



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais



Arthur Emmanuel de Medeiros Nóbrega

**ANÁLISE DE MODELOS DE FLUXOS DE AR PARA
CONFORTO AMBIENTAL ASSISTIDA POR SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL EM *VOXELS***

Campo Grande, MS
Maio de 2022

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais

Arthur Emmanuel de Medeiros Nóbrega

**ANÁLISE DE MODELOS DE FLUXOS DE AR PARA CONFORTO
AMBIENTAL ASSISTIDA POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM
VOXELS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais - PGTA da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do Título de Doutor, na área de concentração de *Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos*.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Conceição Paranhos Filho

Aprovada em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Antonio Conceição Paranhos Filho

Orientador PGTA UFMS

Prof. Dr. Alisson André Ribeiro UFMS

Profa. Dra. Camila Amaro de Souza Uniderp

Profa. Dra. Camila Leonardo Mioto UFR

Prof. Dr. Fabrício Bau Dalmas UNG

Prof. Dr. Thiago Rangel Rodrigues PGTA
UFMS

Campo Grande, MS
Maio de 2022

DEDICATÓRIA

Em especial, ao Professor Dr. Antonio Conceição Paranhos Filho, que acreditou na proposta do trabalho, e aos que se realizam com as soluções tecnológicas ambientais desenvolvidas para conciliar a qualidade de vida com o aproveitamento de um ambiente saudável.

AGRADECIMENTOS

Ao PGTA (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais), da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de produtividade em pesquisa de A. C. Paranhos Filho (CNPq Processo 305013/2018-1).

À BFLa (Base Fluvial de Ladário), do Comando do 6º Distrito Naval – Com6ºDN.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
INTRODUÇÃO.....	9
OBJETIVO GERAL.....	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
OBJETO DE ESTUDO.....	14
PRIMEIRO CAPÍTULO: OBRAS VERTICAIS MAGISTRAIS: A COMPOSIÇÃO DESMATERIALIZADA DE ESPAÇOS AERADOS.....	15
1.1. INTRODUÇÃO.....	16
1.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
1.4. CONCLUSÃO.....	30
1.5. REFERÊNCIAS.....	31
SEGUNDO CAPÍTULO: DADOS EM GEOTECNOLOGIA EÓLICA.....	34
2.1. INTRODUÇÃO.....	35
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	39
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
2.4. CONCLUSÃO.....	49
2.5. REFERÊNCIAS.....	50
TERCEIRO CAPÍTULO: VOLUMES REPRESENTATIVOS DO AR EM MAQUETE DIGITAL.....	52
3.1. INTRODUÇÃO.....	53

3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	61
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
3.4. CONCLUSÃO.....	69
3.5. REFERÊNCIAS.....	69
QUARTO CAPÍTULO: APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL SOBRE MODELOS DE FLUXO DE AR.....	71
4.1. INTRODUÇÃO.....	72
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	83
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	93
4.4. CONCLUSÃO.....	113
4.5. REFERÊNCIAS.....	113
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	115
REFERÊNCIAS.....	116
APÊNDICE I.....	117

RESUMO

NÓBREGA, A. E. de M. Análise de modelos de fluxos de ar para conforto ambiental assistida por simulação computacional em *voxels*. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul.

Os modelos de ventilação são apropriados para se projetarem espaços com conforto ambiental. Com base nesses padrões e de acordo com estudos que relacionam o *design* construído aos aspectos climáticos, as características das construções podem ser orientadas para o aproveitamento dos fluxos de ar trazendo maior adequação ambiental às condições de ocupação humana ao meio construído. O objetivo principal do trabalho reside na simulação computacional dos fluxos de ar sobre os espaços construídos. Esses fluxos são representados em tecnologia de *voxels*, que consistem em unidades mínimas espaciais capazes de descrever graficamente objetos de volumes esparsos. A visualização dos dados volumétricos servem para analisar o aproveitamento da ventilação nas construções. A consulta à tradição de modelos de conforto ambiental da *Princeton University* apoia o desenvolvimento deste trabalho no fornecimento de arranjos de ventilação para estudos testados pela simulação em *voxels*.

Palavras-chave: dados volumétricos, *design* construído, ventilação, volumes esparsos.

ABSTRACT

NÓBREGA, A. E. de M. Analysis of airflow models for environmental comfort assisted by computer simulation in voxels. 2022. Thesis (PhD) - Federal University of Mato Grosso do Sul.

The ventilation models are suitable for designing spaces with environmental comfort. Based on these standards and according to studies that relate the built design to climatic aspects, the characteristics of the buildings can be oriented towards the use of air flows bringing greater environmental adequacy to the conditions of human occupation in the built object. The main objective of the work lies in the computational simulation of air flows over the built spaces. These flows are represented in voxel technology, which consist of minimal spatial units capable of graphically describing sparse volume objects. Visualization of volumetric data are used to analyze the use of ventilation in buildings. The consultation with the tradition of environmental comfort models at Princeton University supports the development of this work in the provision of ventilation arrangements for studies tested by simulation in voxels.

Keywords: volumetric data, built design, ventilation, sparse volumes.

INTRODUÇÃO

O conforto ambiental, considerado como um campo de estudos do ambiente construído, busca o aproveitamento de condicionantes naturais com as intervenções artificiais da ocupação humana. O aspecto climático, principalmente na insolação e a ventilação, tem sido estudado na forma de variáveis para projetos de ambientes para promover adequação e sustentabilidade da permanência e uso do homem sobre os espaços construídos.

Basicamente para a ventilação, as pessoas respiram com as suas construções. As condições de sobrevivência e qualidade de vida e do ar dependem do meio ambiente com a inter-relação com a sustentabilidade no espaço construído.

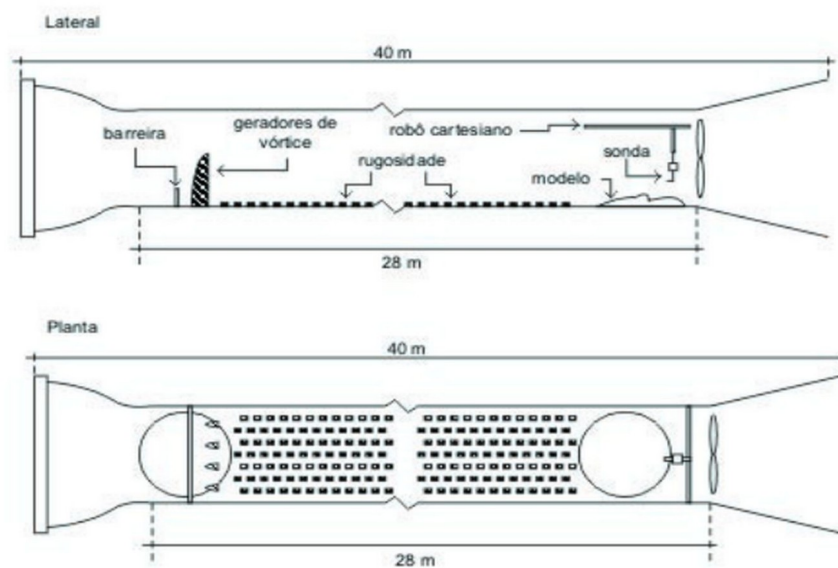
O desenvolvimento sustentável constitui uma grande necessidade global, como nos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável expressos pela ONU – Organização das Nações Unidas, que procuram assegurar a saúde em vários aspectos do ser humano em dependência com a promoção de cidades sustentáveis, com previsão de ação de combate a impactos climáticos (*United Nations*, 2022).

Podem ser considerados vários problemas da ocupação humana com a urbanização crescente que têm interferido na dinâmica ambiental natural, como na impermeabilização do solo, uso de materiais construtivos inadequados termicamente e alteração da vegetação original, que podem ocasionar desconforto térmico (AMORIM, 2010). Nesse contexto, questões bem tratadas de uso dos espaços em relação ao conforto ambiental podem aliviar os impactos sobre as atividades humanas e no meio sob sua influência.

Nguyen, Reiter e Rigo (2014) destacam, para as ciências da construção, a simulação computacional como um método promissor que auxilia no estudo de redução de consumo de energia e de minimização de impactos ambientais.

Para o estudo mais avançado de ventilação sobre edificações, anteriormente ao uso de simulação computacional, utilizava-se o túnel de vento, que continua o seu uso aos dias atuais. Segundo Cóstola (2006), o Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (2020) mantém um túnel de vento específico para conforto ambiental (Figura 1). A máquina para efeito de conforto ambiental utiliza-se de sensores de pressão acoplados às maquetes a serem testadas.

Figura 1. Dimensões do túnel de vento do IPT



Fonte: Cóstola, 2006.

Com o advento de tecnologias computacionais, há a possibilidade de se testarem digitalmente os modelos de ventilação e realizar a substituição do método de simulação de túneis de vento, através da associação de algoritmos que buscam descrever ensaios de propriedades físicas aplicados em *softwares* tridimensionais. Em substituição aos túneis de vento, que podem alcançar valores milionários em indústrias especializadas, usuários podem levantar maquetes digitais para colisão expostas a volumes em movimento como representações de fluxos de ar em programas livres.

A tese busca contribuir com a simulação computacional que ofereça facilitação na troca interativa de dados, rapidez de preparação para os testes e redução significativa de custo ao pesquisador, na utilização de programas livres e bibliotecas de código aberto, baseados em tecnologia explorando as unidades esparsas de *voxels*.

A produção escrita para a tese articula-se em forma de artigos para os capítulos.

No primeiro capítulo “Obras verticais magistrais: a composição desmaterializada de espaços aerados”, o tema do vento se coloca como um fundamento de projetos para composição de espaços. Esse capítulo foi objeto de publicação de uma versão para o dossiê “Espaços Maleáveis” de revista da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em Nóbrega, A. E. de M. & Paranhos Filho, A. C. (2021), “Obras verticais magistrais: a composição desmaterializada de espaços aerados”, PORTO ARTE: Revista De Artes Visuais, 26 (46), 15, <https://doi.org/10.22456/2179-8001.120007>.

O segundo capítulo “Dados em geotecnologia eólica” disponibiliza informações para consulta na *internet* de dados mundiais de ventilação, extraídas de uma ferramenta que utiliza modelagem eólica em grande definição, que serve de aporte de referências geográficas, com o reconhecimento de características do local, para caracterizações em direções de frequências e velocidades do fluxo de ar. Esse segundo capítulo foi enviado como uma versão formatada para a revista Thema, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense (IFSul) e está sendo avaliado em fluxo de trabalho, em avaliação, na rodada 1, no sistema de biblioteca de simulação da revista, com potencial para publicação.

Para o terceiro capítulo “Volumes representativos do ar em maquete digital”, adota-se a escolha de um método de simulação computacional de fluxo de ar, baseado em bibliotecas de código aberto, que permitem manipular dados em *voxels*, unidades mais versáteis na elaboração de volumes esparsos para interagir com construções poligonais virtuais. O terceiro capítulo em formato específico foi enviado para análise na revista Mix

Sustentável, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), encontrando-se em avaliação, na rodada 1.

O quarto capítulo “Aplicação de simulação computacional sobre modelos de fluxo de ar” desenvolve experimentações de simulação de ventilação sobre modelos clássicos de conforto ambiental, organizados pela Universidade de Princeton - *Princeton University*.

OBJETIVO GERAL

Analisar se há uma interface entre referências de modelos clássicos espaciais de conforto ambiental de ventilação da *Princeton University* na reprodução dos fluxos de ar em sistema de simulação computacional por *voxels*.

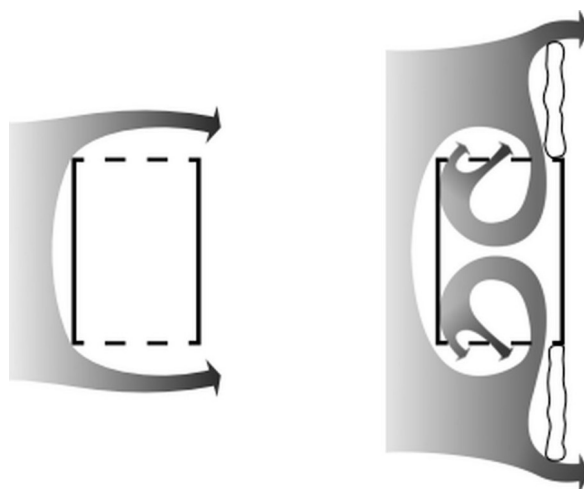
OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Introduzir e discutir o vento para estruturas espaciais. PRIMEIRO CAPÍTULO.
- Consultar fontes de geotecnologias para coordenadas com os parâmetros de ventilação. SEGUNDO CAPÍTULO.
- Apresentar modelos organizados por Olgyay (2015), de *Princeton University*, para estudos de ventilação para o conforto ambiental. TERCEIRO CAPÍTULO.
- Construir e testar os padrões de velocimetria gráfica dos ventos em simulação computacional por *voxel* no *software open source Blender*, de criação de Roosendaal (*BLENDER FOUNDATION*, 2021), que utiliza padrões de *mantaflow*, por Pfaff e Thuerey (2020) e *Open VDB*, de Museth *et al.* (2020). QUARTO CAPÍTULO.

OBJETO DE ESTUDO

Da literatura internacional de conforto ambiental, a obra que se converteu em um dos maiores clássicos, “*Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*”, de Olgyay (2015), da *Princeton University*, reúne modelos hipotéticos, sobre o aproveitamento de ventilação natural (Figura 2), utilizados inclusive como referências de projetos para a atualidade. Especialmente, alguns dos modelos mais conhecidos que analisam os efeitos do paisagismo sobre construções adjacentes foram organizados por Olgyay (2015), mas retirados de White (1945), dos seus estudos pela *Texas Engineering Experiment Station*.

Figura 2. Padrão de fluxo do ar em planta modificado pela vegetação



Fonte: Adaptada de White *apud* Olgyay, 2015.

O objeto de estudo da tese se concentra em analisar os padrões organizados por Olgyay (2015) para fluxos de ar sobre arranjos de edificações, de vegetação adjacente às construções e de interiores com componentes construtivos diante do método de simulação computacional por *voxels*.

PRIMEIRO CAPÍTULO: OBRAS VERTICAIS MAGISTRAIS: A COMPOSIÇÃO DESMATERIALIZADA DE ESPAÇOS AERADOS

Resumo: O ensaio consiste em principalmente abordar obras como *Burj Khalifa* (2010) do projeto de Skidmore, Owings e Merrill e *Bahrain World Trade Center* (2008) do projeto de WS Atkins, que se utilizam de composições aeradas. Na leitura dessas obras arquitetônicas, foram trabalhadas as interpretações de princípios ativos de desconstrução da forma, para permitir a instalação de espaços de ventilação e integração maior com o aspecto bioclimático.

Palavras-chave: arquitetura, cheios e vazios, desconstrução, ventilação.

Abstract: The essay consists mainly of addressing works such as *Burj Khalifa* (2010) from the Skidmore project, Owings and Merrill and *Bahrain World Trade Center* (2008) from the WS Atkins project, which use airy compositions. In reading these architectural works, interpretations of active principles of shape deconstruction were worked out, to allow the installation of ventilation spaces and greater integration with the bioclimatic aspect.

Keywords: architecture, full and empty, deconstruction, ventilation.

1.1. INTRODUÇÃO

O trabalho de pesquisa tem como elemento condutor a discussão do vento como um importante recurso a ser considerado em manifestações de composições espaciais como a arquitetura. Como parte da discussão, são conjugadas aproximações de arte espacial com possibilidades modeladoras do vento, de reproduzir interações em arquitetura acústica e esculturas cinéticas. Para o método de avaliação compositiva formal, os dados de elevações em combinação com os dados de plantas foram apoiados na observação qualitativa que levou à leitura da volumetria das obras. Foi proposto um modelo interpretativo de distribuição do vento sobre o edifício. A consideração das massas com a correlação de elevações e plantas indicam com sua ausência nos espaços, vias liberadas para passagem de ventos. O perfil compositivo formal dispõe da relação de cheios e vazios da interação da arquitetura e do ar, onde a totalidade não se resume apenas ao material, mas ao conjunto formado dessa materialidade com os vazios significativos do imaterial para o vento.

A arquitetura pode ser considerada uma arte que atende a requisitos de funcionalidade, para abrigar atividades humanas. Como instalações espaciais, em sua maior parte, colocam-se em cenários urbanos, dialogando com condicionantes como a forma do terreno, a natureza que o cerca e objetos construídos de seu entorno, tendo o ser humano como expectador, parte da obra e ocupante. A arquitetura como uma manifestação da cultura técnica pode conduzir as suas formas expressando e interagindo com o aspecto ambiental do vento. O fator bioclimático da ventilação tem sido estudado por variáveis em projetos de ambientes onde a geometria dos objetos construídos representam uma grande influência na modelagem e acesso do fluxo do ar. A renovação de oxigênio e a exaustão do ar viciado são necessidades básicas para manter a qualidade ambiental nos ambientes. Se o fluxo do ar encontra barreiras de formas, o resultado pode ser de áreas estagnadas e pouco respiráveis.

As cidades recebem a passagem do vento em direções predominantes do fluxo de ar, mas que apresentam principalmente pela disposição de ruas e distribuições de massas de construções, a formação de trechos de correntes, de desvios e de estagnações, ocasionando microclimas diversos. As ilhas de calor urbanas são uma demonstração dessa particularização para o clima, segundo Amorim (2010). Em determinados locais, a implantação de edifícios criando obstáculos para o vento e a escassez de áreas verdes livres são ainda restrições para uma dinâmica mais equilibrada do meio urbano com aspectos ambientais. Para a distribuição de ventilação na textura de uma cidade, zonas em planta e elevação se configuram em predominância de diversas velocidades do ar no espaço urbano em diferentes escalas.

Em planta, na escala de edifício, as áreas mais livres têm mais velocidade e renovação do ar enquanto que locais com volumes como barreiras levam a uma maior estagnação (OLGYAY, 2015). Dos estudos clássicos bioclimáticos desse autor da *Princeton University*, são apresentados testes com maquetes em túnel de vento para analisar a geração de áreas de fluxo e de estagnação do ar em conformações de espaçamentos de construções. São representadas as linhas aerodinâmicas quanto mais se aproximam, maiores são as velocidades do fluxo de ar, pelo princípio de conservação da massa (EASTLAKE; DAHMEN, 2006), e mais laminares os escoamentos, ocorrendo na pressão dinâmica positiva. O inverso, com a separação de linhas aerodinâmicas, retrata a tendência a estagnação que torna os escoamentos mais rarefeitos e turbulentos da pressão dinâmica negativa.

Em elevação, em uma escala de cidade, os edifícios compõem uma rugosidade aerodinâmica (CÓSTOLA, 2006). Quanto maiores as alturas do fluxo de ar e não sendo desimpedidas pelo relevo e outros elementos, menores as rugosidades aerodinâmicas e maiores as velocidades aéreas, que aumentam inclusive o potencial para produção de energia elétrica a partir do vento.

Nesses estudos, de ventilação de cidades e edifícios, percebe-se que se geram sistemas entre a geometria dos objetos e o fluxo de ar, onde a ventilação de um edifício depende de outro e que elementos de paredes interagem entre si com o vento. Como um jogo de claro e escuro, as áreas ventiladas são da “luz” do vento, enquanto as áreas posteriores são consideradas da “sombra” do vento. Os diferentes matizes de vento dependem da forma e posição de objetos. Frota e Schiffer (2001) e Cóstola (2006), reconhecem a importância desses estudos da *Princeton University*, que referenciam em suas obras. No avanço desses testes, há sofisticados túneis de vento e de água que simulam a ventilação com instrumentos, de medição de pressão e velocidade, associados a computadores (CÓSTOLA, 2006).

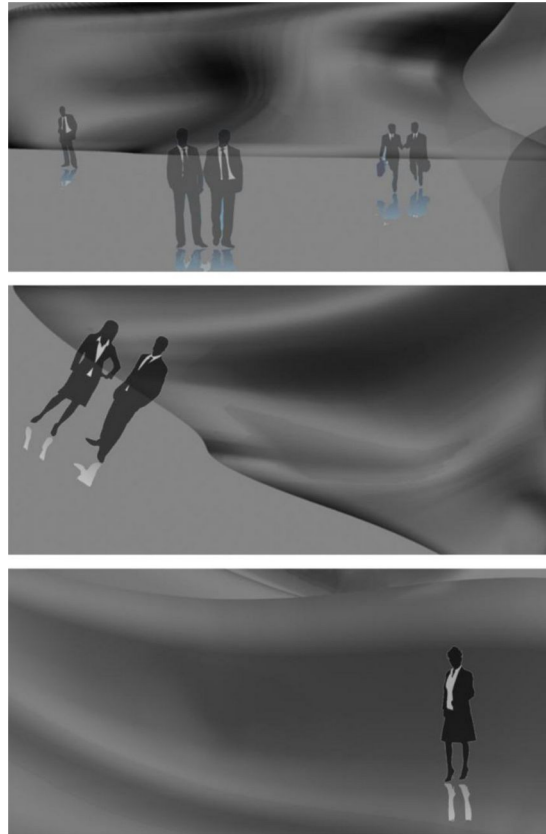
Ocorre ainda o apoio tecnológico de algoritmos computadorizados especializados para analisar alternativas de projetos para ventilação em combinação com eficiência em proteção solar (CHRONIS, LIAPI, SIBETHEROS, 2012). Com esses algoritmos, as análises de vento e insolação vão selecionando e interagindo com alternativas estreitamente ligadas às geometrias propostas e de espaçamentos de edifícios no processo. Nguyen, Reiter e Rigo (2014) e Kormaníková *et al.* (2018) indicam estudos de simulação computadorizada que se apoiam em modelos físicos para que projetos sejam mais eficientes para o aproveitamento do ar. Para essa área de análise de projetos, são destacados os programas de Fluidodinâmica Computacional, em inglês *Computational Fluid Dynamic (CFD)*. Diante dessas tecnologias mais avançadas sobre o vento, no possível exercício criativo de interação criador e algoritmo de máquina, vão surgindo alternativas compositivas em formas digitais que podem se converter em instalações reais (Figura 1.1).

Além do lado funcional do vento nas instalações da arquitetura, a consideração desse importante elemento ambiental tem sugerido formas mais maleáveis.

O ensaio objetiva analisar exemplares instalados de arquiteturas verticais magistrais onde a forma geométrica desconstruída do objeto possa refletir a busca pela maior integração

com a ventilação natural. O apoio interpretativo segue a proposta de simular espaços aéreos que representam a intenção de desconstrução para o corpo do edifício.

Figura 1.1. Formas moldadas por recursos digitais que simulam vento



Fonte: Stavridou, sob licença *Creative Commons*, 2015.

Aproximações de arte e vento são ricas em expressões e interações. São desenvolvidas esculturas cinéticas, biônicas e de arquitetura acústica. Uma expressão se destaca utilizando formas de uma arquitetura aerodinâmica para aproveitamento de acústica da ventilação natural – o Pavilhão Eólico Acústico Aeolus (Figura 1.2), no Reino Unido, de 2011, do escultor multidisciplinar britânico Luke Jerram, conhecido por produzir esculturas que contenham interesse científico, como modelos gigantes de vidro de vírus e bactérias.

Figura 1.2. Aeolus no projeto *Eden*, em aço inoxidável e fios de náilon, de 9x3x6 m, exposto em Cornualha, no Reino Unido, em interação com o público, do projeto de Luke Jerram



Fonte: *Site Acoustic Wind Pavilion | Aeolus by Luke Jerram, 2022.*

Utilizando tecnologias computacionais para sua concepção e garantindo a sua instalação itinerante para exposições, foi realizado com a colaboração de cientistas acústicos da *University of Salford* e da *University of Southampton* e em parceria com *Arup*, *Sculpture Factory*, *Outokumpu* e *Vista Projects*, o pavilhão de Luke Jerram. Na instalação, partes de 316 tubos de aço inoxidável sobre o exterior de um arco de dupla curvatura são presos às cordas de náilon esticadas e ligadas a postes. A obra desperta a curiosidade natural de propriedades acústicas como aportes de disciplina científica (BELANTARA; DRUMM, 2012).

Mesmo os instrumentos de sopro e harpas eólicas não constituem objetos inéditos. Outras obras contemporâneas apesar de serem esculturas acústicas com o vento, normalmente, excluem a presença humana em sua composição. O diferencial do pavilhão *Aeolus* foi marcado pela possibilidade de interação e convergência sonora ao público que se faz presente no interior de sua cúpula irregular, sendo a interiorização dos espaços um importante

caracterizador de uma escultura para uma experiência arquitetônica. Entre seu arco de dupla curvatura, a obra causa uma vibração do efeito mais tridimensional dos sons do vento da paisagem sobre os visitantes internos.

Como manifestações de esculturas cinéticas inspiradas no mundo vivo, as instalações móveis acionadas pelo vento natural são propostas pelo neerlandês Theo Jansen desde a década de 1990 até a atualidade, os *strandbeests*, as bestas da praia, como traduzido do neerlandês, em que tubos plásticos são incorporados à estrutura de um esqueleto para criar pernas articuladas e pequenas velas em tecido funcionam como elementos propulsores eólicos para mover a instalação sobre a areia e fazê-la voar. O autor Theo Jansen refere-se à sua obra artística dinâmica como “novas formas de vida” (CAETANO, 2019). Inclusive, o artista segue criando denominações em latim, relacionadas a animais, para nomear suas obras, como *Animaris mulus* e *Animaris rhinoceros lignatutus*.

O *strandbeest Umerus*, com seus curiosos materiais plásticos, de pés de garrafas e de válvulas de controle de fluxo de ar, além de sua ondulatória barbatana dorsal, foi desenvolvido para se deslocar na areia (Figura 1.3) enquanto o Ader, que homenageia o inventor ligado à aviação Clement Ader (1841-1926), além de se deslocar em terra, levanta voo (Figura 1.4).

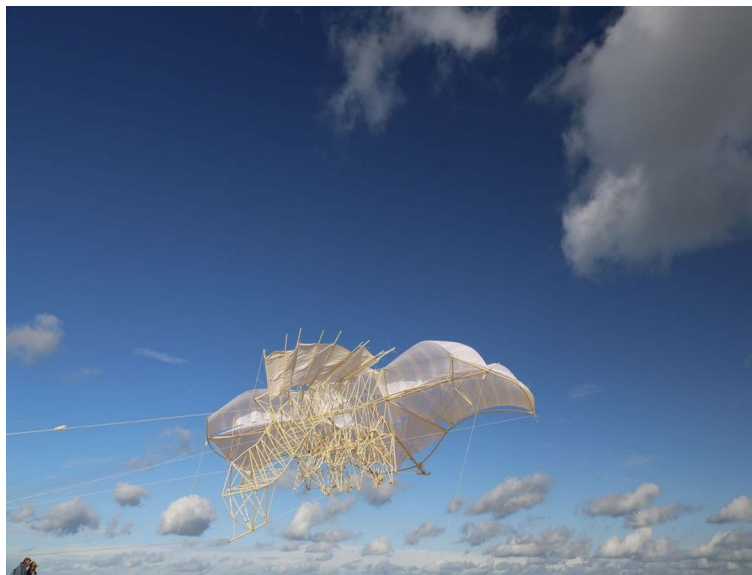
Em relação a concepção do vento para um fundamento direto de movimento para vida, são observados fenômenos ecológicos e evolutivos. Biologicamente, o vento pode funcionar como um elemento do meio ambiente para promover a vida como ocorre nas dispersões aéreas de sementes e frutos de estruturas leves, eventos da chamada anemocoria. Os frutos do dente-de-leão, *Taraxacum officinale*, possuem a forma geral de um balão em miniatura que garante o seu transporte pelo vento para poderem se alastrar em uma área com menos competição entre espécies vegetais.

Figura 1.3. O terrestre *Umerus* em PVC, abraçadeiras de náilon, plástico, dracon, cordas e garrafas SPA, de 4x1,2x2 m, sobre a areia de Theo Jansen



Fonte: *Site Strandbeest: Home*, 2022.

Figura 1.4. O aéreo Ader, em PVC, abraçadeiras de náilon, plástico, dracon e cordas, de 9x4,4x3,1 m, com uma autonomia terrestre de Theo Jansen



Fonte: *Site Strandbeest: Home*, 2022.

Não somente elementos vegetais evoluem com o vento. Respostas evolutivas de aves ao vento como ossos menos densos e considerados pneumáticos encontram um paralelo nas

estruturas plásticas leves e vazadas de Theo Jansen, da mesma forma, que as velas funcionam como asas.

Mais analogias podem ser traçadas comparando seres vivos com *strandbeests*. Em busca de um mecanismo inteligente, mesmo as válvulas com pistões dos *strandbeests* são comparadas às células nervosas por funcionarem como sensores de vento e água, modificando movimentos, mas não podem representar elementos que estejam propriamente vivos.

No entanto, um dos fundamentos mais marcantes de criação se reporta à capacidade desse artista em gerar uma disposição anatômica geral que produz comportamentos de deslocamento em terra e algumas no ar que não se confundem com movimentos aleatórios. Os eixos anatômicos de distribuição das peças tubulares em combinação intencional com o posicionamento das velas criam organizados passos de “criaturas terrestres” e voos característicos para “seres aéreos”. As estruturas *strandbeests* movem-se com desenvoltura não porque são vivas, mas porque possuem formas construídas anatomicamente que encontram paralelos em estruturas vivas como elementos biônicos. Portanto, os *strandbeests*, ao não se sugerirem metaforicamente como vida, podem ser relacionados às formas anatômicas biônicas.

O escultor cinético estadunidense Anthony Howe constrói delicadas estruturas em metal que se movem em um ritmo sincronizado em uma coreografia aproveitando a energia do vento, provocando um efeito hipnótico em seu público. O artista se tornou muito conhecido pela criação do conjunto da pira olímpica movida pelo vento do Rio 2016, nas Olimpíadas no Brasil. O *design* de pesos e contrapesos das estruturas especialmente projetado contribui para a incrível sincronia de cinética dos ventos. A concepção da obra metálica, que alcançou 7,6 m de altura, na instalação em Montreal, Canadá, conhecida como *Di-Octo II* como versão elaborada em 2017, por Anthony Howe, reúne as características de esculturas

cinéticas do vento desde seus testes (Figura 1.5), em que as formas se movem como em um jogo de transformação geométrico, de representação da energia do vento.

O poder da mobilidade do vento vai transformando as geometrias da escultura de Anthony Howe em elegantes e coordenadas evoluções. O *design* interativo da arte com o ambiente do exercício de descobrir e redescobrir formas fornece ao mesmo tempo uma visão móvel material e imaterial para o público. Na mobilidade interativa, o objetivo final se faz com o pensamento sobre a interação do progresso temporal da obra (CAO, 2019).

Figura 1.5. Di-Octo em fase de estudo pelo escultor cinético Anthony Howe



Fonte: Site Anthony Howe, 2022.

Se, na própria natureza, os geólogos reconhecem o fenômeno de erosão eólica, quando os ventos como elementos fluidos e dinâmicos “esculpem” e retiram material sobre as rochas em ação de intemperismo, podendo provocar imagens de grande plasticidade e maleabilidade.

Cabe uma reflexão sobre o potencial de materialidade da obra. A desconstrução ativa e consciente para os pulsos do vento, para além de um fenómeno natural e de reforço de engenharia, pode refletir um viés filosófico incorporado na estética contra o logocentrismo do material, assumindo a discussão entre o cheio e o vazio, como ambos plenamente significativos. O positivo da forma construída significa o negativo do vento. E o positivo do vento o negativo da forma. Essa dicotomia irreverentemente se dinamiza, porque a forma conduz o vento que cobra o espaço em torno para fluir.

Um pensamento interessante pode ser extraído de Blauth (2005) que argumenta sobre as presenças e ausências de materialidade que, ao mesmo tempo em que conferem a unidade de uma obra, criam ritmo.

Para Blauth (2005, p. 106), o espaço não é neutro, “gera uma interioridade, instaurado sob o signo do vazio, sob o viés do ritmo da ação e da inação, da presença e da ausência”.

Sogabe (2008, p. 133) refere-se à construção do espaço vazio como sentido ativo na obra, chamando mesmo de “um vazio-cheio, cheio de ar, cheio de átomos, cheio de energia”.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

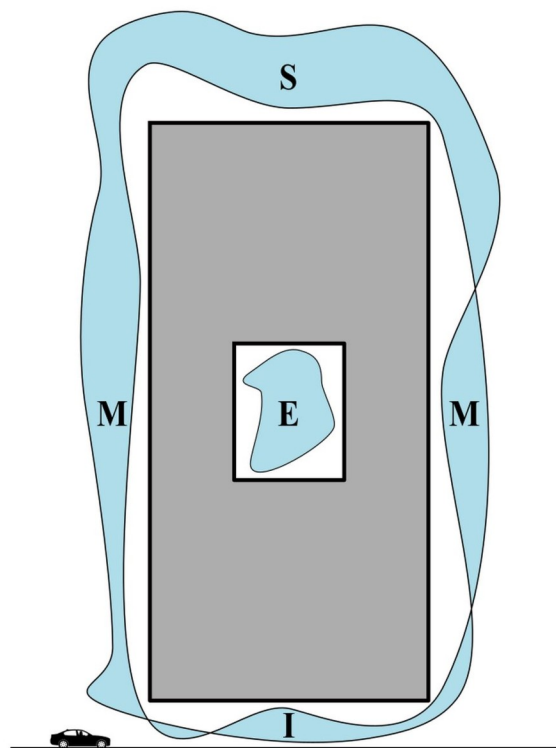
Para compor o ensaio, foram selecionados exemplares emblemáticos introdutórios para serem analisadas as composições adotadas, no sentido de reconhecer a integração da ventilação de elementos construtivos na paisagem urbana. Para a análise, foi proposto um modelo interpretativo que distribui espaços de ventilação em relação ao edifício (Figura 1.6).

O objeto representa a situação básica para abertura de ventilação com a clássica composição de um edifício em cobertura, corpo e base. O superespaço aerado corresponde à parte de ventilação acima da cobertura. O mesoespaço de ventilação aos entornos das

fachadas exteriores que delimitam o corpo e o endoespaço de ventilação ao vazado para as faces internas do corpo. O infraespaço de ventilação remete ao vão da base.

As disposições do vento sobre os objetos a serem estudados serão submetidas a uma análise qualitativa conjunta dos documentos de planta e elevação.

Figura 1.6. Modelo esquemático de espaços aerados ao edifício em elevação



S - SUPERESPAÇO
M - MESOESPAÇO
E - ENDOESPAÇO
I - INFRAESPAÇO

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

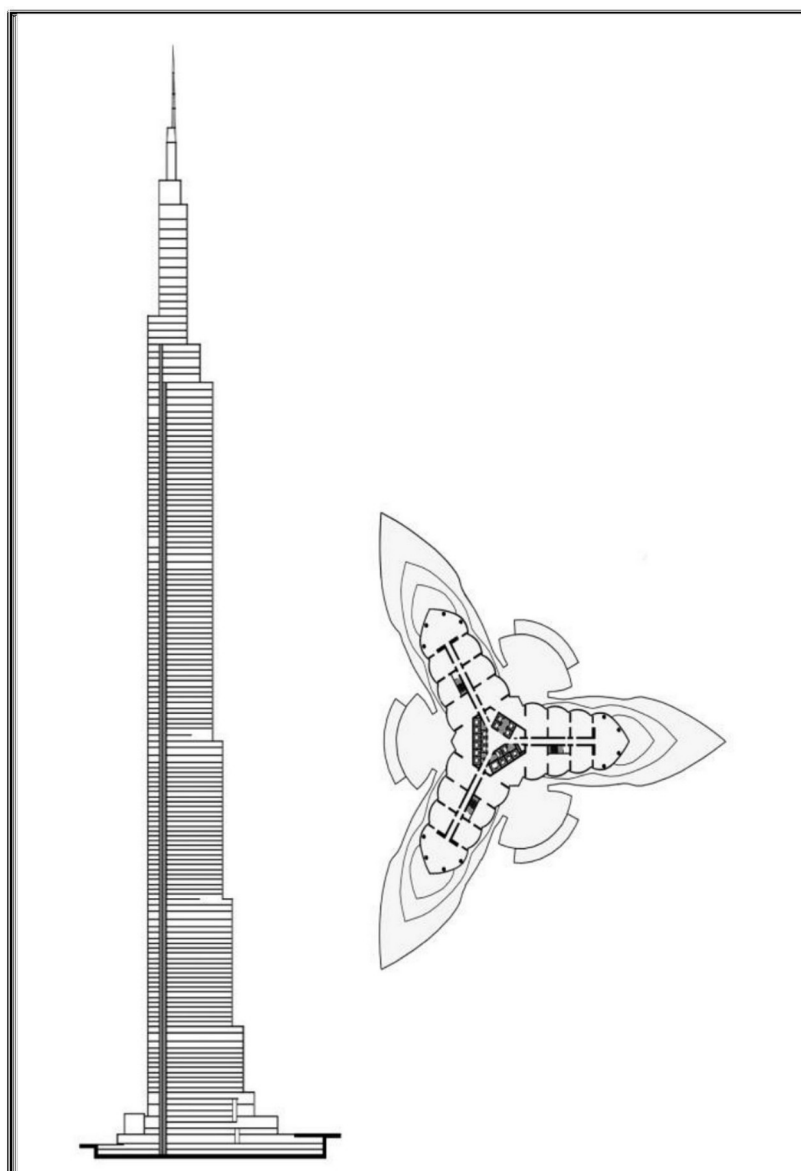
Seguindo a análise para torres emblemáticas, foi considerado que, quanto mais alto um objeto arquitetônico, menor a influência do solo e da rugosidade aerodinâmica. No projeto de torres mais elevadas, faz-se sentir volumetricamente que as velocidades superiores do

vento ocorrem em pontos mais elevados e com grandes e perigosos esforços aerodinâmicos. Frente ao desafio de altas velocidades do ar em áreas de alturas consideráveis, foi levantado o maior exemplar do planeta, de 828 m de altura, o edifício *Burj Khalifa* (2010) de Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, projeto de Skidmore, Owings e Merrill (Figura 1.7). Para o método de análise, que partiu de uma observação qualitativa comparando a disposição de plantas que ocorrem ao longo da elevação, foi percebida que a composição aerodinâmica apresenta um estreitamento do objeto total, com as plantas diminuindo de volume quanto mais próximo ao topo da obra. A lógica de uma pirâmide com a base no solo, para que suas partes mais estreitas e mais altas não venham a oferecer sérios bloqueios para atuação da ventilação mais forte. Esse partido construtivo representa uma forma de compensar o crescimento de velocidade do vento atuando sobre as torres, desafiando a integridade e evitando custos exorbitantes de sua estrutura, se tivesse mais volume material nas partes mais altas.

Como foi proposto, significa dizer que as ventilações de mesoespaço estão mais espaçadas na medida em que as velocidades se tornam maiores e os fluxos mais altos. Os ventos mais altos do mesoespaço, por não serem obstruídos e dissipados, acabam por beneficiar áreas urbanas restantes. De uma leitura simplificada, em sua elevação, a obra apresenta o mesoespaço se unindo com o superespaço e formando o sinal de circunflexo “^” do vazio ativo para ventilação em volta do prédio.

Para essas grandes alturas, não necessários contraventamentos, que criam novas configurações visuais, para que objetos não se desprendam das fachadas. Além da aerodinâmica considerada, prédios estão se utilizando de instalações para produção energética que inclusive pode alterar a concepção de sua própria forma.

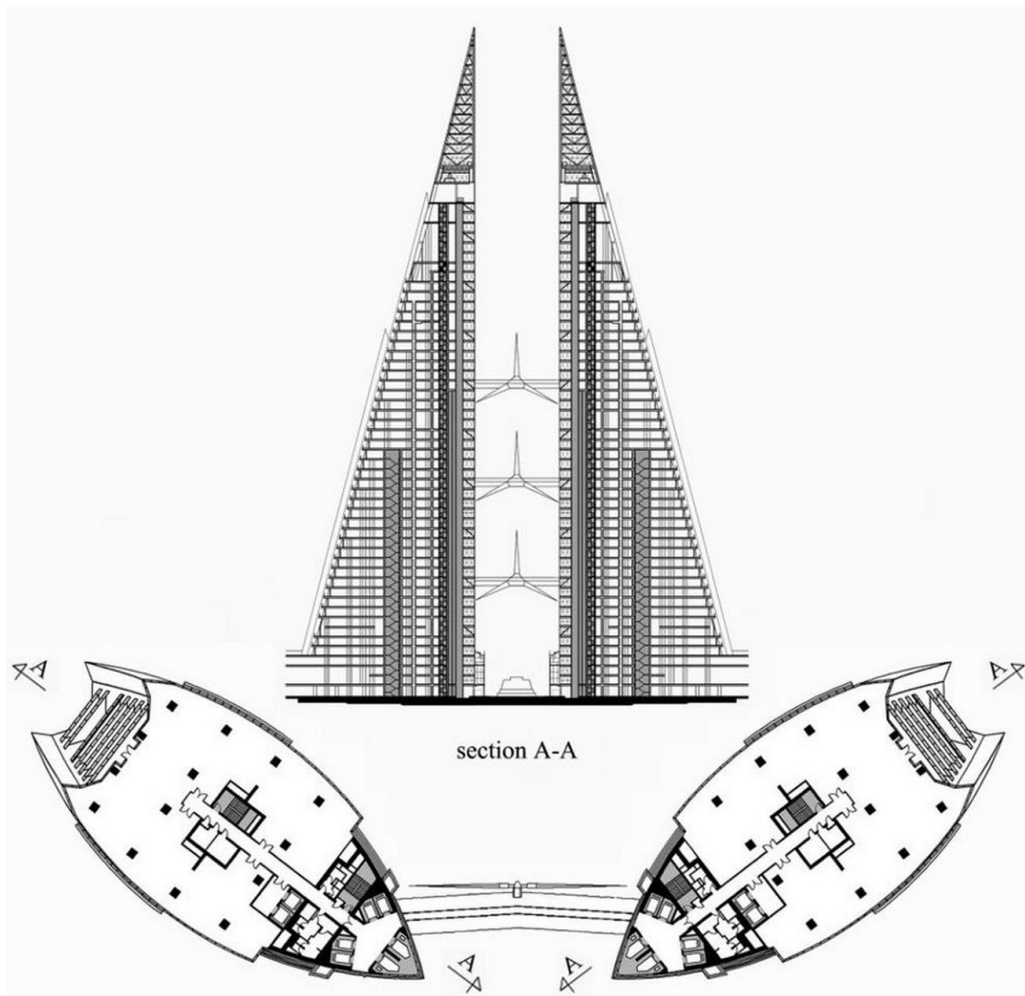
Figura 1.7. Seção e planta do *Burj Khalifa* do projeto de Skidmore, Owings e Merrill



Fonte: Szolomicki e Golasz-Szolomicka, sob licença *Creative Commons*, 2019.

O próximo exemplar analisado, o edifício do *Bahrain World Trade Center* em Manama, Bahrein, no Oriente Médio, ostenta 240 m, foi idealizado por um grupo londrino, WS Atkins, onde utiliza aerogeradores integrados ao conjunto dos dois blocos (Figura 1.8).

Figura 1.8. Seção e planta do *World Trade Center* do projeto de WS Atkins



Fonte: Szolomicki e Golasz-Szolomicka, sob licença *Creative Commons*, 2019.

Também, para esse modelo, ocorreu a diminuição de volumes de planta no sentido da subida, com o estreitamento da massa e aumento do mesoespaço quanto mais ao topo. Mas o destaque da análise da instalação consiste na exploração intencional do endoespaço significativo na composição. O espaçamento central entre os blocos pode constitui um *insight* geométrico excelente, porque além de direcionar o vento para as hélices internas, contribuiu para canalizar parte do fluxo para a cidade. Simplificadamente, há o mesoespaço, o endoespaço e o superespaço em união compondo a letra “M” como espaços vazios envolvendo a obra.

Segundo Bobrova (2015), na Europa, há extensas centrais eólicas para consumo energético no meio urbano que, no entanto, não conseguem atender às cidades com a carga de energia necessária para a população. Diante desse quadro, a incorporação de soluções de energia na própria interioridade do corpo do edifício tem sido uma iniciativa reconhecida de eficiência energética, não somente no continente europeu, mas no mundo inteiro, para desonerar as centrais eólicas.

No detalhe, as hélices representam a sinonímia entre a materialidade e a imaterialidade, o jogo cinético, a interface entre o cheio e vazio no encontro mais amalgamado dessas fronteiras. O material que se move em todo corpo com o vento. Em relação às peças de abertas a fechadas, entre os cheios e vazios híbridos que se alternam das faces de um edifício, como portas, janelas e claraboias, podem constituir soluções para aproveitar os campos de ventilação para o interior da edificação como elementos do contorno dos espaços de vento.

1.4. CONCLUSÃO

Comparando-se com as “luzes” do vento, essas duas obras possuem mais “luz” de vento quanto mais ao topo, com as “sombras” de vento à base. Na segunda obra referenciada, há também a penetração da “luz” de vento no interior, tendo as turbinas mais em seu *core*, por serem cinéticas, como produtoras de “cintilações” de vento.

O ensaio percorreu as camadas da arquitetura, do tratamento bioclimático e do potencial de materialidade. A arquitetura não necessariamente implica soluções bioclimáticas. A desconstrução consciente pode alcançar objetos de arte que não signifiquem a arquitetura. Pode haver a desconstrução pela desconstrução, sem captar um sentido ambiental de captação de ventos e sem qualquer intenção estética. No entanto, em situações mais ideais, pode haver

a interseção de sentidos com a relação harmônica entre esses lugares de significados para a arquitetura.

As análises de composições dos exemplares interpretados apontaram as geometrias materiais e imateriais orientadas que resultaram em trabalhos de espaços aerados, como estreitamentos, espaçamentos, vazados e elementos cinéticos como estratégias compositivas que, ao favorecer espaços ventilados, tornaram-se mais responsivos para o sentido bioclimático. A desconstrução assumiu nessa pesquisa um importante papel na composição da análise das formas por ser um significativo espaço para proporcionar interação com o vento.

Assim como as obras dos escultores cinéticos que orientam a energia de sua arte pela natureza do vento, as exteriorizações urbanas e manifestações arquitetônicas, das grandes às mais simples obras, devem promover estímulos para favorecer composições criativas e maleáveis de instalações de espaços de ventilação, estando as formas construídas e desconstruídas da arquitetura com a possibilidade de se beneficiarem com a tecnologia e a ciência do vento.

1.5. REFERÊNCIAS

Acoustic Wind Pavilion | Aeolus by Luke Jerram. Disponível em: <https://www.lukejerram.com/aeolus/>. Acesso em: 25/02/2022.

AMORIM, Margarete C. C. T. Climatologia e gestão do espaço urbano. **Mercator**: Revista de Geografia da UFC, Fortaleza, v. 9, n. 1, p. 71-90, 2010.

Anthony Howe. Disponível em: <https://www.howeart.net/>. Acesso em: 25/02/2022.

BELANTARA, Amanda; DRUMM, Ian. Touring a singing sculpture to promote acoustics. **Acoustics 2012**, Apr 2012, Nantes, France.

BLAUTH, Lurdi. Ativar o vazio/cheio numa produção gráfica pessoal. **PORTO ARTE**: Revista de Artes Visuais, v. 13, n. 23, 2005.

BLENDER FOUNDATION. **blender.org – Home of the Blender project – Free and Open 3D.** Disponível em: <https://blender.org>. Acesso em: 16 jan. 2021.

BOBROVA, Darya. Building-integrated wind turbines in the aspect of architectural shaping. **Procedia engineering**, Amsterdam, v. 117, p. 404-410, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.185>

CAETANO, Murilo M.. **A gênese dos Strandbeests**: alguns aspectos sobre os limites entre organismos e máquinas. 2019. Dissertação (Mestrado em Antropologia Social) - Universidade Federal de Santa Catarina.

CAO, Yang. Artistic Characteristics of Dynamic Interaction Sculpture Design. In: **1st International Symposium on Innovation and Education, Law and Social Sciences (IELSS 2019)**. Atlantis Press, 2019. p. 378-382.

CHRONIS, Angelos; LIAPI, Katherine; SIBETHEROS, Iohannis. A parametric approach to the bioclimatic design of large scale projects: The case of a student housing complex. **Automation in construction**, Amsterdam, v. 22, p. 24-35, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.09.007>

CÓSTOLA, Daniel. **Ventilação por ação do vento no edifício**: procedimentos para quantificação. 235p. Tese. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

EASTLAKE, Charles N., DAHMEN Sílvio R. A visão de um engenheiro aeronáutico acerca da sustentação, Bernoulli e Newton. **Física na escola**. São Paulo, Vol. 7, n. 2, p. 52-57, 2006.

FROTA, Anésia B.; SCHIFFER, Sueli. **Manual de conforto térmico**. 5. ed. São Paulo: Nobel. 2001.

KORMANÍKOVÁ, Lenka et al. Parametric wind design. Licensed under Creative Commons. **Frontiers of Architectural Research**, v. 7, n. 3, p. 383-394, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2018.06.005>

MUSETH, Ken et al. **OpenVDB**. Disponível em: <http://www.openvdb.org>. Acesso em: 19 nov. 2020.

NGUYEN, Anh-Tuan; REITER, Sigrid; RIGO Philippe. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 113, p. 1043-1058, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>

OLGYAY, Victor. **Design with climate**: bioclimatic approach to architectural regionalism-new and expanded edition. Princeton University Press, 2015. Kindle Edition.

PFAFF, Tobias; THUEREY, Nils. **mantaflow**. Disponível em <http://www.mantaflow.com>. Acesso em: 19 nov. 2020.

SOGABE, Milton. O espaço das instalações de arte. **ARTECH 2008**, p. 129, 2008.

STAVRIDOU, Anastasia D. Breathing architecture: Conceptual architectural design based on the investigation into the natural ventilation of buildings. **Frontiers of Architectural Research**, v. 4, n. 2, p. 127-145, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2015.03.001>

Strandbeest: Home. Disponível em: <https://www.strandbeest.com>. Acesso em: 25/02/2022.

SZOŁOMICKI, Jerzy; GOLASZ-SZOŁOMICKA, Hanna. Licensed under Creative Commons. Technological Advances and Trends in Modern High-Rise Buildings. **Buildings**, Basel, v. 9, n. 9, p. 193, 2019. Licença de Creative Commons. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings9090193>

UNITED NATIONS. Disponível em: <https://www.un.org>. Acesso em: 03/06/2022.

SEGUNDO CAPÍTULO: DADOS EM GEOTECNOLOGIA EÓLICA

Resumo: Os dados em geotecnologias eólicas são muito úteis para caracterizar parâmetros para a ventilação. Atualmente, estão sendo organizadas, customizadas e disponibilizadas informações em documentações eletrônicas sobre o vento e insolação que possibilitam tomadas de decisão para investimentos em produção de energia, analisadas em meso e microescala. O trabalho objetiva explorar recursos de obtenção de dados eólicos que possam servir de base para adequação de estudos em um ambiente determinado com coordenadas conhecidas. Para o método exploratório, seleciona-se o sistema *GWA – Global Wind Atlas*. Como resultados, foram colhidas amostras de dados que formularam parâmetros de médias de velocidades e aproximação de direções do vento locais de pontos específicos. Para a área de Ladário-MS selecionada para aplicação no sistema *GWA*, foi constatado um desconforto térmico, por baixas velocidades de vento, influenciado pelas barreiras orográficas da serra do Urucum e do relevo do Taquaral.

Palavras-Chave: dados eólicos, direção do vento, *Global Wind Atlas*, velocidade do vento.

Abstract: The data in wind geotechnologies are very useful to characterize parameters for the ventilation. Currently, information is being organized, customized and made available in electronic documentation on the wind and sunshine that enable decision making for investments in energy production, analyzed in meso and microscale. The work aims to explore resources for obtaining wind data that can serve as a basis for adapting studies in a given environment with known coordinates. For the exploratory method, the *GWA - Global Wind Atlas* system is selected. As a result, samples of data were collected that formulated parameters for mean velocities and approximation wind speed of local wind directions of specific points. For the area of Ladário-MS selected for application in the *GWA* system, a thermal discomfort was verified, due to low wind speeds, influenced by the orographic barriers of the Urucum mountains and the Taquaral relief.

Keywords: wind data, wind direction, *Global Wind Atlas*.

2.1. INTRODUÇÃO

Existem padrões únicos eólicos que ocorrem em determinados locais e seus dados podem ser armazenados em *sites* de projetos que envolvem estudos analíticos. Da mesma forma, há constantes de insolação pela *internet* que podem ser extraídos de pontos do planeta. De mapas customizados mais regionais até disposições de informações totalizadoras do planeta Terra, em meso e microescala, há investimentos na construção de ferramentas de geotecnologias eólica e solar que podem auxiliar na tomada de decisão em temas energéticos de forma acessível para o usuário final.

Para Carlos Santamarina e Cho (2011), governos envolvendo vários países estão crescentemente realizando estudos energéticos para seu gerenciamento nas populações. Nesse contexto, esses mesmos autores e Fragaszy *et al.* reconhecem (2011) a “geotecnologia energética” como uma base tecnológica incorporável a uma estratégia de qualificação de energia mundial.

Carlos Santamarina e Cho (2011) enquadram o vento como uma fonte de recurso energético renovável que vinha sendo estudado no século passado pela geotecnologia clássica para construção de *wind mills* (torres eólicas), mas a pressão crescente de consumo populacional coloca essa proposta como saturada e está apontando para uma geotecnologia com as necessidades geotécnicas energéticas mais bem atendidas frente a competição de espaços para produção de alimentos e de demanda de água.

Deve-se prever o máximo de eficiência de ventilação por uma geotecnologia energética eólica para economia de espaço sobre parques de produção energética com o vento.

De uma forma mais global e muito generalizada, os ventos mais juntos à superfície terrestre seguem paralelos às latitudes, sendo influenciados pela rotação terrestre e pelas diferenças de temperatura e pressão da inclinação nessas latitudes em relação à insolação, no

sentido de deslocamento para Oeste (alísios) na faixa intertropical, com os ventos invertendo esse sentido para Leste (contra-alísios) nas células polares e zonas aproximadas.

Para o estudo com maior detalhe de ventilação selecionado para o Brasil, de início, foi sondada a referência nacional de potencial eólico. A ferramenta “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro – Simulações 2013”, fornecida pela Eletrobras (2020) – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (Cepel), apresenta dados de vento como velocidade média anual e direção predominante.

A disposição do potencial eólico se apresenta de forma dinâmica e varia no espaço por pontos. No entanto, o atlas nacional (ELETROBRAS, 2020) oferece dados georreferenciados em pranchas representadas graficamente, mas não permite a escolha de um ponto fora de customização, de modo que a metodologia empregada expande os dados de um ponto único para uma vasta área de pontos, não necessariamente com informações compatíveis (Figura 2.1).

Figura 2.1. Rosa dos ventos anual



Fonte: Eletrobras, 2020.

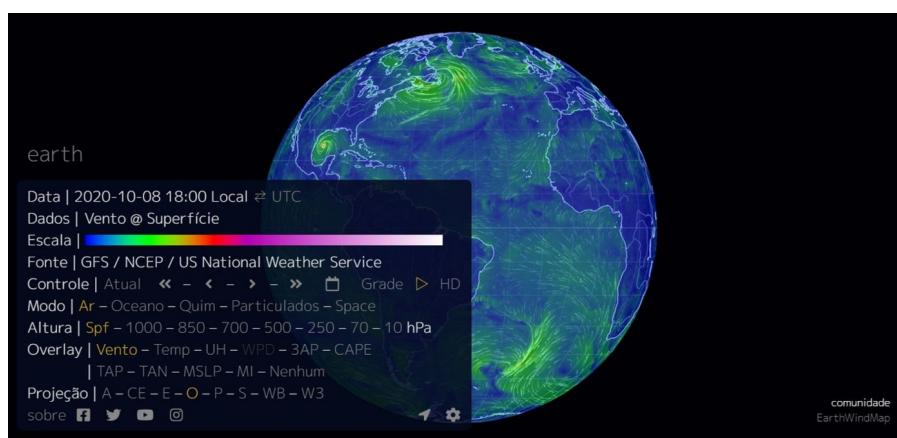
Apesar de haver pranchas para consulta e arquivos para *download*, não há ainda um sistema interativo *on-line* para o atlas nacional.

Pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2005), a Norma NBR 15220, de “Desempenho térmico de edificações”, mesmo apresentando o mapa de zoneamento bioclimático brasileiro, não especifica velocidades e direções do vento em porções mais pontuais e aproximadas no Brasil.

Dados internacionais tornados públicos em expansão como uma mixagem de multimídia estão impactando a natureza da informação (BENES, 2013).

Internacionalmente, no *site earth.noolschool.net*, em “*An animated map of global weather conditions*” (BECCARIO, 2020a), há a possibilidade de levantamento de dados relacionados à ventilação em consulta como fatores espaço-temporais interativamente (Figura 2.2). O dispositivo de interatividade que foi desenvolvido para apoiar esse *site* se utiliza de código aberto em um projeto hospedado no *GitHub* (BECCARIO, 2020b), apoiado por supercomputadores.

Figura 2.2. Controles de manipulação no *site earth.noolschool.net* acessados ao se clicar no termo *earth*, à esquerda.



Fonte: Beccario, 2020a.

Na barra “Controle”, o usuário pode colher dados de diversos momentos com a precisão do dia.

Sobre as ferramentas, em “Modo”, o usuário explora fluxo de ar. Se combinado com química, que capta monóxido de carbono, pode inclusive compreender o indício de percursos, em dias encadeados, de incêndios levados pelos ventos em terrenos e permite partir para ação de inteligência de combate ao fogo.

Essa ferramenta de base *open source* pode ser considerada como uma fonte *OSINT* (*Open Source Intelligence*) e de caráter midiático, por apresentar os dados em animação, que serve como ponto de partida para tomada de decisão para diversos problemas ambientais.

Hulnik (2010) aponta que mesmo que grandes quantidades de dados sejam imprecisas e decorrentes de desinformação, se o *OSINT* for utilizado corretamente, torna-se crucial para coleta de inteligência para tomadas de decisão.

No entanto, com todo o poder de representação de dados dessa ferramenta, as consultas a esse mapa animado climático de Beccario (2020a) retornam com análises de buscas de pontos de qualquer lugar do planeta, mas precisando ser compiladas manualmente, dia a dia, as informações para formar gráficos de padrões de semanas, meses e anos.

Nesse cenário, destaca-se a iniciativa do sistema “*GWA – Global Wind Atlas*” (<https://globalwindatlas.info/>), da Universidade Técnica da Dinamarca - *Danmarks Tekniske Universitet* (DTU, 2020). Por esse mapa *on-line*, é possível extrair dados mundiais de ventos de forma rápida, em alturas relativas, de compilação de informações em torno de 10 anos. Os dados *GWA* são mais precisos e representativos para mais pontos que o atlas nacional (CRESEB, 2020) e compila automaticamente dados em intervalos de tempo e espaço mais agrupados que o mapa animado (BECCARIO, 2020a).

Segundo Larsen e Cox (2019), o *GWA* (<https://globalwindatlas.info/>) deriva da *Danmarks Tekniske Universitet*, mas está combinado ao Grupo do Banco Mundial – *Group*

World Bank que desenvolve o *GSA – Global Solar Atlas* (<https://globalsolaratlas.info/>) (*WBG*, 2020), formando os dois *sites* um conjunto poderoso para análises energéticas em eólica e solar. O financiamento do *GWA* decorre da *ESMAP - Energy Sector Management Assistance Program* sobre a companhia *Vortex* que gera os dados para serem armazenados em *EnergyData*.

O objetivo do trabalho se pauta em explorar a potencialidade do *GWA* para auxiliar nas caracterizações de vento que precisam de dados locais.

Para cumprir esse objetivo, foram feitos acessos em um local específico referenciado pelo *GWA* e analisados os dados para os ventos obtidos.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

O método do *GWA* se baseia em dados de estações meteorológicas e de satélites para topografia e cobertura do solo que passam por modelagens em escala de menor resolução (2 a 5 km) do histórico aproximado de 10 anos. Em seguida, são escolhidos pontos representativos onde se fazem medições com mastros meteorológicos no solo e também usando sensoriamento remoto como *LIDAR* para validação dessas medidas. Por último, passa-se à modelagem de alta resolução (100 a 1000 m) no modelo *WAsP* - Análise e Programa de Aplicação de Atlas de Ventos, que se apoia em uma versão linearizada de equações de fluxos e também em *CFD* - Fluidodinâmica Computacional (HANSEN, 2018).

Foi escolhida a área de levantamento de dados de ventilação na região de Ladário – MS, no Brasil, em proximidade com a Bolívia, um município estimado em 354,255 km², pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), com altitudes na planície em torno de 100 m e contrastando com elevações que atingem acima de 400 m. A área passou a ser localizada e foram extraídas as informações de vento a partir do *Global Wind Atlas* (*GWA*), da *Danmarks Tekniske Universitet (DTU)* por dois pontos:

- No encontro das ruas Riachuelo e José Silvestre (WGS84 Lat, Long) -19.00136, -57.60030 e (Alt) de 104 m, onde se encontra o Mirante Pantaneiro, nomeado **Centro de Ladário**;
- Na elevação do Rabicho, localizado na serra do Urucum, em sua parte em Ladário (WGS84 Lat, Long) -19.11306, -57.49969 e (Alt) de 570 m, denominado **Rabicho** para a tomada de dados.

Para a localização dos pontos do *GWA*, têm-se os mapas correspondentes ao objeto de estudo (Figuras 2.3 e 2.4). O sistema apoiado em *datum* WGS84 (*World Geodetic System*), com as coordenadas em grau decimal, representam valores praticamente equivalentes para o sistema de SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geodésico para as Américas) adotado como padrão pelo Brasil, segundo cálculos da calculadora geográfica disponibilizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2022).

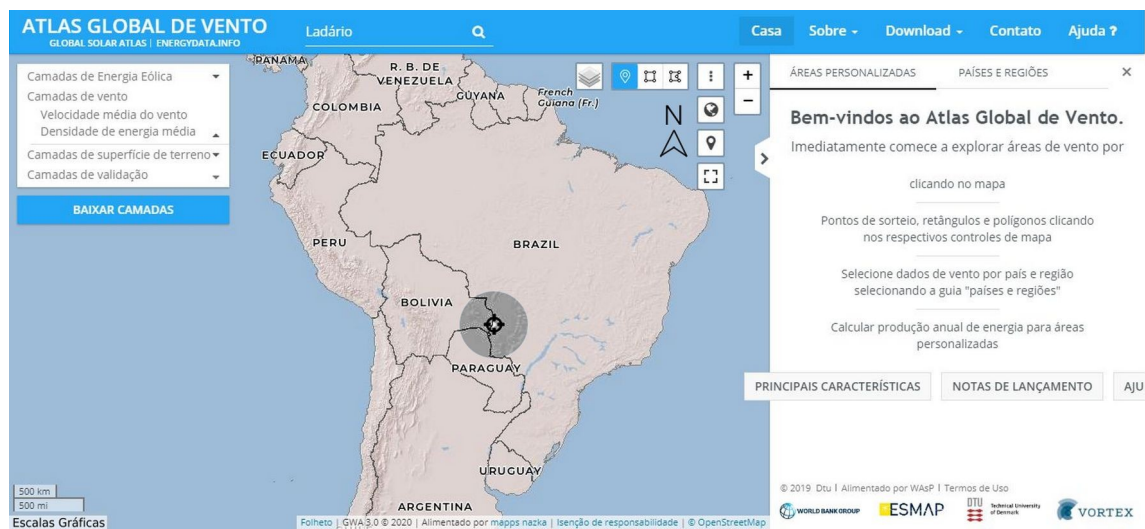
Para uso do *site GWA*, clica-se diretamente sobre um ponto no mapa para serem extraídos dados. As coordenadas dos pontos permitem ser atribuídas e editadas em uma forma precisa a partir da utilização da ferramenta de geração de *link* do *GWA*. Além de pontos, há as opções de demarcação de áreas retangulares e regiões poligonais mais complexas.

Os dados do *GWA* são atualmente extraídos do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)* e são baseados em levantamentos entre 2008 e 2017 (DTU, 2020).

Como Ladário está em enclave com Corumbá, sendo a primeira cidade cercada pela segunda por todos os lados, com os dois locais compartilhando o mesmo clima que, para Soriano (1997), pode ser classificado no padrão Köppen como Awa – clima tropical de altitude, de invernos secos e verões úmidos, com temperatura média superior a 18° C.

As amostras do mapa foram obtidas pelo sistema do *site GWA* e combinadas em uma pós-produção com elementos cartográficos da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais – INDE (2020).

Figura 2.3. Localização do município de Ladário-MS em relação ao Brasil com alvo próximo à linha de fronteira para Bolívia e Paraguai na tela inicial do sistema *GWA*



Fonte: Adaptada do *site DTU*, 2020.

Figura 2.4. Localização dos pontos do Centro de Ladário margeando o rio Paraguai e do Rabicho sobre o maciço de mesmo nome pertencente à serra do Urucum



Fonte: Adaptada dos *sites DTU e INDE*, 2020.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No acesso aos pontos do sistema *GWA*, a busca retorna com os resultados de gráficos que caracterizam os ventos nos pontos considerados. Foram consideradas as alturas relativas de 10, 50, 100, 150 e 200 m dos ventos e extraídos os dados das rosetas de frequências (Figura 2.5) e de velocidades com direções (Figura 2.6), a cada 30°, e dos gráficos de médias de velocidades (Figura 2.7) dos dois pontos considerados.

As maiores frequências e velocidades de ambos os pontos ocorreram no sentido horário para as direções nos ângulos entre Nor-Noroeste (330°) e Sul-Sudeste (150°), sendo que também foi observada uma influência de frequências e velocidades maiores de Sul-Sudoeste (210°) para o Centro de Ladário.

Nesse ponto, principalmente para a altura de 10 m do gráfico de velocidade média dos ventos (Figura 2.7), notam-se baixas velocidades inclusive para os valores mais altos. Mesmo considerando a altitude do Rabicho no ponto de 570 m, também com um pequeno aumento de velocidade, mas para os valores mais altos foram apontadas baixas velocidades. Para compreender o fenômeno dessas baixas velocidades, foi necessário, além dos gráficos, recorrer aos mapas de velocidade do *Global Wind Atlas* (DTU, 2020) com a delimitação do município (INDE, 2020), que contêm as escalas de áreas de cores associadas aos valores de velocidade dos ventos nos mesmos valores de alturas dos ventos de 200, 150, 100, 50 e 10 m (Figuras 2.8 a 2.12).

No interior do município de Ladário, percebeu-se nitidamente a influência orográfica da sombra dos ventos pelo relevo do Taquaral, a Oeste, e pela serra do Urucum, a Sul e Leste (que inclui o Rabicho) dos limites da cidade. O conjunto do relevo em forma de “U”, uma cunha, faz a contenção de ventos, reduzindo as suas velocidades no interior dessa formação e causando um desconforto térmico com a sensação de abafamento para os habitantes da cidade.

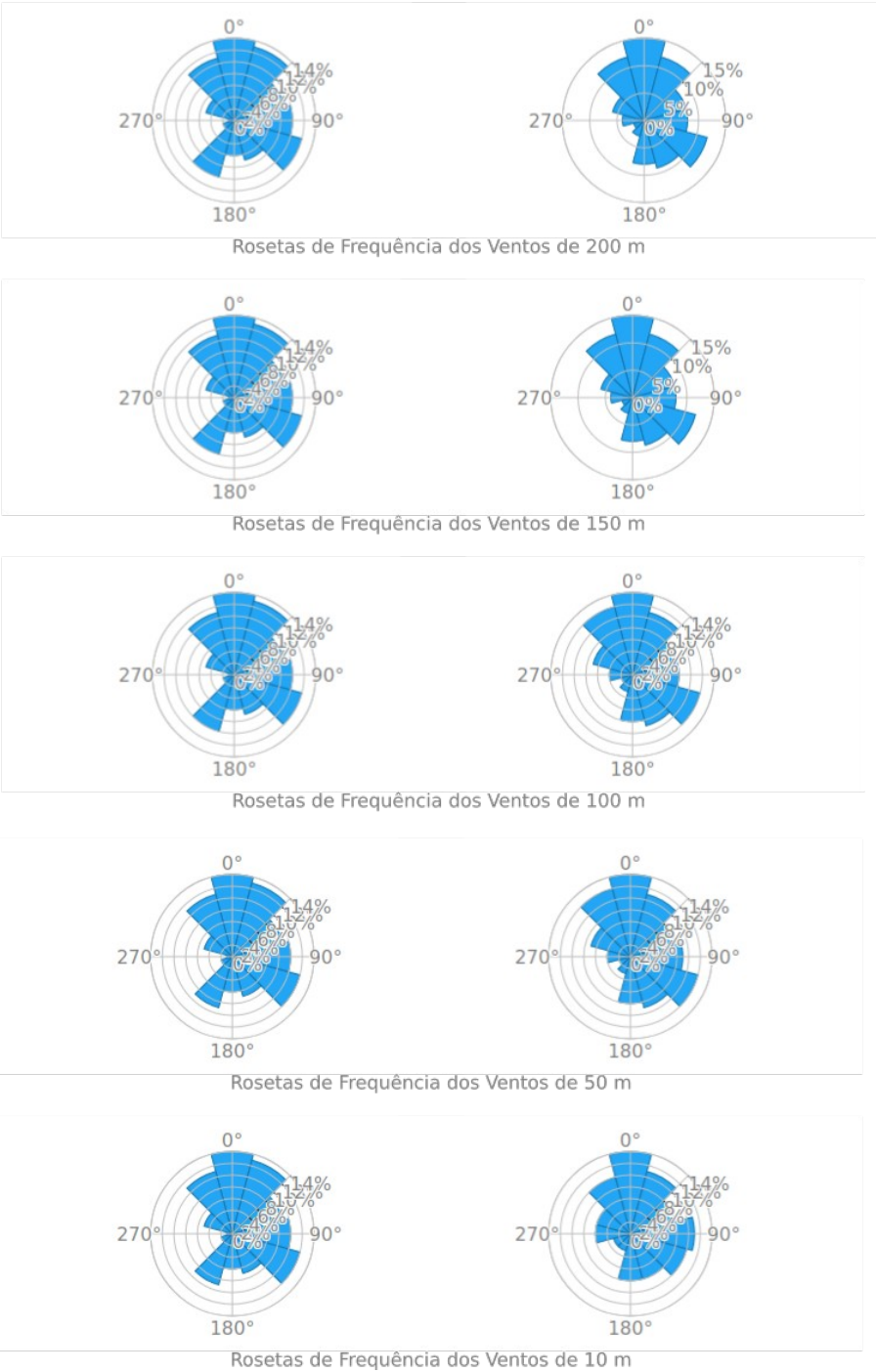
Figura 2.5. Rosetas de frequência dos ventos nos pontos do Centro de Ladário e do Rabicho

Centro de Ladário (Lat, Long WGS84 e Alt)

-19.00136°, -57.60030° e 104 m

Rabicho (Lat, Long WGS84 e Alt)

-19.11306°, -57.49969° e 570 m

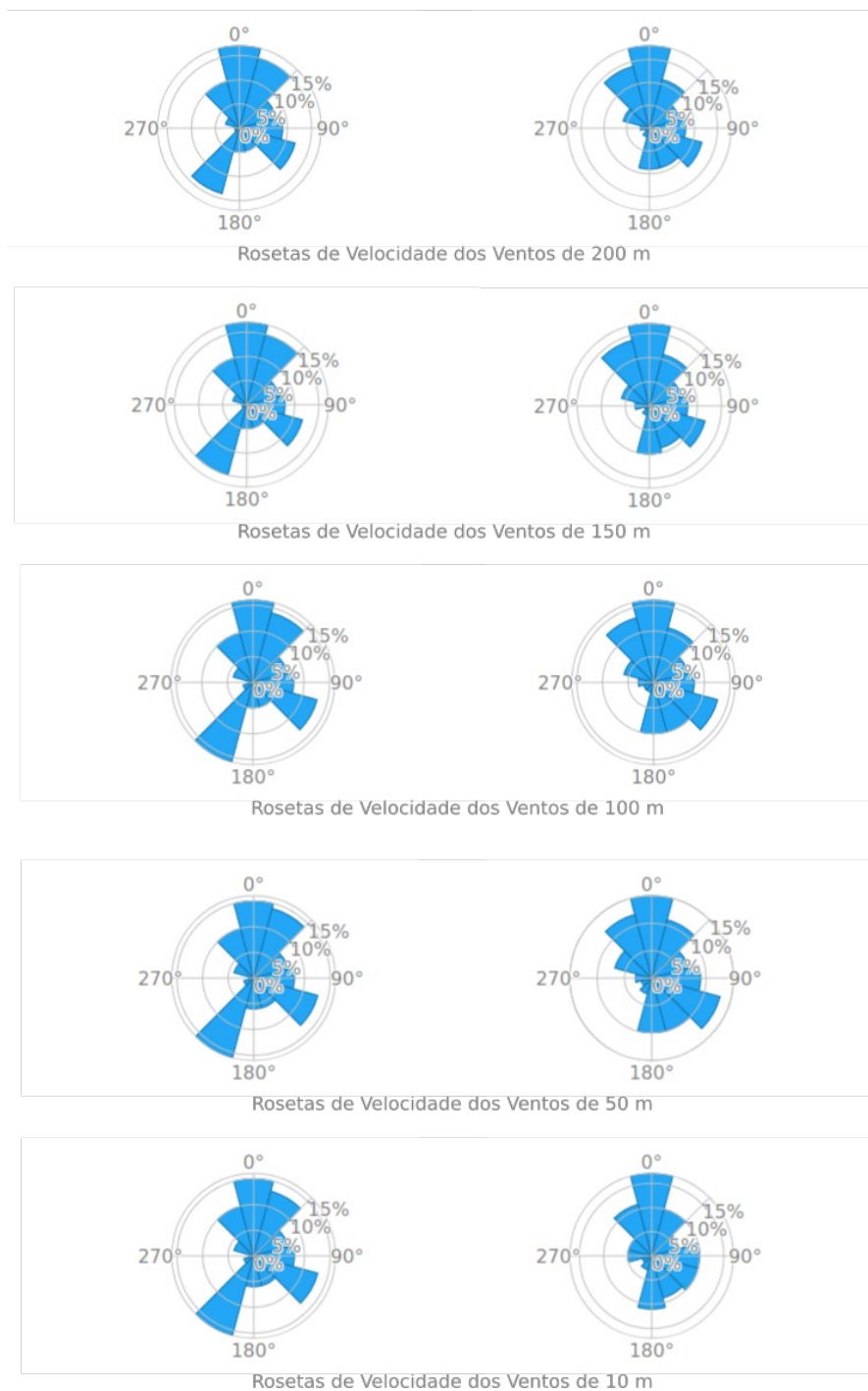


Fonte: Adaptada do *site DTU*, 2020.

Figura 2.6. Rosetas de velocidade dos ventos nos pontos do Centro de Ladário e do Rabicho

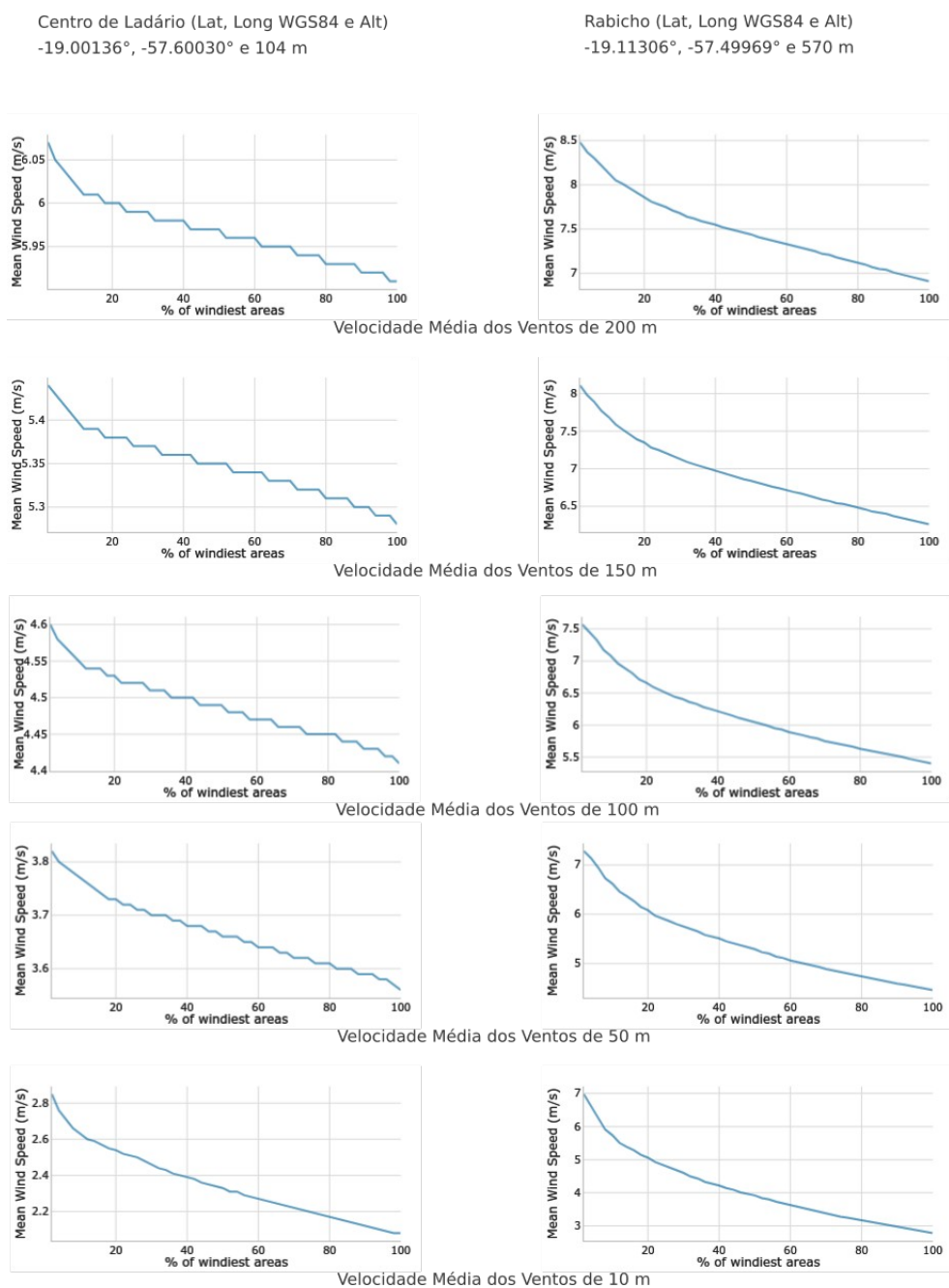
Centro de Ladário (Lat, Long WGS84 e Alt)
-19.00136°, -57.60030° e 104 m

Rabicho (Lat, Long WGS84 e Alt)
-19.11306°, -57.49969° e 570 m



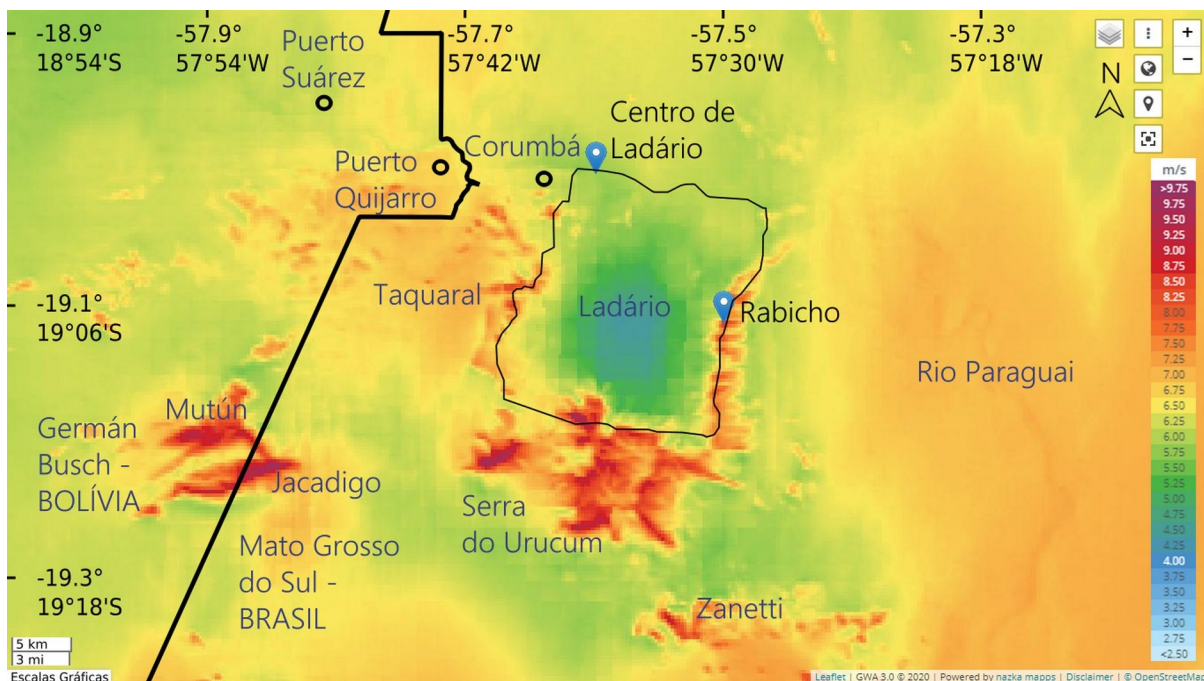
Fonte: Adaptada do *site DTU*, 2020.

Figura 2.7. Gráficos de velocidade média dos ventos nos pontos do Centro de Ladário e do Rabicho



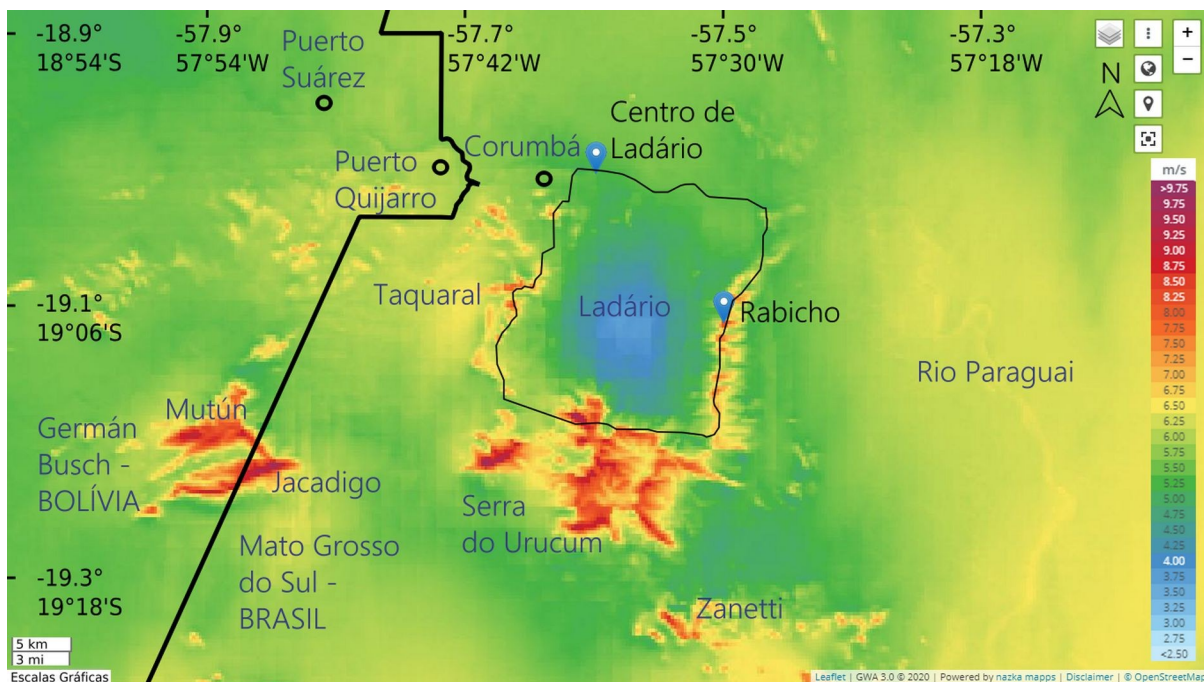
Fonte: Adaptada do *site DTU*, 2020.

Figura 2.8. Velocidade média dos ventos nos pontos do Centro de Ladário e do Rabicho à altura relativa dos ventos de 200 m



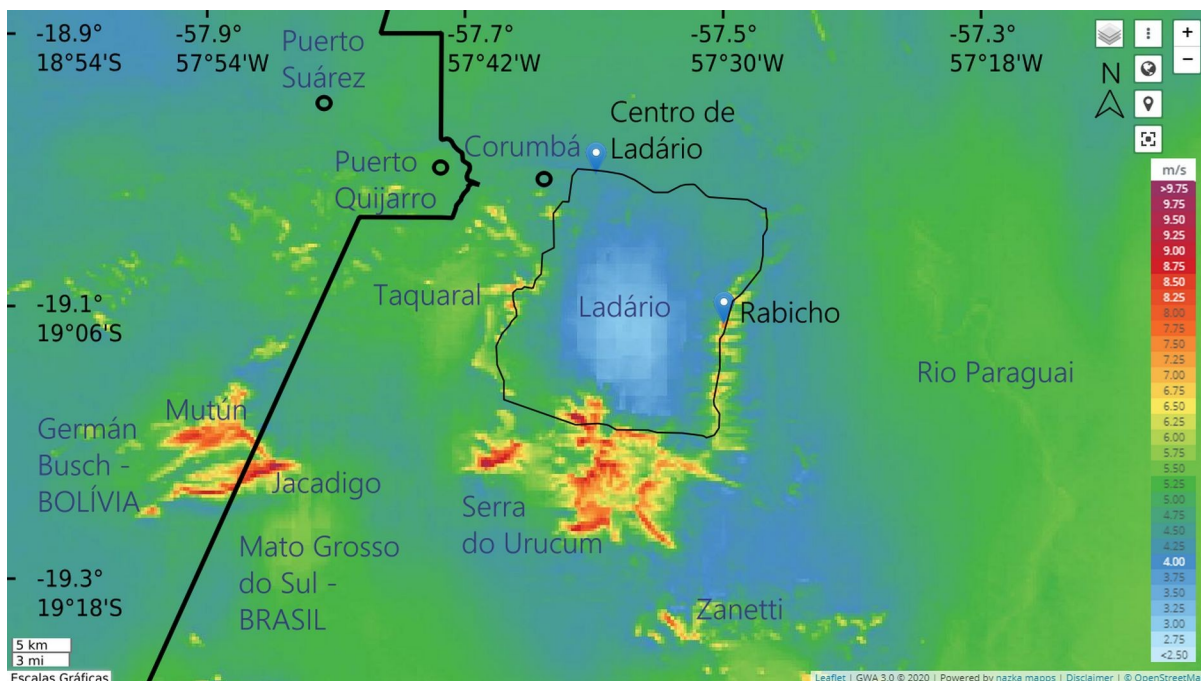
Fonte: Adaptada dos sites DTU e INDE, 2020.

Figura 2.9. Velocidade média dos ventos nos pontos do Centro de Ladário e do Rabicho à altura relativa dos ventos de 150 m



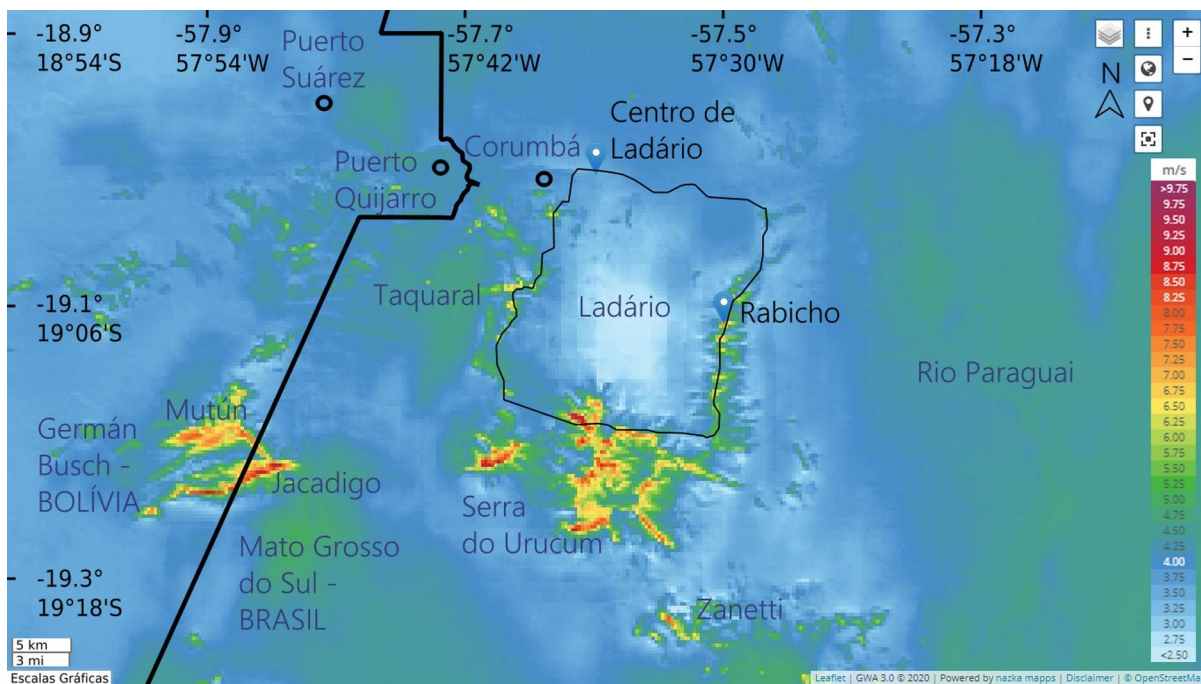
Fonte: Adaptada dos sites DTU e INDE, 2020.

Figura 2.10. Velocidade média dos ventos nos pontos do Centro de Ladário e do Rabicho à altura relativa dos ventos de 100 m



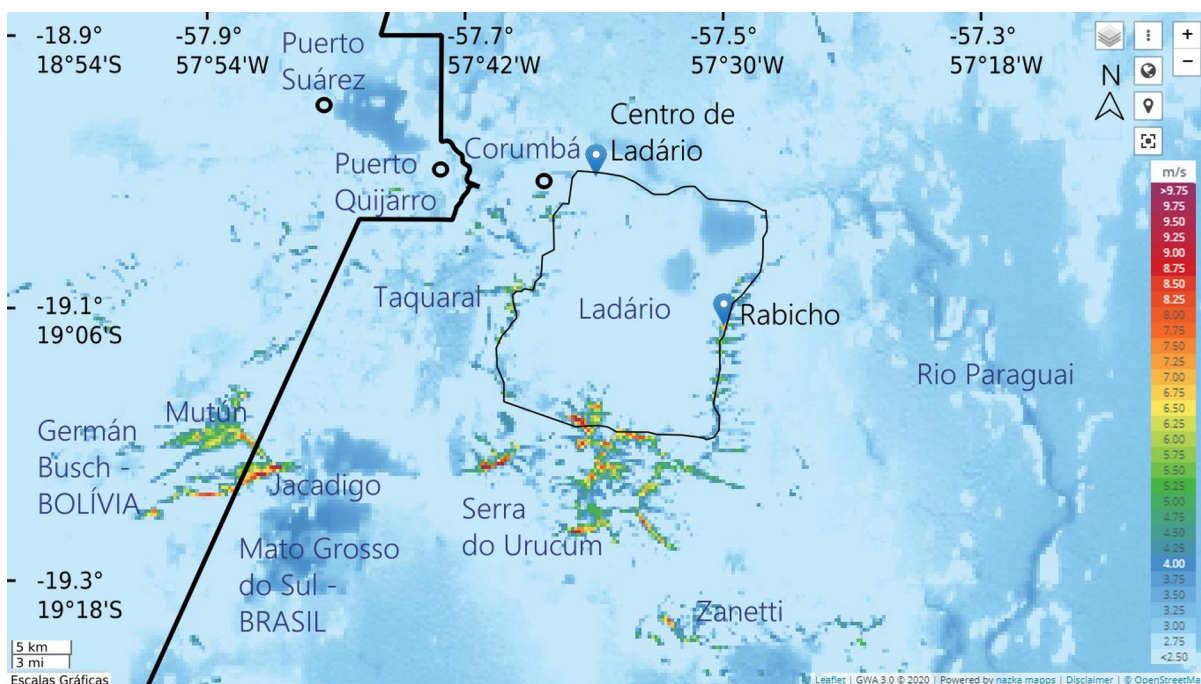
Fonte: Adaptada dos sites DTU e INDE, 2020.

Figura 2.11. Velocidade média dos ventos nos pontos do Centro de Ladário e do Rabicho à altura relativa dos ventos de 50 m



Fonte: Adaptada dos sites DTU e INDE, 2020.

Figura 2.12. Velocidade média dos ventos nos pontos do Centro de Ladário e do Rabicho à altura relativa dos ventos de 10 m



Fonte: Adaptada dos sites DTU e INDE, 2020.

Dos mapas, compara-se a influência da participação orográfica na conformação das velocidades dos ventos (Figura 2.13).

Figura 2.13. Orografia em torno dos pontos do Centro de Ladário e do Rabicho



Fonte: Adaptada dos sites DTU e INDE, 2020.

As maiores velocidades ocorrem na serra do Urucum, no *cerro Mutún*-Jacadigo e no relevo do Taquaral e na elevação do Zanetti. A serra do Urucum, que vista de topo toma a configuração de um “macaco”, por isso a denominação de Rabicho para uma de suas partes, por essa disposição, e em conjunto com o relevo do Taquaral, comportam-se como barreiras de contenção da ventilação, gerando, para o interior do município de Ladário, uma sombra orográfica, de mais reduzidas velocidades dos ventos.

A influência hídrica se faz notar com um aumento de velocidade de ventos pelas lagoas e, principalmente, pelo rio Paraguai. No entanto, quando o rio passa pelo Norte do perímetro do município de Ladário, onde há a ação do cinturão orográfico da serra do Urucum com a elevação do Taquaral, observa-se que, nesse trecho, o corpo de água tem reduzidas as velocidades de vento.

Freitas (2010) nomeia as partes da serra do Urucum em Tromba dos Macacos, Urucum, Santa Cruz, São Domingos, Grande e Rabicho. Há variantes dos nomes na região de Corumbá-Ladário como Cabeça do Macaco para Tromba dos Macacos e Rabichão para Rabicho.

Excetuando o contexto da serra do Urucum, o Jacadigo para o lado boliviano se chama *Cerro Mutún*, e para o lado brasileiro, também pode ser chamado de Mutum.

2.4. CONCLUSÃO

No estudo proposto, procurou-se uma ferramenta que pudesse servir de base para a análise de ventos, principalmente em relação às direções predominantes e dos padrões de velocidades médias.

Foi escolhida a tecnologia do *Global Wind Atlas* (DTU, 2020) que permite explorar com rapidez dados em escala com muitos detalhes e permite compreender ainda a influência orográfica nas velocidades de ventilação de pontos específicos.

Na busca de dados em pontos localizados no Brasil, em Ladário-MS, surge a questão de se explicarem as baixas velocidades para os pontos do Centro de Ladário e Rabicho, ocorrendo em um clima padrão Köppen Awa megatérmico (SORIANO, 1997).

Com essa análise, foi verificado que os pontos explorados do Centro de Ladário e o Rabicho na parte do lado dessa cidade têm parte de seu desconforto térmico, que se acentua no interior do município, explicado pelo fenômeno da sombra orográfica causada principalmente pelas barreiras da serra do Urucum e do relevo do Taquaral, como demonstrado na análise do *GWA* (DTU, 2020).

Sendo analisados os padrões de ventos, em suas direções predominantes, velocidades médias e análise de sua distribuição no relevo em escala apropriada, torna-se mais seguro realizar caracterizações de ventilação.

2.5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-3:** Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005

BECCARIO, Cameron. **An animated map of global weather conditions**. Disponível em: <https://earth.nullschool.net>. Acesso em: 08 out. 2020a.

_____. **A project to visualize global weather conditions**. Disponível em: <https://github.com/cambecc/earth>. Acesso em: 08 out. 2020b.

BENES, Libor. OSINT, New technologies, education: Expanding opportunities and threats. A new paradigm. **Journal of Strategic Security**, v. 6, n. 3, p. 22-37, 2013.

CARLOS SANTAMARINA, J.; CHO, G. C. Energy geotechnology. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 15, n. 4, p. 607-610, 2011.

DTU. **Danmarks Tekniske Universitet – Global Wind Atlas**. Disponível em <https://globalwindatlas.info/>. Acesso em: 08 dez. 2020.

ELETOBRAS. **Atlas Eólico Brasileiro – Simulações 2013 (cepel.br)**. Disponível em <http://novoatlas.cepel.br/>. Acesso em: 08 dez. 2020.

FRAGASZY, R. J. et al. “Sustainable development and energy geotechnology – Potential roles for geotechnical engineering.” **KSCE Journal of Civil Engineering, Special**

Issue on Energy Geotechnology, Edited by J. C. Santamarina and G. C. Cho, Vol. 15, No. 4, pp. 611-621, 2011.

FREITAS, Bernardo T. **Tectônica e sedimentação do Grupo Jacadigo (Neoproterozóico, MS)**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

HANSEN, S. B. K. **Guidance on Mesoscale Wind Mapping**. The World Bank Group, 2018.

HULNICK, Arthur S. **The Dilemma of Open Sources Intelligence: Is OSINT Really Intelligence?**. The Oxford Handbook of National Security Intelligence (U.S.A.: Oxford University Press, March 2010), 229-241.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Ladário (MS)/Cidades e Estados/IBGE**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ms/ladario.html>. Acesso em: 08 dez. 2020.

INDE. **Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais**. Disponível em: <https://www.inde.gov.br/>. Acesso em: 08 dez. 2020.

INPE. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Disponível em <https://www.gov.br/inpe/pt-br>. Acesso em: 06 jun. 2022.

LARSEN, Timothy; COX, Sarah L. **Renewable Energy GIS Tool Guide-Informing Choice of Tools to Support Decisions**. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2019.

SORIANO, Balbina M. A. **Caracterização climática de Corumbá-MS**. Embrapa Pantanal-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), 1997.

WBG. **World Bank Group - Global Solar Atlas**. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/>. Acesso em: 08 dez. 2020.

TERCEIRO CAPÍTULO: VOLUMES REPRESENTATIVOS DO AR EM MAQUETE DIGITAL

Resumo: O trabalho objetiva identificar a possibilidade de tornar elementos de maquete digital de construções, aptos a interagirem com fluxos de ar simulados, para prever espaços ventilados e sem ventilação. Por meio do método simulatório computacional de volumes esparsos da tecnologia de *voxels*, as evoluções dos dados suportados puderam servir como objetos de análise ao registrar padrões visuais de velocidades e direcionamentos de ventos, projetados por algoritmos especializados para refletir espacialmente a física clássica newtoniana. Diante do domínio desse método que foi demonstrado no tutorial de um modelo mínimo construído de um bloco sobre um piso de entorno, submetido a um fluxo de ar dominante, tornou-se possível o uso das unidades de *voxels*, para gerar mapeamentos dinâmicos de percursos fisicamente plausíveis de volumes de vento simulado, que podem servir de base para avaliar a qualidade de ventilação de espaços que busquem ser orientados para a eficiência em conforto ambiental.

Palavras-chave: conforto ambiental, simulação computacional, ventilação natural.

Abstract: The work aims to identify the possibility of making digital mockup elements of buildings, able to interact with simulated air flows, to predict ventilated and unventilated spaces. Through the sparse volume computational simulation method of voxel technology, the supported data evolutions were able to serve as objects of analysis by recording visual patterns of wind speeds and directions, designed by specialized algorithms to spatially reflect classical Newtonian physics. Given the mastery of this method, which was demonstrated in the tutorial of a minimal model built of a block on a surrounding floor, submitted to a dominant air flow, it became possible to use voxel units to generate dynamic mappings of physically plausible paths of simulated wind volumes, which can serve as a basis for evaluating the quality of ventilation of spaces that seek to be oriented towards efficiency in environmental comfort.

Keywords: environmental comfort, computer simulation, natural ventilation.

3.1. INTRODUÇÃO

Os métodos de simulação computacional normalmente se baseiam em unidades como *pixels* e vetores. *Pixel* representa uma unidade gráfica mínima de um código numérico com o formato retangular, enquanto que vetores representam formas gráficas derivadas de equações matemáticas.

Segundo Paranhos Filho, Mioto e Marcato Junior (2016), quando se amplia consideravelmente uma imagem digital e a figura ficar significando que apresenta *pixels* que são vistos individualmente, isso pode prejudicar a leitura geral. Com os vetores, mesmo que seja ampliada uma visualização, a forma se mantém legível.

As formas comumente são percebidas em seus contornos, seja por diferenças de campos de tonalidades em *pixels* e por representação de linhas vetoriais. O desafio está em representar elementos sem contornos definidos como volumes esparsos.

Fluxos de ar e elementos vaporosos, como objetos esparsos, para serem analisados em sistemas de simulação computacional, podem se valer de unidades conhecidas como *voxels*, que têm analogia com *pixels* volumétricos, como sugere o seu termo. Os *pixels* se representam em um campo de retângulos interligados em um plano, enquanto os *voxels* em volumes prismáticos retangulares agrupados sobre um espaço digital.

A aplicação mais comum de *voxels* se constitui na técnica básica de tridimensionalização da tomografia computadorizada, de feixe cônico, aonde a leitura tridimensional vai se fazendo pelas diferenças de densidade nos tecidos do corpo do ser humano.

Assim como nos *pixels*, a resolução se faz presente na representação de *voxels*. Para esses últimos elementos, quanto menores e mais numerosos, diminui-se o risco da visualização estar esfumada, que significa dizer ser percebida em padrões mais mesclados, no lugar de serem representados em prismas definidos e individualizados.

Os *voxels* e vetores suportam cores e transparências, mas a diferença principal que se faz para os vetores está na capacidade dos *voxels* de exatamente conterem elementos com densidades diferenciadas, do cheio ao esparso. Nesse sentido, o mais próximo que as formas vetoriais podem alcançar significa se apresentarem como nuvens de pontos, mas que não permite uma qualidade gráfica mais avançada com os *voxels* em resolução apropriada.

No entanto, há algoritmos que podem tanto converter nuvens de pontos vetoriais em *voxels* e, também pelo caminho contrário, transformar *voxels* em malhas poligonais.

Orengo (2013) apresenta como parte de um método de levantamento de um terreno o fato de converter vetores em *voxels* para as áreas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Arqueologia (Figura 3.1). Esse autor recomenda a forma de conversão em *voxels* no *software GRASS GIS* (NETELER, 2021), pelo uso do algoritmo *flood-filling*, porque, para seu método que inclui captura de imagens de escavações em alturas diferenciadas, permite gerar discretizações dessas camadas levantadas e o preenchimento vertical como uma interpolação em *voxels* por entre essas camadas.

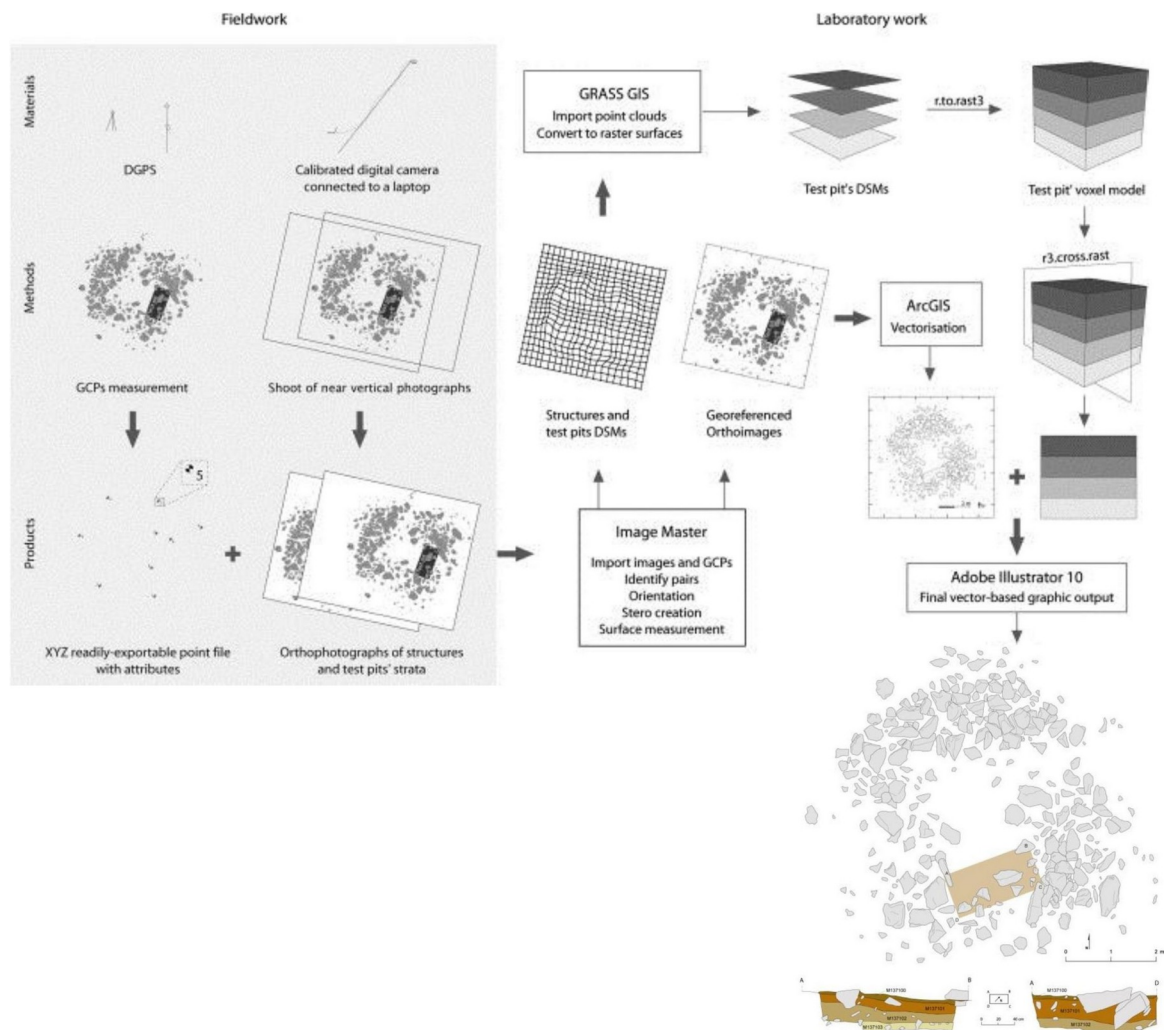
Para SIG, com esse algoritmo, os *voxels* são considerados modelos de 3D *raster*, porque podem ser gerados pela combinação de 2D *rasters* de DEM – *Digital Elevation Model* (NETELER, 2021).

Gobbetti e Marton (2005) realizaram estudos positivos com *voxels* de renderizações de modelos digitais com vazados de alta complexidade e de estrutura topológica avançada de malhas intrincadas de milhões de triângulos.

Hahn *et al.* (2020) recomendam o uso de *voxels* como blocos de base para criarem manufatura aditiva, as impressões 3D, para as mais diversas aplicações tecnológicas e científicas, como ótica e mecânica.

Asvadi *et al.* (2016) indicam a “*voxelização*” para detecção espacial de obstáculos fixos e móveis em ruas para orientação de veículos inteligentes para o mundo real.

Figura 3.1. Método de levantamento que utiliza conversão em *voxels* para composição de terreno



Fonte: Adaptada de Orengo, 2013.

Os *voxels* podem ter uma larga escala de aplicações, desde como elementos para exame médico, em patologias industriais, de apoio de SIG, de execução de objetos e protótipos industriais e permite ser usado em simulações de fluxos de ar.

A pesquisa objetiva reconhecer o uso de *voxels* como suporte e controle para o estudo de simulação de ventilação com a adoção de ferramentas acessíveis e de alta tecnologia.

Esse trabalho se baseia na caracterização dos comandos de simulações físicas de base clássica newtoniana para fluxos de ar do *software* livre *Blender*, de Roosendaal (*BLENDER FOUNDATION*, 2021), no suporte do formato *voxel* oferecido pelo formato do *OpenVDB*, por

Museth *et al.* (2020), apoiado na biblioteca *mantaflow*, desenvolvida pelo grupo composto por Pfaff e Thuerey (2020).

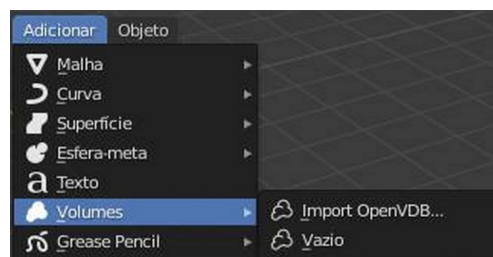
O *Blender*, desde a criação da *Blender Foundation*, em 2002, inicialmente lidava apenas com malhas poligonais com vetores além de *pixels* para criação de modelagem tridimensional e renderizações, permitindo gerar animações e simulações físicas.

No *Blender*, os objetos que representavam volumes esparsos eram trabalhados com pontos vetorizados, conhecidos como partículas, que podiam ter interface com itens poligonais. Atualmente, os *voxels* utilizados por esse programa são do formato *OpenVDB*.

O *Blender* pode utilizar *voxels OpenVDB* de forma estática e em animação de simulação física.

A utilização de ferramentas do *Blender*, na versão 2.92, permitirá manipular arquivos de *voxel*. Para esse programa, o menu de adicionar objetos apresenta os comandos em criação e importação de volumes *voxel* (Figura 3.2).

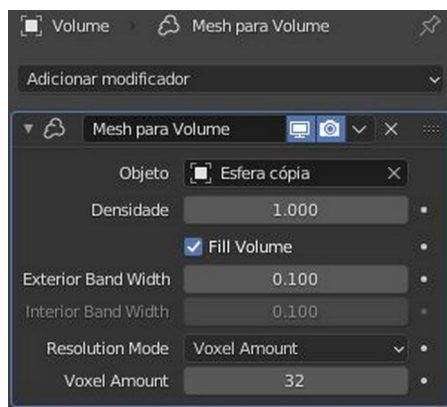
Figura 3.2. Menu de importação e lançamento deposição para volumes *voxel*



Fonte: *Blender Foundation*, 2021.

Através do comando de adicionar volumes do *Blender*, importa-se o arquivo *OpenVDB* e também se cria diretamente um volume *voxel*, associando uma ferramenta de modificador de malha para volume (Figura 3.3).

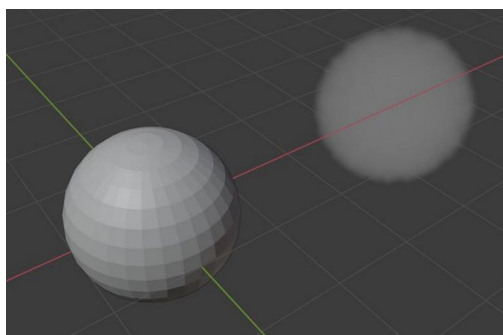
Figura 3.3. Modificador de malha para volume



Fonte: *Blender Foundation*, 2021.

Dessa forma, são introduzidas uma esfera em malha poligonal e sua cópia convertida em volume *voxel* (Figura 3.4).

Figura 3.4. Esferas em malha poligonal e cópia convertida em volume *voxel*

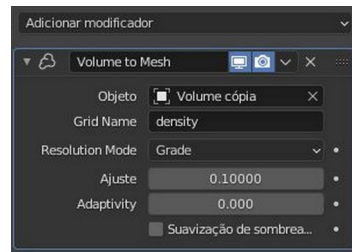


Observa-se que a esfera da malha poligonal apresenta polígonos bem definidos com arestas, agrupados espacialmente, enquanto que a esfera em *voxel* não possui arestas, representando um volume esparsos. Com esse suporte do *Blender*, qualquer geometria gerada e modelada em malha poligonal pode ser convertida em *voxel*.

Um segundo modificador desse *software*, de volume para malha (Figura 3.5), consegue realizar o procedimento inverso, de converter *voxels* para polígonos.

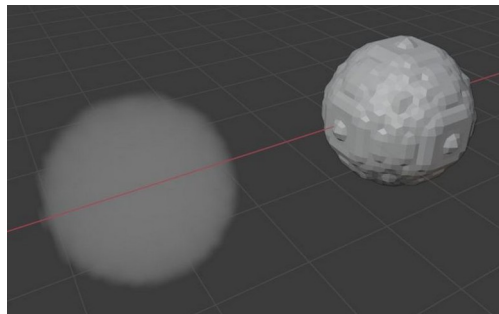
Esse modificador permite converter a cópia de um volume em malha (Figura 3.6). Os polígonos obtidos da conversão assumem uma forma mais irregular para a ideia original de uma esfera. Qualquer volume *voxel* pode ser convertido em polígonos.

Figura 3.5. Modificador de volume para malha



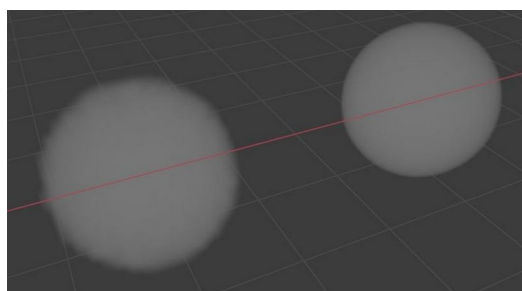
Fonte: *Blender Foundation*, 2021.

Figura 3.6. Esferas em volume voxel e cópia convertida em malha poligonal



Quanto à resolução de *voxel*, no modificador de malha para volume, no último campo denominado *Voxel Amount*, seus valores são indicados (Figura 3.7). Quanto maior a resolução, menos esparsa o volume se torna.

Figura 3.7. Esferas em volume com resoluções de 32 e 120 *voxels*



O *Blender*, sendo apto a comportar *voxels*, ainda disponibiliza o *mantaflow* como um *framework* de diversos solucionadores físicos para fluidos de líquido, de fogo e de fumaça. Destaca-se, como um dos responsáveis da adequação à fusão de *mantaflow* ao *Blender*, o desenvolvedor de física da *Blender Foundation*, Sebastián Barschkis (*BLENDER FOUNDATION*, 2021), que se aplica em estudos como de viscosidade para simulações, como uma capacidade ofertada na versão *Blender 2.92*.

Um dos desenvolvedores de simulação física do *Blender*, Nils Thuerey viria a desenvolver o *framework mantaflow* para simulação de fluido em conjunto com Tobias Pfaff (PFAFF; THUEREY, 2020). Esses autores fazem parte do *Thuerey group of the Technical University of Munich (TUM)*, sendo Thuerey professor-associado, cientista da computação, e Pfaff, pesquisador e programador de jogos.

Esses profissionais se interessam por simulação física de fluido e aprendizagem profunda de máquina e, para o *mantaflow*, utilizam principalmente o cenário *Python* (ROSSUM, 2021) de linguagem de programação para inclusão de algoritmos com fórmulas matemáticas e físicas (eulerianas e lagrangeanas) e incorporam o *DeepMind* (HASSABIS, 2021) para aprendizagem de máquina.

Dong *et al.* (2019) conceituam o *mantaflow* como um código de simulação euleriana dinâmica, que resolve as equações de Navier-Stokes, baseadas no movimento de um fluido em campos de vetor velocidade u e de pressão p , com densidade do fluxo do fluido ρ e vetor gravidade g . Segundo esses autores, para resolver essas expressões de fluido sem viscosidade (equação do momento 3.1 e restrição para fluido incompressível 3.2 combinadas), o *mantaflow* usa o método de divisão em advecção, adição de força externa e projeção de pressão para o operador padrão, codificados nas linhas 4 a 6 do algoritmo de velocidade na equação de Euler (Figura 3.8).

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\vec{u} \cdot \nabla \vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g}, \quad (\text{Equação 3.1})$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Figura 3.8. Algoritmo no *mantaflow* de incremento de velocidade

Algorithm 1 Velocity Update in the Euler Equation

Require: Simulation time step N ;

- 1: Start with an initial divergence-free velocity field $\vec{u}^0$
- 2: Determine a good time step Δt to go from time t_n to time t_{n+1} .
- 3: **for** $n \leftarrow 1$ to N **do**
- 4: **Advection.** Set $\vec{u}^A = \text{advect}(\vec{u}^n, \Delta t, q)$;
- 5: **Add body force.** $\vec{u}^B = \vec{u}^A + \Delta t \vec{f}$;
- 6: **Pressure projection.** set $\vec{u}^{n+1} = \text{Project}(\Delta t, \vec{u}^B)$:
- 7: 1) Solve the Poisson eq. $\nabla \cdot \nabla \tilde{p}_n = \frac{1}{\Delta t} \nabla \cdot \vec{u}^B$
- 8: //Use a PCG solver to to update $\tilde{p}_n$.
- 9: Set initial guess $\tilde{p}_n=0$ and residual vector $r=d$ (if $r=0$, then return $\tilde{p}_n$)
- 10: Set search direction $\vec{s} = \text{ApplyPreconditioner}(r)$;
- 11: **while** residual doesn't reach the convergence criteria
- 12: **do**
- 13: Set $\alpha = \frac{r^T r}{s^T A s}$;
- 14: Calculate the residual $r = r - \alpha A \tilde{p}_n$;
- 15: Update the solution $\tilde{p}_n = \tilde{p}_n + \alpha \vec{s}$;
- 16: Update the conjugated direction $\vec{s} = r + \beta \vec{s}$;
- 17: **end while**
- 18: 2) Apply velocity update: $\vec{u}^{n+1} = \vec{u}^B - \Delta t \frac{1}{\rho} \nabla \tilde{p}_n$;
- 19: **end for**
- 20: **return** 0

Fonte: Dong *et al.*, 2019.

Além dessas operações para incremento de velocidade, há uma crescente implantação de algoritmos que ampliam as capacidades da biblioteca *mantaflow*, sendo constantemente aperfeiçoada, inclusive os relacionados com aprendizagem de máquina, o que faz menos necessário o uso de computadores mais robustos.

Para Dong *et al.* (2019), esse simulador euleriano compartilha modelos de rede neural para maior qualidade e precisão no controle de precisão.

Uma simulação de um tornado animado demonstra o controle de física e aprendizagem de máquina pelo *mantaflow* (Figura 3.9).

Figura 3.9. Simulação de um tornado em *mantaflow*



Fonte: Pfaff e Thuerey, 2020.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

As simulações de fluxos não se baseiam em formas estáticas, como volumes fixos no espaço, requerem o desenvolvimento no tempo. Portanto, os *voxels OpenVDB* serão submetidos aos processos de animação. No entanto, configurar apenas uma animação, em que todos os passos serão previstos, não garantirá um estudo de simulação, porque não haverá condição de resposta de interação com o computador. Será preciso associar com a animação um solucionador físico para que tenha interatividade com os objetos para simulação. Nas simulações de fluxo de ar, além de modelagem de objetos, o *software Blender* incorpora simultaneamente as unidades *voxels*, a animação em seu motor interno e o solucionador físico fluido de fumaça do *mantaflow*.

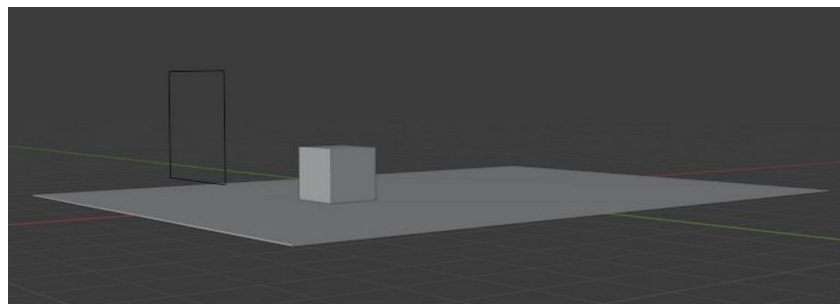
Com essas tecnologias integradas e avançadas, será testada a simulação da ventilação que representa uma construção lançada de um elemento cúbico sobre terreno simples como um plano para avaliar a distribuição de velocidade dos ventos em seu entorno. Para o teste de uma animação com simulação no *Blender 2.9*, serão criados e organizados os elementos e o ambiente, sendo a fonte de ventilação e os objetos que representarão bloqueios e defletores,

como a construção e o piso, modelados em malhas poligonais. No espaço tridimensional do *Blender*, serão informados os elementos habilitados para física de simulação, em domínio, fonte e colisões, e ao proceder à animação, os quadros de fluxo evoluirão no tempo como um “piloto automático”, obedecendo aos algoritmos do *mantaflow*.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A cena de malhas vetoriais na plataforma do *Blender* foi criada em blocos para o piso, o objeto defletor e a fonte suspensa não habilitada fisicamente (Figura 3.10).

Figura 3.10. Elementos de malhas poligonais sem aplicação de animação e propriedade física



Sobre o retângulo suspenso em apresentação de arame (*wireframe*), foi atribuída a capacidade de emitir o fluxo. O caminho mais rápido para dotar esse elemento vetorial como física de fonte de fluxo consistiu em selecioná-lo e utilizar o menu Objeto > Efeitos Instantâneos > Gerar Fumaça Rápida (Figura 3.11).

Figura 3.11. Parte do caminho para geração rápida de fumaça

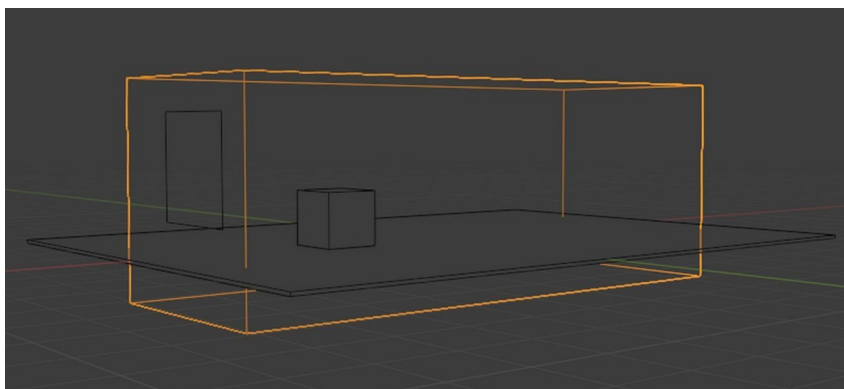


Fonte: *Blender Foundation*, 2021.

Com a ativação desse comando, um domínio automático em forma de um prisma retangular (conjunto de *voxels*) passou a ser gerado, podendo ser posicionado e escalado para compreender internamente ou parcialmente as malhas das construções. O domínio considera como estado inicial o desenvolvimento de velocidade em *default* 1 sob a densidade do fluxo padrão, no método semi-lagrangeano de segunda ordem (PFAFF; THUERREY, 2020).

Por padrão do *software*, o fluxo ocorreu para cima pela gravidade do domínio, precisando ser rotacionado esse elemento para a direção da ventilação pretendida (Figura 3.12).

Figura 3.12. Domínio selecionado em laranja e fonte sendo habilitados para física, com construção em cubo e piso



Mesmo estando garantidos o fluxo pelo domínio e pela fonte, habilitados para gerarem o fluxo, a construção e o piso não se configuraram como barreiras físicas à simulação. Portanto, sobre os objetos de malha de bloqueio e deflexão, que precisaram ser modelados com espessuras, foram atribuídas, a cada um desses objetos, físicas de colisão para fluidos, dentro do editor de propriedades de habilitar físicas, com acesso aos itens Fluido > (Tipo) *Effector* > (*Effector Tips*) Colisões (Figura 3.13).

Com todos os elementos habilitados para modelagem física do *mantaflow*, foi possível proceder à animação. Percebeu-se a dificuldade de visualização com o fluxo total sobre os objetos (Figura 3.14). No entanto, o *Blender* tornou possível habilitar a vista isolada

de seção, filtrando melhor a percepção do fluxo. Para alcançar esse efeito, foi marcado em *Slice > X (Eixos) > 0.500* (Figura 3.15) e o resultado do recorte do fluxo como uma lâmina foi visualizado sobre o eixo X (Figura 3.16).

Figura 3.13. Habilitação física de colisão para fluidos



Fonte: *Blender Foundation*, 2021.

Figura 3.14. Um quadro da animação do solucionador físico de fluido do *mantaflow* incorporado ao *Blender*

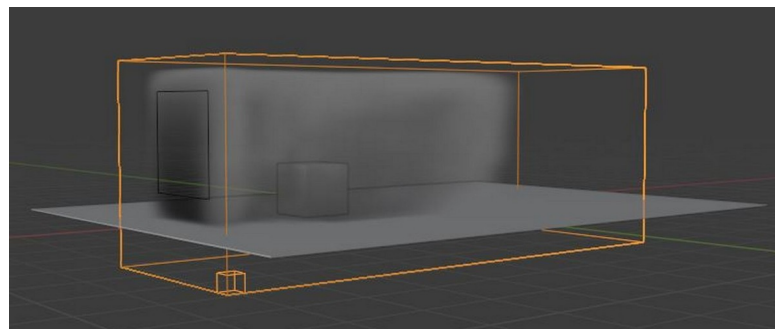
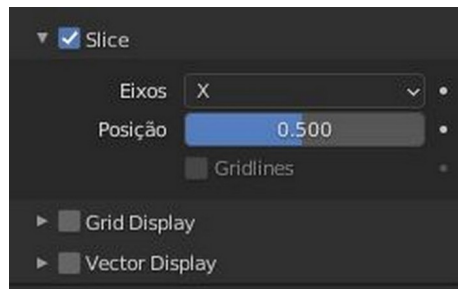
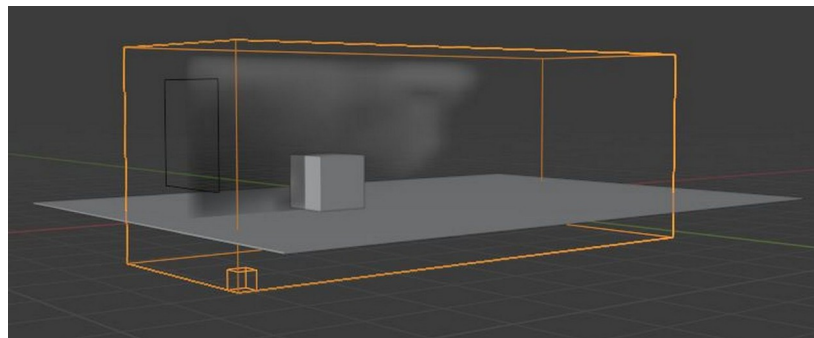


Figura 3.15. Habilitação de vista de seção.



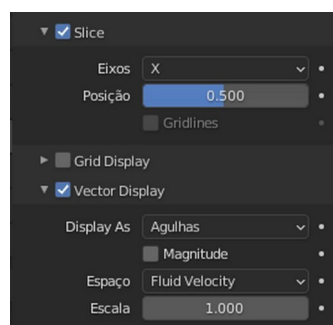
Fonte: *Blender Foundation*, 2021.

Figura 3.16. Vista de seção de um quadro de animação



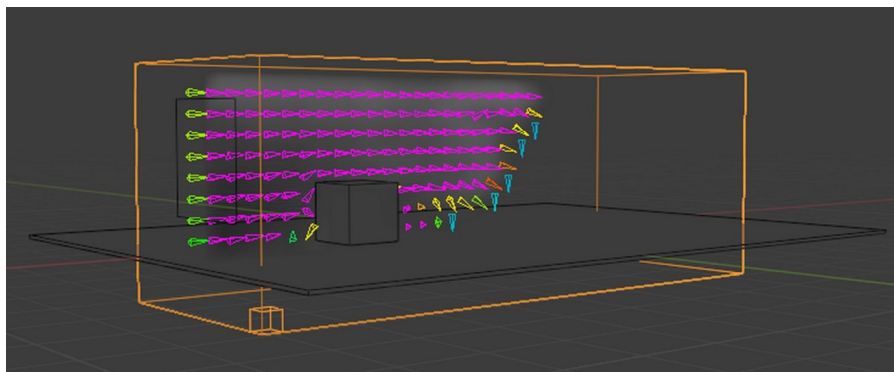
Através das mesmas configurações de *Slice* do domínio, em se marcando *Vector Display* > *Agulhas (Display As)*, *Fluid Velocity* (Espaço) e 1.00 (Escala) (Figura 3.17), foram possíveis ter apresentações de setas indicativas do parâmetro de direção da velocidade sobre os percursos de fluxo na seção definida (Figura 3.18).

Figura 3.17. Habilitação de setas na vista de seção



Fonte: *Blender Foundation*, 2021.

Figura 3.18. Vista de seção com setas de velocidade sobre os *voxels* de um quadro de animação



Nessas setas, as cores indicativas no sentido crescente de velocidade vão do azul, passando como um gradiente pelo ciano, verde, amarelo, laranja e vermelho intermediários, chegando ao magenta, que são associadas ainda às direções de velocidades das setas. Mesmo em uma seção plana, observa-se que as setas tomam uma direção tridimensional.

A representação de velocimetria gráfica se faz como uma projeção *PIV - Particle Image Velocimetry*. Aumentando-se a escala em 64 para os *voxels*, nas configurações de domínio, e com as setas marcadas no *Vector Display* também em magnitude que, além de cores e direções, o item possibilita apresentar tamanhos de setas diferenciados segundo o parâmetro de velocidade, foram capturados 200 quadros, de vista superior em animação, da captação de um fluxo simulado de ar vindo de frente para uma construção (Figura 3.19).

Para verificar a participação das faces superior e inferior, alternou-se para uma vista significativa de elevação, mudando-se o plano de seção (Figura 3.20).

Foi necessário observar que ao modificar a seção para o fluxo, como de horizontal para a vertical, precisou-se atualizar o cache, dentro das configurações do domínio, que se optou clicando sobre *Replay* (Figura 3.21). Mais modificações, como alteração das medidas do domínio, reposicionamento de objetos e o que precisar alterar o fluxo, precisaram passar pela atualização de cache.

Figura 3.19. Quadros 50, 100, 150 e 200 da animação de simulação de fluxo de ar em vista de planta

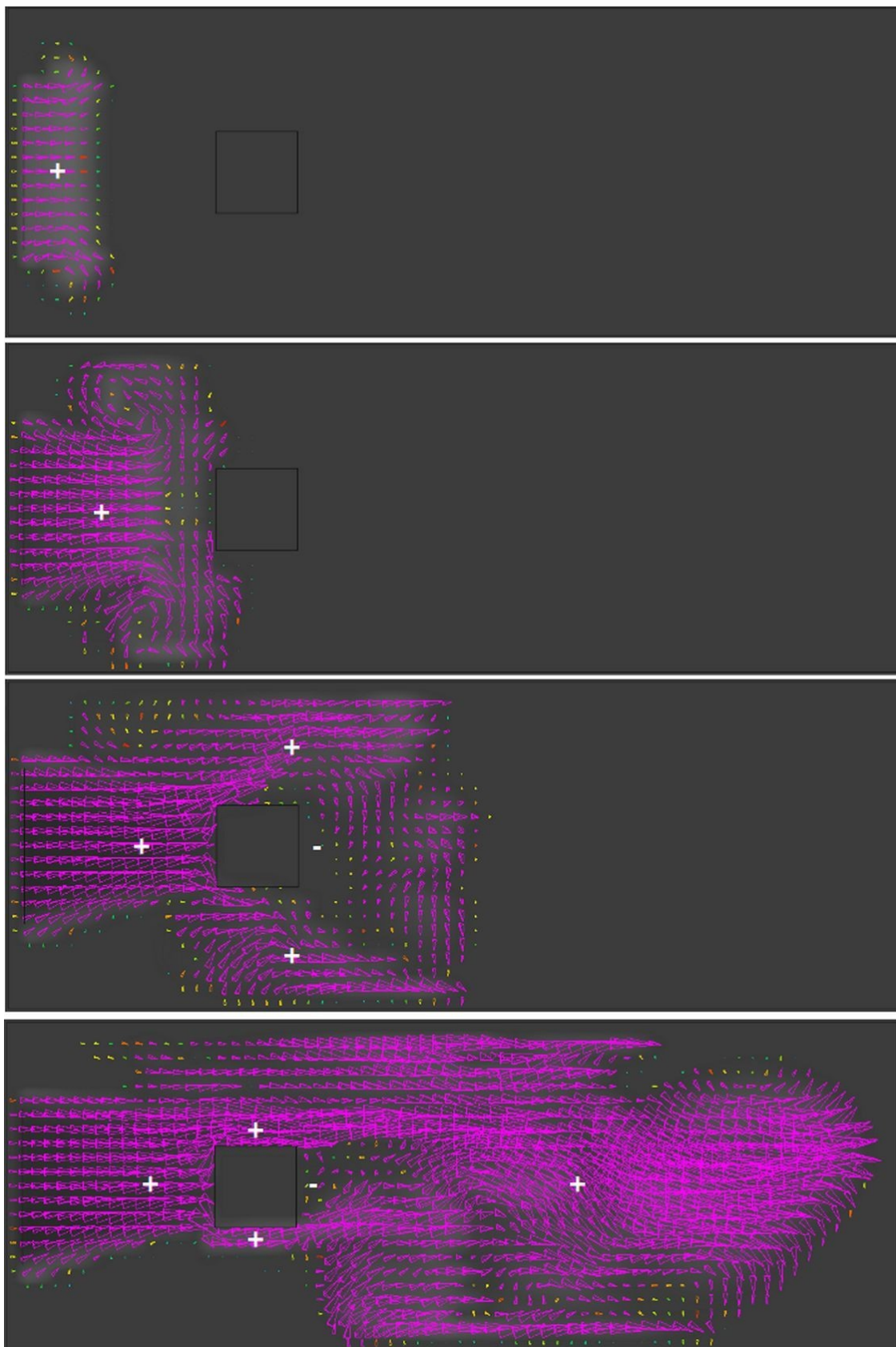


Figura 3.20. Quadro 200 de animação de fluxo do ar em vista de elevação

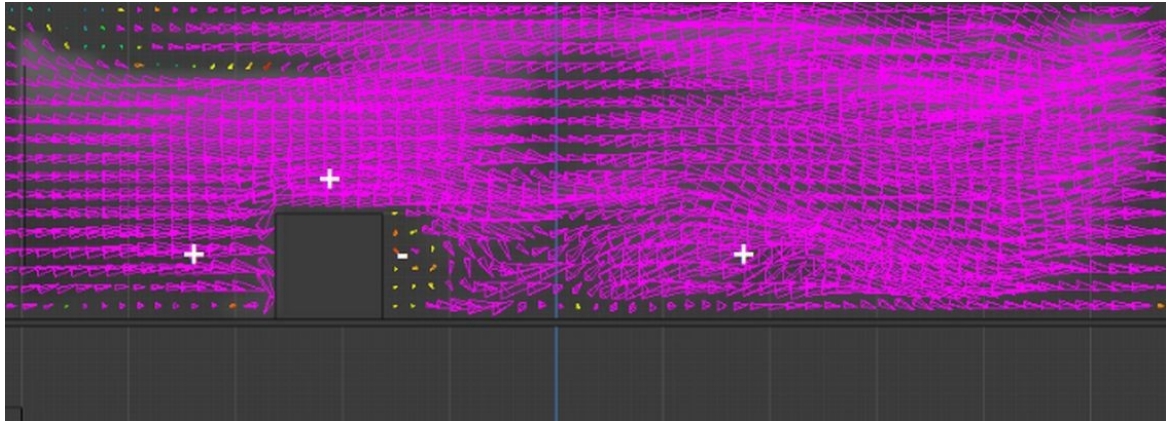
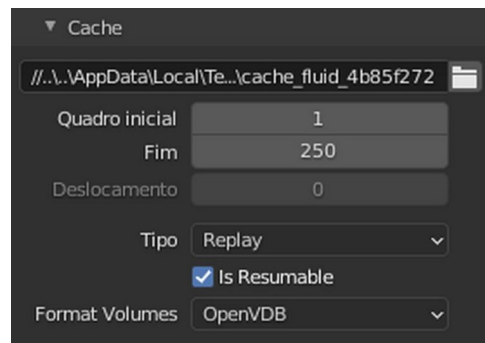


Figura 3.21. Cache para atualização



Fonte: *Blender Foundation*, 2021.

Os resultados obtidos demonstraram que a parte frontal do espaço antes da construção (empuxo), em seu ponto mais central, recebe a “luz” do vento frontalmente que tende a reduzir a velocidade e que volta a ter um impulso crescente nas laterais e parte superior do objeto (filado), com a representação da continuidade de ataque de pressão aerodinâmica positiva (+). A parte posterior (arrasto), após o objeto de colisão, representado pela pressão aerodinâmica negativa (-) se coloca para um setor de baixas velocidades, como uma “sombra” de vento. A face inferior (isolamento) apresenta bloqueio de ventilação por estar em contato direto com o piso. Após a interferência do objeto, o ataque se restabelece.

Os espaços de pressão aerodinâmica negativa equivalem para efeito de ventilação a locais análogos aos ocupados por corpos construtivos de bloqueio.

3.4. CONCLUSÃO

Baseado na tecnologia do *software* livre *Blender* da *Blender Foundation* (2021), que incorporou diversos sistemas articuladores de *voxels*, como os suportes gratuitos do *OpenVDB* (MUSETH, *et al.*, 2020) e dos solucionadores físicos *mantaflow* (PFAFF; THUEREY, 2020), com a linguagem do *Python* (ROSSUM, 2021) funcionando associada ao *DeepMind* (HASSABIS, 2021), que utilizam algoritmos avançados, os comandos de emissão de fluxo e colisões habilitam objetos vetoriais modelados no espaço tridimensional para se proporem à realização de simulação computacional em *voxel* de fluxo de ar, de maneira acessível.

Ao lidar com os recursos computacionais dos *voxels* de forma mais simples como elementos isolados, a submetê-los ao processo de animação com simulação e captar as representações de seções em setas, percebe-se o potencial para modelar e descrever volumes esparsos associados à velocidade simulada.

Com esses sistemas, o método com a simulação computacional em *voxels* demonstra ter uma precisão de avaliação na percepção de detalhes mais individuais como seções com resultados que podem permitir visualizações eficazes de orientação de fluxo de ar.

3.5. REFERÊNCIAS

ASVADI, Alireza et al. 3D Lidar-based static and moving obstacle detection in driving environments: An approach based on voxels and multi-region ground planes. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 83, p. 299-311, 2016.

BLENDER FOUNDATION. **blender.org – Home of the Blender project – Free and Open 3D**. Disponível em <https://blender.org>. Acesso em: 16 jan. 2021.

DONG, Wenqian et al. Adaptive neural network-based approximation to accelerate eulerian fluid simulation. In: **Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis**. 2019. p. 1-22.

GOBBETTI, Enrico; MARTON, Fabio. Far voxels: a multiresolution framework for interactive rendering of huge complex 3d models on commodity graphics platforms. In: **ACM SIGGRAPH 2005 Papers**. 2005. p. 878-885.

HAHN, Vincent et al. Rapid assembly of small materials building blocks (voxels) into large functional 3D metamaterials. **Advanced Functional Materials**, v. 30, n. 26, p. 1907795, 2020.

HASSABIS, Denis. **DeepMind**. Disponível em <https://deepmind.com/>. Acesso em: 05 jan. 2021.

MUSETH, Ken. et al. **OpenVDB**. Disponível em <http://www.openvdb.org>. Acesso em: 19 nov. 2020.

NETELER, Markus. **Grass GIS**. Disponível em <https://grass.osgeo.org/>. Acesso em: 04 jan. 2021.

ORENGO, Hector A. Combining terrestrial stereophotogrammetry, DGPS and GIS-based 3D voxel modelling in the volumetric recording of archaeological features. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 76, p. 49-55, 2013.

PARANHOS FILHO, Antonio C.; MIOTO, Camila L.; MARCATO JUNIOR, José. (Ed.). **Geotecnologias em aplicações ambientais**. Editora UFMS, 2016.

PFAFF, Tobias; THUEREY, Nils. **mantaflow**. Disponível em <http://www.mantaflow.com>. Acesso em: 19 nov. 2020.

ROSSUM, Guido V. **Python Software Foundation**. Disponível em <https://www.python.org/psf/>. Acesso em: 05 jan. 2021.

QUARTO CAPÍTULO: APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO

COMPUTACIONAL SOBRE MODELOS DE FLUXO DE AR

Resumo: Os estudos de *Princeton University* sobre fluxos de ar nas construções se tornaram um clássico de aplicação em conforto ambiental. São tratados o ambiente construído e a vegetação como barreiras e canalizadores da ventilação. As tecnologias de simulação computacional podem testar esses modelos e produzir análises de aproveitamento de fluxos de ar. O objetivo desse trabalho consiste em modelar ventos baseados em ambientes de *voxels*, unidades de volumes esparsos, para os padrões de fluxo de ar organizados pela *Princeton University*. Os resultados reproduzidos demonstraram as possibilidades de adequação à inadequação desses modelos diante das tecnologias de simulação computacional.

Palavras-chave: ambiente construído, conforto ambiental, ventilação, *voxels*.

Abstract: Princeton University studies on air flows in buildings have become a classic application in environmental comfort. The built environment and vegetation are treated as barriers and ventilation channels. Computer simulation technologies can test these models and produce analysis of the use of air flows. The objective of this work is to model winds based on environments of voxels, sparse volume units, for the airflow standards organized by Princeton University. The reproduced results demonstrated the possibilities of adequacy to the inadequacy of these models in the face of computer simulation technologies.

Keywords: built environment, environmental comfort, ventilation, voxels.

4.1. INTRODUÇÃO

Para interpretar espaços sob efeito de ventilação, as trajetórias dos ventos sobre áreas urbanas, paisagísticas e de interiores podem ser simuladas em experimentação física.

No estudo mais avançado de experimentos físicos de ventilação, mesmo anteriormente ao uso de tecnologia computacional, utilizava-se normalmente o túnel de vento, e que continuam suas aplicações nos dias atuais, também associadas a computadores.

Segundo Cóstola (2006), o Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT mantém um túnel de vento específico para conforto ambiental. Esse túnel apresenta uma camada limite de 20 m e uma seção livre de 6 m², enquanto que o robô cartesiano serve para resolver a repetibilidade no posicionamento das sondas (CÓSTOLA, 2006).

Na pesquisa, é preciso atentar para a escala do objeto sob o campo de influência que possibilite a similaridade com as condições de contorno do local real a ser estudado, considerado como o domínio. Nesse sentido, deve-se estabelecer o domínio para o objeto a ser testado considerando os possíveis obstáculos reais na vizinhança para garantir a similaridade do experimento.

A máquina para o conforto ambiental utiliza-se de sensores de pressão acoplados às maquetes a serem testadas. Além disso, para efeito de medição de velocidades, são utilizados sobre o objeto anemômetros de vários tipos. Dados analógicos obtidos pelas medições podem ser convertidos em dados digitais com auxílio de uma placa de transição e do computador.

A anemometria a laser, conhecida pela sigla em inglês *LDA (Laser Doppler Anemometry)* constitui um dos sistemas mais avançados para medições de velocidade em túneis de vento, que garante uma alta resolução espacial (CÓSTOLA, 2006).

As obstruções externas modeladas devem ser consideradas não somente a barlavento, de onde sopra o vento, como também a sotavento, para onde sopra o vento, para não interferirem nas condições de contorno do objeto a ser testado (CÓSTOLA, 2006).

Para esse autor, a utilização de outro fluido como a água pode ser viável para estudos de simulação do vento, mesmo que haja diferença entre massas específicas e viscosidades a serem consideradas.

Para obter a similitude dinâmica entre o ar e a água, considera-se que o primeiro fluido apresenta velocidades 20 vezes maiores que o segundo fluido, concluindo-se do cálculo de se comparar o número de Reynolds (Re) entre os dois fluidos (CÓSTOLA, 2006), conforme a expressão (Equação 4.1):

$$Re_{Ar} = Re_{Água} \quad (\text{Equação 4.1})$$

O número de Reynolds consiste na relação entre as forças de inércia ($L.u.\rho$, longitude do fluxo L , velocidade média do fluxo u e massa específica do fluxo ρ), e as forças viscosas (viscosidade do fluxo μ), segundo a expressão (Equação 4.2):

$$Re = L u \rho / \mu \quad (\text{Equação 4.2})$$

Quanto menor o Re , mais viscoso o fluido e mais organizado é o deslocamento das partículas, ocorre o chamado escoamento laminar. Em contrapartida, quanto maior o Re , menos viscoso o fluido e maior a desorganização das partículas, o escoamento é considerado turbulento.

Com a similaridade obtida entre o ar e a água, os túneis de água são empregados para estudos de ventilação, destacando-se o estudo no efeito do fluido sobre formas de superfícies curvas como cascas e abóbadas.

Um equipamento desse tipo no Brasil está sob posse da POLI-USP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para estudos em modelos de pequeno porte (CÓSTOLA, 2006).

Com o advento de tecnologias computacionais, há a possibilidade de se testarem digitalmente os modelos de ventilação e de realizar a substituição do método de simulação de túneis de vento e de água, através da associação de algoritmos que buscam descrever ensaios de propriedades físicas aplicados em programas de computador diretamente.

Da mecânica dos fluidos e de estudos hidráulicos, as equações de Navier-Stokes, Euler e Lagrange vêm sendo traduzidas em algoritmos avançados com o auxílio de complementos de aprendizagem de máquina para serem possíveis simulações físicas complexas nos meios digitais, incluindo variações de viscosidade.

Em relação aos túneis de vento e de água, a simulação computacional para ventilação pode oferecer maior controle de modelagem dos experimentos e de drásticas diminuições de custos materiais e de tempo. Os próprios equipamentos dos túneis de vento podem atingir cifras milionárias para sua aquisição como na indústria automobilística.

Para as simulações computacionais, são levantadas maquetes digitais com riqueza de detalhes e que podem ser reconstruídas com mais facilidade que os modelos físicos. Associadas às propriedades virtuais físicas de colisão, essas maquetes são expostas aos ventos elaborados como fluxos de volumes com variável simulada de velocidade. Não importa se a simulação será realizada por elementos de pequeno e de grande porte, se o estudo se concentrará em uma solução paisagística isolada e se fará com um modelo ampliado de uma cidade.

Nguyen, Reiter e Rigo (2014) destacam, para física da construção, a simulação computacional para projetos mais adaptados ao meio ambiente.

Chronis, Liapi e Sibetheros (2012) preveem que o avanço nos estudos que incluam estratégias de *design* sustentável desenvolverá novas tipologias e padrões de elaborações. Esses autores indicam que simulações físicas computacionais podem ser usadas para modelar

formas e defendem que soluções bioclimáticas e o desenho generativo paramétrico podem ajudar a moldar novas faces para os edifícios.

Para a tarefa específica de dimensionar dispositivos de sombreamento para controlar a insolação excessiva, há programas que analisam e geram formas automatizadas considerando parâmetros de conforto ambiental. De forma similar à proteção solar, cálculos paramétricos com a ventilação podem se converter em configurações de espaços. Kormaníková *et al.* (2018) apontam que arquitetos estão buscando práticas de simulação computacional para que o *design* seja cada vez mais responsiva ao meio ambiente com o uso de técnicas de Fluidodinâmica Computacional, em inglês *Computer Fluid Dynamics (CFD)*.

Nessa prática, observa-se a trajetória de ventilação simulada, reconstroem-se ambientes no estudo em interação com um sistema de simulação computacional, onde vão sendo desenvolvidas as concepções parametricamente apropriadas para os ventos.

A simulação de ventos sobre aerofólios constitui um estudos mais recorrentes que utilizam visualização de correntes em linhas. As linhas de correntes representam um campo dinâmico do deslocamento de massas do fluido do ar, também conhecidas como linhas aerodinâmicas, que ocorrem desde sua fonte de emissão e passam pelos objetos de colisão assumindo trajetórias peculiares, que modelam situações de ventos mais específicos, podendo se tornar soluções de projetos.

As linhas de correntes transportam partículas do ar pelo princípio de conservação da massa, conforme Eastlake e Dahmen (2006), com a taxa de escoamento (transferência mássica $\rho u A$, de massa específica ρ , velocidade u e área da seção transversal A) em um ponto 1 igual à taxa de escoamento em um ponto 2, que pode ser descrita pela expressão (Equação 4.3).

$$\rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 \quad (\text{Equação 4.3})$$

Se tomar a variação de compressibilidade nula, a massa específica do ar fica constante, tornando a expressão mais simplificada (Equação 4.4).

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 \quad (\text{Equação 4.4})$$

Significa afirmar que, para gases considerados como incompressíveis, se a taxa de escoamento no ponto 2 ($u_2 A_2$) tiver a área A_2 menor em relação à área A_1 , da taxa de escoamento inicial ($u_1 A_1$), sua velocidade u_2 será maior que a velocidade u_1 . Dessa forma, interpreta-se que quando as linhas de corrente se aproximam de fluidos incompressíveis, a área de ataque dessas linhas se reduz e a velocidade aumenta. Por outro lado, se essas linhas de corrente se distanciam, nessa maior área, sua velocidade diminui.

Em resumo, para gases sem compressão, a velocidade é inversamente proporcional à área da seção transversal do fluxo. Um exemplo intuitivo de conservação da massa por Eastlake e Dahmen (2006) pode ser compreendido quando se comprime a saída de água de uma mangueira e o fluido esguicha mais rápido.

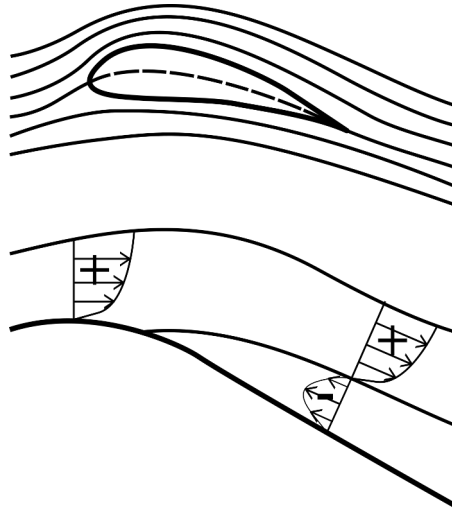
Para esses mesmos autores, a tendência de voo para um aerofólio também se explica em parte pela conservação da massa que ocorre quando, pelo seu ângulo de ataque em contato com o fluxo de ar, se promove uma maior aproximação de linhas de corrente para próximo do topo do objeto (extradorso), gerando uma maior velocidade de fluxo com menor pressão estática nesse lado e uma menor velocidade para sua base com maior pressão estática (intradorso) (Figura 4.1).

Para um gás incompressível e de baixas velocidades (menores que a relação 0,3 da velocidade do som), Eastlake e Dahmen (2006) destacam a pressão dinâmica ($\rho u^2/2$, de massa específica ρ e velocidade u) em interação com a pressão estática (P_s) na expressão de Bernoulli para pressão total constante (P_T) (Equação 4.5).

$$P_T = P_s + \rho u^2/2 \quad (\text{Equação 4.5})$$

Para as mesmas pressão total e densidade específica, aumentando a velocidade no percurso, cresce a pressão dinâmica e decresce a pressão estática. A diferença de pressões estáticas causa o efeito maior do empuxo para cima, que dependendo também de combinação de forças, favorecem o voo, entre as relações de Bernoulli e Newton (EASTLAKE; DAHMEN, 2006).

Figura 4.1. Seção ideal de aerofólio levemente inclinado e detalhe maior de gradientes de velocidade



Fonte: Adaptada de Weltner *et al.*, 2001 e Blessmann, 1990.

Um modelo com um filado perfeito não acontece na realidade. Entre a camada limite e a face curva do objeto, há a linha de separação, de onde os vetores de velocidade formam gradientes opostos (BLESSMANN, 1990). As indicações de positivo para ataque (+) e negativo para arrasto (-) nos gráficos se referem às pressões dinâmicas envolvidas nas linhas de correntes de velocidades. Quanto mais o aerofólio inclinar o seu ângulo de ataque, maiores serão os gradientes negativos de velocidade e gerações de turbulências, que em casos críticos, arriscam a desestabilizar o voo.

Eastlake e Dahmen (2006) consideram errônea a igualdade dos tempos de trânsito. Essa hipótese falha admite que a velocidade do topo aumenta para que as partículas se reencontrem emparelhadas em linhas de correntes paralelas após a parte posterior do objeto (fuga).

Esses autores argumentam que, devido à conservação da massa, as partículas acima do extradorso se movem mais rápido pela maior proximidade das linhas de corrente. Considera-se que as pressões dinâmicas ocorrem acompanhando os vetores das velocidades que seguem os sentidos das partículas de ar pelas linhas de correntes. Depois de contornado o aerofólio, as partículas se encontram desemparelhadas em relação ao fluxo original, não seguindo os tempos de trânsito.

A forma geral dos objetos recebe a influência de sua superfície. Com sulcos e vazados, há uma tendência de geração de turbulências menores e menor pressão de ataque que faz com que a camada limite aumente a sua aproximação ao longo do corpo do objeto, concorrendo significativamente para um menor campo de arrasto parasita. Isso explica a maior velocidade de deslocamento no exemplo de uma bola de golfe que tem cavas superficiais.

Percebe-se portanto que o comportamento das linhas de correntes submetidos às experimentações formam um campo de escoamento que depende da forma, da posição, da rugosidade, da relação de cheios com os vazios e do direcionamento de ângulos de ataque dos objetos.

Para edifícios submetidos às linhas de correntes, foi elaborado um ensaio sobre uma categorização básica da ventilação em relação aos objetos, principalmente a partir de analogias com a caracterização de Kormaníková *et al.* (2018) e na leitura de concentração de área para as linhas de corrente e velocidades envolvidas. Na caracterização ensaiada, estão

representadas segundo a direção dos prédios em relação ao vento, as direções axial, oblíqua e perpendicular (Figura 4.2).

Há efeitos particulares a serem considerados sobre linhas de correntes. Quando essas linhas têm uma tendência de contornar o objeto considerada a escala do fluxo com o objeto, trata-se do efeito **coanda**, de filado em sua maior parte, enunciado pelo engenheiro aeroespacial romeno Henry Marie Coandă (1886-1972). Sabe-se que a influência das forças viscosas (μ) melhor observada para fluidos líquidos e gasosos, faz com que fluam melhor, diferentes de elementos sólidos, que seguem uma trajetória menos formatada ao contorno do objeto. Mesmo assim, considera-se o efeito coanda, de uma ventilação axial, sem alteração significativa de velocidade, que seguiu como proposta de categoria de uma construção sólida laminar na mesma direção da ventilação, que representa o equivalente da “resistência mínima” por Kormaníková *et al.* (2018). O efeito coanda ao extremo não ocorre na natureza por haver camada de separação interferindo com a camada limite.

O efeito **venturi**, do físico italiano Giovanni Battista Venturi (1746-1822), enuncia-se como um aumento da velocidade de um fluido pela menor pressão estática e estreitamento de um tubo e, pelo contrário também, como uma diminuição da velocidade pela maior pressão estática e alargamento de um tubo. Portanto, torna-se errôneo relacionar somente para acréscimo de velocidade como mais comumente usado. Para os modelos propostos que generalizam o tubo fechado com analogia para as paredes das massas do objeto intercaladas com a pressão atmosférica, foram indicados na ventilação oblíqua tanto o efeito venturi de aumento quanto de diminuição de velocidade, como na “concentração” e “difusão” em Kormaníková *et al.* (2018), respectivamente. Quando se usa, no lugar de um único objeto, dois prédios, pode-se intensificar o efeito venturi. Na elevação, uma estrutura inclinada pode resultar no efeito venturi abaixo desse plano.

O tubo de venturi é utilizado para medir velocidades e pressões estáticas. O engenheiro hidráulico francês Henri Pitot (1695-1771) idealizou um medidor que também leva o seu nome, tubo de pitot, que relaciona e mensura a pressão estática (relacionada à pressão transversal da direção do fluido na parede) e também a pressão dinâmica (pressão longitudinal do fluxo), ainda conhecida como a pressão de velocidade.

As forças aerodinâmicas podem se neutralizar com forças de tração (empuxo) exercidas por barreiras fixas, causando o efeito de **freio aerodinâmico**, sem continuidade para a parte posterior (arrasto). Foi proposto também para a categorização, na ventilação perpendicular, a barreira de um prédio, análogo à “deflexão” de Kormaníková *et al.* (2018).

Considerando que o efeito do **filtro aerodinâmico** pode ocorrer com o vazado entre o edifício, que deixa percorrer parte do fluido, com a propriedade de porosidade. Na prática, para usar o filtro, são comuns as soluções de quebra-ventos com elementos vazados.

De uma análise simplificada, percebe-se que enquanto no freio aerodinâmico se cria um grande campo de arrasto, no filtro, há uma redução de velocidade na área de arrasto menor.

Podem ser propostos arranjos desses efeitos em plantas de prédios com a combinação de efeito venturi para aumento (aproximação de linhas de correntes para uma menor área), diminuição (separação de linhas de correntes para uma maior área) e renovação de aumento de velocidade do ar, consecutivamente (Figura 4.3). Nessa demonstração em combinação (aproximação – separação – aproximação), tem-se uma calmaria intencional de ventos no interior da composição entre os prédios.

Um estudo de simulação de ventilação deve seguir os condicionantes do local e se alinhar aos objetivos. Importa saber que aspectos de ventilação devem ser elencados, como em proteger de fortes ventos ou aumentar a renovação do ar, entre outros parâmetros, para formar o perfil apropriado do objeto do projeto parametrizado.

Figura 4.2. Efeitos básicos das ventilações sobre posição de objetos

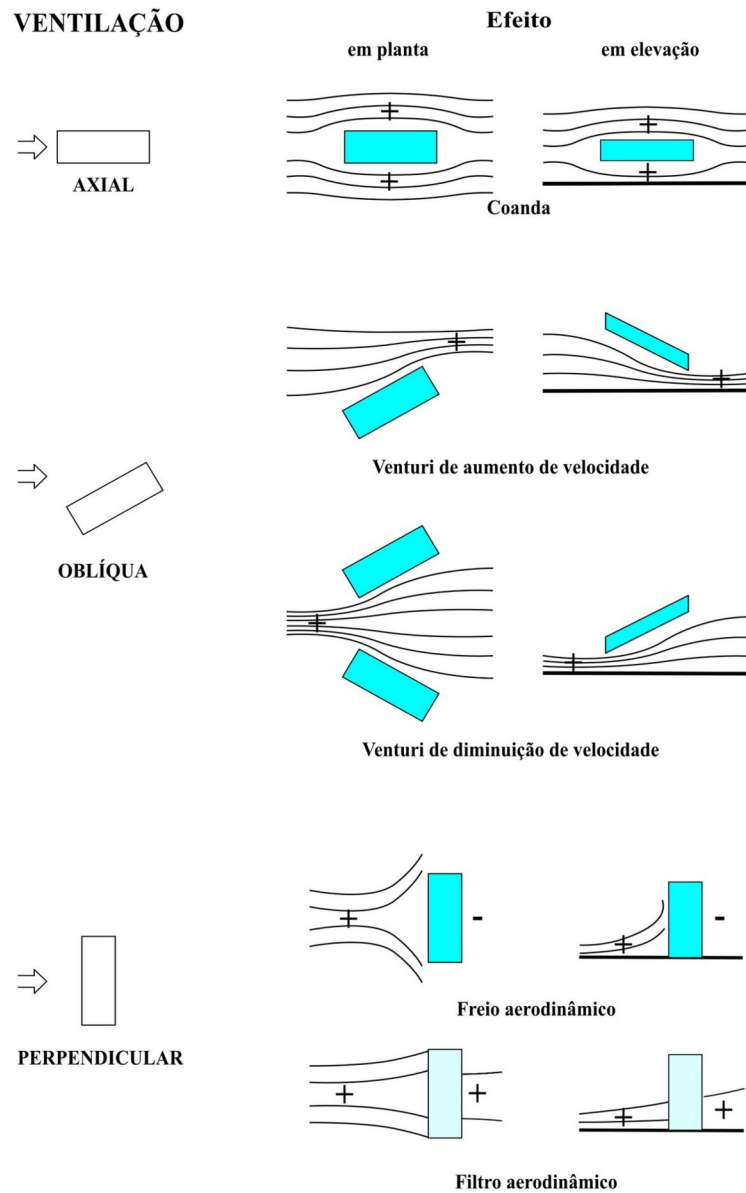
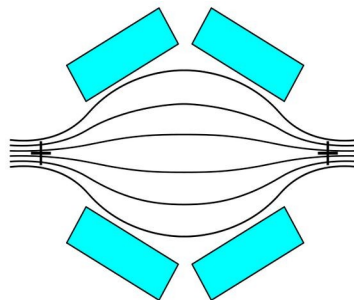


Figura 4.3. Disposições combinadas com o efeito venturi em planta



Relacionado à distribuição de ventos, grande parte das obras sobre conforto ambiental no Brasil e internacionais se utiliza das referências da *Princeton University*, com os modelos da edição clássica de Olgyay (2015) “*Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*”, como em Cóstola (2006), Frota e Schiffer (1995) e Robinette (1972).

O trabalho de Olgyay (2015) havia sido publicado na década de 1960 e, a partir dessa época, desenvolveu-se em um campo teórico interdisciplinar, entre as ciências naturais e a tecnologia, buscando responder questões de como o ser humano lidava com as necessidades climáticas através da arquitetura e urbanismo, destacando de forma consistente e pioneira o termo “bioclimático”. Importava saber como o ambiente construído podia se constituir em uma solução bioclimática.

Olgyay (2015) elaborou a carta bioclimática, em que se considerava a zona de conforto entre valores de umidade relativa e temperatura. O mesmo autor postula como as zonas de conforto preferenciais entre as temperaturas de 20 a 28°C e dentro das faixas de 18 a 77% de umidade relativa. Quanto mais os atributos estando distantes dessas zonas, maior o risco atmosférico de estresse e perigo para o ser humano. Esse autor descreve que mesmo um local que alcance as zonas de conforto poderá sair dessa condição em determinadas horas do dia. Quanto mais distante das zonas de conforto, soluções tecnológicas e de *design* eficientes precisam ser adotadas para adaptação bioclimática.

Além de diversas demonstrações de gráficos de sombreamento e do uso de brises solares, que considera o percurso do Sol sobre os dispositivos das fachadas, a obra de Olgyay (2015) se concentra ainda na simulação de ventilação sobre as construções.

Para tanto, utiliza-se do *layout* urbano submetido a uma direção predominante de ventos, do efeito paisagístico sobre a ventilação que as estruturas construídas estão submetidas e dos resultados de deflexão do vento no interior de compartimentos.

Cóstola (2006) reconhece como um clássico do trabalho de simulação de escoamento de ar sobre modelos reduzidos de Olgyay (2015) e recomenda como reforço teórico ao estado da arte da ventilação autores como Etheridge e Sandberg (1996).

Frota e Schiffer (1995) tomam como uma das referências de índice de conforto a carta bioclimática de Olgyay (2015) e emprega diversos exemplos de fluxos de ar organizados pelo autor, compreendendo estudos através de ambientes construídos e com barreiras de vegetação.

Robinette (1972), também considerado um clássico na área de conforto, em temas mais voltados ao paisagismo, reelabora variantes dos modelos organizados por Olgyay (2015).

O objetivo do trabalho se concentra em analisar os modelos de fluxo de ar da *Princeton University*, apresentados por Olgyay (2015), utilizando-se da simulação computacional baseada na tecnologia de *voxels*.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

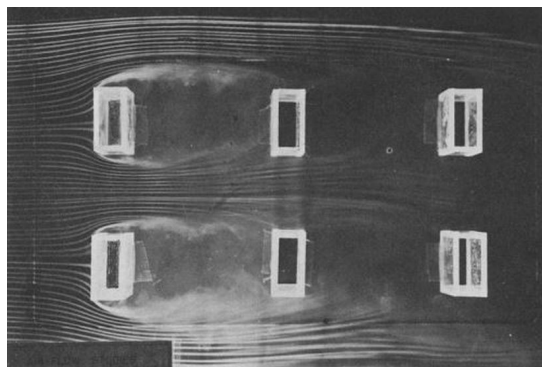
Os dados dos modelos da obra de Olgyay (2015) que serão testados em simulações de computação gráfica, em relação aos percursos de fluxo de ar, são basicamente referenciados em:

- **Fixação da direção do vento e arranjo entre prédios.** Sobre uma direção fixa do vento, toma-se um agrupamento de prédios em distribuição uniforme e se observa o percurso do fluxo do ar defletido entre essas construções (Figuras 4.4 a 4.7).
- **Efeito de paisagismo sobre áreas adjacentes às construções.** Verificam-se os elementos de vegetação dispostos como influenciadores para o percurso do fluxo de ar sobre as construções (Figuras 4.8 a 4.12).

- **Padrões de fluxos no interior da edificação.** Em relação ao padrão de altura do ser humano em relação às modificações de aberturas na edificação e obstáculos, são explorados os aproveitamentos do fluxo de ar no interior das edificações (Figuras 4.13 a 4.18).

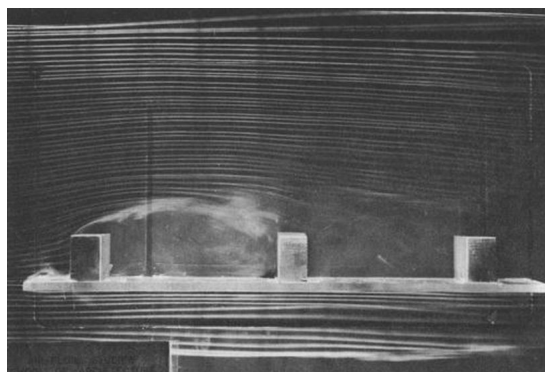
Para o estudo documentado por fotos dos arranjos dos prédios (Figuras 4.4 a 4.7), são observadas as linhas de corrente de velocidade, como fios de fumaças nesses experimentos sobre modelos de prédios em chapas de acrílico, que quanto mais próximas, indicam ser mais velozes e onde não aparecem, sem linhas de corrente, significa a sombra do vento.

Figura 4.4. Proteção contra o vento com arranjo linear entre prédios em planta



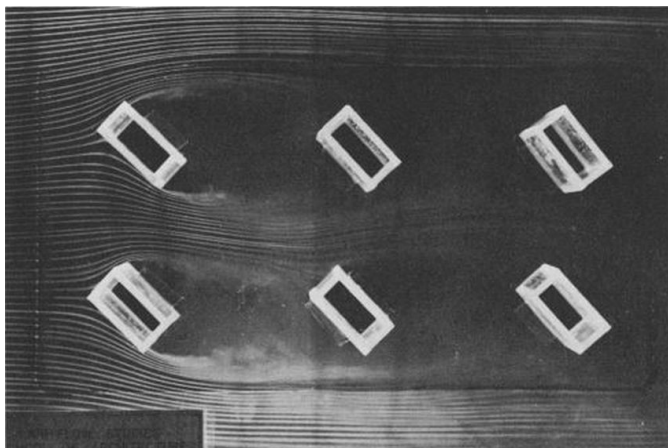
Fonte: Olgyay, 2015.

Figura 4.5. Proteção contra o vento com arranjo linear entre prédios em elevação



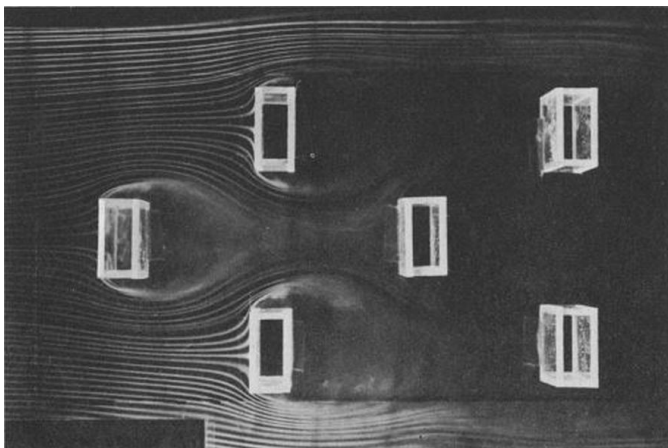
Fonte: Olgyay, 2015.

Figura 4.6. Efeito de proteção contra o vento com arranjo de 45 graus entre prédios em planta



Fonte: Olgyay, 2015.

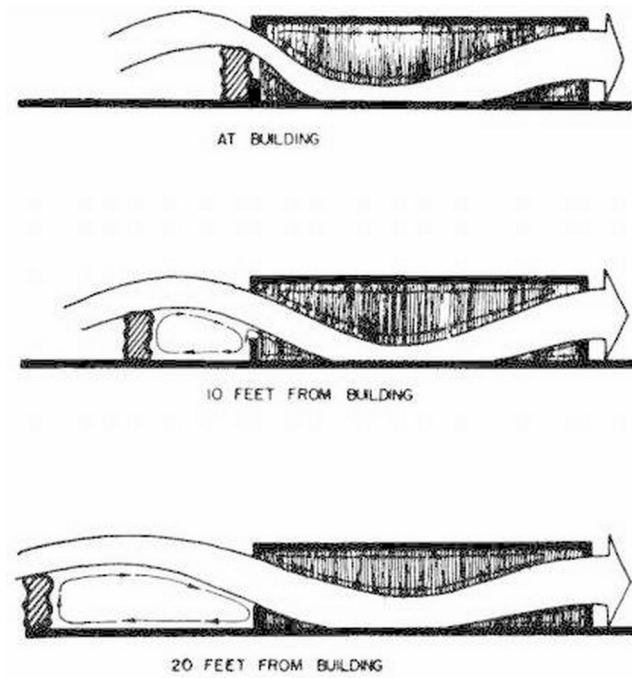
Figura 4.7. Arranjo intercalado para aproveitamento de brisas em planta



Fonte: Olgyay, 2015.

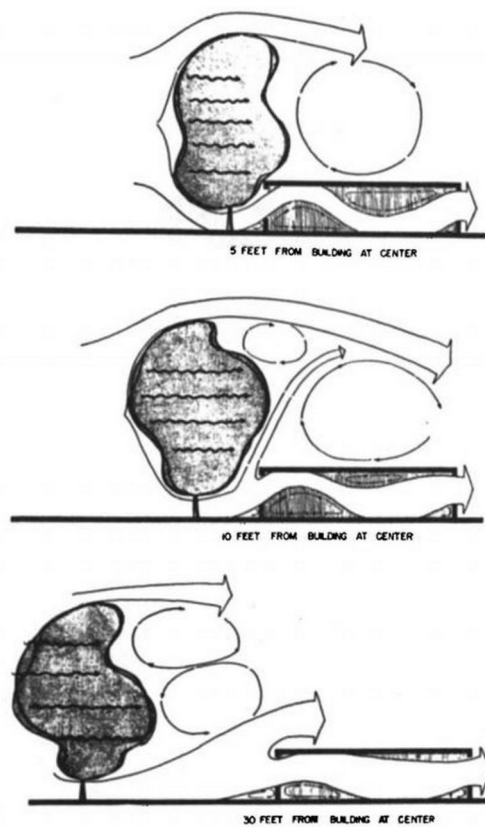
Não mais baseados em registros fotográficos, Olgyay (2015) organiza uma série de modelos em desenhos esquemáticos postulados por White (1945) para indicar a influência da vegetação para o percurso do ar, representado por uma zona com uma finalização em seta, sobre a construção (Figuras 4.8 a 4.12).

Figura 4.8. Fluxo de ar com cerca viva média em elevação



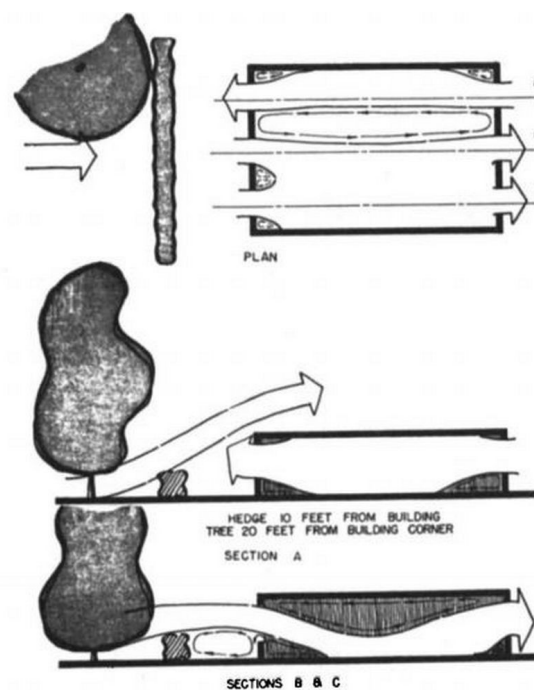
Fonte: White *apud* Olgyay, 2015.

Figura 4.9. Fluxo de ar com árvore de maior porte em elevação



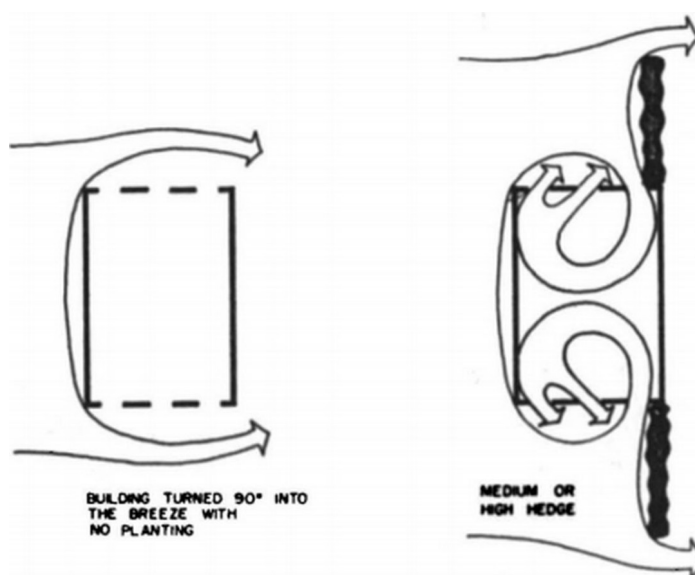
Fonte: White *apud* Olgyay, 2015.

Figura 4.10. Fluxo de ar com árvore de maior porte e cerca viva média em planta e elevação



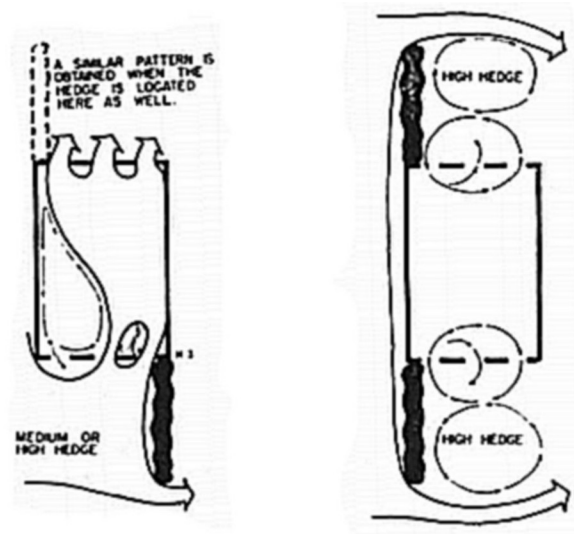
Fonte: White *apud* Olgyay, 2015.

Figura 4.11. Fluxo de ar alterado por cerca viva em planta



Fonte: White *apud* Olgyay, 2015.

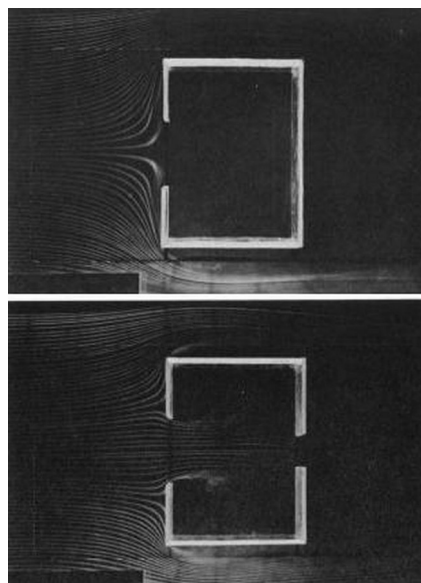
Figura 4.12. Variações de cerca viva em planta



Fonte: White *apud* Olgyay, 2015.

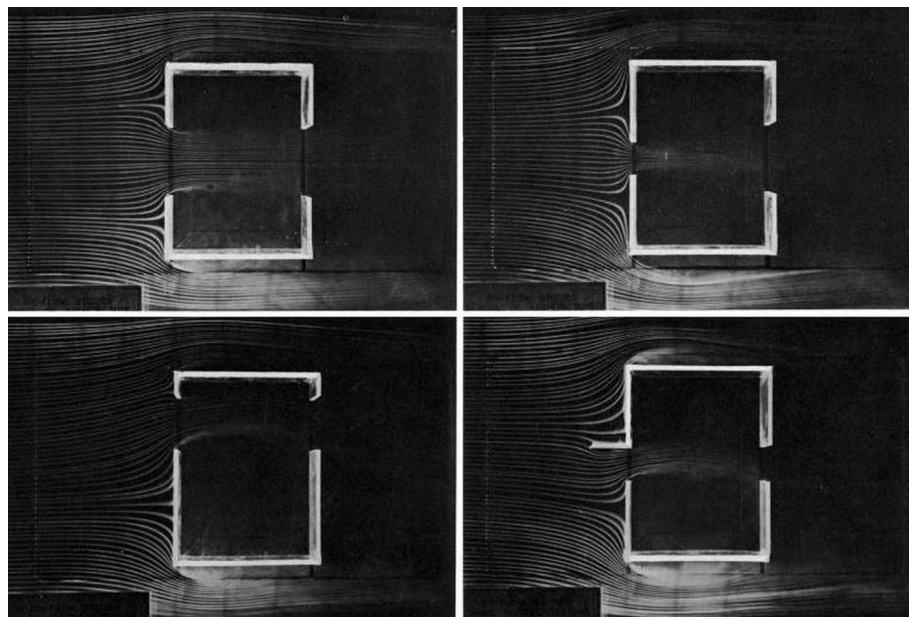
As aberturas têm grande influência sobre o percurso do ar no ambiente e o uso de paredes internas também impacta a distribuição do vento, com experimentos de fios de fumaça (Figuras 4.13 a 4.18).

Figura 4.13. Ambiente sem fluxo interno e com abertura de exaustão



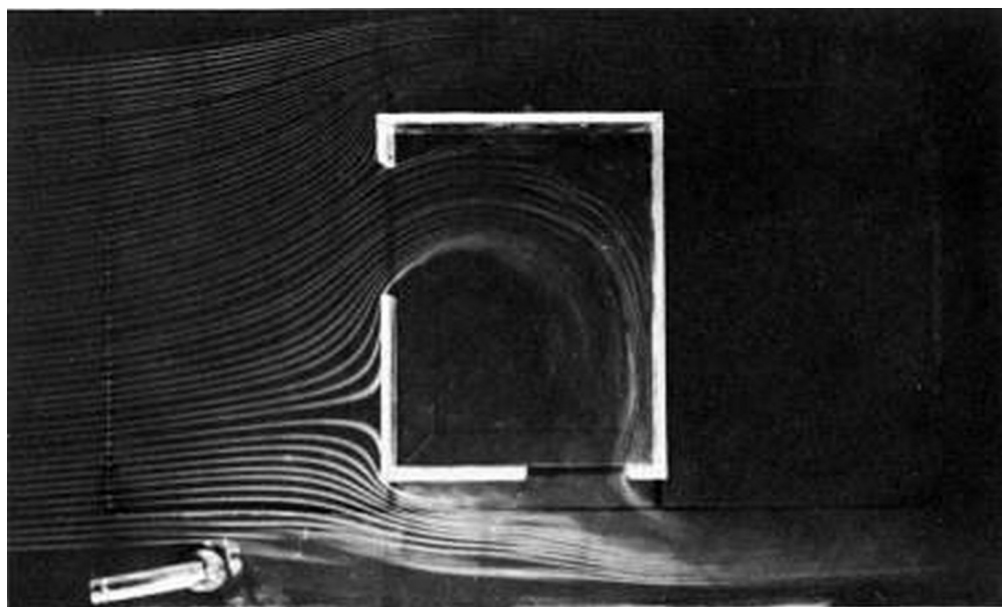
Fonte: Olgyay, 2015.

Figura 4.14. Modificações de aberturas de entrada



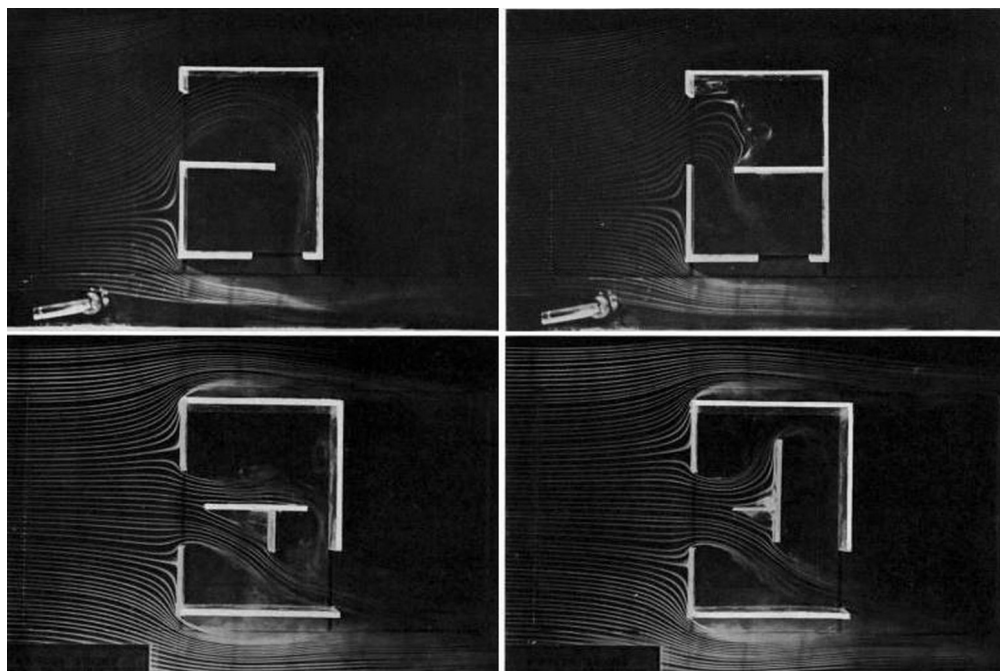
Fonte: Olgyay, 2015.

Figura 4.15. Fluxo de ar em ângulo



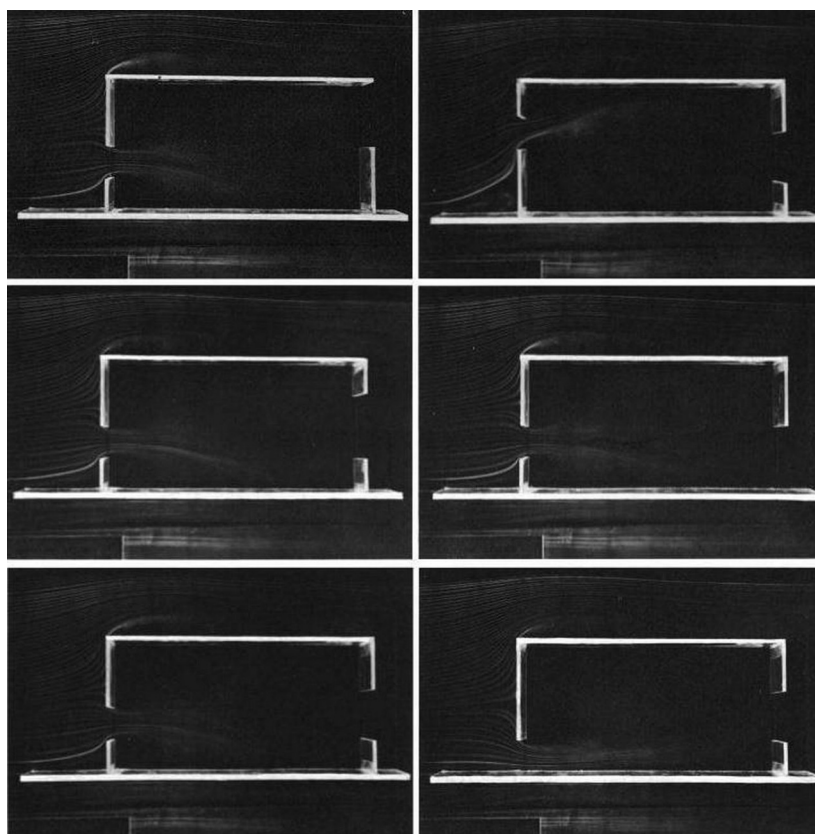
Fonte: Olgyay, 2015.

Figura 4.16. Obstáculos e defletores internos



Fonte: Olgyay, 2015.

Figura 4.17. Variações em alturas de aberturas



Fonte: Olgyay, 2015.

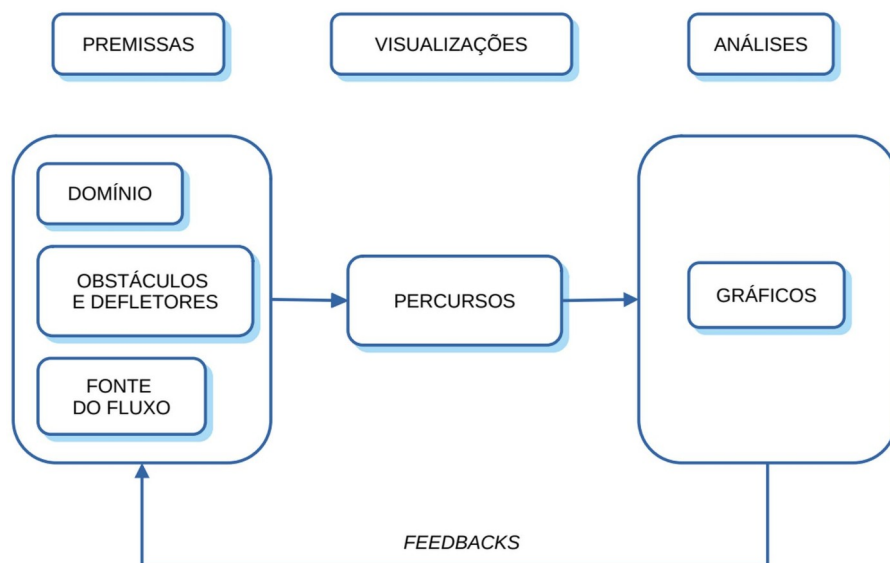
Figura 4.18. Dispositivos em aberturas



Fonte: Olgyay, 2015.

Um modelo para simulação, que supõe animação e física para conseguir observar a performance do fluxo do ar, pode precisar de *feedbacks* (Figura 4.19).

Figura 4.19. Esquema da aplicação de simulações com o uso de animação e de solucionador físico



Para serem conduzidos os experimentos, respondendo a esses *feedbacks*, com a direção inicial da ventilação definida pelo domínio, podem ser alterados os posicionamentos e formatos dos objetos de obstáculos e defletores, para que o fluxo de ar seja modificado e atenda os objetivos de bloqueio e deflexão esperados.

A análise dos modelos clássicos organizados por Olgyay (2015), partindo-se da tecnologia de *voxels* foi realizada com o auxílio do *software Blender*, versão 2.92, (*BLENDER FOUNDATION*, 2021), que principalmente incorpora o pacote de simuladores físicos *mantaflow* com as velocidades influenciadas pelo controle padrão 1 da densidade do fluxo em algoritmo, para o método semi-lagrangeano de segunda ordem (PFAFF; THUERREY, 2020), com suporte do formato *OpenVDB* (MUSETH *et al.*, 2020).

Para representação sobre *voxels*, que se comportam como unidades de volumes esparsos, adota-se o padrão de utilização de setas espaciais em escalas de velocidade de cores do azul ao magenta e de variações de dimensões dessas setas para as velocidades crescentes de vento, que em estudos clássicos são representados em linhas de correntes. Nos extremos, as setas menores em azul significam baixas velocidades de fluxo enquanto setas maiores em magenta compreendem altas velocidades. No entanto, cabe observar que espaços com mudança de direção em relação ao fluxo de ventilação principal, na perspectiva de colisão com objetos, e setas menores em magenta, podem significar diminuições de velocidades em relação às setas maiores de mesma cor.

As representações obtidas são projeções em *PIV - Particle Image Velocimetry* substituindo visualizações em linhas de correntes, para a apreciação de vetores sobre os *voxels*. Como pós-produção sobre as simulações, são indicados os sinais de positivo (+) significando as pressões aerodinâmicas de ataque e de negativo (-) para pressões aerodinâmicas de arrasto.

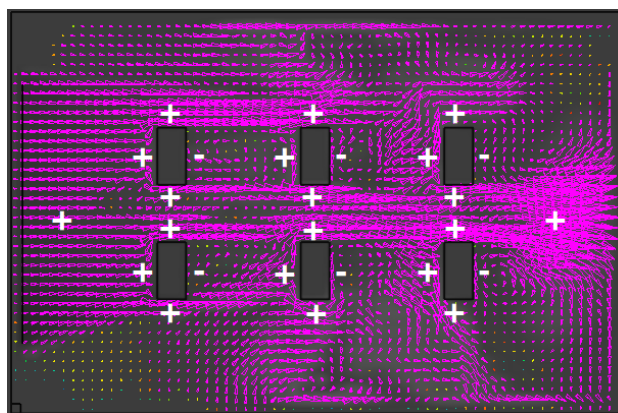
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados os testes em simulação de fluxos no *software Blender (BLENDER FOUNDATION, 2021)* dos modelos da *Princeton University (OLGYAY, 2015)*, para analisar a eficiência da ventilação.

Em relação ao arranjo de prédios, paralelos à fonte (Figuras 4.20 e 4.21), observou-se que o resultado do fluxo da simulação computacional para o efeito pretendido de bloqueio de ventilação, pelo distanciamento acentuado dos blocos, há o preenchimento com a ventilação das laterais e dos espaços frontais aos prédios, dificultando a proteção.

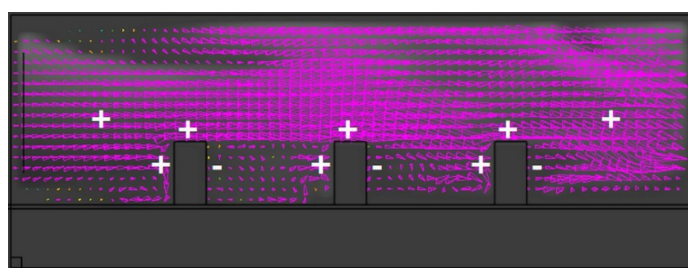
Portanto, há a necessidade de se promover um menor distanciamento dos elementos pela direção da emissão do fluxo para realizar o bloqueio mais efetivo (Figura 4.22).

Figura 4.20. Simulação computacional de proteção contra o vento com arranjo linear entre prédios em planta



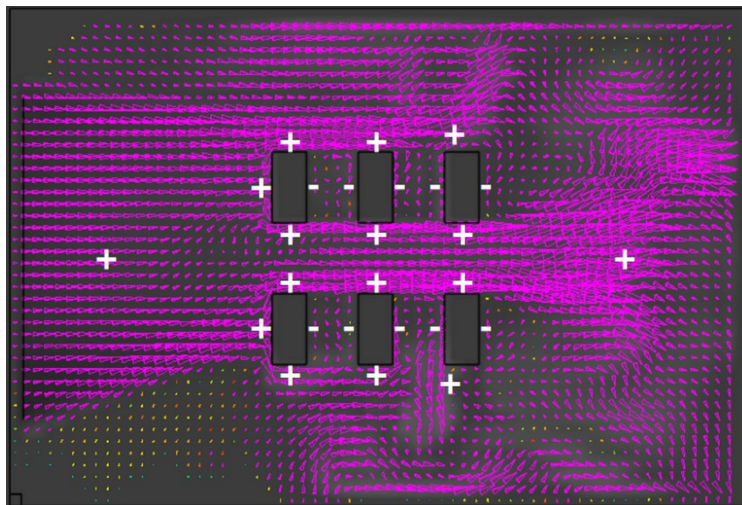
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

Figura 4.21. Simulação computacional de proteção contra o vento com arranjo linear entre prédios em elevação



Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

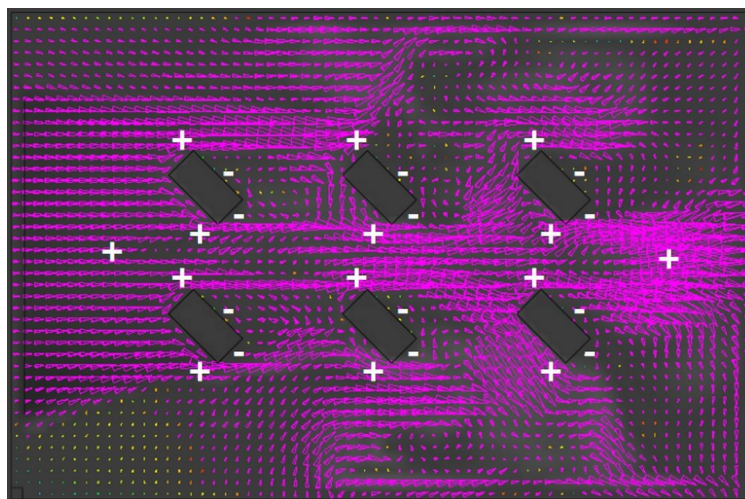
Figura 4.22. Proposição em simulação computacional de encurtamento na distância entre os prédios de arranjo linear na direção do fluxo e maior eficiência de bloqueio de ventilação



Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

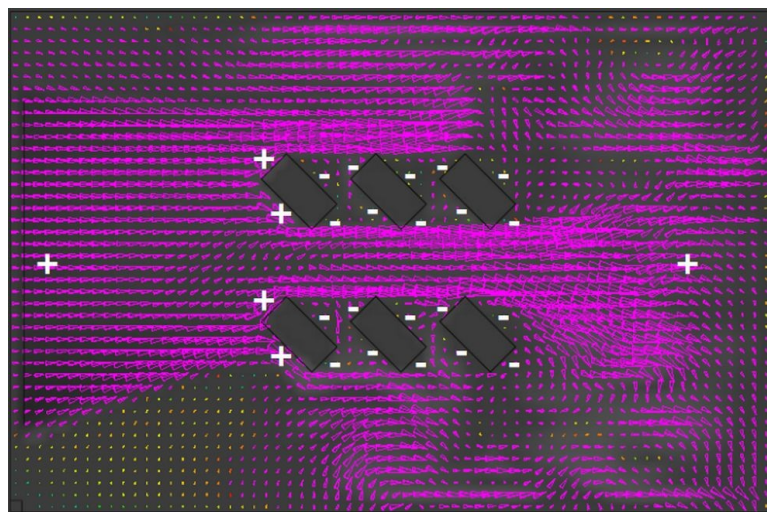
Para o objetivo de trazer mais ventilação para prédios, a ventilação oblíqua resolve, mas ainda necessita promover uma distância satisfatória entre os blocos (Figuras 4.23 e 4.24).

Figura 4.23. Simulação computacional de efeito de proteção contra o vento com arranjo de 45 graus entre prédios em planta



Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

Figura 4.24. Proposição em simulação computacional de encurtamento na distância entre os prédios do arranjo de 45 graus na direção do fluxo e maior eficiência de bloqueio de ventilação



Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

Objetos intercalados garantem uma interessante disposição para receber ventilação (Figura 4.25).

Figura 4.25. Simulação computacional de arranjo intercalado para aproveitamento de brisas em planta

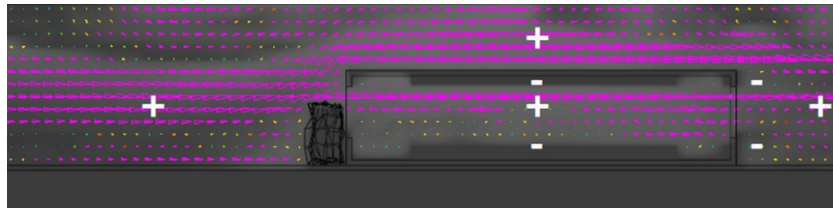


Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

Dos estudos de White (1945), pela *Texas Engineering Experiment Station* divulgados por Olgyay (2015), há as propostas de fluxo entre barreira vegetal e as construções. No

entanto, são apresentadas sem registro fotográfico, baseadas apenas em croquis. Das barreiras de cercas vivas, de altura média, situadas em relação à construção, foram feitas as simulações computacionais (Figuras 4.26 a 4.28).

Figura 4.26. Simulação computacional de fluxo de ar com cerca viva média sobre a fachada em vista de elevação



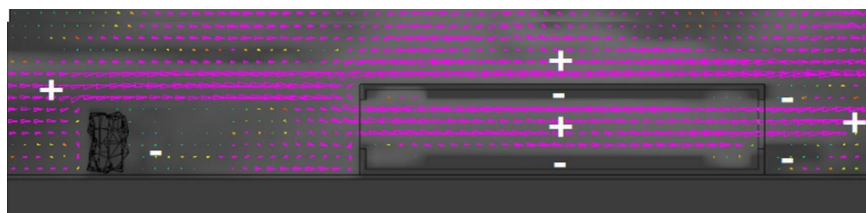
Fonte: Simulada sobre White *apud* Olgyay, 2015.

Figura 4.27. Simulação computacional de fluxo de ar com cerca viva média a 3 m da fachada em vista de elevação



Fonte: Simulada sobre White *apud* Olgyay, 2015.

Figura 4.28. Simulação computacional de fluxo de ar com cerca viva média a 6 m da fachada em vista de elevação



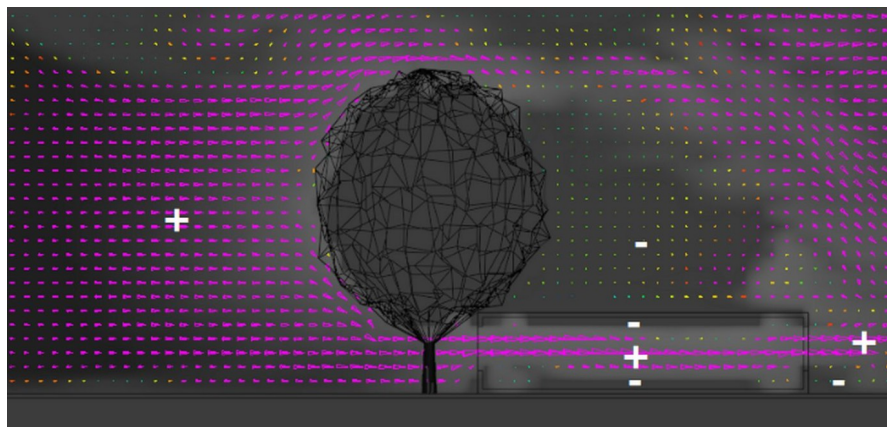
Fonte: Simulada sobre White *apud* Olgyay, 2015.

Com o aumento da distância da barreira à fachada, percebe-se que nos modelos e nas simulações, crescem os volumes de ventilação com maior velocidade no interior da construção.

A diferença principal entre esses modelos com cerca e as simulações consiste nas velocidades maiores ao piso dos modelos não serem verificadas nas simulações.

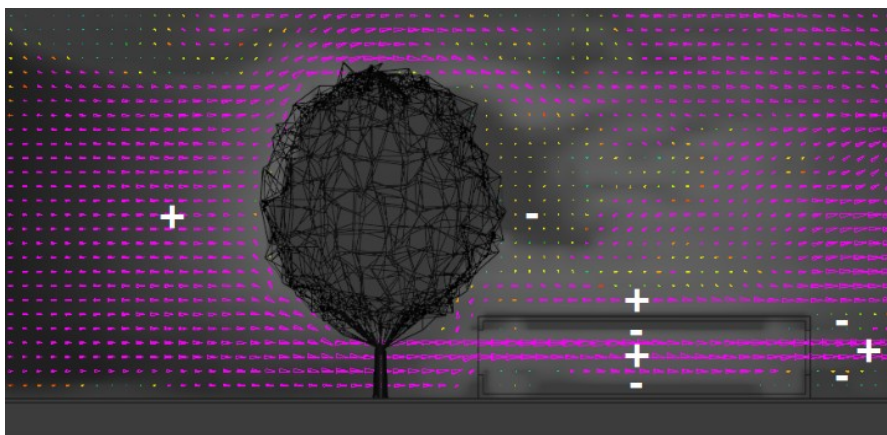
Quanto ao obstáculo de árvore situada à construção, percebe-se que a área de arrasto, a sombra de vento da copa da árvore, mostra-se bem compatível entre os modelos e as simulações (Figuras 4.29 a 4.31).

Figura 4.29. Simulação computacional de fluxo de ar com árvore de maior porte a 1,5 m da fachada em vista de elevação



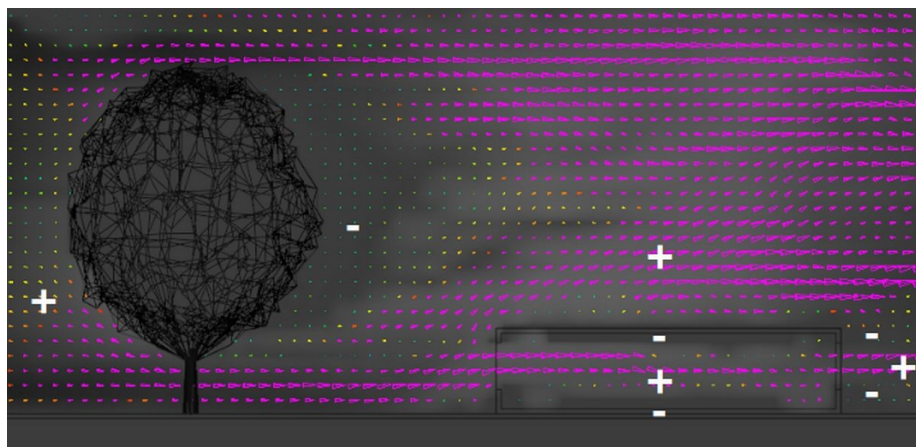
Fonte: Simulada sobre White *apud* Olgyay, 2015.

Figura 4.30. Simulação computacional de fluxo de ar com árvore de maior porte a 3 m da fachada em vista de elevação



Fonte: Simulada sobre White *apud* Olgyay, 2015.

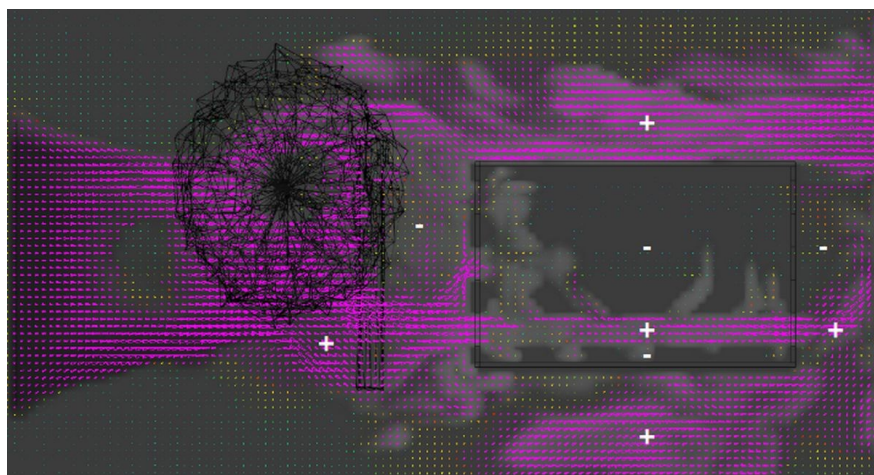
Figura 4.31. Simulação computacional de fluxo de ar com árvore de maior porte a 6 m da fachada em vista de elevação



Fonte: Simulada sobre White *apud* Olgyay, 2015.

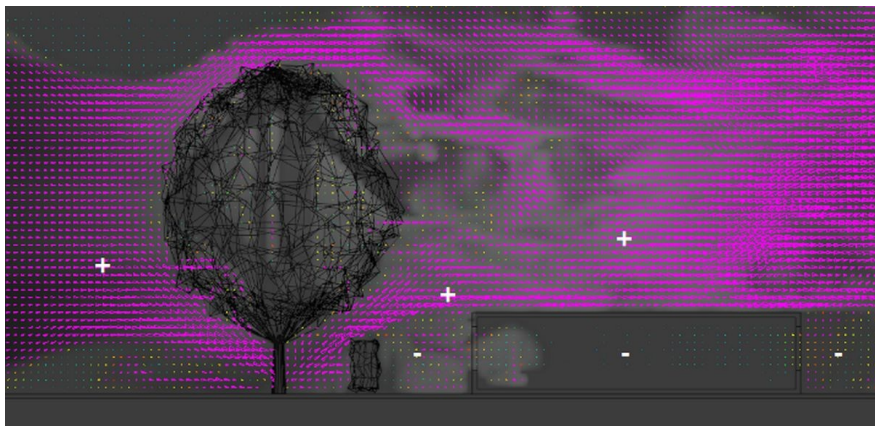
Para a simulação conjunta do modelo de árvore e cerca, não há um refluxo significativo na direção da árvore, contrariamente ocorre uma situação mais próxima à estagnação do ar dentro da construção nessa direção e no eixo longitudinal da construção (Figuras 4.32 a 4.34).

Figura 4.32. Simulação computacional de fluxo de ar com árvore de maior porte e cerca viva média em planta



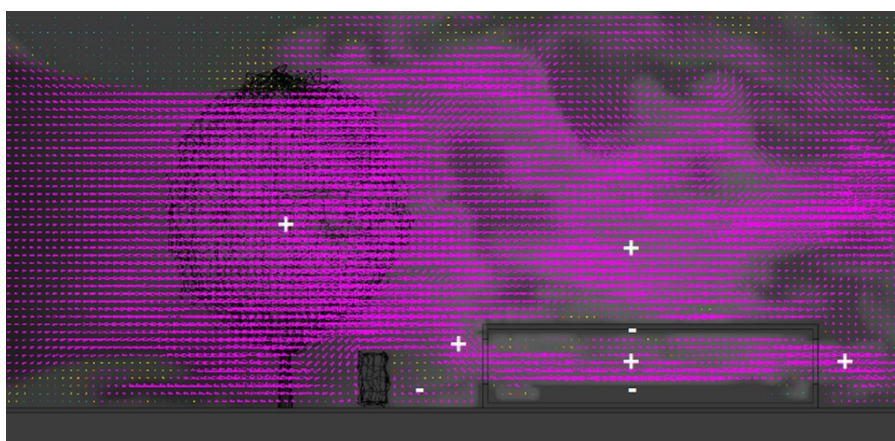
Fonte: Simulada sobre White *apud* Olgyay, 2015.

Figura 4.33. Simulação computacional de fluxo de ar com árvore de maior porte e cerca viva média em elevação com referência ao eixo da árvore pela vista de frente



Fonte: Simulada sobre White *apud* Olgyay, 2015.

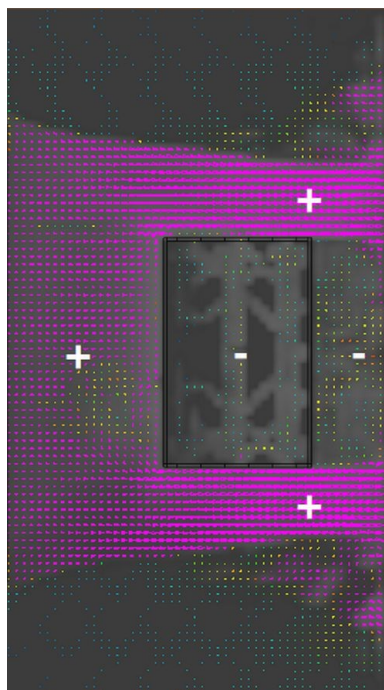
Figura 4.34. Simulação computacional de fluxo de ar com árvore de maior porte e cerca viva média em elevação com referência ao eixo longitudinal da construção



Fonte: Simulada sobre White *apud* Olgyay, 2015.

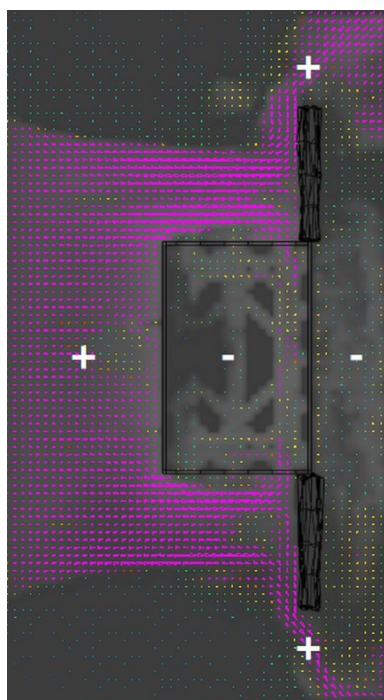
Em relação à alteração de fluxo pela cerca viva na lateral, as simulações não demonstram fluxo interno representativo arejando dentro da construção (Figuras 4.35 e 4.36), predominando o arrasto, maior massa de ar para lateral da construção, e contrariando radicalmente os modelos nas cercas em recuo.

Figura 4.35. Simulação computacional de fluxo de ar sem cerca viva em planta



Fonte: Simulada sobre White *apud* Olgyay, 2015.

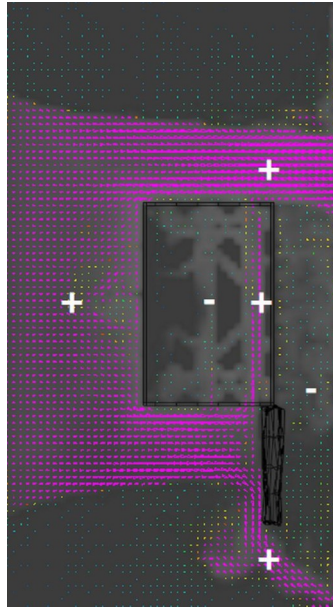
Figura 4.36. Simulação computacional de fluxo de ar alterado por cerca viva recuada em planta



Fonte: Simulada sobre White *apud* Olgyay, 2015.

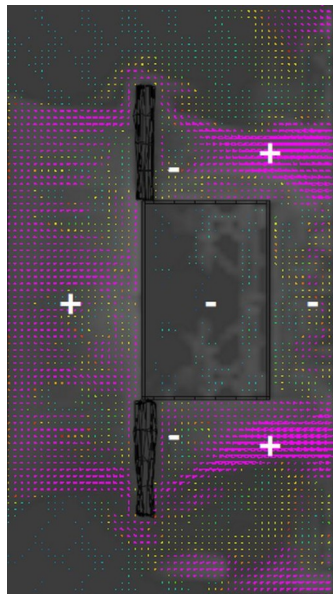
No entanto, a solução da cerca recuada em uma das laterais garante um maior fluxo de ar no interior da construção na simulação (Figura 4.37) do que nas duas laterais (Figura 4.38).

Figura 4.37. Simulação computacional de fluxo de ar alterado por cerca viva em uma das laterais da construção recuada em planta



Fonte: Simulada sobre White *apud* Olgyay, 2015.

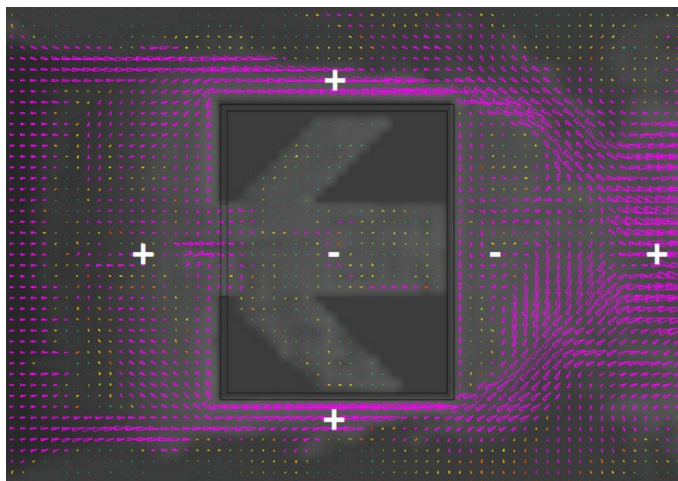
Figura 4.38. Simulação computacional de fluxo de ar alterado por cerca viva avançada em planta



Fonte: Simulada sobre White *apud* Olgyay, 2015.

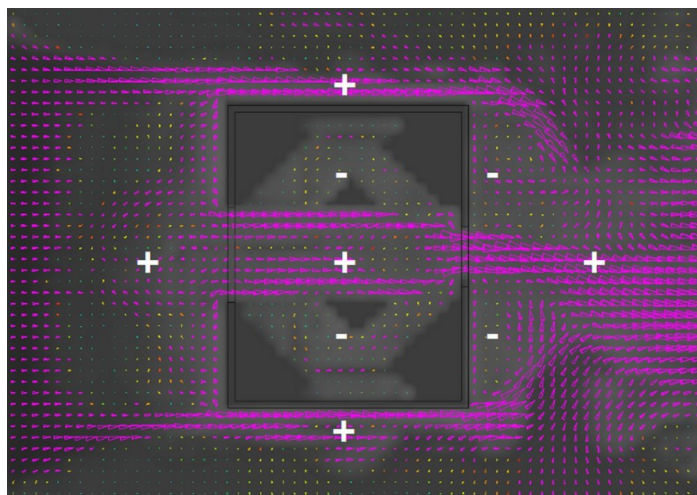
Quanto aos modelos de fluxo de ar no interior da construção, foram feitas as simulações que demonstraram coerentes (Figuras 4.39 a 4.60).

Figura 4.39. Simulação computacional de ambiente com uma abertura e praticamente sem fluxo interno em planta



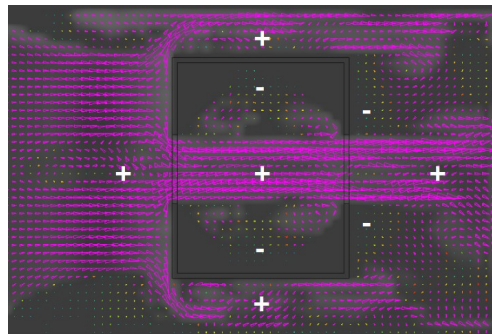
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

Figura 4.40. Simulação computacional de ambiente com aberturas de entrada e de exaustão em planta



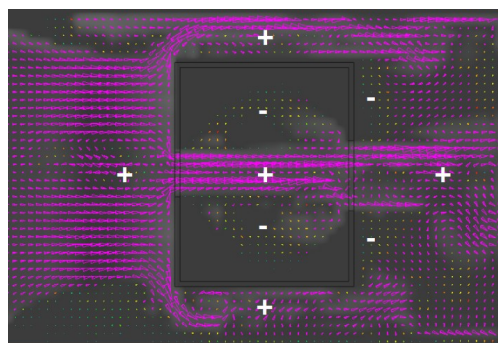
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

Figura 4.41. Simulação computacional com aberturas de mesmas dimensões com eixo centralizado em paredes opostas em planta



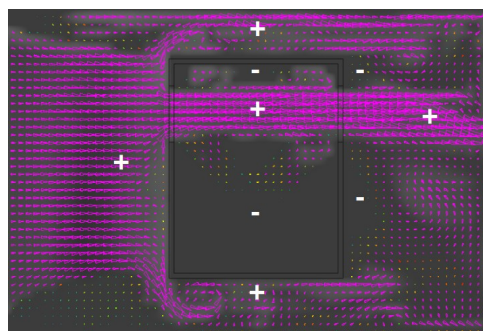
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

Figura 4.42. Simulação computacional com abertura de entrada menor que abertura de exaustão em paredes opostas em planta



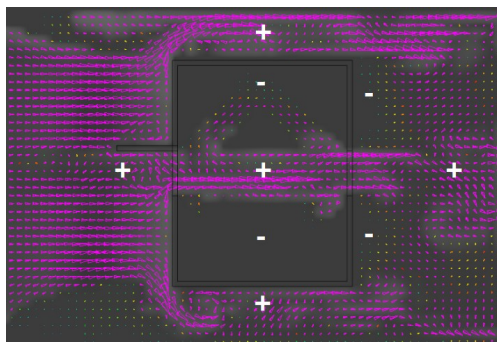
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

Figura 4.43. Simulação computacional com aberturas de mesmas dimensões com eixo deslocado em paredes opostas em planta



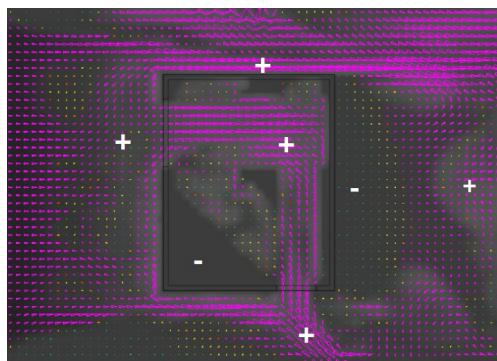
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

Figura 4.44. Simulação computacional com um brise na abertura de entrada em planta



Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

4.45. Simulação computacional com aberturas para paredes em ângulo em planta



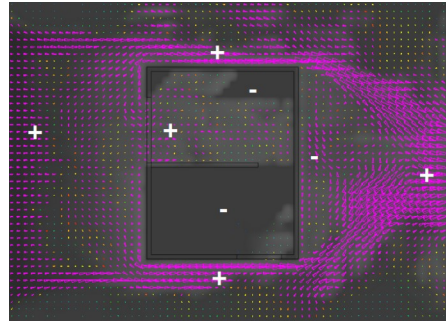
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

Das simulações que comprovaram os modelos com as aberturas em planta, vale destacar o ambiente estagnado de fluxo por não possuir abertura de exaustão (Figura 4.39), pouco explorado em códigos de obras que se baseiam em tamanho maior de abertura sem preocupação com entrada e saída, e o de maior aproveitamento de fluxo que consiste no que, no Brasil, se considera o mais representativo da ventilação cruzada (Figura 4.45), sendo que o efeito chaminé com entrada de ar pelas paredes e saída pelo teto, pode ser uma outra situação mais específica de ventilação cruzada, por ser na vertical.

A introdução de divisórias impacta o fluxo de ar nos ambientes (Figuras 4.46 a 4.49). As simulações de aproximaram dos modelos na dispersão do ar, no entanto, houve maior

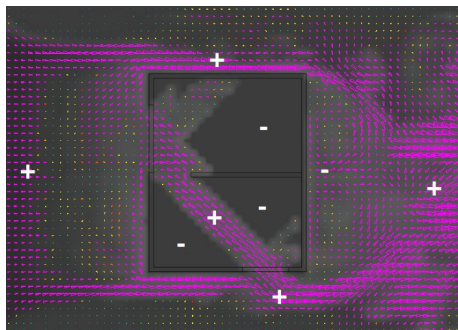
estagnação do ar com a divisória conectada diretamente à abertura de entrada na simulação (Figura 4.46).

4.46. Simulação computacional de fluxo com aberturas em paredes em ângulo interceptado por divisória perpendicular e conectada à entrada em planta



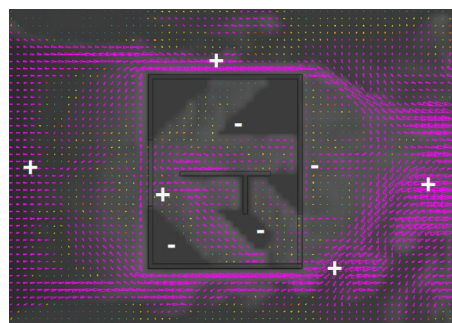
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

4.47. Simulação computacional de fluxo com aberturas em paredes em ângulo interceptado por divisória perpendicular e desconectada à entrada em planta



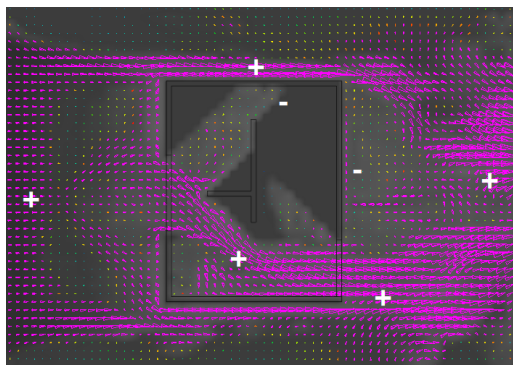
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

4.48. Simulação computacional de fluxo com aberturas em paredes opostas interceptado por divisórias em T em planta



Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

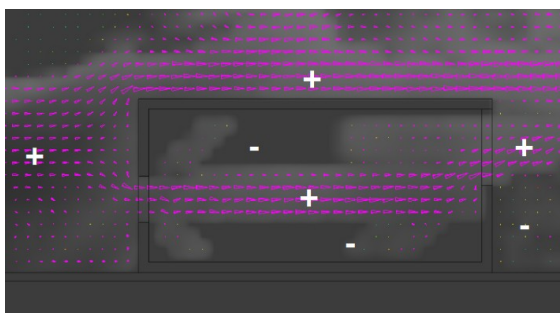
4.49. Simulação computacional de fluxo com aberturas em paredes opostas interceptado por divisórias em T rotacionado em planta



Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

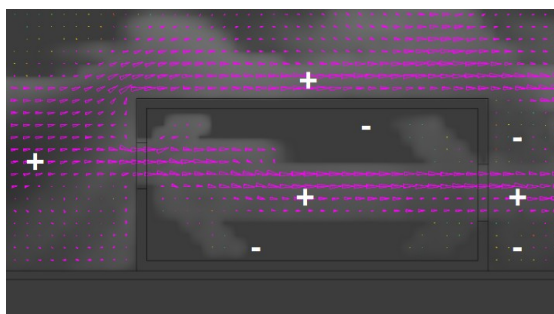
Analisando a influência das alturas de aberturas em vistas de elevação, percebe-se a compatibilidade entre os modelos e as simulações nos fluxos de ar (Figuras 4.50 a 4.60).

4.50. Simulação computacional com abertura de entrada em meia altura e abertura de exaustão alta em elevação



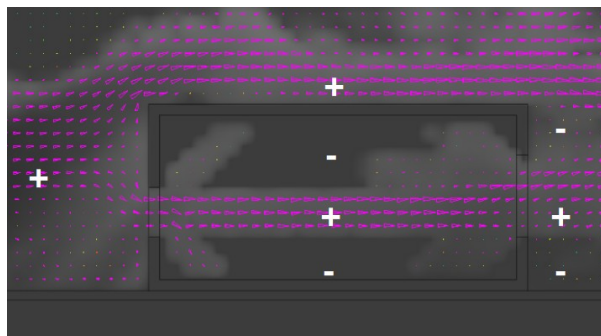
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

4.51. Simulação computacional com abertura de entrada alta e abertura de exaustão em meia altura em elevação



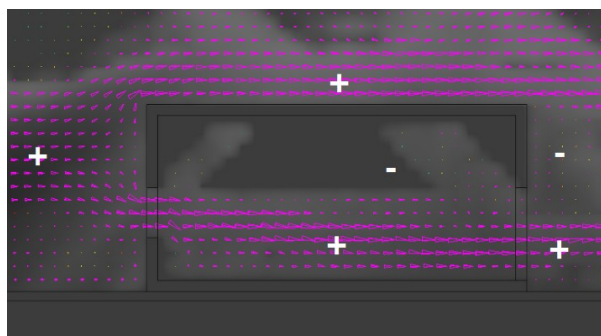
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

4.52. Simulação computacional com abertura de entrada pequena e abertura de exaustão grande em elevação



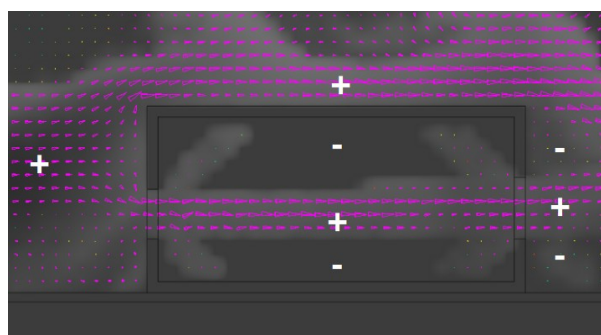
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

4.53. Simulação computacional com abertura de entrada pequena e abertura de exaustão grande alcançando o piso em elevação



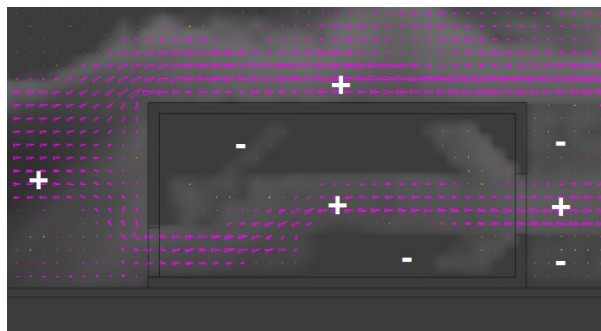
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

4.54. Simulação computacional com aberturas aproximadas em tamanho em elevação



Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

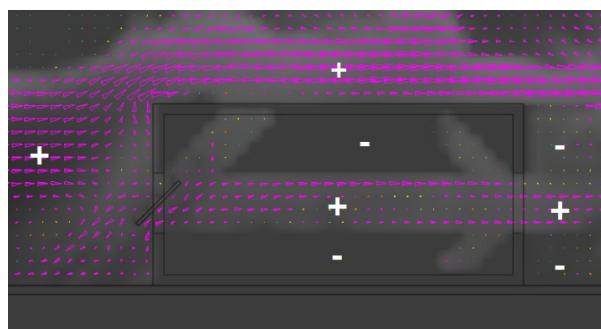
4.55. Simulação computacional com abertura de entrada ao piso e abertura de exaustão na altura média em elevação



Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

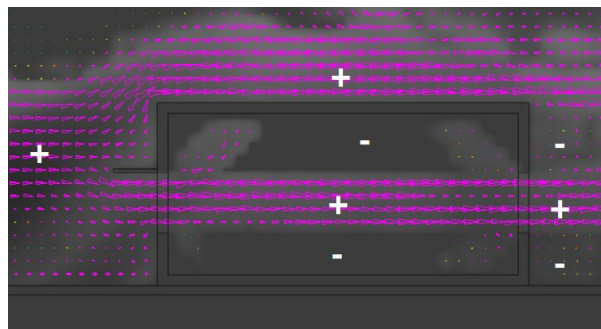
O fluxo de ar pode sofrer alteração com dispositivos instalados na abertura, conforme os modelos e simulações que se mostraram adequados.

4.56. Simulação computacional para abertura de entrada com basculante em elevação



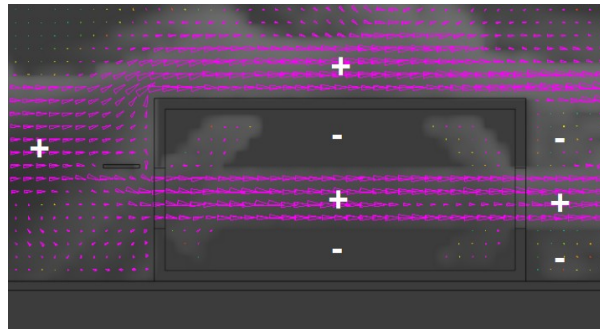
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

4.57. Simulação computacional para abertura de entrada com viseira em elevação



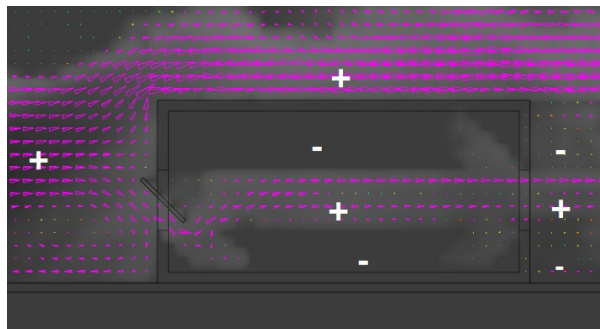
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

4.58. Simulação computacional para abertura de entrada com afastamento de viseira em elevação



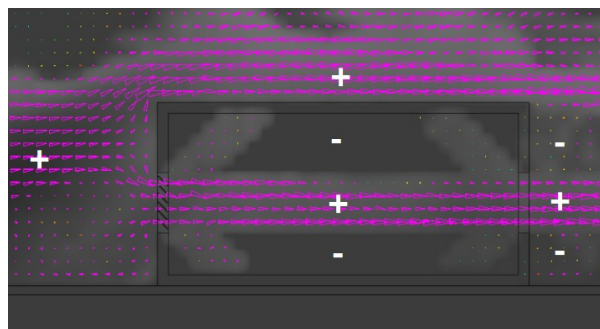
Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

4.59. Simulação computacional para abertura de entrada com basculante invertida em elevação



Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

4.60. Simulação computacional para abertura de entrada com venezianas em elevação



Fonte: Simulada sobre Olgyay, 2015.

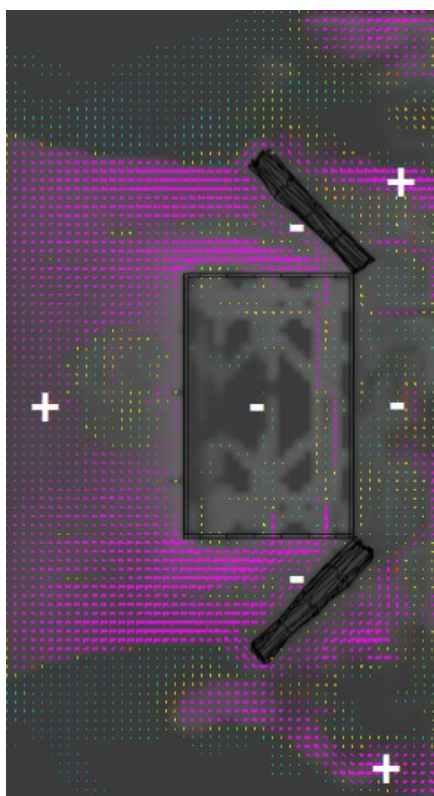
Observados os conjuntos de modelos para as várias situações simuladas, o maior desvio se deu com as propostas de White *apud* Olgyay (2015) sobre a questão que se resume em como fazer fluir o ar de forma oblíqua internamente.

São buscados os *feedbacks* (Figura 4.19) para atender o objetivo de gerar o fluxo, que faz parte das premissas.

Foram simuladas novas proposições, utilizando cercas vivas e dispositivos para aberturas (Figuras 4.61 a 4.64).

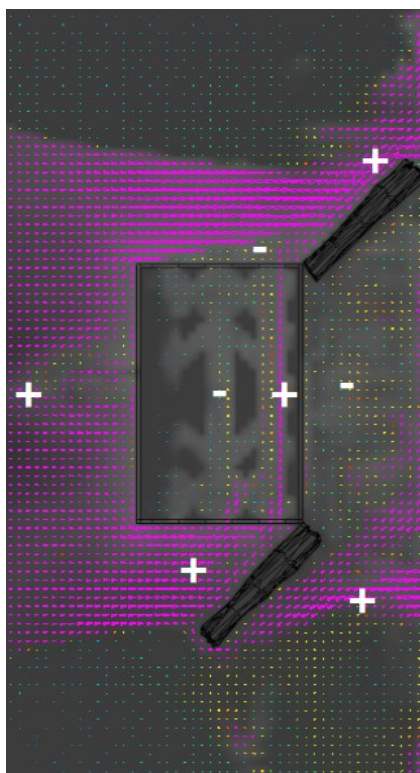
O primeiro *feedback* consistia na hipótese do ângulo desfavorável, portanto foi estudada uma simulação que compõe cercas recuadas em 45 graus, que mesmo garantindo um fluxo de ar maior que a simulação de linhas no mesmo eixo recai no problema de não haver um escape típico do fluxo, por ter pressões equivalentes se opondo (Figura 4.61).

Figura 4.61. Estudo em simulação computacional de fluxo de ar alterado por cerca viva recuada em ângulo de 45 graus caracterizando aberturas mais evidentes para entradas dos dois lados em planta



Surgiu o segundo *feedback* que foi a necessidade de substituir as funções mais exclusivas de ângulos de entrada, como ocorreu na simulação, por entrada e exaustão. Foi constatada que a solução permitiu ser a disposição da cerca para concentração do ar para entrada de um lado da construção e de outra cerca para dispersão do ar para saída, do lado oposto, aumentando a velocidade do fluxo interno (Figuras 4.62 a 4.63). No entanto, as aberturas oblíquas do topo ainda apresentam uma zona mais próxima de pressão dinâmica negativa, caracterizando nessa parte uma distribuição de arrasto que atua na diminuição de exaustão (Figura 4.62).

Figura 4.62. Proposição em simulação computacional de fluxo de ar alterado por cerca viva recuada em ângulo de 45 graus caracterizando aberturas de entradas de um lado e de aberturas de saída do lado oposto em planta



Com as aberturas do topo mais distanciadas da área de arrasto e mais próximas a uma pressão dinâmica positiva, a solução que usa a cerca avançada para as saídas de ar garante um maior fluxo interno e exaustão (Figura 4.63).

Uma solução para fluxos de ar, substituindo cercas de vegetação, no binômio de entrada e saída de ar, seguindo um ângulo favorável com melhor distribuição para exaustão, pode ser realizada por anteparas (brises) (Figura 4.64).

Figura 4.63. Proposição em simulação computacional de fluxo de ar alterado por cerca viva recuada para aberturas de entradas de um lado e avançada para aberturas de saída do lado oposto em planta

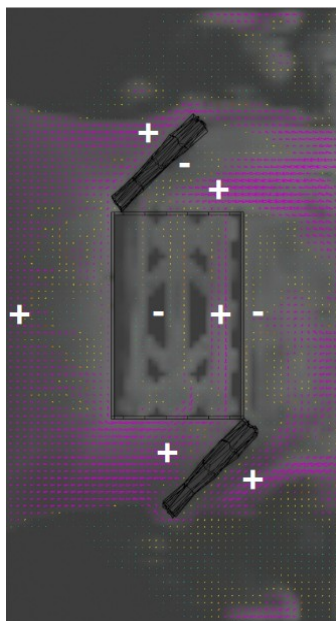
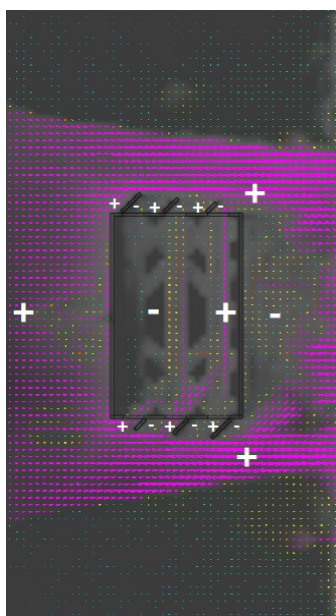


Figura 4.64. Proposição e simulação computacional de fluxo de ar alterado por brises



4.4. CONCLUSÃO

As tecnologias computacionais tornadas acessíveis permitem fazer experimentações de clássicos do *design* bioclimático.

São explorados os modelos da *Princeton University*, da obra de Olgyay (2015), para eficiência de ventilação nas construções baseados em uso de *voxels* nas simulações.

Dos resultados alcançados, podem ser extraídos *feedbacks* para readequação de simulações e constituição de novos modelos. Quanto mais as aberturas, de entrada e de saída do fluxo, se acobertarem de pressões positivas, maiores as possibilidades de renovação do ar.

As formas definem ângulos de ataque, que controlam as deflexões, que influem nas linhas de correntes do vento. As geometrias nos arranjos de edifícios e no uso de vegetação possuem o potencial de proporcionar, se corretamente dispostas, o direcionamento da ventilação.

4.5. REFERÊNCIAS

BLENDER FOUNDATION. **blender.org – Home of the Blender project – Free and Open 3D**. Disponível em <https://blender.org>. Acesso em: 16 jan. 2021.

BLESSMANN, Joaquim. **Aerodinâmica das construções**. Porto Alegre: Sagra, 1990.

CÓSTOLA, Daniel. **Ventilação por ação do vento no edifício**: procedimentos para quantificação. 2006. PhD Thesis. Universidade de São Paulo.

CHRONIS, Angelos; LIAPI, Katherine; SIBETHEROS, Iohannis. A parametric approach to the bioclimatic design of large scale projects: The case of a student housing complex. **Automation in construction**, Amsterdam, v. 22, p. 24-35, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.09.007>

EASTLAKE, Charles N., DAHMEN Sílvio Renato. A visão de um engenheiro aeronáutico acerca da sustentação, Bernoulli e Newton. **Física na escola**. São Paulo, Vol. 7, n. 2, p. 52-57, 2006.

ETHERIDGE, David W.; SANDBERG, Mats. **Building ventilation: theory and measurement**. Chichester: John Wiley & Sons, 1996.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 1995.

MUSETH, Ken. et al. **OpenVDB**. Disponível em <http://www.openvdb.org>. Acesso em: 19 nov. 2020.

KORMANÍKOVÁ, Lenka et al. Parametric wind design. **Frontiers of Architectural Research**, v. 7, n. 3, p. 383-394, 2018.

NGUYEN, Anh-Tuan; REITER, Sigrid; RIGO, Philippe. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043-1058, 2014.

OLGYAY, Victor. **Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism**-new and expanded edition. Princeton University Press, 2015. Kindle Edition.

PFAFF, Tobias; THUEREY, Nils. **mantaflow**. Disponível em <http://www.mantaflow.com>. Acesso em: 19 nov. 2020.

ROBINETTE, Gary O. **Plants, people, and environmental quality: A study of plants and their environmental functions**. US Department of the Interior, National Park Service, 1972.

WELTNER, Klaus et al. A dinâmica dos fluidos complementada e a sustentação da asa. Licenciado sob Creative Commons. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 429-443, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-47442001000400009>

WHITE, Robert F. **Effects of Landscape development on the natural ventilation of buildings and their adjacent Area**. Texas Engineering Experiment Station, Research Report, 1945.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma introdutória, o trabalho da tese tipifica padrões de espaços do vento como elementos de composição e decomposição em estruturas espaciais.

Para favorecer a obtenção de dados de pontos mais específicos do planeta, como direção e velocidade predominante do vento, foi feita a busca de geotecnologias *on-line*, que retorna com a recomendação do sistema *GWA – Global Wind Atlas, da DTU - Danmarks Tekniske Universitet* (2020).

Os *voxels* da computação gráfica são lidos e traduzidos entre diversos sistemas e equipamentos, tendo potencial de diversas aplicações em visualizações. A capacidade em preencher espaços vazios com interpolação de conteúdo e trazer suporte à animação faz dessas unidades espaciais um importante suporte gráfico para usos tecnológicos e científicos, incluindo elementos dinâmicos simuladores.

Basicamente, a parte ferramental da pesquisa explora os modelos clássicos de ventilação da *Princeton University*, organizados por Olgyay (2015), sendo testados por um conjunto de ferramentas digitais de uso livre, principalmente com a suíte gratuita de modelagem e animação *Blender* (*BLENDER FOUNDATION*, 2021), associada ao gestor de solucionadores físicos *mantaflow* (PFAFF; THUEREY, 2020), que utilizam os padrões de *voxels*.

Sobre os campos de bloqueios e espaços de liberação de fluxos do ar, a interface observada entre as simulações computacionais e os modelos clássicos de Olgyay (2015) vem trazer resultados de compatibilidade, enquanto para os estudos de White *apud* Olgyay (2015) se encontra maior incompatibilidade.

REFERÊNCIAS

BLENDER FOUNDATION. **blender.org – Home of the Blender project – Free and Open 3D**. Disponível em: <https://blender.org>. Acesso em: 16 jan. 2021.

DTU. **Danmarks Tekniske Universitet – Global Wind Atlas**. Disponível em <https://globalwindatlas.info/>. Acesso em: 08 dez. 2020.

NGUYEN, Anh-Tuan; REITER, Sigrid; RIGO, Philippe. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043-1058, 2014.

OLGYAY, Victor. **Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism**-new and expanded edition. Princeton University Press, 2015. Kindle Edition.

PFAFF, Tobias; THUEREY, Nils. **mantaflow**. Disponível em: <http://www.mantaflow.com>. Acesso em: 19 nov. 2020.

APÊNDICE I

Artigo “Obras verticais magistrais: a composição desmaterializada de espaços aerados”, publicado em dossiê “Espaços Maleáveis”, da revista PORTO ARTE, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/PortoArte/article/view/120007>