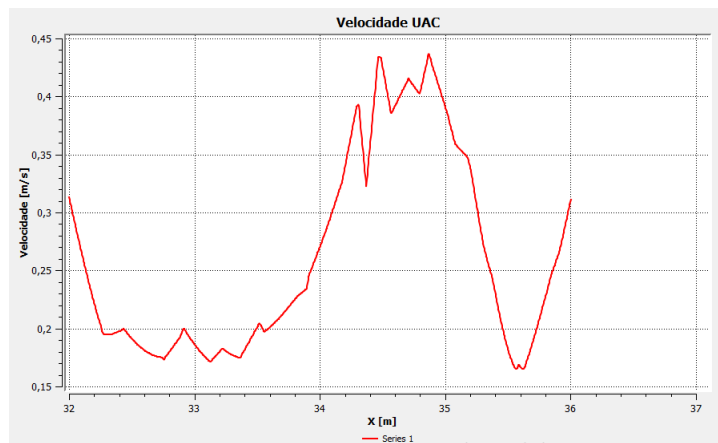
O gráfico da Figura 90 indica 2 perfis de velocidade existentes entre a UAC e a UED onde a série 1 tem início em 0,5m e a série 2 tem seu início em 0,8m. As curvas apresentam oscilações. A presença de oscilações mostram que a região apresenta quantidade de turbulência para ventos incidindo nesta direção.

Figura 90 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Oeste



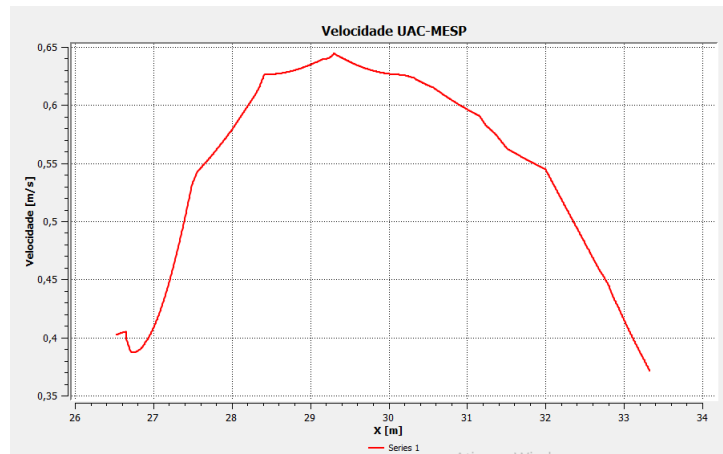
O gráfico da Figura 91 indica 1 perfil de velocidade existente internamente na UAC onde a série tem origem em 0,31m. A curva apresenta muitas oscilações o que é um forte indício de turbulência na região interna da UAC. O que é visível nas imagens onde mostram as linhas de velocidade.

Figura 91 – variação da velocidade UAC Oeste



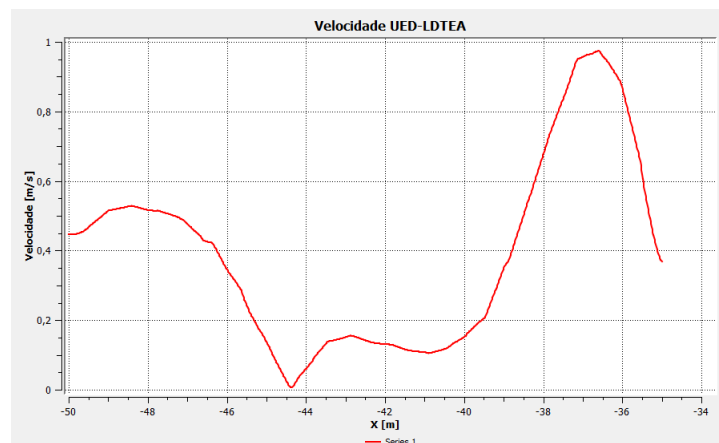
O gráfico da Figura 92 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UAC e o MESP onde a série tem origem cerca de 0,4 m. A curva apresenta oscilações, as oscilações mostram que a região apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção.

Figura 92 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Oeste



O gráfico da Figura 93 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UED e o LDTEA onde a série tem um pico em cerca de 0,42m. A curva apresenta algumas oscilações, estas oscilações demonstram que a região apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção.

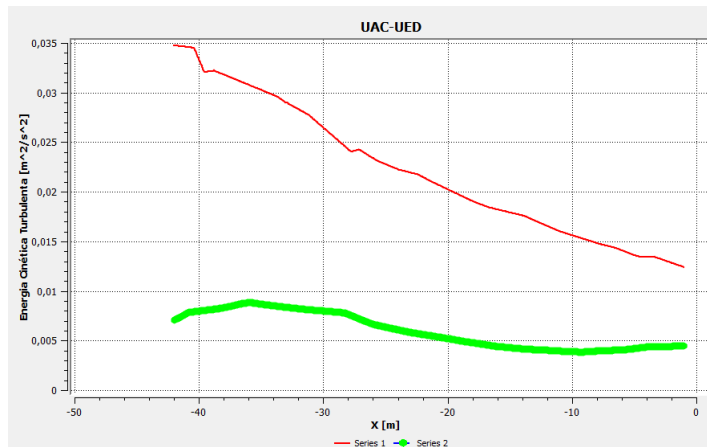
Figura 93 – variação da velocidade entre os edifícios UED e LDTEA Oeste



4.4.21 Perfis de Energia Cinética Turbulenta Oeste

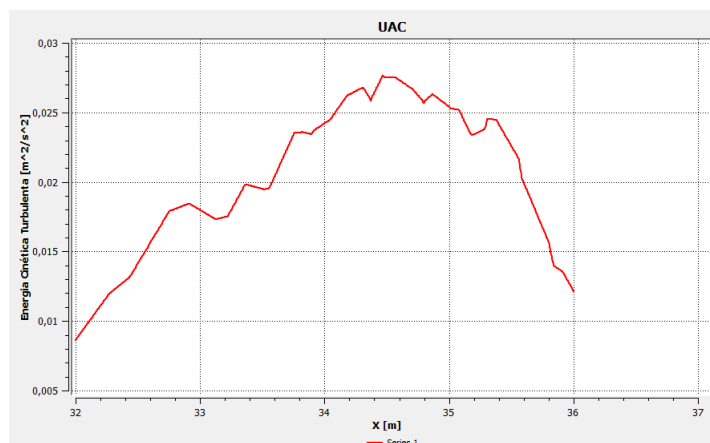
Nas figuras a seguir são apresentados os resultados dos perfis de energia cinética turbulenta sobre o domínio da FGA para ventos incidentes na direção Oeste. O gráfico da Figura 94 indica 2 perfis de energia cinética turbulenta existentes entre a UAC e a UED. As 2 séries apresentadas não possuem flutuações e as duas apresentam uma queda de energia de forma linear ao longo do gráfico.

Figura 94 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED Oeste



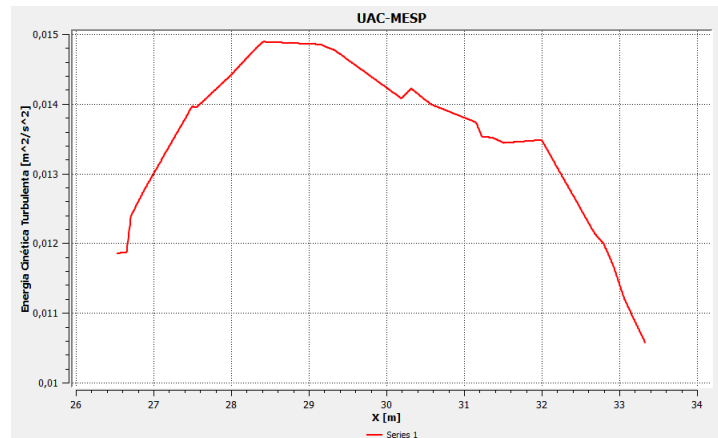
Já as outras 3 figuras apresentam apenas uma série em seus gráficos. O gráfico da Figura 95 apresenta o perfil de turbulência interna do UAC. Os dados da curva apresentada neste gráfico se parecem com uma parábola com concavidade para baixa e que sofre várias oscilações ao longo da curva.

Figura 95 – variação de energia cinética turbulenta UAC Oeste



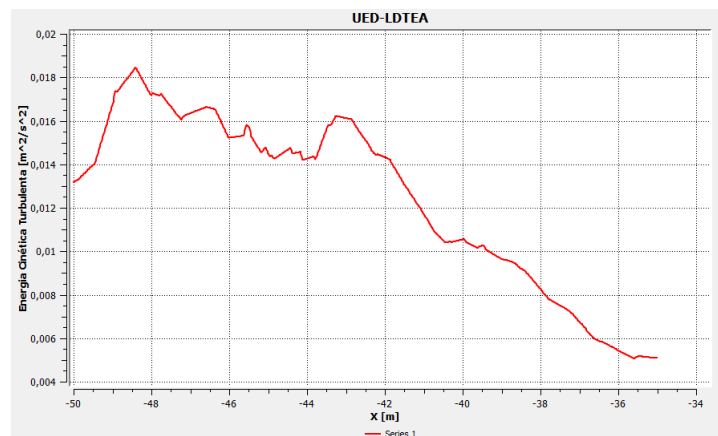
Já na Figura 96, ela mostra que a energia cinética entre o UAC e o MESP, ele apresenta uma curva que se parece com uma parábola de concavidade voltada para baixa e sofre pouquíssimas oscilações ao longo da curva.

Figura 96 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Oeste



Em relação ao UED e LDTEA, Figura 97, observa-se que se inicia com uma energia cinética turbulenta mais alta e vai sofrendo oscilações bruscas de queda ao longo do gráfico.

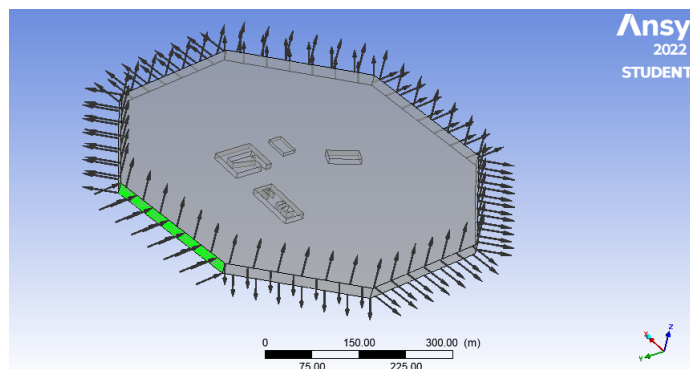
Figura 97 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA Oeste



4.4.22 Comportamento do vento Noroeste

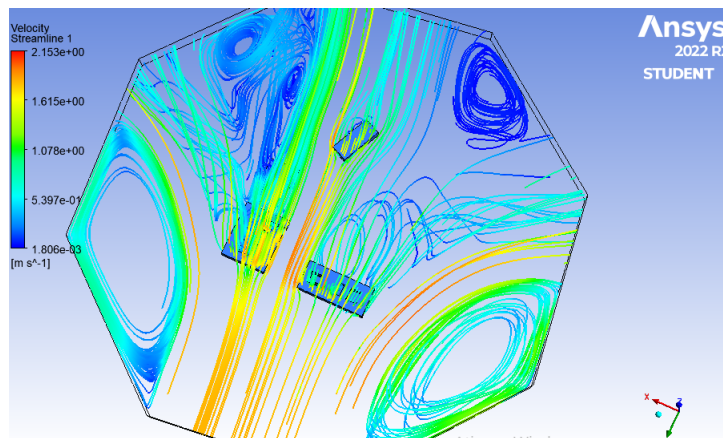
Agora adotando a direção Noroeste como direção de entrada dos ventos, as outras 7 direções foram consideradas como saídas, como mostrado na Figura 98.

Figura 98 – Indicação das regiões de entrada e saída do fluido direção Noroeste



Em relação às imagens abaixo é possível ver que se apresenta um escoamento visualmente laminar onde tem a entrada do ar, na Figura 99 esse escoamento permanecerá ao longo dos telhados dos edifícios de forma a cobrir na imagem o MESP. novamente ocorre formação de turbilhões nas faces opostas a direção da incidência do vento, no LDTEA é bem pequena a formação.

Figura 99 – Escoamento do vento no domínio da FGA Noroeste



Já no UAC e no UED os turbilhões são maiores, mas não tanto quando se comparado aos já vistos em outras direções. Na Figura 100. e Figura 100. é possível ver de forma mais detalhada os turbilhões.

Figura 100 – Turbulências no UED Noroeste

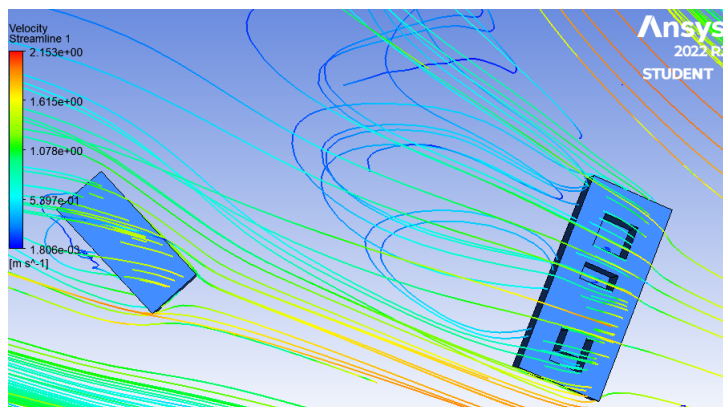
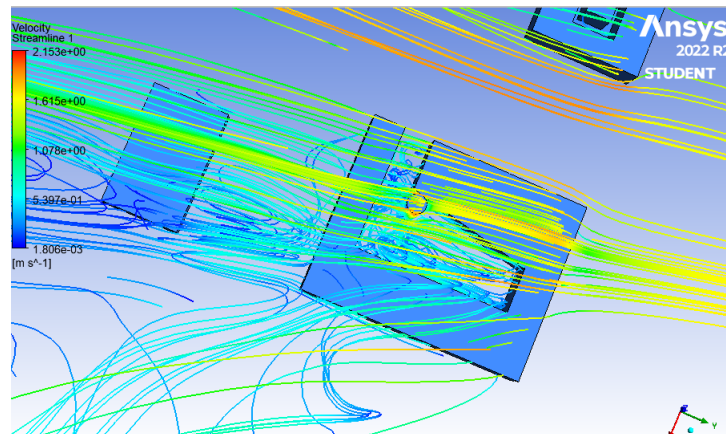


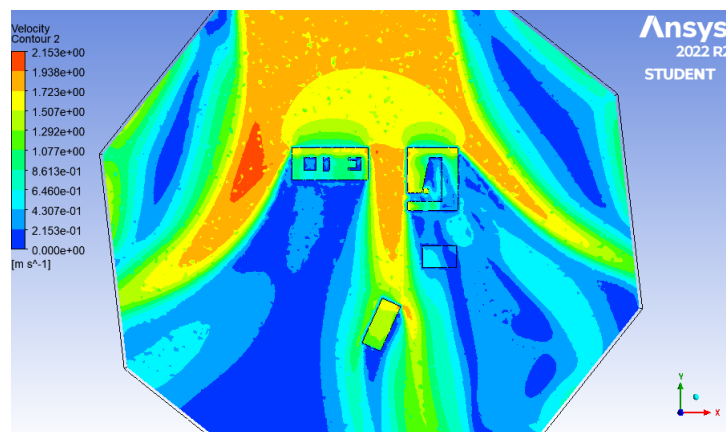
Figura 101 – Turbulências no UAC Noroeste



4.4.23 Perfis de velocidade Noroeste

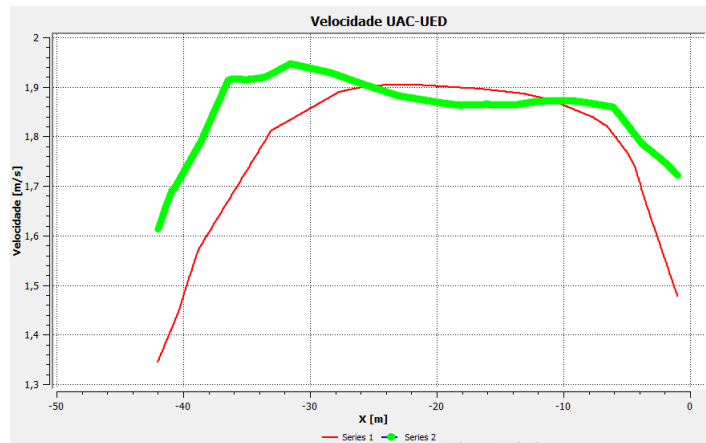
Na Figura 102 é possível observar o contorno de velocidade, onde a velocidade do escoamento aumenta nas laterais e entre a UAC e a UED e diminui nas fases opostas a incidência dos ventos em relação aos outros prédios.

Figura 102 – Contorno de velocidade no domínio da FGA Noroeste



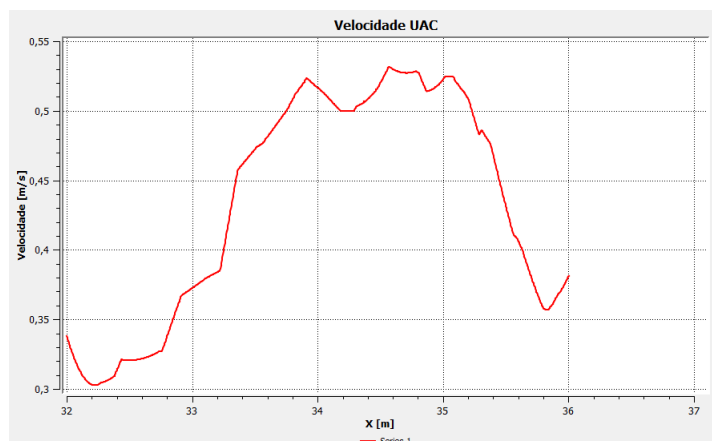
O gráfico da Figura 103. indica 2 perfis de velocidade existentes entre a UAC e a UED onde a série 1 tem início em 1,35m e a série 2 tem seu início em 1,6m. As curvas apresentam poucas oscilações. A presença de poucas oscilações demonstram que a região apresenta pouca de turbulência para ventos incidindo nesta direção.

Figura 103 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e UED Noroeste



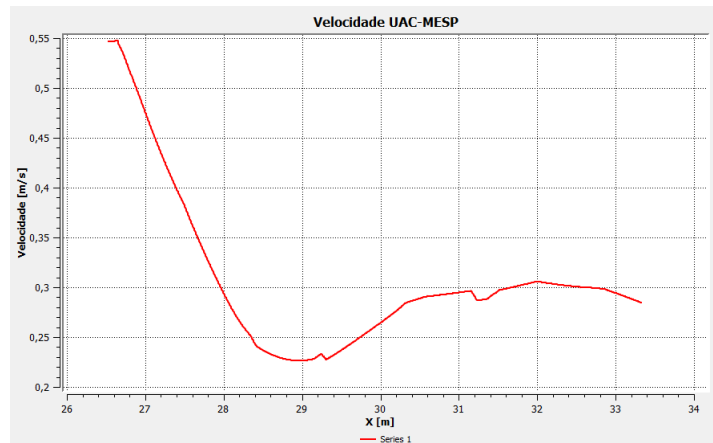
O gráfico da Figura 104 indica 1 perfil de velocidade existente internamente na UAC onde a série tem origem em 0,35m. A curva apresenta muitas oscilações o que é um forte indício de turbulência na região interna da UAC. O que é visível nas imagens onde mostram as linhas de velocidade.

Figura 104 – variação da velocidade UAC Noroeste



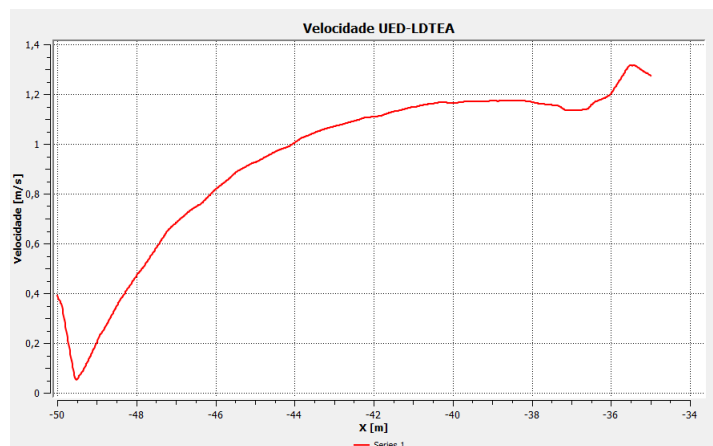
O gráfico da Figura 105. indica 1 perfil de velocidade existente entre a UAC e o MESP onde a série tem origem cerca de 0,55 m. A curva apresenta poucas oscilações, mesmo sendo poucas oscilações, isto demonstra que a região apresenta uma certa turbulências para ventos incidindo nesta direção.

Figura 105 – variação da velocidade entre os edifícios UAC e MESP Noroeste



O gráfico da Figura 106 indica 1 perfil de velocidade existente entre a UED e o LDTEA onde a série tem um pico em cerca de 0,4m. A curva apresenta oscilações, estas oscilações demonstram que a região apresenta turbulências para ventos incidindo nesta direção.

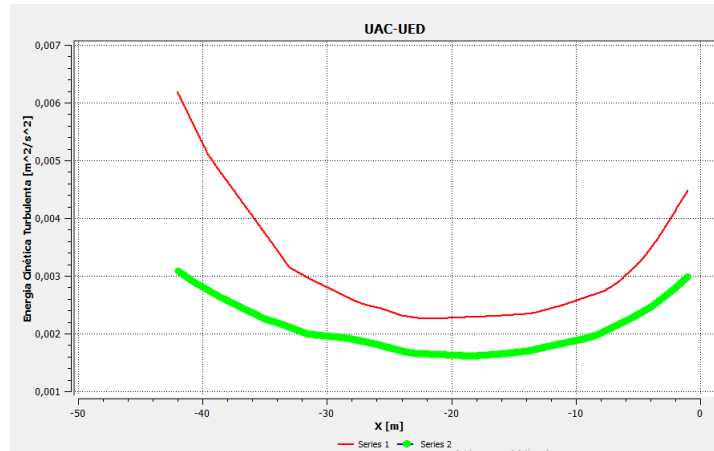
Figura 106 – variação da velocidade entre os edifícios UED e LDTEA Noroeste



4.4.24 Perfis de Energia Cinética Turbulenta Noroeste

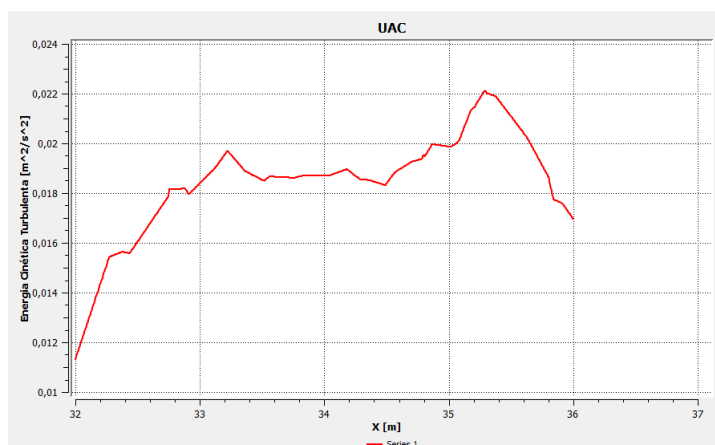
Nas figuras a seguir são apresentados os resultados dos perfis de energia cinética turbulenta sobre o domínio da FGA para ventos incidentes na direção Noroeste. O gráfico da Figura 107 indica 2 perfis de energia cinética turbulenta existentes entre a UAC e a UED. A série 1 apresenta formato de parábola com concavidade para baixo sem nenhuma oscilação, já a série 2 vai ter uma flutuação bem leve em sua metade.

Figura 107 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e UED Noroeste



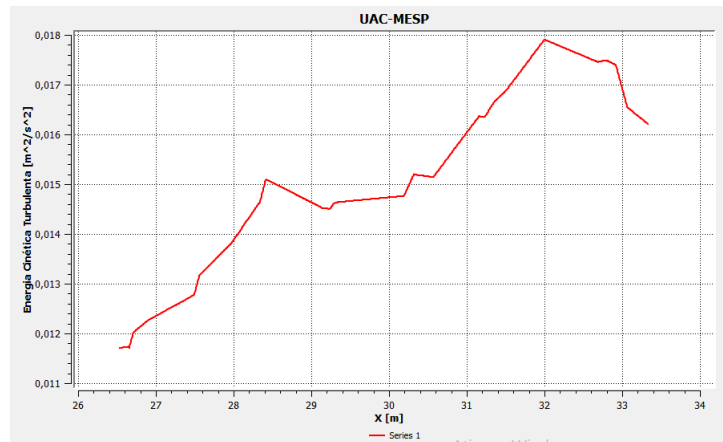
Já as outras 3 figuras apresentam apenas uma série em seus gráficos. O gráfico da Figura 108 apresenta o perfil de turbulência interna do UAC, sua curva apresenta formato de parábola com concavidade para baixo com várias oscilações.

Figura 108 – variação de energia cinética turbulenta UAC Noroeste



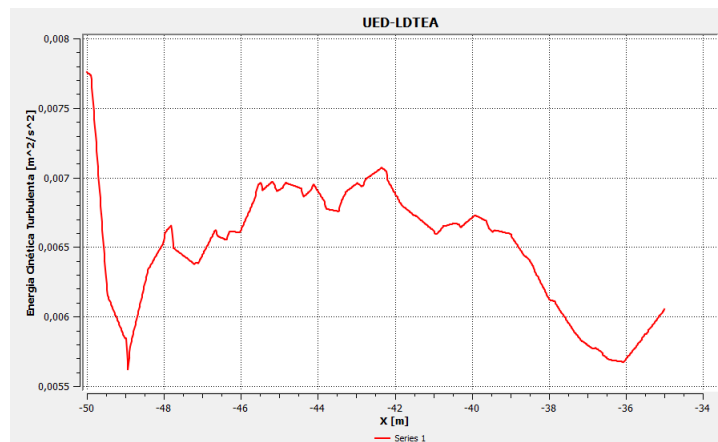
Já na figura 109, ele mostra que a energia cinética entre o UAC e o MESP nela é possível ver uma curva com queda linear e após isso valores constantes.

Figura 109 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UAC e MESP Noroeste



Em relação ao UED e LDTEA, Figura 110, observa-se que se apresenta um crescimento parabólico da energia cinética turbulenta sem oscilações ao longo da curva. Sendo assim, a região Noroeste a que possui os gráficos com menos oscilações em comparação as outras direções.

Figura 110 – variação de energia cinética turbulenta entre os edifícios UED e LDTEA Noroeste



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi realizada uma simulação numérica utilizando o software ANSYS e o método de CFD (Computação de Fluxo de Fluidos), com o objetivo de avaliar o comportamento dos prédios no campus da FGA quanto ao escoamento dos ventos na região. Para isso, foi simulado o impacto dos ventos em oito direções diferentes: norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste.

Foi desenvolvido um volume de controle em forma de octógono, que inclui os quatro principais prédios do campus: UAC, UED, MESP e LDTEA. Inicialmente, foi gerada uma malha padrão, de acordo com as especificações do ANSYS. Embora fosse possível refinar a malha, isso não foi feito devido à limitação de recursos computacionais do notebook utilizado para realizar as oito simulações.

Em seguida, foram inseridas as condições de contorno. Os dados sobre as velocidades dos ventos na região foram obtidos do site do INMET, na estação meteorológica de Gama (Ponte Alta), que é a estação mais próxima do campus. Com base nesses dados, foi possível calcular as velocidades médias dos ventos em oito direções para os anos de 2021 e 2022. Com essas informações, foi possível obter alguns resultados relevantes.

É possível notar que, independentemente da direção do vento na região da FGA, o prédio mais afetado em relação à turbulência e energia cinética turbulenta é o UAC, seguido pelo UED. Isso se deve, principalmente, à localização dos prédios no campus e ao seu modelo de arquitetura, que possui aberturas dentro da construção. O UAC sofre mais devido à sua abertura interna ser muito maior em comparação com a do UED, além da presença de uma caixa d'água que é um obstáculo interno ao escoamento do vento.

A direção que mais apresentou turbulências entre os prédios UAC e UED foi a NE, que apresenta a segunda maior média e velocidade geral. Já a direção que apresentou menos turbulências foi a Sudoeste. Vale ressaltar que, independentemente da direção, houve turbulências significativas em todas as direções, mas a direção foi o fator mais importante, pois a posição onde as turbulências ocorrem sofre muita influência da incidência do vento.

Em relação à variação dos valores de velocidade de velocidade e energia cinética turbulenta, o prédio do MESP é o que sofre menos com isso. Além disso, ele apresenta menos turbulências em suas laterais.

Com base nas informações apresentadas, podemos concluir que o estudo do escoamento dos ventos é de grande importância para avaliar o comportamento das construções em relação aos fatores como turbulência e energia cinética turbulenta. É possível verificar que a localização e arquitetura das construções são fatores determinantes para a

intensidade desses fenômenos.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6123:88*: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS. Desenvolvimento da eólica no Brasil. 2022. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/o-setor/>>. Citado na página 26.

BARBOSA, A. C. L. avaliação ambiental do uso da energia eólica para usuários de pequeno porte. 2008. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/18065/000685805.pdf?...1>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. Proinfa. 2022. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Proinfa.aspx>>. Citado na página 26.

COPEL. Quais as vantagens em utilizar energia eólica? 2022. Disponível em: <<https://copelmercadolivre.com/entenda-o-que-e-energia-eolica-como-e-gerada-e-seus-beneficios/>>. Citado na página 27.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Proinfa. 2022. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/en/web/guest/mercado/proinfa>>. Citado na página 26.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. History of wind power. 2022. Disponível em: <<https://www.eia.gov/energyexplained/wind/history-of-wind-power.php>>. Citado na página 25.

ENGINEERING SIMULATION AND SCIENTIFIC SOFTWARE. Processo de simulação fluidodinâmica (CFD). 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/processo-de-simulacao-fluidodinamica-cfd/>>. Citado na página 31.

ENGINEERING SIMULATION AND SCIENTIFIC SOFTWARE. Fluidodinâmica computacional: o que é? 2022. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/fluidodinamica-computacional-o-que-e/>>. Citado na página 31.

GARRISONN, P. *Fundamentos de estruturas*. [S.l.]: Bookman, 2018. v. 3. Citado na página 28.

GRIMM, A. M. O vento. 1999. Disponível em: <<https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>>. Citado na página 25.

HILSDORF, J. W. et al. *Química Tecnológica*. [S.l.]: Cengage Learning, 2014. v. 1. Citado na página 25.

JR, C. F. C. Ação do vento nas estruturas. São Paulo, Brazil, p. 21, 2004. Citado na página 28.

LEÃO, M.; ARAGÃO, M. d. Estruturas metálicas. 2013. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~moniz/metallica/estruturas_metallicas_2013_3.pdf>. Citado na página 23.

- MACEDO, I. R. Sobre a ação do vento no campus gama da unb: Um estudo computacional. Brasília , Brasil, p. 76, 2021. Citado na página 23.
- MARTINS F.R., G. R. e. P. E. O aproveitamento da energia eólica. 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/nL6x7dJv9gJv7HnkTSJRLfS/#>>. Citado na página 25.
- MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. California, p. 8, 1994. Citado na página 32.
- MENTER, F. R.; KUNTZ, M.; LANGTRY, R. Ten years of industrial experience with the sst turbulence model. Otterfing, Germany, p. 9, 2003. Citado na página 32.
- ONS. Nordeste registra em julho dez recordes de energia renovável. 2022. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20210804-nordeste-registra-em-julho-dez-recordes-de-geracao-renovavel.aspx>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.
- RAMPINELLI G. A.; ROSA JÚNIOR, C. G. Análise da geração eólica na matriz brasileira de energia elétrica. Criciúma, Brazil, p. 30, 2012. Citado na página 27.
- ROBERT, W. F. et al. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. [S.l.]: LTC, 2018. v. 9. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 32.
- WATANABE, R. M. A ação dos ventos nas edificações. 2021. Disponível em: <<https://www.ebanataw.com.br>>. Citado na página 23.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos fluidos*. [S.l.]: AMGH, 2015. v. 3. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 32.