

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RONALD WILLIAN ASSUNÇÃO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO FLUÍDO-ESTRUTURA EM AMBIENTES URBANOS
IDEALIZADOS UTILIZANDO SIMULAÇÃO DE GRANDES TURBILHÕES**

**ALEGRETE
2024**

RONALD WILLIAN ASSUNÇÃO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO FLUÍDO-ESTRUTURA EM AMBIENTES URBANOS
IDEALIZADOS UTILIZANDO SIMULAÇÃO DE GRANDES TURBILHÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Rafael Maroneze

Coorientador: Dr. Felipe Denardin Costa

**Alegrete
2024**

RONALD WILLIAN ASSUNCAO DA SILVA

**AValiação DA INTERAÇÃO FLUÍDO-ESTRUTURA EM AMBIENTES URBANOS
IDEALIZADOS UTILIZANDO SIMULAÇÃO DE GRANDES TURBILHÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade
Federal do Pampa, como requisito
parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 02 de julho de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. RAFAEL MARONEZE - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. FELIPE DENARDIN COSTA - UNIPAMPA - Coorientador

Profa. Dra. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA

Eng. Me. LUIS FERNANDO CAMPONOGARA - Examinador Externo



Assinado eletronicamente por **RAFAEL MARONEZE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/07/2024, às 12:10, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FELIPE DENARDIN COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/07/2024, às 12:15, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/07/2024, às 12:36, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIS FERNANDO CAMPONOGARA, Usuário Externo**, em 18/07/2024, às 14:32, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1495224** e o código CRC **7CC11708**.

Dedico este trabalho ao meu sobrinho Bento da
Silva Schiavo.

AGRADECIMENTO

Primeiramente a minha mãe Rejane Assunção, que não mediu esforços para a realização do meu objetivo. Sem você isso não seria possível.

A minha irmã e “segunda mãe” Milene Assunção, que sempre acreditou nos meus sonhos me incentivando e dando suporte durante a minha formação.

A minha irmã Franciele Assunção e aos demais membros da minha família Luiz, Bento, Maurício e Matheus pelo apoio durante a graduação.

Ao meu orientador, o Dr. Rafael Maroneze e o coorientador Dr. Felipe Denardin por todo apoio desde o primeiro ano de iniciação científica até o fim deste trabalho.

Aos professores, Me. Luis Fernando Camponogara e Dra. Simone pelas contribuições com esse trabalho.

A minha dupla Ingrid Machado Teixeira que esteve comigo durante as madrugadas de estudo e intermináveis projetos.

À FAPERGS e CNPQ pela remuneração da bolsa de pesquisa à mim disponibilizada, o qual serviu como grande ajuda na minha formação acadêmica.

As minhas colegas e amigas Geandra e Amanda, que me acompanharam desde o primeiro dia de graduação.

Aos meus demais amigos que conquistei durante o período em Alegrete: Adryel, Ary, Andressa, Felipe, Juliano, Letícia, Natália, Rubens e Tayara. Vocês são parte da minha história e sempre levarei cada um em meu coração.

A minha amiga Natalie Medeiros, que mesmo a distância contribuiu por todos esses anos, dando suporte emocional nos momentos que mais precisei.

Aos colegas do grupo de pesquisa LFCTA.

As minhas colegas de trabalho Eng. Brenda e Eng. Michelly, pela compreensão e apoio para que pudesse conciliar a rotina na empresa com o desenvolvimento do TCC.

RESUMO

O aumento da urbanização é um fenômeno global que altera significativamente o ambiente natural impactando de forma direta o clima local. Desse modo, o crescimento das cidades introduz em um espaço grande quantidade de materiais artificiais e modificações no relevo, assim, alterando o balanço energético da superfície. A partir destas mudanças, há o surgimento de microclimas urbanos, assim, é crucial compreender esses efeitos e desenvolver estratégias para mitigar os impactos negativos sobre a saúde pública, o consumo de energia e o conforto térmico. Desta forma, este trabalho fundamenta-se em utilizar o modelo meteorológico PALM (Parallelized Large-Eddy Simulation Model) para simular um ambiente urbano idealizado. O PALM é um modelo de simulação numérica de alta resolução que permite a análise detalhada dos processos físicos atmosféricos, e foi utilizado para estudar os efeitos da urbanização sobre o fluxo de vento, através de dois cenários urbanos fictícios com variáveis controladas. A simulação é composta por dois casos, sendo o primeiro, um conjunto de poucos edifícios e ruas mais largas e o segundo uma representação mais adensada com mais prédios e ruas mais estreitas. A velocidade do fluxo inicial foi de 1 m s^{-1} e o tempo total de simulação foi de 3 horas, acrescido do tempo da rodada precursora que foi utilizada como condição inicial. Como dados de saída, foi extraído a visualização 2D do escoamento por meio de uma seção transversal ao domínio, a fim de visualizar as estruturas formadas, além dos perfis verticais de velocidade plotados em pontos arbitrários. Após a plotagem percebe-se características como a formação de mais zonas de recirculação e regiões mais adensadas, além de pontos de alta e baixa pressão. Além disso, foi possível observar a formação de corredores de vento e pontos de estagnação nas duas situações simuladas. Todos os resultados foram discutidos e analisados, além de correlacionados com os impactos no clima urbano.

Palavras-chave: SIMULAÇÃO, PALM, CFD, URBANIZAÇÃO

ABSTRACT

Increased urbanization is a global phenomenon that significantly alters the natural environment, directly impacting the local climate. In this way, the growth of cities introduces a large amount of artificial materials into a space and changes in the relief, thus altering the energy balance of the surface. These changes give rise to urban microclimates, so it is crucial to understand these effects and develop strategies to mitigate negative impacts on public health, energy consumption and thermal comfort. Therefore, this work is based on using the PALM meteorological model (Parallelized Large-Eddy Simulation Model) to simulate an idealized urban environment. PALM is a high-resolution numerical simulation model that allows detailed analysis of atmospheric physical processes, and was used to study the effects of urbanization on wind flow, through two fictitious urban scenarios with controlled variables. The simulation consists of two cases, the first being a set of few buildings and wider streets and the second a more dense representation with more buildings and narrower streets. The initial flow velocity was 1 m s^{-1} and the total simulation time was 3 hours, plus the time of the precursor round that was used as initial condition. As output data, a 2D visualization of the flow was extracted through a cross-section of the domain, in order to visualize the structures formed, in addition to the vertical velocity profiles plotted at arbitrary points. After plotting, characteristics such as the formation of more recirculation zones and denser regions, in addition to high low pressure points, can be seen. Furthermore, it was possible to observe the formation of wind corridors and stagnation points in both simulated situations. All results were discussed and analyzed, in addition to being correlated with the impacts on the urban climate.

Keywords: SIMULATION, PALM, CFD, URBANIZATION

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da população urbana do Brasil, e grau de urbanização da população – Anos censitários entre 1950 e 2010.....	9
Figura 2 – Perfil vertical de escoamento em camada limite.....	11
Figura 3 – Representação da camada limite atmosférica.....	12
Figura 4 – Representação camada limite atmosférica urbana e rural.....	13
Figura 5 – Escoamento perturbado pela presença de um edifício.....	14
Figura 6 – Escoamento perturbado pela presença de um edifício.....	14
Figura 7 – Domínio da simulação	18
Figura 8 – Distribuição das edificações no Caso 1.....	18
Figura 9 - Arranjo 2 de média complexidade	18
Figura 10 - Arranjo 3 de maior complexidade.....	19
Figura 11 - Figura esquemática do método de recirculação de turbulência utilizado para geração de fluxo turbulento	20
Figura 12 - Simulação de uma tempestade severa visualizada com o software VAPOR.....	27
Figura 13 - Visualização da média de 1 minuto da velocidade do vento no caso 1.....	28
Figura 14 - Visualização da média de 1 minuto da velocidade do vento no caso 2.....	29
Figura 15 - Linhas de corrente da componente vertical da velocidade no caso 1.....	29

Figura 16- Linhas de corrente da velocidade no caso 2.....	30
Figura 17- Plano horizontal da distribuição de pressão no escoamento no caso 1...31	
Figura 18- Plano horizontal da distribuição de pressão no escoamento no caso 2...31	
Figura 19- Perfil vertical de vento no caso 1.....	32
Figura 20- Perfil vertical de vento no caso 2.....	32

LISTA DE SIGLAS

CFD	Dinâmica dos Flúidos Computacional (do inglês Computational Fluid Dynamics)
CLA	Camada limite atmosférica
CLU	Camada limite urbana
LES	Simulação de Grande Turbilhões (do inglês Large Eddy Simulation)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e estatística
ICU	Ilha de calor urbana
ONU	Organização das nações unidas
PALM	Parallelized Large-Eddy Simulation Model
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
VAPOR	Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and SolarResearchers
NCAR	National Center for Atmospheric Research

LISTA DE SIMBOLOS

∂	Derivada Parcial
u_i	Componentes de velocidade
i, i, k	Índices da notação de Einsten (podem assumir valores 1,2 e 3)
x_k	Vetor posição
ρ_0	Densidade do ar
p^*	Pressão de perturbação
ε_{ijk}	Tensor de Levi-Civitta
f_j	Parâmetro de Coriolis
g	Aceleração gravitacional
T	Temperatura potencial
T_0	Temperatura de referência
δ_{i3}	Delta de Kroneker
V	Média temporal da velocidade no ponto analisado
V_∞	Velocidade de escoamento livre
Z	Altura do ponto analisado
Z_H	Altura do edifício

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
1.2	Justificativa	14
1.3	Estrutura do trabalho	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	O processo de urbanização mundial	16
2.2	Desenvolvimento urbano sustentável	17
2.3	Camada limite atmosférica	17
2.3.1	Camada limite atmosférica urbana	18
2.3.2	Escoamento de vento em regiões urbanas	21
2.4	Fluidodinâmica computacional	22
2.5	PALM	23
2.6	Descrição do modelo	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	Domínio da simulação	25
3.2	Condições iniciais e de contorno	26
3.3	Pós processamento dos resultados	27
3.3.1	VAPOR	28
4	RESULTADOS	29
4.1	Visualização e caracterização do escoamento	29
4.2	Perfis verticais de vento	33
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
5.1	Trabalhos futuros	37
	REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

Em 2007 ocorreu um marco histórico: a população urbana mundial, pela primeira vez, ultrapassou a população rural. Atualmente, cerca de 56% da população reside em cidades, e a perspectiva do relatório das Nações Unidas é que até 2060, essa porcentagem chegue a 66% (TABARIN, 2018; NAÇÕES UNIDAS; 2022). No Brasil, segundo a série histórica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), desde 1970 a população já se consolidava como majoritariamente urbana, chegando ao marco (84,72%) na Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) realizada em 2015.

Em diversos momentos históricos, questões relacionadas ao desenvolvimento com redução de impactos ambientais ganharam destaque. Entretanto, eventos como Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, realizado em 1972, tornaram-se referências relevantes, introduzindo um novo paradigma de crescimento, com ênfase no desenvolvimento urbano sustentável, relacionado tanto às questões sociais e econômicas como ambientais, (FREITAS e AZEREDO, 2021). A incapacidade dos governos nacionais em planejar o desenvolvimento, mediante ao rápido crescimento das cidades e transformações das necessidades da população, conduziu ao desequilíbrio socioambiental e às alterações climáticas nas áreas urbanas, conseqüentemente, diminuindo a qualidade de vida em assentamentos urbanos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2000). Nesse sentido, estudo do escoamento de vento em ambientes urbanos, se apresenta como um fator de interesse para desafios associados ao microclima local, qualidade do ar e segurança estrutural. Esses por sua vez, são aspectos essenciais para o planejamento sustentável das cidades (LIMA, 2017; KHANDURI, 1998).

Dessa forma, este trabalho utilizou o modelo meteorológico PALM para realizar simulações numéricas de escoamento de vento ao redor representações tridimensionais ambientes urbanas idealizadas. Sendo assim, com o intuito de compreender os principais padrões de vento em torno de edifícios e outros elementos deste contexto, foram analisadas grandezas físicas como velocidade, pressão do escoamento e além da visualização das estruturas formadas no fluxo mediante a obstrução por obstáculos. A importância desse estudo reside na possibilidade de aplicar os resultados obtidos para aprimorar o planejamento urbano, auxiliando na

concepção de edifícios mais seguros e eficientes energeticamente, além da mitigação do efeito dessas construções no clima local.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

No presente trabalho, tem-se como objetivo geral, avaliar o comportamento do escoamento de vento em ambientes urbanos idealizados através de simulações numéricas. A partir deste, são estabelecidos os objetivos específicos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Investigar o comportamento do escoamento atmosférico sobre influência de dois arranjos geométricos urbanos idealizados.
- Comparar os perfis vertical de vento obtido entre os arranjos geométricos estudados.
- Visualizar as estruturas formadas no escoamento dos casos simulados.

1.2 Justificativa

O modelo meteorológico PALM apresenta-se como uma ferramenta que permite a modelagem detalhada proporcionando uma compreensão profunda das interações complexas entre a atmosfera e a região urbana. Desse modo, a compreensão detalhada dos perfis de vento e das estruturas de fluxo em ambientes urbanos é crucial para diversos aspectos da engenharia e planejamento urbano. Em particular, a dinâmica do vento nas áreas urbanas afeta diretamente a dispersão de poluentes, o conforto térmico dos pedestres e a eficiência energética dos edifícios.

1.3 Estrutura do trabalho

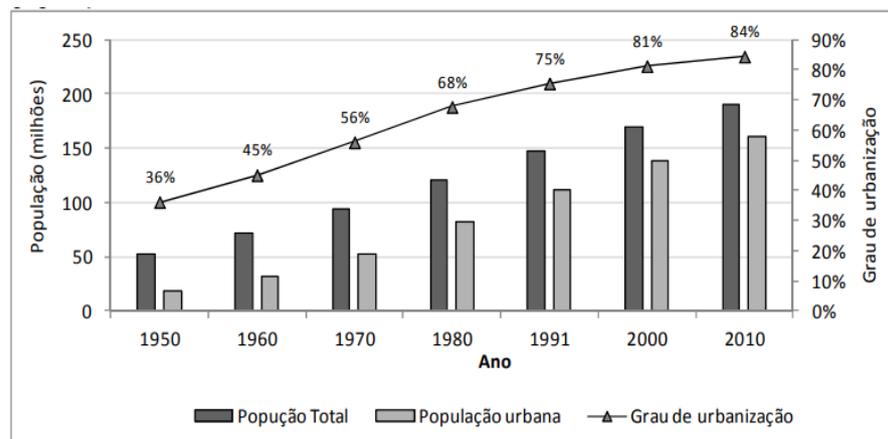
Este trabalho, é composto primeiramente por uma revisão bibliográfica, onde serão apresentados os fatores históricos e as perspectivas futuras acerca do processo de urbanização mundial. Além disso, são expostos o conceito de camada limite atmosférica, camada limite atmosférica urbana e as características do escoamento atmosférico urbano desenvolvimento urbano sustentável. Na sequência, serão apresentados os conceitos sobre fluidodinâmica computacional, modelagem meteorológica, visando entender o procedimento para a realização de uma simulação com um modelo meteorológico. Ao fim da revisão bibliográfica, é apresentado o modelo meteorológico PALM, o qual será utilizado no desenvolvimento do trabalho e o processo de pós-processamento dos dados obtidos. Na metodologia, serão apresentadas as características do domínio computacional utilizado, e as características do arranjo geométrico de cada situação simulada e a descrição das condições iniciais e de contorno e procedimento necessário para a análise dos resultados que serão obtidos. Ademais, são apresentados a análise dos resultados obtidos e as considerações finais. Por fim, são descritas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O processo de urbanização mundial

Diversos são os fatores históricos responsáveis pelo crescimento das cidades. Dentre eles, pode-se destacar: a revolução industrial, o aumento da expectativa de vida e a modernização das atividades agrícolas (DA SILVA, 2009). Essa nova dinâmica demográfica tem como consequência o adensamento da população em regiões pequenas, e conseqüentemente em alterações na paisagem urbana. SILVA (2009, p.04), destaca ainda que: “Hoje existem sociedades totalmente urbanas, ou seja, com 100% de suas populações vivendo nas áreas urbanas. Exemplo máximo dessa realidade pode ser encontrado em Cingapura, Hong Kong e Nova York.” Segundo dados da Organização das Nações Unidas (ONU) (2022), atualmente a maior parte da população mundial (56%) vive em áreas urbanas, e a expectativa é de que o percentual continue crescendo. Nesse contexto, DE PINHO (2017), através de análises da série histórica do censo demográfico, concluiu que no Brasil, o grau de urbanização passou de 36% no ano de 1950 para 84% no ano de 2010. Na Figura 1 é demonstrada a evolução histórica da população total e urbana do Brasil além do grau de urbanização no período de 1950 a 2010.

Figura 1 – Evolução da população urbana do Brasil, e grau de urbanização da população – Anos censitários entre 1950 e 2010



Fonte: adaptado de DE PINHO, 2017

Com esse aumento desenfreado, o planejamento de um desenvolvimento urbano sustentável é primordial para a garantia da qualidade de vida dos habitantes de grandes centros (FREITAS e AZEREDO,2021).

2.2 Desenvolvimento urbano sustentável

A partir da revolução industrial, houve o desenvolvimento técnico-científico e conseqüentemente, a necessidade de mão de obra concentrada em uma pequena porção espacial, o que impulsionou o desenvolvimento das cidades (SPOSITO et al,1988). Entretanto, no início desse período ideias de preservação ambiental e planejamento de um desenvolvimento urbano sustentável não eram discutidas. Para ABIKO (2009) os reflexos dos ideais de industrialização e urbanização sem planejamento tem sido uma crise socioambiental atual, a qual se apresenta tanto em países desenvolvidos como subdesenvolvidos, e traz problemas como: extinção de recursos naturais, poluição do ambiente natural, a pobreza, a miséria, a má distribuição de renda e problemas climáticos, e conseqüentemente deterioração da qualidade de vida de habitantes de centros urbanos.

ABIKO (2009) destaca ainda que para atingir um modelo de desenvolvimento que compatibilize o crescimento econômico com sustentabilidade, ecologia, política, demografia, cultura, sociedade e política devem estar alinhados com o mesmo objetivo. Nesse sentido, a Constituição do Brasil de 1988, por meio do capítulo da Política urbana, estabelece responsabilidade da elaboração de planos diretores pelos municípios com mais de 20 mil habitantes. Aliado a isso, o estatuto da cidade, estabelece as diretrizes que devem constar no plano diretor elaborado por cada município e na garantia do desenvolvimento de cidades sustentáveis (OLIVEIRA, 2001).

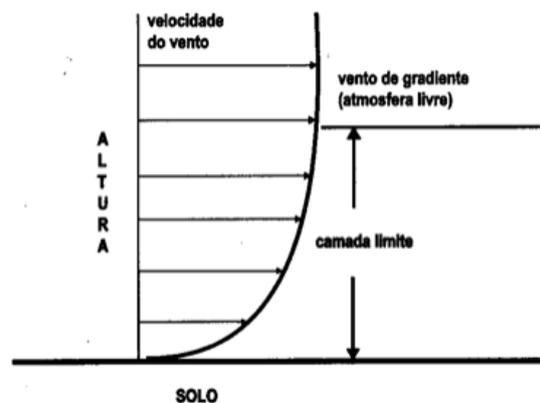
2.3 Camada limite atmosférica

A primeira definição de camada limite foi apresentada por Ludwig Prandtl em 1904 após constatar em análises observacionais, que em um escoamento de fluido, a magnitude das forças inerciais e viscosas, sofrem alterações nas regiões adjacentes a uma superfície (ANDERSON 2005). Dessa forma, Prandtl fez a seguinte descrição que para entender bem o fenômeno físico que ocorre na camada limite entre um fluido e um corpo sólido, pode-se assumir que o fluido adere completamente à superfície do

corpo, ou seja, a velocidade relativa entre eles é zero. Quando a viscosidade do fluido é muito baixa e o deslocamento é pequeno, a velocidade do fluido tende a voltar ao normal a uma curta distância da superfície. Contudo, dentro dessa camada de transição fina, a grande variação de velocidade, mesmo com pequenos coeficientes de fricção, resulta em efeitos significativos. (ANDERSON, 2005, p.43, apud PRANDTL, 2001, p.49)

A Figura 2 apresenta um esquema ilustrativo de um fluxo com perfil vertical de velocidade típico da camada limite, no qual a velocidade é nula na região próxima à superfície e tem magnitude constante na região de escoamento livre.

Figura 2 – Variação da camada limite de acordo com a altura

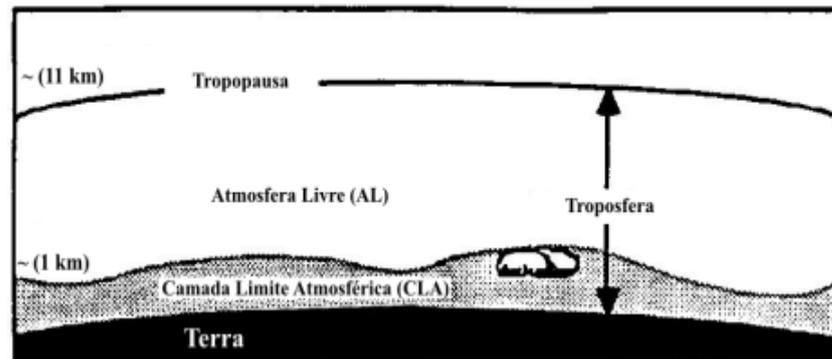


FONTE: CUSTÓDIO (2009)

2.3.1 Camada limite atmosférica urbana

Na troposfera, região da atmosfera terrestre que se estende desde o solo até uma altitude média de 11 km, também há a formação da camada limite. Todavia, nessa região, além do atrito, o escoamento também é influenciado pela variação térmica da superfície. Devido a essas características, há a formação da camada limite atmosférica (CLA) (Figura 3), a qual é conceituada como a região da troposfera onde o escoamento é diretamente influenciado pela presença da superfície (STULL, 1988).

Figura 3 – Representação da camada limite atmosférica



FONTE: Adaptado de (STULL,1988)

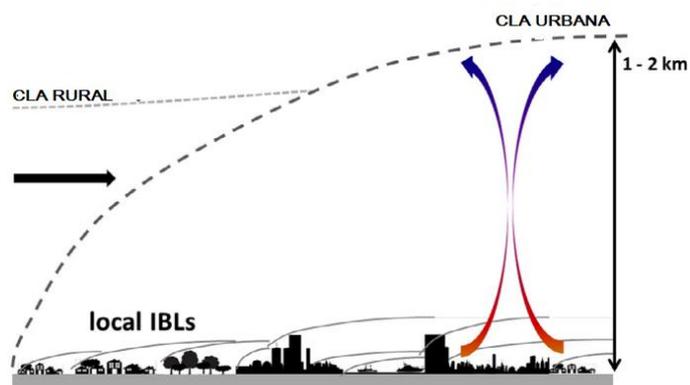
A definição de camada limite atmosférica auxilia na compreensão da variação da velocidade e direção do vento em relação à altura do solo e a rugosidade da superfície. Segundo ARYA (1988), na região da CLA há um grande gradiente de velocidade do vento cuja magnitude varia de acordo com todas as características de ocupação do solo, tais como, altura das construções, propriedades térmicas dos materiais que recobrem a superfície, calor antropogênico, emissão de poluentes, entre outros.

Dessa forma, devido a dependência de muitas variáveis, a modelagem e simulação da camada limite atmosférica é complexa, porém necessária para a melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem na atmosfera terrestre. Mesmo com a importância do ambiente urbano, devido à grande densidade populacional, para BARLOW (2014) o microclima urbano, é um dos mais complexos e menos conhecidos pela comunidade científica. Essa complexidade tem como causas principais: a irregularidade da disposição dos elementos urbanos, a heterogeneidade dos elementos presentes na superfície, a emissão de gases pelo fluxo de veículos e atividades industriais e calor antropogênico. Nesse sentido, SÁNCHEZ (2017) destaca ainda que quando o ambiente sofre modificações, como a substituição da vegetação por edifícios e vias pavimentadas, ocorre um aumento na impermeabilização do solo, na geração de calor causada pelas atividades humanas diminuir o do albedo da superfície, assim, causando o aumento no armazenamento de energia no ambiente urbano. Essas mudanças têm um impacto significativo nas diferentes partes do

balanço de energia e radiação, podendo trazer consequência a formação de uma ilha de calor urbana (ICU) e na diminuição da umidade nas áreas urbanas.

Além disso, de forma geral, a camada limite urbana (CLU) tende a ser mais alta em comparação com a região rural (Figura 4) Barlow (2014). Todavia, a estrutura termodinâmica e dinâmica durante o dia é muito parecida com a rural, diferenciando somente por ser mais seca, turbulenta e poluída. Por outro lado, essa maior altura causa impactos na inversão térmica noturna, fazendo com que as cidades continuem mais quentes, mesmo durante a noite. (BARLOW et al., 2015; SÁNCHEZ., 2017).

Figura 4 – Representação camada limite atmosférica urbana e rural

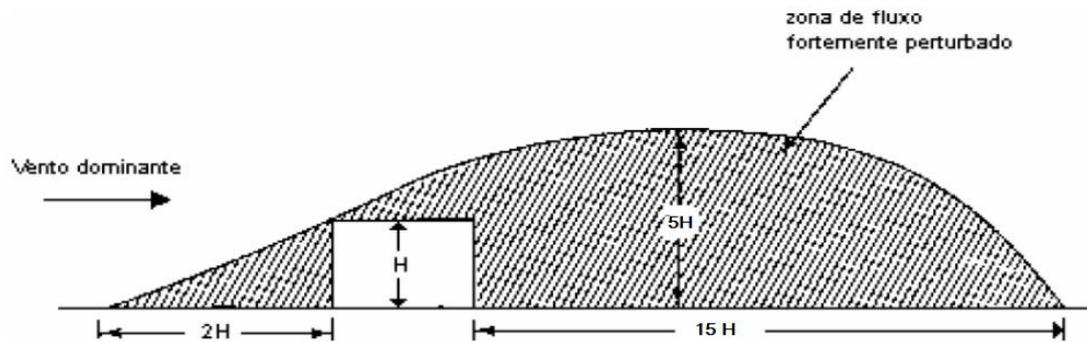


Fonte: Adaptado da Figura 1 de Barlow (2014)

2.3.2 escoamento de vento em regiões urbanas

Diversos são os fatores que influenciam no escoamento atmosférico em regiões urbanas, os quais foram explicitados nas seções anteriores. Na figura 5 é apresentado um esquema da perturbação do escoamento gerado pela presença de apenas um edifício. De acordo com Baturin (1972), a presença de um edifício com altura H causa uma perturbação no fluxo de ar ao seu redor, exercendo uma influência considerável na velocidade do vento em um raio de até $5H$. Além disso, na região de sotavento, essa influência se estende até uma distância de $15H$.

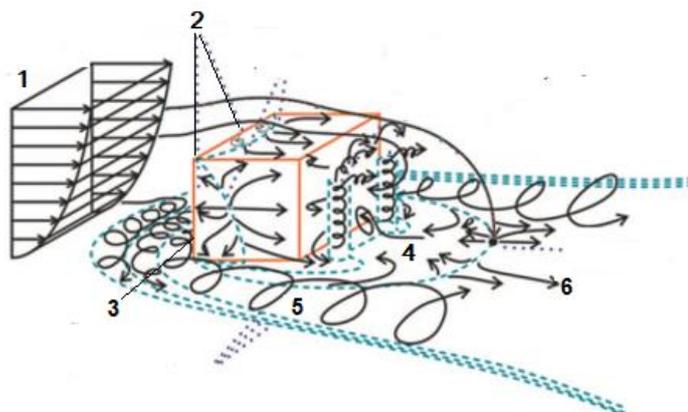
Figura 5 – escoamento perturbado pela presença de um edifício



Fonte: Adaptado de Hiester, T.R. e W.T. Pennell 1983

Com a presença de um obstáculo que obstrui o fluxo, o escoamento passa a apresentar comportamentos e estruturas características conforme é esquematizado na Figura 6, onde: (1) é perfil de vento na direção dominante; (2) é ponto de estagnação, onde a velocidade é zero e a pressão é máxima; (3) local onde o escoamento é dividido e apresenta pressões mais baixas; (4) vórtice próximo ao nível do solo com sentido oposto ao escoamento; (5) vórtices laterais com velocidades maiores e (7) o escoamento segue normalmente com baixas velocidades. Ao longo do desenvolvimento do trabalho essas características serão observadas sobre a presença de mais de diferentes disposições de várias edificações.

Figura 6 - Escoamento perturbado pela presença de um edifício



Fonte: Adaptado de Hiester and Pennel (1983)

O estudo do fluxo de ar ao redor de edifícios é de extrema importância na engenharia, tanto no aspecto estrutural quanto na aerodinâmica das edificações,

sendo fundamental para determinar as cargas nos edifícios para garantir sua estabilidade estrutural. Além disso, também serve para estabelecer e otimizar a ventilação natural tendo impactos diretos no conforto térmico da edificação e no microclima urbano (SANTOS, 2018).

2.4 Fluidodinâmica computacional

A Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) é o estudo e análise de sistemas que envolvem o movimento de fluidos, transferência de calor e fenômenos relacionados, como por exemplo reações químicas, por meio de simulações computacionais (Versteeg e Malalasekra, 2007). Esse recurso, pode apresentar diversas aplicações tais como, avaliação de aerodinâmica de veículos, simulações de combustão, avaliação de conforto térmico externo e interno de edificações e simulações de clima urbano. Desta forma, os CFD, atualmente vem sendo amplamente utilizadas em aplicações industriais e no meio acadêmico como uma ferramenta de prescrever fenômenos físicos e químicos que ocorrem em escoamentos, reduzindo a necessidade de métodos empíricos de alto custo. Nesse sentido, LEMES (2017) destaca que o principal objetivo e desafio da área, é realizar as simulações de modo com que representem o caso real estudado.

Para a realização de uma simulação de CFD é necessário primeiramente definir o problema que será simulado para escolher qual modelo que melhor se adapta às variáveis de interesse. Após isso, deve realizar a construção da geometria, definindo condições de contorno com duas respectivas propriedades físicas. Essa geometria será dividida em uma grade de elementos finitos, que é a representação discreta de onde as equações do modelo aplicado serão resolvidas. Segundo BUSTAMANTE, et al (2012) a quantidade de elementos da malha é o que determina o grau de refinamento. No entanto, quanto maior o refinamento, maior o esforço computacional e o tempo de simulação. Posteriormente, são definidas as condições iniciais e de contorno que descrevem o estado inicial do sistema e especificam como o fluido se comporta nas fronteiras do domínio de simulação. Essas informações são fundamentais para obter resultados confiáveis e representativos do problema em estudo. Por fim, são definidas quais as variáveis e formato de saída dos resultados obtidos. Após a obtenção dos resultados, vem a etapa de pós processamento, a qual

pode-se fazer necessária a utilização de ferramentas específicas de processamento de dados, para a visualização e verificação da coerência dos resultados obtidos.

2.5 PALM

O trabalho utilizará o sistema de modelagem meteorológica PALM, que é baseado nas equações de Navier-Stokes. O PALM assume as hipóteses de não hidrostática, fluido incompressível e aproximação de Boussinesq, conforme descrito por Maronga et al. (2015). O modelo possui sete grandezas prognósticas: as componentes cartesianas de velocidade, a temperatura potencial, a taxa de mistura de vapor de água, um escalar passivo e a energia cinética turbulenta. Além disso, o modelo PALM utiliza o método das diferenças finitas para discretizar o espaço, com um espaçamento de grade horizontal equidistante. As velocidades são definidas deslocando em meia largura da grade em sua respectiva direção. (MARONGA et al., 2020)

2.6 Descrição do modelo

A equação (1) representa a equação de Navier-Stokes (1) e é a base fundamental do modelo Palm. De maneira geral, é a segunda lei de Newton Aplicada a um fluido monofásico, definindo o escoamento com base na relação entre aceleração com a força. (PUHALES, 2011)

$$\underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t}}_A + \underbrace{\frac{\partial u_k u_i}{\partial x_k}}_B = - \underbrace{\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p^*}{\partial x_i}}_C - \underbrace{2\varepsilon_{ijk} f_j u_k}_D + \underbrace{g \frac{T-T_0}{T_0} \delta_{i3}}_E + \underbrace{\nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} \frac{\partial u_k}{\partial x_k}}_F \quad (1)$$

Onde:

- Termo A: Variação local da velocidade.
- Termo B: Transporte advectivo da velocidade.
- Termo C: Gradiente de pressão.
- Termo D: Coriolis
- Termo E: Empuxo

- Termo F: Termo viscoso

Além disso, na equação da continuidade para um fluido incompressível, a variação local da densidade do fluido em função do campo de velocidade é nula (PUHALES, 2011) Dessa forma, pode ser descrita pela equação (2).

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad (2)$$

O PALM utiliza o LES (Simulação de Grandes Turbilhões), que envolve a utilização de médias espaciais sobre volumes para resolver as equações que caracterizam o comportamento de um fluxo turbulento. É importante destacar que estruturas menores que as dimensões da grade são filtradas e os seus efeitos sobre as estruturas são incluídos através de parametrizações de subgrade. (PUHALES, 2011; MARONGA et al., 2020).

3 METODOLOGIA

No presente trabalho, foram realizadas as simulações numéricas do escoamento de vento em ambientes urbanos idealizados, utilizando o sistema de modelagem meteorológica PALM. Além disso, é importante ressaltar que as dimensões do domínio e características dos casos simulados, foram baseados no estudo desenvolvido por BOU-ZEID et al. (2009). Todavia, devido à falta de informações sobre as dimensões de cada edificação presente no domínio, as representações não correspondem precisamente às analisadas pelo autor.

3.1 Domínio da simulação

O presente trabalho utilizou de um domínio hexaédrico de dimensões cartesianas (x, y, z) respectivamente de 500x300x160 m conforme representados na Figura 8. O domínio é discretizado em uma malha hexaédrica com espaçamento de grade de 2 m totalizando 250x150x80 pontos de grade nas direções ortogonais. No centro do domínio estão posicionados os dois arranjos geométricos que serão investigados, os quais através de hexaedros em diferentes e posições, representam ambientes urbanos idealizados. O caso 1 com dimensões representadas na Figura 9, apresenta uma região com baixa complexidade de prédios de 18 m, largura da rua de 20 m e disposto de maneira organizada. A Figura 10 representa o caso 2, sendo um arranjo mais complexo com ruas mais estreitas, entre 4 m e 10 m e edifícios também de 18 m de altura.

Figura 8 – Domínio da simulação

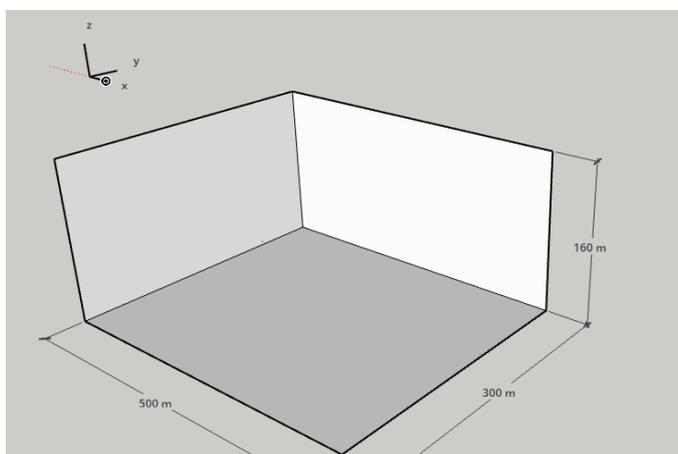
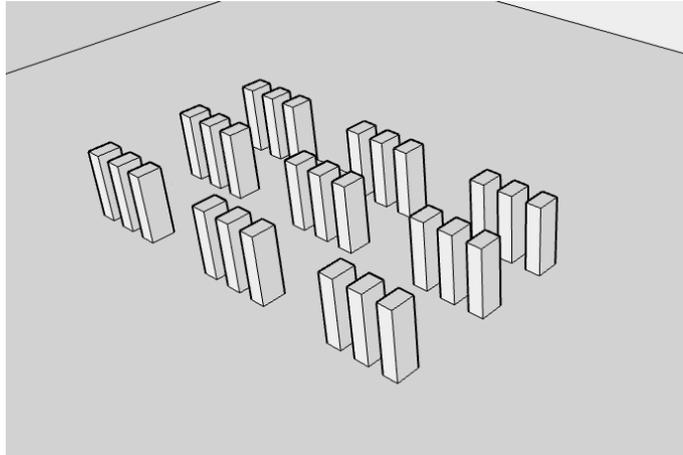
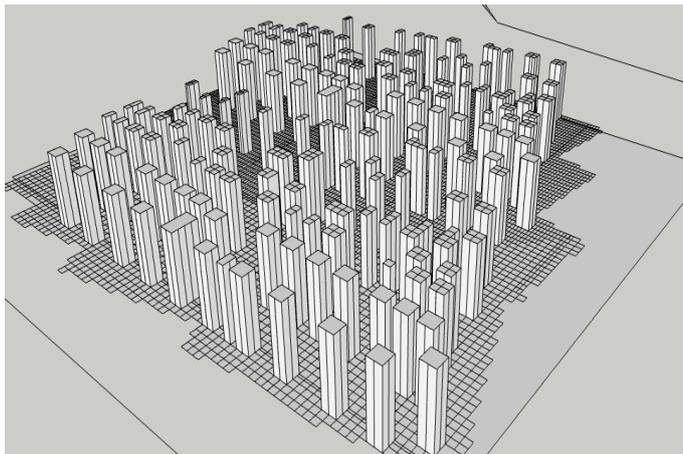


Figura 9 - Distribuição das edificações no Caso 1



Fonte: O autor

Figura 10 - Distribuição das edificações no Caso 2



Fonte: O autor

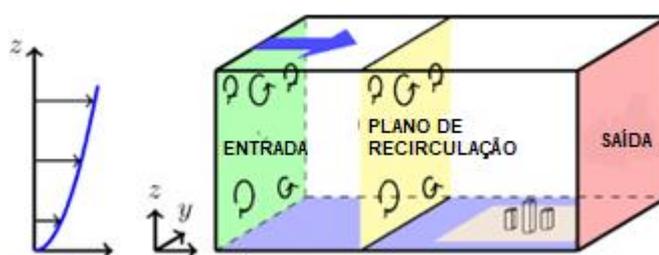
3.2 Condições iniciais e de contorno

Para simular numericamente um escoamento, termicamente neutro, e com turbulência plenamente desenvolvida será utilizada a técnica de recirculação (Lund et al. (1998); Kataoka and Mizuno (2002)) para gerar um campo de escoamento turbulento uniforme. A técnica de recirculação de turbulência consiste em realizar uma simulação precursora, escoamento laminar, que servirá de condição inicial para a continuação da simulação. A partir disso é inserido um plano de recirculação a uma distância fixa da região de entrada. No plano de recirculação é estimada a flutuação

em torno da média da variável prognóstica. O sinal da flutuação é então adicionado ao escoamento na região de entrada. Dessa forma, são realizadas duas simulações paralelamente, a primeira para desenvolver a turbulência em todo domínio de modo que não sejam necessários simulações muito longas, e a segunda é a simulação de um escoamento, com turbulência homogênea, na região de interesse, onde estão presentes os elementos urbanos (Figura 11).

Além disso, são assumidas como condições de contorno a condição de não-eskorregamento na parede inferior, condição de superfície livre na parede superior. Nas laterais as condições de contorno são cíclicas, enquanto nas extremidades, na direção do escoamento, são assumidas as condições de entrada, onde as partículas fluidas são injetadas no escoamento, com um perfil vertical previamente definido (Figura 11), e de saída onde as partículas fluidas deixam o domínio devido a presença de um gradiente de pressão.

Figura 11 - Figura esquemática do método de recirculação de turbulência utilizado para geração de fluxo turbulento



Fonte: Documentação PALM

3.3 Pós processamento dos resultados

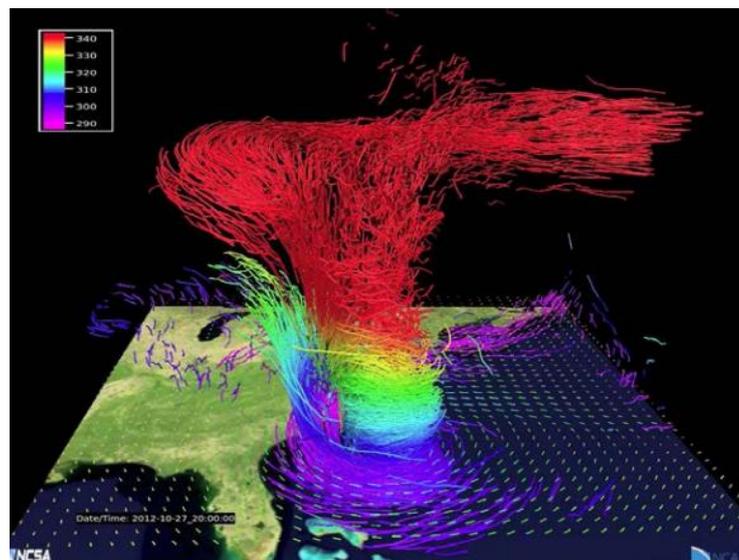
As variáveis analisadas foram as componentes da velocidade e a perturbação da pressão do escoamento de vento. O modelo tem como formato de saída arquivos netCDF, sendo necessário a utilização de softwares de processamento de dados para serem visualizados. Dessa forma, com o auxílio do programa VAPOR, foram geradas as seções transversais que representam a média da velocidade e pressão

escoamento. Além disso, foram traçados os perfis verticais em regiões distintas do domínio.

3.3.1 VAPOR

O VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and SolarResearchers) é um programa especializado em visualização e análise de dados científicos complexos, particularmente aqueles armazenados em arquivos NetCDF. Desenvolvida pelo National Center for Atmospheric Research (NCAR), VAPOR é projetado para facilitar a visualização de dados temporais, e permite a renderização e exploração de dados em três dimensões incluindo técnicas de visualização como isosuperfícies, cortes planos e renderização direta de volume. Na Figura 12 é apresentado a visualização da simulação de uma tempestade, que é um dos exemplos disponíveis na documentação do software.

Figura 12 – Simulação de uma tempestade severa visualizada com o software VAPOR.



Fonte: Mel Shapiro, NCAR

4. RESULTADOS

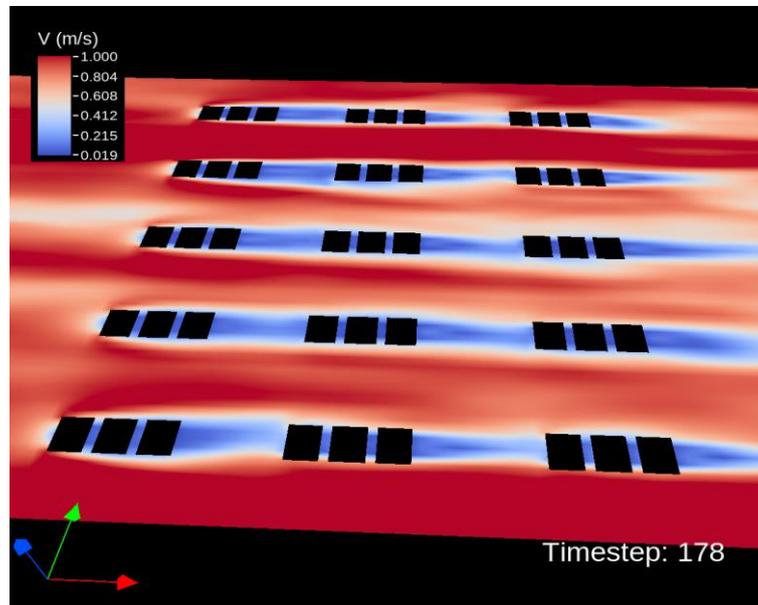
Neste capítulo, são detalhados os resultados obtidos após a análise da simulação de escoamento de vento, realizada utilizando o PALM. Foram plotados, a seção transversal da média da velocidade de vento de um minuto, a seção transversal das linhas de corrente da componente vertical da velocidade (W) média nos últimos 30 minutos, e os perfis verticais em diferentes regiões. As discussões sobre cada um estão sendo apresentadas nas próximas seções.

4.1 Visualização e caracterização do escoamento

As seções transversais para o caso 1 e caso 2 estão apresentadas nas Figuras 13 e 14, respectivamente. Nos dois casos foi possível observar zonas de recirculação devido a obstrução pelos obstáculos região a sota-vento. Essas zonas, são regiões em que há formação de vórtices e recirculação de ar e podem trazer impactos significativos, pois tendem a resultar em bolsões de ar estagnado, que retém energia na forma de calor, e dificultam a dispersão de poluentes. É importante destacar que no caso 2 (Figura 14), onde há a presença de ruas mais estreitas, com disposição desordenada, houve uma maior incidência de zonas de recirculação e a região de esteira foi maior. Na seção 4.2 foram discutidos e apresentados os perfis verticais nessas regiões.

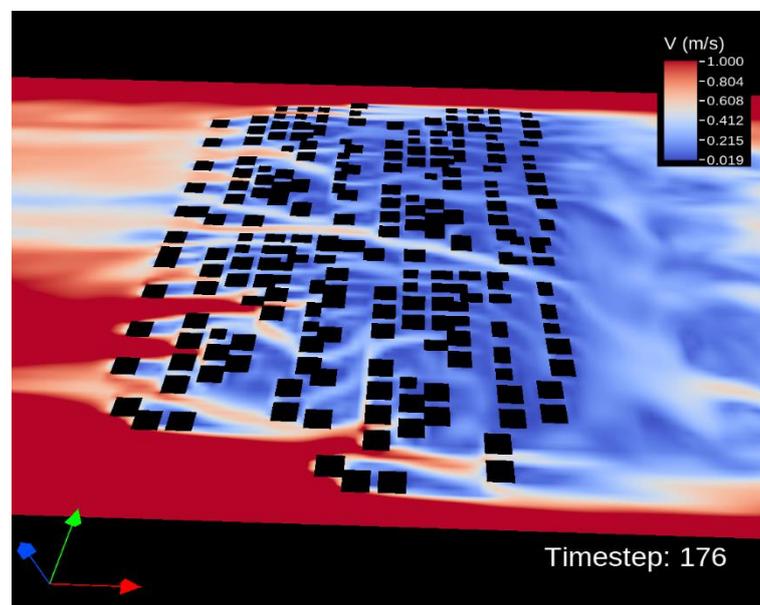
Além disso, foi possível observar a formação de corredores de vento, que são regiões onde o escoamento é canalizado, afetando o padrão e a intensidade da velocidade do vento em diferentes partes da área urbana. Esse padrão foi observado nos dois casos e suas diferenças são discutidas na seção 4.2.

Figura 13- Visualização da média de 1 minuto da velocidade do vento no caso 1.



Fonte: O autor

Figura 14- Visualização da média de 1 minuto da velocidade do vento no caso 2.

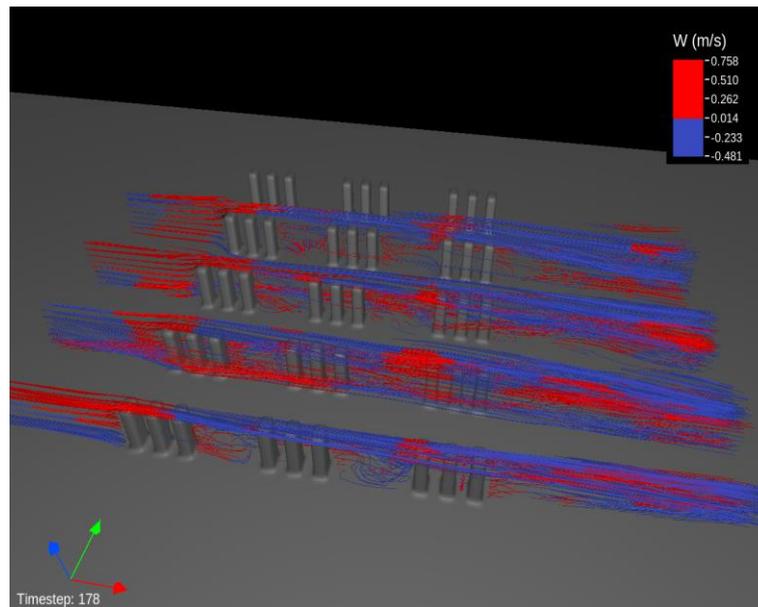


Fonte: O autor

Nas Figuras 15 (Caso 1) e 16 (Caso 2) são apresentadas as linhas de corrente da velocidade onde é possível uma melhor visualização das estruturas formadas no

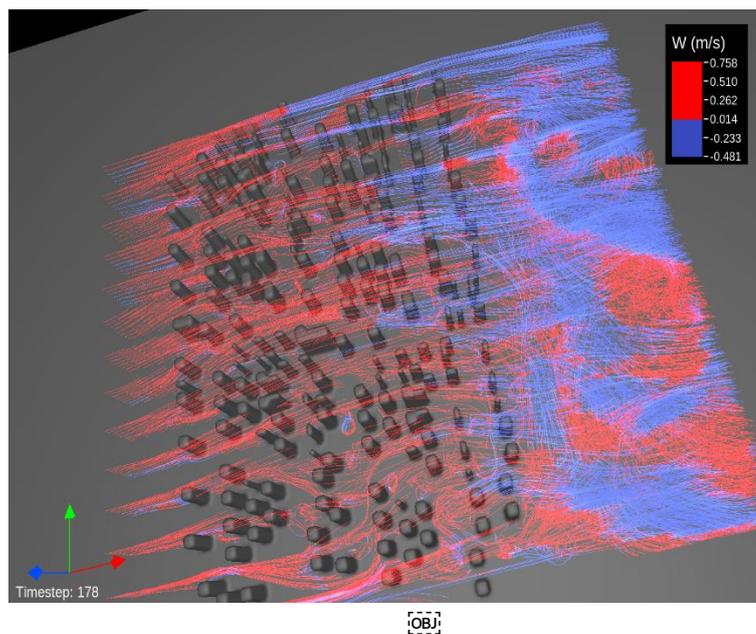
escoamento tais como: regiões de movimento ascendente (vermelho) e descendente (azul), regiões de recirculação e de canalização do escoamento.

Figura 15- Linhas de corrente da da velocidade no caso 1.



Fonte: O autor

Figura 16- Linhas de corrente da da velocidade no caso 2.

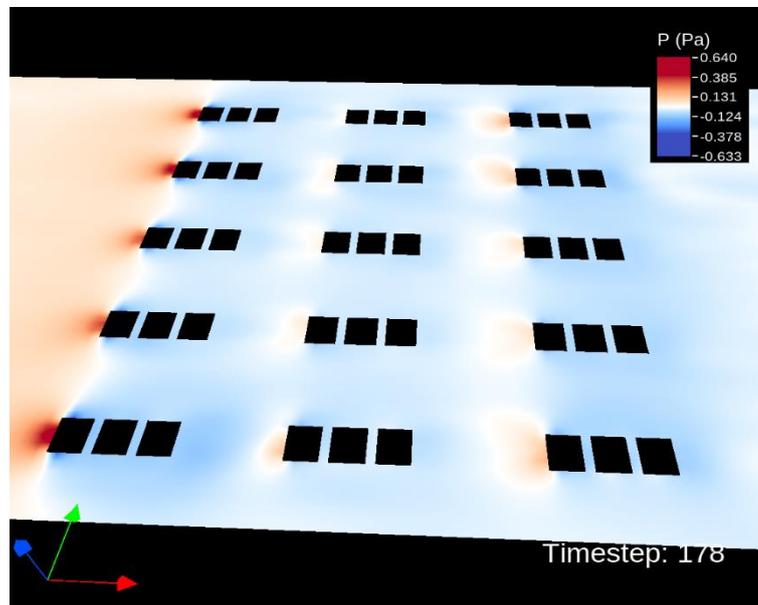


Fonte: O autor

Além disso, foram analisadas as pressões do escoamento. Na Figura 17, observou-se uma distribuição uniforme da pressão do vento resultando em uma distribuição mais homogênea no plano analisado. A redução na formação de vórtices e turbulência, contribuiu para uma pressão do vento com variações menores entre áreas de alta e baixa pressão.

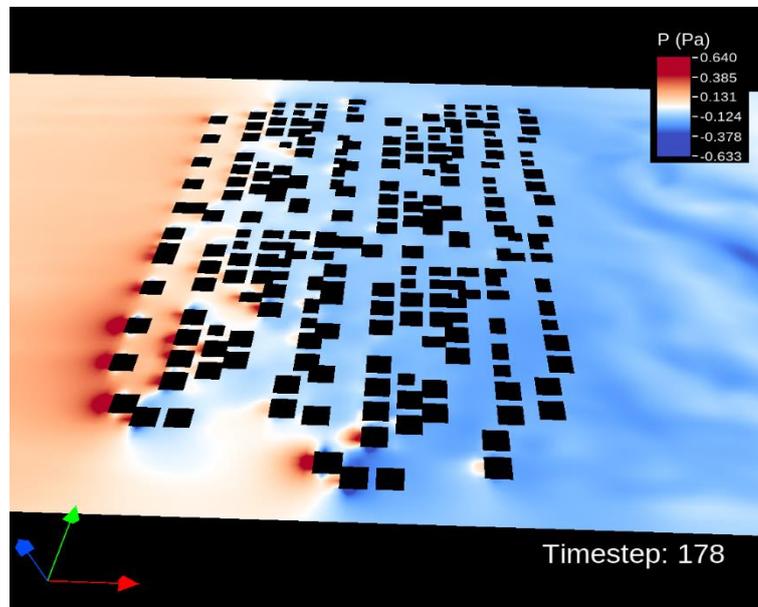
Por outro lado, no caso 2 (figura 18), a pressão do vento foi caracterizada por uma distribuição irregular e variável. A disposição irregular dos edifícios e a estreiteza das ruas contribuíram para a formação de zonas de baixa pressão em áreas de recirculação e turbulência propiciando a uma distribuição irregular dos pontos de maior perturbação. Essas condições podem afetar diretamente o conforto térmico e a estabilidade estrutural das construções nesses ambientes. Em ambos os casos, observou-se uma perturbação de pressão positiva e intensa nas regiões de estagnação, onde o escoamento é obstruído, perturbações de pressão negativas nas regiões onde há a formação de vórtices de recirculação.

Figura 17- Plano horizontal da distribuição de pressão no escoamento no caso 1.



Fonte: O autor

Figura 18- Plano horizontal da distribuição de pressão no escoamento no caso 2.

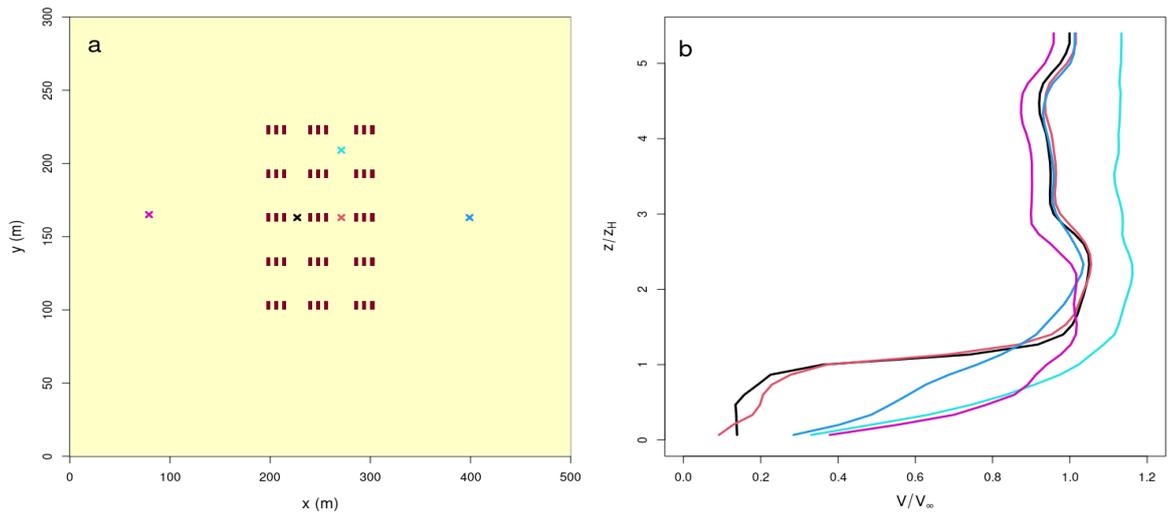


Fonte: O autor

4.2 Perfis verticais de vento

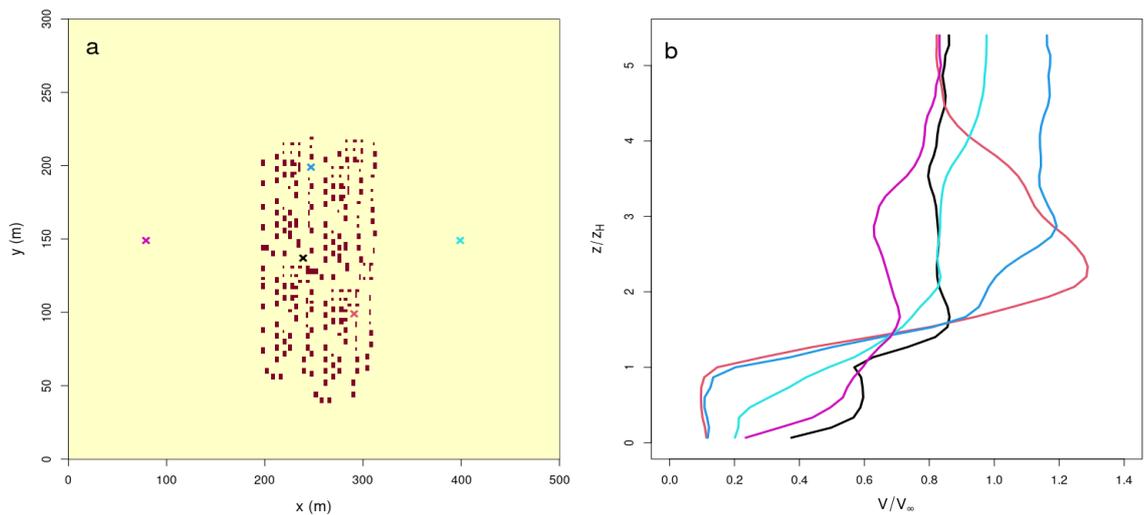
Os perfis verticais de velocidade estão representados na Figuras 19 e 20 onde Z/Z_H é a razão entre a posição vertical e a altura das edificações. Foram traçados em cinco pontos para os dois casos, escolhidos arbitrariamente para visualização antes e depois da presença dos edifícios, em uma região com o escoamento obstruído e em um corredor de vento. Os dados representam a média de 30 minutos e V/V_∞ representam a razão entre a velocidade no ponto e a velocidade de escoamento livre (1 m s^{-1}).

Figura 19- Perfil vertical de vento no caso 1.



Fonte: o autor

Figura 20- Perfil vertical de vento no caso 2.



Fonte: o autor

Para os dois casos, na região de escoamento sem obstrução, antes da presença da cidade, o perfil de velocidade do vento mostrou um comportamento típico

de camada limite atmosférica. A razão V/V_{∞} aumenta gradualmente com a altura (z/H), atingindo um máximo em altitudes mais elevadas, entretanto ainda apresenta um pequeno efeito gerado pela alta pressão, devido a proximidade das edificações que estão obstruindo o escoamento.

Por outro lado, na região de escoamento atrás da obstrução de um prédio, observou-se uma significativa redução na razão V/V_{∞} imediatamente após o obstáculo para os dois casos. Esta área, conhecida como a esteira de vento, é caracterizada por uma zona de recirculação e há formação de vórtices. A velocidade do vento nesta região é consideravelmente menor em comparação com a área livre de obstruções em que a diferença para os casos é a intensidade que a diferença da velocidade ocorre. No caso 1 a na altura $Z/Z_H = 1$ m é de $0,2 \text{ m s}^{-1}$, no entanto, no caso 2 neste mesmo ponto a velocidade é de aproximadamente $0,1 \text{ m s}^{-1}$.

No corredor de vento gerado por uma rua, o escoamento do vento é canalizado entre os edifícios, resultando em um aumento local da razão V/V_{∞} . Este “efeito de funil” intensifica o escoamento, levando a velocidades mais altas no corredor em comparação com as áreas adjacentes. Esta situação apresentou as maiores velocidades nos dois casos, entretanto, devido ao estreitamento das ruas, no caso 2 foi possível observar velocidade mais intensas. .

Na região de esteira após a presença de toda a cidade, o perfil de velocidade do vento é altamente influenciado pela configuração urbana precedente. No caso 2, a velocidade do vento é mais baixa de aproximadamente $0,6 \text{ ms}^{-1}$ na região de $Z/Z_H=1$. Em contraste, no cenário com prédios ordenados e ruas largas, a esteira apresenta uma mais rápida da velocidade do vento e possui uma velocidade maior no ponto analisado, chegando a $0,9 \text{ m s}^{-1}$. Dessa forma, a organização uniforme dos prédios permite um escoamento mais linear e menos perturbado após a cidade, o que facilita a dissipação da esteira a uma distância menor.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados das simulações indicam que a presença de edificações e outras obstruções urbanas exerce um impacto significativo no perfil de velocidade do vento. A variação na velocidade do vento em diferentes regiões urbanas pode influenciar diretamente aspectos como o conforto térmico, a dispersão de poluentes e a eficiência energética dos edifícios. Portanto, compreender esses perfis é crucial para o planejamento urbano e o design de edificações sustentáveis.

A comparação entre os dois cenários destacou que a organização urbana desempenha um papel crucial na distribuição da pressão do vento. Prédios desordenados e ruas estreitas tendem a criar condições mais turbulentas e variáveis, com maior formação de zonas de baixa pressão devido à recirculação e à turbulência. Em contraste, prédios ordenados e ruas largas proporcionam um ambiente mais favorável para um escoamento de ar mais uniforme e estável, com uma distribuição mais consistente da pressão do vento. Essas diferenças têm implicações importantes para o design urbano e o planejamento de áreas residenciais e comerciais. Compreender como a configuração urbana afeta a pressão do vento pode auxiliar na criação de ambientes mais seguros e confortáveis, além de influenciar decisões de projeto para melhorar a eficiência energética e a sustentabilidade das construções urbanas.

Com relação a formação de corredores de vento entre os destaca-se como a disposição urbana influencia diretamente a velocidade e a distribuição do vento dentro da cidade. Prédios desordenados e ruas estreitas tendem a gerar corredores de ventos mais intensos. Sendo assim, em contrapartida, prédios ordenados e ruas largas proporcionam corredores de vento mais moderados e uniformes, com benefícios potenciais para a circulação do ar e o conforto térmico urbano.

Posto isso, verificou-se que o modelo PALM pode ser uma ferramenta importante para o planejamento urbano sustentável, permitindo o desenvolvimento e concepção de espaços urbanos que otimizem a ventilação natural, reduzam o calor urbano e melhorem a qualidade do ar promovendo um ambiente urbano mais saudável e confortável para seus habitantes.

5.1 Trabalhos futuros

Como projetos futuros pretende-se adotar modelos em 3D de conjunto de edificações reais, a fim de verificar o comportamento do escoamento simulado pelo modelo nessas condições. Além disso, serão adicionadas outras condições como, propriedades térmicas dos materiais, temperatura do ar a fim de tornar as simulações mais fiéis a um ambiente urbano real.

REFERÊNCIAS

- ABIKO, Alex; MORAES, OB de. **Desenvolvimento urbano sustentável**. São Paulo, 2009.
- ANDERSON, John D. **Ludwig Prandtl's boundary layer**. *Physics today*, v. 58, n. 12, p. 42-48, 2005.
- ARYA, Paul S. **Introduction to micrometeorology**. Elsevier, 2001.
- Barlow, J.F., Halios, C.H., Lane, S.E., Wood, C.R., 2015: **Observations of urban boundary layer structure during a strong urban heat island event**. *Environment Fluid Mechanic*, 15, 373-398.
- BARLOW, Janet F. **Progress in observing and modelling the urban boundary layer**. *Urban Climate*, v. 10, p. 216-240, 2014.
- BATURIN, V.V. **Fundamentals of Industrial Ventilation**, 3 ed. Pergamon Press Ltd., 1972. 486 p
- BOU-ZEID, Elie et al. **The effects of building representation and clustering in large-eddy simulations of flows in urban canopies**. *Boundary-layer meteorology*, v. 132, p. 415-436, 2009.
- DA SILVA, Regina Celly Nogueira; DE SOUTO MACÊDO, Celênia. **A Urbanização Mundial**. 2009.
- DE PINHO, Breno ATD; BRITO, Fausto. **A urbanização da população brasileira: uma análise segundo o tamanho dos municípios**. *Anais*, p. 1-20, 2017.
- FADL, M. Sakr; KARADELIS, John. **CFD simulation for wind comfort and safety in urban area: A case study of Coventry University central campus**. *International journal of architecture, engineering and construction*, v. 2, n. 2, p. 131-143, 2013.
- Freitas, R. F. M. de ., Azerêdo, J. de F. F. A. de ., Carvalho, L. T. de ., & Costa, R. F. da . (2021). **Mapa climático como instrumento para o planejamento urbano**. *Revista Brasileira De Estudos Urbanos E Regionais*, 23. <https://doi.org/10.22296/2317-1529.rbeur.202108pt>

Hiester, T.R. e W.T. Pennell (1983). **The Siting Handbook for Large Wind Energy Systems**. Windbooks, New York, USA.

KHANDURI, A. C.; STATHOPOULOS, T.; BÉDARD, Claude. **Wind-induced interference effects on buildings—a review of the state-of-the-art**. *Engineering structures*, v. 20, n. 7, p. 617-630, 1998.

LEMES JUNIOR, Danilo Nogueira. **Implementação de uma malha dinâmica para estudo da formação da esteira em um aerogerador utilizando simulação de grandes turbilhões**. 2017.

LIMA, Raffaella Germano de; BITTENCOURT, Leonardo Salazar. **A influência de diferentes arranjos construtivos no comportamento da ventilação natural. urbe**. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 9, p. 425-441, 2017.

MARONGA, Björn et al. **Overview of the PALM model system 6.0**. *Geoscientific Model Development*, v. 13, n. 3, p. 1335-1372, 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Cidades sustentáveis: subsídios à elaboração da agenda 21 brasileira**. Brasília, 2000.

Oliveira, M. de. (2001). **A trajetória do discurso ambiental em Curitiba (1960-2000)**. *Revista de Sociologia e Política*

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Relatório Mundial das Cidades 2022**

PUHALES, Franciano Scremin et al. **Parametrização do transporte de energia cinética turbulenta na camada limite convectiva**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.

SARAIVA, Alexa; **ONU-Habitat: população mundial será 68% urbana até 2050,2022**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/188520-onu-habitat> Acesso em 10 de jun 2023.

SÁNCHEZ, Maciel Piñero; OLIVEIRA, Amauri Pereira de. **Investigação da camada limite urbana na região metropolitana de São Paulo**. 2017.

SPOSITO, Maria Encarnação Beltrão et al. **Capitalismo e urbanização**. 1988.

STULL, Roland B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Springer Science & Business Media, 1988.

TABARIN, Charles Serra. **Desenvolvimento Sustentável na Agenda Internacional: Conferências Das Nações Unidas Sobre Assentamentos Humanos (ONU-HABITAT). XIX Encontro Nacional de Geógrafos. Pensar e Fazer a Geografia Brasileira no Século XXI. Escalas, Conflitos Socioespaciais e Crise Estrutural na Nova Geopolítica Mundial**, v. 1, 2018.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **Computational fluid dynamics. The finite volume method**, p. 1-26, 1995.