

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ALLEKSANDER RODRIGUES SANTOS

ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE TORRES DE VENTO PARA
MELHORIA DA VENTILAÇÃO NATURAL EM AMBIENTES

Jataí
2025



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia - Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho apresentado em evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome completo do autor: Alleksander Rodrigues
Santos Matrícula: 20161020260064

Título do trabalho: Estudo da viabilidade da utilização de torres de vento para melhoria da ventilação natural em ambientes

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
- ☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
- ☐ Outra justificativa: _____.

Declaração de distribuição não-exclusiva

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do

documento entregue;

- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Jataí, 13/02/2025.

Local Data

(Assinado Eletronicamente)

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Documento assinado eletronicamente por:

■ **Alleksander Rodrigues Santos**, 20161020260064 - Discente, em 25/02/2025 15:49:21.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 12/02/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 617323

Código de Autenticação: 6f95d16535



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Av. Presidente Juscelino Kubitschek,, 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3514-9580 (ramal: 9580)

ALLEKSANDER RODRIGUES SANTOS

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE TORRES DE VENTO PARA
MELHORIA DA VENTILAÇÃO NATURAL EM AMBIENTES**

Trabalho apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Dra. Francielle Coelho dos Santos

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Santos, Alleksander Rodrigues

Estudo de viabilidade da utilização de torres de vento para melhoria da ventilação natural em ambientes [manuscrito] / Alleksander Rodrigues Santos. -- Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Engenharia Civil, 2025.

93 f.; il.

Orientadora: Dra Francielle Coelho dos Santos

Bibliografias.

1. Torre de vento. 2. Ventilação natural. 3. Conforto térmico. I. Santos, Francielle Coelho dos. II. IFG, Campus Jataí. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Aquisição e Tratamento da Informação.

Bibliotecária – Wilma Joaquim da Silva – CRB 1/1850 – Campus Jataí. Cód. F 026-2025/1

ALLEKSANDER RODRIGUES SANTOS

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE TORRES DE VENTO PARA
MELHORIA DA VENTILAÇÃO NATURAL EM AMBIENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel e Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovada, em 13 de fevereiro de 2025, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a Francielle Coelho dos Santos
Presidente da banca/ Orientadora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof^a. Dr^a Monica Maria Emerenciano Bueno
Membro Interno
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Arquiteta Mestra Fernanda Caroline Magalhães
Membro Externo
Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico

Jataí
2025

Documento assinado eletronicamente por:

- **Monica Maria Emerenciano Bueno, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 05/03/2025 14:31:59.
- **Fernanda Caroline Rodrigues Magalhães, Fernanda Caroline Rodrigues Magalhães - 214125 - Arquiteto urbanista - Ifg - Câmpus Jataí (10870883000306)**, em 25/02/2025 07:56:24.
- **Francielle Coelho dos Santos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 24/02/2025 15:57:14.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 12/02/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 617322

Código de Autenticação: c735beb7e3



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Av. Presidente Juscelino Kubitschek,, 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714

(64) 3514-9580 (ramal: 9580)

RESUMO

A ventilação natural é uma das estratégias mais eficientes para resfriamento passivo dos edifícios e para a manutenção da qualidade do ar. Uma forma de utilizar a ventilação natural é através de torres de vento, um sistema bastante utilizado em países do Oriente Médio e norte da África, que são estruturas localizadas na parte superior da edificação, captando o vento incidente e o direcionando para o seu interior. No Brasil, onde predomina o clima quente e úmido, as taxas de velocidade do ar são favoráveis para a utilização do sistema para melhorar o conforto térmico. Este estudo tem como objetivo viabilizar o uso de torres de vento para edificações residenciais na cidade de Jataí. Para isso, foram feitas simulações computacionais no *software* Ansys Fluent, os quais permitiram estudar as características técnicas das torres analisadas e seus efeitos na ventilação interna dos ambientes. As simulações foram feitas em 3 tipos de torres de vento: a unidirecional, com uma abertura; a bidirecional com duas aberturas e a tetradirecional com quatro aberturas. Após análise dos dados, a torre tetradirecional obteve melhores resultados, pois capta o vento nas quatro direções. Os resultados obtidos, comprovam que há um grande potencial para o uso desta estratégia para regiões com clima quente e úmido.

Palavras-chave: Torre de vento. Ventilação natural. Conforto térmico.

ABSTRACT

Natural ventilation is one of the most suitable strategies for passive cooling of buildings and for maintaining air quality. One way to utilize natural ventilation is through wind towers, a system widely used in Middle Eastern and North African countries. These are structures located at the top of buildings that capture incoming wind and lead to the inside. In Brazil, where a hot and humid climate predominates, air velocity rates are favorable for using this system to improve thermal comfort. This study aims to make the use of wind towers feasible for residential buildings in Jataí city. For this purpose, computational simulations were carried out using the Ansys Fluent *software*, allowing the study of the technical characteristics of the analyzed towers and their effects on indoor ventilation. Simulations were conducted for three types of wind towers: unidirectional (with one opening), bidirectional (with two openings), and tetradirectional (with four openings). After analyzing the data, the tetradirectional tower achieved the best results, as it captures wind from all directions. The results demonstrate a great potential for using this strategy in regions with hot and humid climates.

Keywords: Wind tower. Natural ventilation. Thermal comfort.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Torre de vento em Yazd.....	18
Figura 2 – Windcatchers na casa Faraônica de Neb-Ammun, Egito, 19 ^a Dinastia, c.1300 a.C., Museu Britânico	19
Figura 3 – Vista superior dos tipos de torre de vento baseado em direções.....	20
Figura 4 – Vista superior dos tipos de torres de vento baseadas em sua forma	21
Figura 5 - Divisórias primárias e secundárias de uma torre de vento	22
Figura 6 - Parque Nacional de Zion, Sringdale, EUA.....	23
Figura 7 – Casa com torre de vento em Jalal Abad	23
Figura 8 - Universidade do Catar	24
Figura 9 - Centro de reabilitação Sarah Kubischek, Rio de Janeiro	24
Figura 10 - Planta baixa e cortes das unidades habitacionais.....	25
Figura 11 - Corte da casa de Bagh-e Khan.....	26
Figura 12 - Impacto ocasionado por construções vizinhas na ventilação interna	27
Figura 13 - Esquema da edificação sem torre de vento	30
Figura 14 - Esquema de edificação com torre unidirecional	31
Figura 15 - Esquema de edificação com torre bidirecional	32
Figura 16 - Esquema de edificação com torre tetradirecional	32
Figura 17 - Velocidade máxima do vento no mês registrada em diferentes horários do dia....	33
Figura 18 - Velocidade média do vento no mês registrada em diferentes horários do dia.....	33
Figura 19 - Posição do vento para simulações	34
Figura 20 - Planos de corte para análise de resultados	34
Figura 21 - Painel de comando do <i>software</i> Ansys Discovery.....	35
Figura 22 - Modelagem da casa dentro do <i>software</i> Ansys Discovery	35
Figura 23 - Criação do domínio do modelo.....	36
Figura 24 - Detalhamento da malha	37
Figura 25 - Entrada e saída do fluido no domínio	38
Figura 26 - Velocidade máxima do vento no mês registrada em diferentes horários do dia....	39
Figura 27 - Velocidade média do vento no mês registrada em diferentes horários do dia.....	40
Figura 28 - Temperatura máxima no mês registrada em diferentes horários do dia	40
Figura 29 - Temperatura média no mês registrada em diferentes horários do dia	41
Figura 30 - Vetores de velocidade do vento a 0° para modelo sem torre de vento: a) considerando a velocidade a 2 m/s; b) considerando a velocidade a 5 m/s.....	43

Figura 31 - Vetores de velocidade do vento a 90° para modelo sem torre de vento: a) considerando a velocidade a 2 m/s; b) considerando a velocidade a 5 m/s.....	44
Figura 32 - Vetores de velocidade do vento a 180° para modelo sem torre de vento: a) considerando a velocidade a 2 m/s; b) considerando a velocidade a 5 m/s.....	45
Figura 33 - Vetores de velocidade do vento a 270° para modelo sem torre de vento: a) considerando a velocidade a 2 m/s; b) considerando a velocidade a 5 m/s.....	46
Figura 34 – Velocidade do vento de 2 m/s a 0° para modelo de torre de vento unidirecional ..	48
Figura 35 - Velocidade do vento de 5 m/s a 0° para modelo de torre de vento unidirecional..	49
Figura 36 - Velocidade do vento de 2 m/s a 180° para modelo de torre de vento unidirecional	50
Figura 37 - Velocidade do vento de 5 m/s a 180° para modelo de torre de vento unidirecional	51
Figura 38 - Velocidade do vento de 2 m/s a 0° para modelo de torre de vento bidirecional....	53
Figura 39 - Velocidade do vento de 5 m/s a 0° para modelo de torre de vento bidirecional....	54
Figura 40 - Velocidade do vento de 2 m/s a 180° para modelo de torre de vento bidirecional	55
Figura 41 - Velocidade do vento de 5 m/s a 180° para modelo de torre de vento bidirecional	56
Figura 42 - Velocidade do vento de 2 m/s a 0° para modelo de torre de vento tetradirecional	58
Figura 43 - Velocidade do vento de 5 m/s a 0° para modelo de torre de vento tetradirecional	59
Figura 44 - Velocidade do vento de 2 m/s a 180° para modelo de torre de vento tetradirecional	60
Figura 45 - Velocidade do vento de 5 m/s a 180° para modelo de torre de vento tetradirecional	61
Figura 46 - Velocidade do vento de 2 m/s a 90° para modelo de torre de vento tetradirecional	62
Figura 47 - Velocidade do vento de 5 m/s a 90° para modelo de torre de vento tetradirecional	63
Figura 48 - Velocidade do vento de 2 m/s a 270° para modelo de torre de vento tetradirecional	64
Figura 49 - Velocidade do vento de 5 m/s a 270° para modelo de torre de vento tetradirecional	65
Figura 50 - Velocidade do vento de 2 m/s a 0° para modelo de torre de vento unidirecional..	67
Figura 51 - Velocidade do vento de 5 m/s a 0° para modelo de torre de vento unidirecional..	68
Figura 52 - Velocidade do vento de 2 m/s a 180° para modelo de torre de vento unidirecional	69

Figura 53 - Velocidade do vento de 5 m/s a 180° para modelo de torre de vento unidirecional	70
Figura 54 - Velocidade do vento de 2 m/s a 0° para modelo de torre de vento bidirecional....	72
Figura 55 - Velocidade do vento de 5 m/s a 0° para modelo de torre de vento bidirecional....	73
Figura 56 - Velocidade do vento de 2 m/s a 180° para modelo de torre de vento bidirecional	74
Figura 57 - Velocidade do vento de 5 m/s a 180° para modelo de torre de vento bidirecional	75
Figura 58 - Velocidade do vento de 2 m/s a 0° para modelo de torre de vento tetradirecional	77
Figura 59 - Velocidade do vento de 5 m/s a 0° para modelo de torre de vento tetradirecional	78
Figura 60 - Velocidade do vento de 2 m/s a 180° para modelo de torre de vento tetradirecional	79
Figura 61 - Velocidade do vento de 5 m/s a 180° para modelo de torre de vento tetradirecional	80
Figura 62 - Velocidade do vento de 2 m/s a 90° para modelo de torre de vento tetradirecional	81
Figura 63 - Velocidade do vento de 5 m/s a 90° para modelo de torre de vento tetradirecional	82
Figura 64 - Velocidade do vento de 2 m/s a 270° para modelo de torre de vento tetradirecional	83
Figura 65 - Velocidade do vento de 5 m/s a 270° para modelo de torre de vento tetradirecional	84
Figura 66 – Velocidade para modelo sem torre de vento	85
Figura 67 - Velocidade média para modelos com esquadrias abertas	86
Figura 68 - Velocidade média para modelos com esquadrias abertas	87
Figura 69 - Velocidade média para modelos com esquadrias fechadas	88
Figura 70 - Velocidade média para modelos com esquadrias fechadas	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos resultados das simulações	25
Tabela 2 - Dimensões aberturas de janelas.....	31
Tabela 3 - Resumo dos resultados modelo sem torre de vento	85
Tabela 4 - Resumo modelos com esquadrias abertas	86
Tabela 5 - Resumo modelos com esquadrias fechadas.....	87

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA E CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 TORRES DE VENTO	18
2.1.1 Tipos de torres de vento.....	20
2.1.2 Torres de vento em projetos modernos	22
2.2 TORRES DE VENTO E CONFORTO TÉRMICO	25
2.2.1 Pesquisas relacionadas.....	25
2.2.2 Conforto térmico	27
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA.....	30
3.1 ELABORAÇÃO DO PROJETO.....	30
3.2 PARÂMETROS DE ENSAIO	33
3.3 SIMULAÇÃO NO SOFTWARE ANSYS FLUENT	35
3.3.1 Modelagem no <i>software</i>	35
3.3.2 Determinação da malha	36
3.3.3 Condições de contorno	37
CAPÍTULO 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	39
4.1 ANÁLISE DOS DADOS DO INMET	39
4.2 SIMULAÇÕES NO SOFTWARE ANSYS FLUENT	41
4.2.1 Modelo sem torre de vento	42
4.2.2 Modelo com torre de vento unidirecional.....	47
4.2.3 Modelo com torre de vento bidirecional.....	52
4.2.4 Modelo com torre tetradirecional (portas e janelas abertas).....	57
4.2.5 Modelo com torre unidirecional (portas e janelas fechadas).....	66
4.2.6 Modelo com torre bidirecional (portas e janelas fechadas).....	71
4.2.7 Modelo com torre tetradirecional (portas e janelas fechadas).....	76
4.2.8 Resumo dos valores obtidos pela simulação	85
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES	89
5.1 SUGESTÃO DE PESQUISAS FUTURAS	90
REFERÊNCIAS	91

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E CONTEXTUALIZAÇÃO

O crescimento da população mundial tem relação direta com o aumento das emissões de gases do efeito estufa e isso tem preocupado os líderes mundiais. Segundo dados da Organização Meteorológica Mundial (OMM), o ano de 2023 foi o mais quente registrado pela organização (OMM, 2023). No Brasil a temperatura ficou 0,69° C acima da média histórica devido ao fenômeno El Niño (aquecimento acima da média das águas do Oceano Pacífico Equatorial), segundo o levantamento do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024).

De acordo com a International Energy Agency (IEA, traduzido como Agencia Internacional de Energia), com o aumento na temperatura, houve também um aumento significativo na demanda por sistemas de refrigeração nas residências e comércios. O número de unidades operantes mundial triplicou desde 2000, chegando a mais de 1.5 bilhão, em 2022, e a demanda pode aumentar em até 40% até 2030. O sistema é responsável por mais da metade do consumo de energia no verão e pela piora da qualidade do ar dentro dos ambientes (IEA, 2023).

A busca por inovações sustentáveis é imprescindível para a melhora da qualidade de vida da população. Iniciativas como o Net Zero 2050, que é um compromisso global estabelecido no Acordo de Paris (2015), busca zerar toda a emissão de gases prejudiciais à atmosfera até o ano de 2050, acelerou a busca por inovações em tecnologia para melhorar a eficiência e promover o uso de energias renováveis (IEA, 2023).

Uma tecnologia usada há milhares de anos é a ventilação natural, que se baseia na força natural do vento para resfriamento sem a necessidade de sistemas mecânicos. Rivero (1985) afirma que a ventilação natural pode ser térmica ou dinâmica. A primeira acontece devido a diferença de pressão do ambiente interno e externo, promovendo um fluxo da área de maior pressão para a de menor pressão. A segunda é causada pelas pressões e depressões que surgem nos volumes devido à ação mecânica do vento. A utilização destes princípios, pode potencializar o uso da ventilação natural nas construções, porém, apesar da importância, tais ferramentas nem sempre são utilizadas no desenvolvimento dos projetos (Andrade, 2013).

Uma alternativa para melhorar a ventilação natural é o uso de torres de ventos, um sistema bastante utilizado em países do Oriente Médio e norte da África, que possuem climas secos e quentes durante praticamente o ano todo. São estruturas que ficam posicionadas na cobertura

dos edifícios e funciona captando o vento através de aberturas e o direcionando para dentro da construção, aumentando o conforto térmico e a manutenção da qualidade do ar interno (Aryan et al., 2010).

Em casos em que a incidência de ventos é muito baixa, a torre de vento funcionará como chaminé, pois o ar quente dentro da edificação se eleva até o topo da torre, por ser menos denso que o ar frio, saindo pela pelas aberturas e promovendo o resfriamento do ambiente. Esse sistema ganha maior eficiência em construções menores e com pouca interferência de paredes e objetos entre os cômodos, para facilitar a circulação do ar. Além disso, é levado consideração a posição das aberturas da torre, que devem ficar na direção predominante do vento para potencializar a captação de ar (Foroozesh et al., 2022).

Por ter uma elevação vertical mais alta em relação à residência, as torres de vento são mais eficientes que as aberturas de portas e janelas. Isso ocorre principalmente porque as construções vizinhas, árvores e muros, agem como obstáculos para a passagem do vento, diminuindo o fluxo de ar em baixas alturas (Ghoulem et al., 2020).

Segundo Martins *et al.* (2009), onde predomina o clima quente e úmido no Brasil, as taxas de velocidade do ar são favoráveis para a utilização da ventilação natural para melhorar o conforto térmico no interior das residências. As torres de vento apesar de não serem muito difundidas, podem ser uma opção eficiente para utilização desse recurso.

A arquitetura moderna no país, tem utilizado cada vez mais os barriletes, que servem como espaço para a instalação do sistema de abastecimento de água fria e água quente da casa. Eles possuem um formato semelhante ao das torres de vento utilizadas no Oriente Médio, além de ficar no top da edificação, livre de obstáculos. Apesar de suas características, não se observa nenhuma tentativa de associar os barriletes com as torres de vento, podendo serem incorporados a custos reduzidos (Lobô; Bittencourt, 2003).

A proposta deste trabalho objetiva estudar a viabilidade do uso das torres de vento nas edificações residenciais através da confecção de um projeto capaz de adaptar a torre de vento e o barrilete em um só elemento. O projeto será criado utilizando o Revit e será exportado para o *software* Ansys Fluent versão estudante, onde serão feitas as simulações.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é viabilizar o uso de torres de vento para edificações residenciais em Jataí, utilizando simulações computacionais no *software* Ansys Fluent.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar as características técnicas das torres de vento e sua influência no ambiente interno;
- Aprender a utilizar o software para realizar as simulações;
- Analisar a ventilação proporcionada pela torre de vento nos ambientes através de simulações realizadas pelo *software* Ansys Fluent;
- Determinar qual melhor torre de vento para o modelo de casa escolhido;
- Contribuir para a difusão desse sistema em regiões com climas seco e úmido.

CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 TORRES DE VENTO

Sistemas de ventilação e resfriamento natural têm sido utilizados em assentamentos de climas quentes desde os tempos mais remotos da humanidade ao redor do mundo. O estilo e métodos de arquitetura eram caracterizados de acordo com a necessidade da população, sendo que em regiões mais quentes eram usadas aberturas para circulação do ar e em climas mais frios, eram feitos abrigos mais fechados (Pirhayati et al., 2013).

A torre de vento, conhecidas como “Badgir”, é um recurso da arquitetura muito utilizada nas cidades centrais do Irã, onde os climas, em geral, são quentes e secos, como na cidade de Yazd, e quentes e úmidos, como na cidade de Lenghe. Yazd possui clima desértico muito quente, podendo chegar a temperaturas máximas de 40°C, sendo que a temperatura média do dia é por volta de 30°C (Mostafaeipour et al., 2014; Pirhayati et al., 2013), sendo necessária a implementação do sistema para melhorar o conforto interno.

Apesar de não saberem ao certo qual local de origem das torres de vento, estudiosos puderam notar que elas foram construídas na arquitetura do Oriente Médio, na África, Índia e países da fronteira do Golfo Pérsico (Pirhayati et al., 2013), sendo as mais antigas mencionadas em literaturas de viagem, poemas e enciclopédias.

Sua construção é caracterizada por uma torre acima do nível da casa com aberturas para captação do vento (Figura 1), direcionando para dentro da residência, deixando o ambiente mais fresco e confortável (Ahmadkhani; Maleki, 2011).

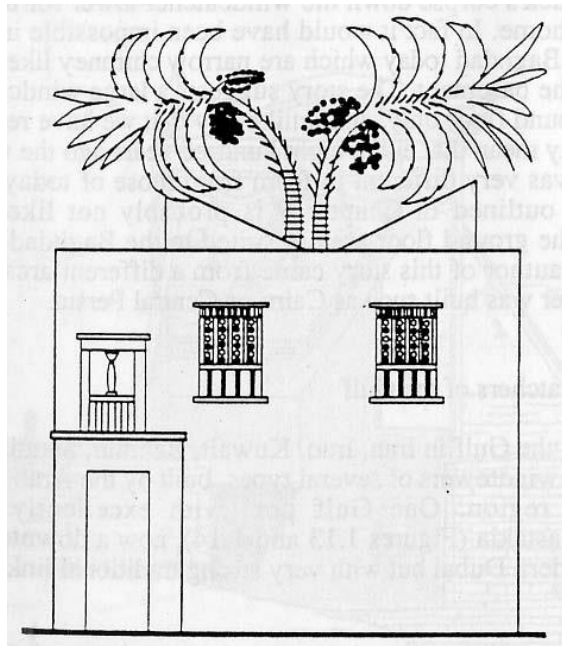
Figura 1 Torre de vento em Yazd



Fonte: Stouhi, (2021)

Exemplos dessas construções são as casas dos faraós Tal Al-Amarna e Neb-Amun, descritas a partir de uma pintura em seu túmulo (Dinastia XIX, 1300 a.C.), como mostrado na Figura 2, que conta com a construção de elementos na cobertura do edifício para captação de vento com duas aberturas, uma na direção dos ventos prevalentes, empurrando o ar para baixo, e a outra na direção oposta, servindo como exaustor do ar quente. Em conjunto com as aberturas das janelas o fluxo cruzado de ar dentro da casa é maximizado (Pirhayati et al., 2013)

Figura 2 – Windcatchers na casa Faraônica de Neb-Ammun, Egito, 19ª Dinastia, c.1300 a.C., Museu Britânico



Fonte: Pirhayati et al., (2013)

Pirhayati et al., (2013) classificam as torres de vento de duas maneiras em termos de funcionamento:

- Torres de vento que resfriam dentro da estrutura através de convecção. Elas utilizam a diferença de pressão do ambiente interno da casa e do ambiente externo para a circulação do ar de forma natural. Recomendada para regiões quentes e úmidas.
- Torres de vento que resfriam dentro da estrutura através de convecção e evaporação. Recomendada para regiões quentes e secas, onde a umidade do ar é baixa, sendo geralmente combinadas com uma fonte de água para umidificar os ambientes internos, trazendo, assim, maior conforto térmico. Este método inclui vários tipos:
 - O fluxo de ar sobre um lago ou canal de água;

- Colocar arbustos e potes na abertura e borrifa-los;
- Separar a torre de vento do edifício, conectando-o com um canal subterrâneo.

Roaf, (2005) relata que as torres de vento podem variar a forma e tamanho dependendo da região em que se encontram. Elas são mais baixas e de maiores dimensões na parte sul do país, como nas cidades de Yazd e Lengeh, pois o vento mais forte ocorre em alturas mais baixas. Nas áreas de deserto do Irã, as torres são mais altas e de menores dimensões, já que o vento ocorre em partes mais alta em relação a superfície do solo.

2.1.1 Tipos de torres de vento

De acordo com Roaf (1982), há 4 tipos de torres de vento criadas ao longo do tempo, conforme apresentado na Figura 3. As principais são:

Figura 3 – Vista superior dos tipos de torre de vento baseado em direções

Unidirecional	
Bidirecional	
Tetra direcional	

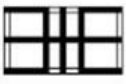
Fonte: Adaptado de Pirhayati (2013)

- Torres unidirecionais: Essa é a primeira versão de torre de vento, em que uma torre fica virada na direção dos ventos prevalentes. Cerca de 3% das torres de Yazd são desse tipo;
- Torres bidirecionais: Esse tipo de torre de vento tem duas aberturas, uma na direção principal do vento para melhorar a captação e outra no sentido contrário, servindo como exaustor para o ar quente de dentro da residência. Em Yazd, esse tipo de torre representa cerca de 17% das casas;

- Torres tri-direcionais: São torres com aberturas em três direções. Elas não são usualmente comuns, sendo que algumas podem ser encontradas na cidade de Tabas;
- Torres tetra-direcionais: É o tipo de torre que aparece com maior frequência. Ela tem quatro aberturas para todas as direções. Quase todas as torres de vento em climas quentes e úmidos são dessa configuração.

As torres de vento também podem ser classificadas de acordo com suas formas (Figura 4), podendo ser circulares, quadradas, retangulares ou octogonais (Mahmoudi, 2007).

Figura 4 – Vista superior dos tipos de torres de vento baseadas em sua forma

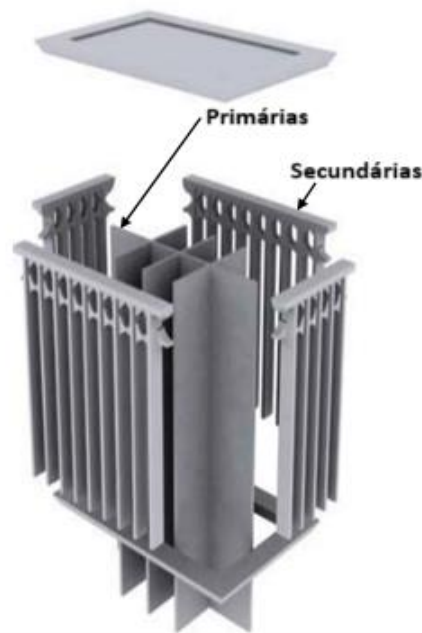
Forma	Formato das torres	
Círculo		
Quadrado		
		
Retângulo		
		
		

Fonte: Adaptado de Mahmoudi (2007)

Outra parte importante de sua composição são as divisórias, geralmente feitas de tijolos, podendo ser classificadas como primárias ou secundárias. As primárias dividem a torre em vários *shafts* e seguem do topo até a parte inferior, princípio baseado na “Lei de Bernoulli”, que diz que o fluxo de ar aumenta quando passa por seções mais estreitas. Seu formato pode variar em seções I, H ou diagonais. As divisórias secundárias ficam na face da torre, sendo da mesma largura que a parede externa (Figura 5). Além de melhorar o fluxo do ar, as divisórias aumentam

a superfície de contato do ar com as paredes, aumentando a troca de calor do sistema. Isso funciona tanto de dia, quando as paredes de tijolos absorvem o calor do vento, quanto à noite, quando o calor retido pelas paredes é transferido para o ar mais frio que entra na residência (Ahmadkhani; Maleki, 2011).

Figura 5 - Divisórias primárias e secundárias de uma torre de vento



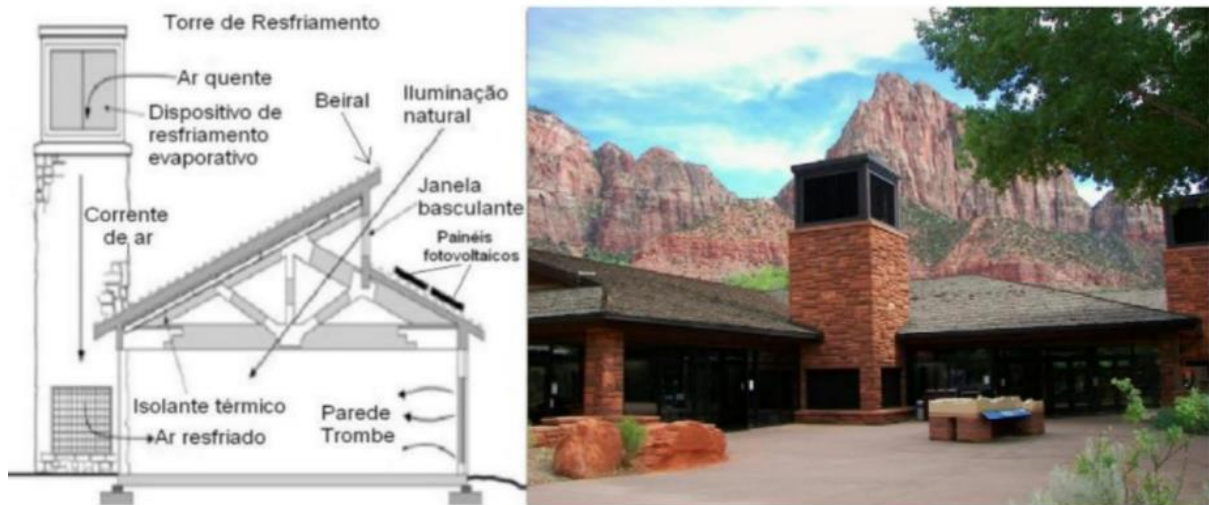
Fonte: Adaptado de Ahmadkhani; Maleki, (2011)

2.1.2 Torres de vento em projetos modernos

Com o aumento da temperatura mundial, projetistas tem buscado a utilização de tecnologias para a melhora do conforto térmico através de ventilação natural. Esses tipos de projetos têm aumentado consideravelmente nos últimos anos, e podem ser encontrados exemplos em várias partes do mundo.

No Centro de Visitantes do Parque Nacional de Zion, nos Estados Unidos, foram construídas torres de vento para diminuir a temperatura dos ambientes internos e também melhorar a circulação do ar. As duas torres de vento do estabelecimento são quadradas com aberturas para quatro direções, potencializando a entrada de ar. (Silva et al., 2020)(Figura 6).

Figura 6 - Parque Nacional de Zion, Sringdale, EUA



Fonte: Silva et al., (2020)

Outra residência totalmente pensada em questões de conforto, através de ventilação e iluminação natural, comum à arquitetura tradicional do Irã, é da cidade de Jalal Abad, projetada por Hajm_e Sabz (Figura 7). A torre escolhida foi a unidirecional quadrada, voltada para os ventos prevalentes. (Abdel, 2021)

Figura 7 – Casa com torre de vento em Jalal Abad



Fonte: Abdel, (2021)

A universidade do Catar também utilizou o princípio das torres de vento em seu projeto, junto com a implementação de pátios e jardins para circulação de pessoas (Figura 8). Cada instalação da universidade possui uma torre, espaçadas a uma distância uma da outra de forma que não interfira no fluxo de ar. O complexo conta com dois estilos de torres quadradas, uma com as divisórias secundárias verticais e outra na forma de mosaico, trazendo mais modernidade à arquitetura (Andrade, 2014).

Figura 8 - Universidade do Catar



Fonte: Bellini, (2016)

No Brasil, esse método de construção ainda não é muito utilizado, porém há vários edifícios que utilizam os mesmos princípios básicos da ventilação natural em seus ambientes, como o centro de reabilitação Sarah Kubischek, na cidade do Rio de Janeiro (Figura 9). Seu telhado em forma de onda permite a entrada de ar dentro dos ambientes, podendo também trabalhar como extratores de ar. Apesar de possuir sistema de refrigeração, o centro de reabilitação trabalha na maior parte do tempo com a ventilação natural, reduzindo o custo com energia elétrica. (Lukiantchuki, 1991).

Figura 9 - Centro de reabilitação Sarah Kubischek, Rio de Janeiro



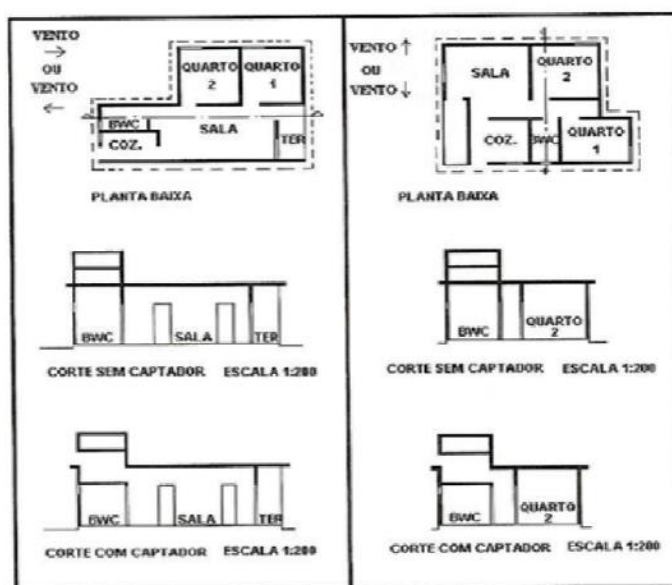
Fonte: Finotti, (2008)

2.2 TORRES DE VENTO E CONFORTO TÉRMICO

2.2.1 Pesquisas relacionadas

Lôbo e Bittencourt (2003) realizaram simulação com o PHOENICS 3.2, para verificar a viabilidade do uso das torres de vento em habitações localizadas em Maceió, cidade de clima quente e úmido. Foram analisados dois projetos de casas comuns da região, fazendo a simulação da casa com e sem a torre de vento para efeito de comparação (Figura 10). Os resultados alcançados mostraram que o uso das torres de vento aumentou significativamente a ventilação, chegando a dobrar a média de fluxo de ar em alguns ambientes (Tabela 1).

Figura 10 - Planta baixa e cortes das unidades habitacionais



Fonte: Lôbo, Bittencourt, (2003)

Tabela 1 - Resumo dos resultados das simulações

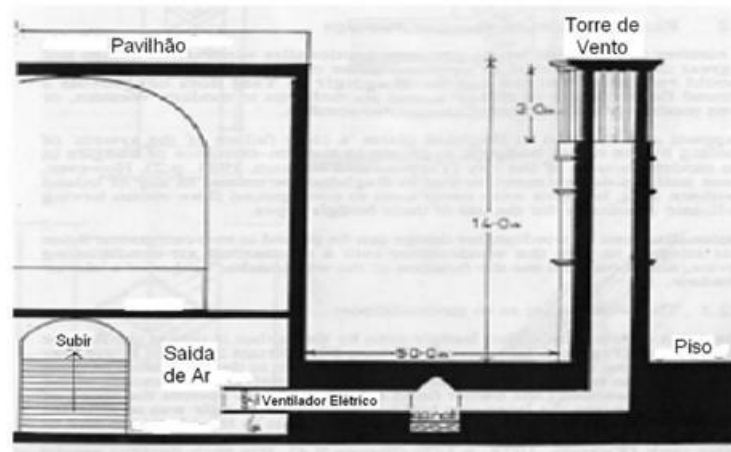
Localização	Modelo	Captor	Sentido do vento	Incremento na sala	Incremento no quarto 1	Incremento no quarto 2
Conjunto Salvador Lyra	1	Sem captor	Barlavento	-	-	-
	2	Com captor	Barlavento	100%	20%	25%
	3	Sem captor	Sotavento	-	-	-
	4	Com captor	Sotavento	100%	15%	15%
Conjunto Graciliano Ramos	5	Sem captor	Barlavento	-	-	-
	6	Com captor	Barlavento	20%	90%	30%
	7	Sem captor	Sotavento	-	-	-
	8	Com captor	Sotavento	30%	0%	30%

Fonte: Lôbo, Bittencourt, (2003)

Roaf (2005) afirma que com o aumento da temperatura nas próximas décadas, as torres de vento irão necessitar da associação com água, túnel ou porão para melhorar a eficiência do sistema.

Um exemplo é a casa de Bagh-e Khan (Figura 11), que usa um espelho d'água e um reservatório sob o solo, capaz de resfriar o ar captado pela torre em até 20°C.

Figura 11 - Corte da casa de Bagh-e Khan



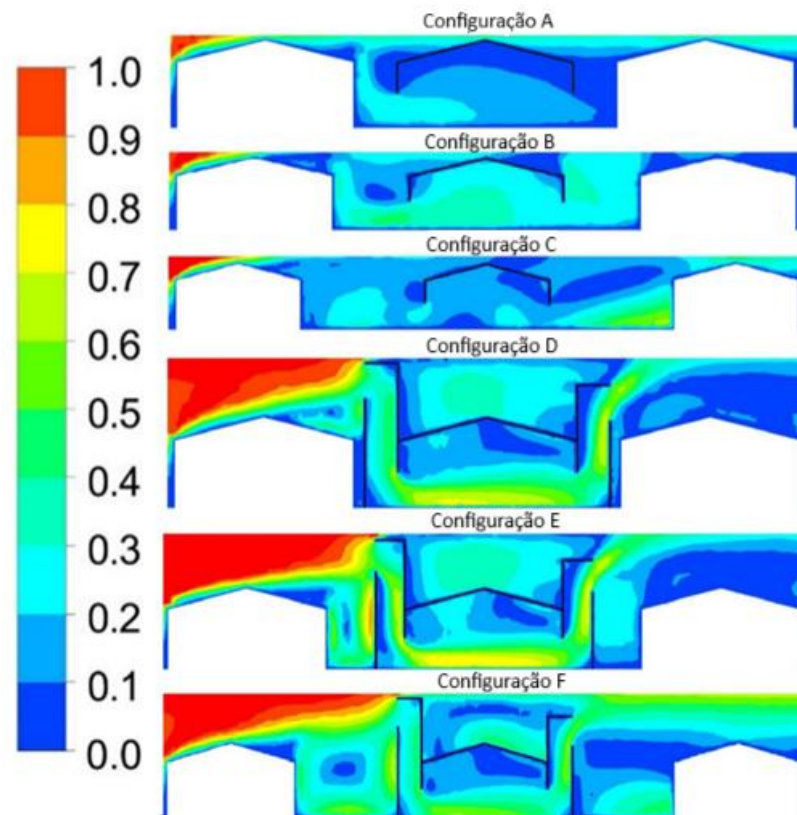
Fonte: Roaf (2005)

Ghoulem et al., (2020) realizaram simulações tridimensionais no *software* ANSYS v18.1 CFD para análise da velocidade do ar e da diferença de temperatura interna e externa de um galpão. Um sistema de aspersão de água foi implementado na entrada da torre de vento, com o intuito de diminuir a temperatura do ar que entra e aumentar a umidade relativa do ar. Os resultados mostraram uma redução considerável de temperatura após a utilização do sistema, obtendo uma diferença de até 17,13°C, dependendo da configuração utilizada.

Andrade (2013) realizou simulações em túnel de vento com uma maquete na escala de 1:50, feita com material acrílico, com torres unidirecional, tetradirecional, octodirecional e dodecadirecional obtendo dados de velocidade e pressão, usando sensores instalados dentro dos ambientes. Também foram feitas simulações com o *software* CFX 12.1, com o modelo confeccionado no *AutoCAD*. Os resultados mostraram que as torres octodirecional e as dodecadirecional apresentaram melhores resultados no aumento da ventilação interna, devido ao seu maior número de aberturas e por permitir a passagem de ar em várias direções.

Ghoulem et al., (2020) fizeram simulações para analisar o efeito que as construções vizinhas têm no fluxo de ar em uma residência com torre de vento e sem torre de vento (Figura 12). Na simulação, a velocidade do ar adotada foi de 5,56 m/s. Para a residência sem as torres, a melhor configuração foi a B, com velocidade máxima de 2,50 m/s. Para a residência com as torres de vento, a velocidade máxima obtida foi de 3,62 m/s.

Figura 12 - Impacto ocasionado por construções vizinhas na ventilação interna



Fonte: Adaptado de Ghoulam et al., (2020)

2.2.2 Conforto térmico

O homem é um ser homotérmico, ou seja, consegue manter relativamente constante a temperatura corporal, independente da temperatura ambiente. Isso acontece por causa de um sistema orgânico chamado termorregulador, que através de ações fisiológicas interfere nas trocas de calor com o ambiente (Ruas, 1999).

O conforto térmico depende de fatores que interferem no trabalho do sistema regulador como: taxa de metabolismo, isolamento térmico da vestimenta, temperatura radiante média, umidade relativa, temperatura e velocidade relativa do ar. Quanto mais trabalho o sistema fizer para manter a temperatura, maior será o desconforto da pessoa. (Ruas, 1999)

Quando se entra em um ambiente quente, o sistema regulador entra em ação iniciando o processo de vasodilatação, permitindo que uma maior quantidade de sangue percorra os vasos superficiais, aumentando a temperatura da pele e proporcionando uma maior troca de calor por convecção e radiação. Adicionalmente, poderia haver um aumento da frequência cardíaca,

levando mais sangue para a pele. Quando as anteriores não são suficientes, é iniciada a produção de suor para que o corpo perca calor por meio da evaporação.

De forma recíproca, quando se entra em um ambiente frio é iniciada a vasoconstrição, diminuindo a circulação de sangue na pele. Esse processo abaixa a temperatura da pele, diminuindo a troca de calor com o meio. Quando isso não é o suficiente, o sistema termorregulador provoca o tremor muscular que aumenta o metabolismo nos músculos e, portanto, a produção de calor. (Ruas, 1999).

Diversas pesquisas foram realizadas no último século sobre o assunto. Na pesquisa de Rohles et al. (1966) com oitocentos homens e oitocentas mulheres de idades entre 18 e 24 anos, foi concluído que:

1. Os homens precisam de aproximadamente uma hora e meia para se adaptarem ao ambiente enquanto as mulheres conseguem isso muito mais rapidamente;
2. Para um determinado ambiente térmico, os homens sentem mais calor que as mulheres durante a primeira hora de exposição e, assim, isso deve ser considerado nos ambientes em que a permanência é menor ou igual a uma hora;
3. Existe uma inter-relação linear entre temperatura, umidade e sensação térmica que depende do sexo. A influência da temperatura na sensação térmica dos homens é quase sete vezes maior que a da umidade, enquanto que no caso das mulheres a influência da temperatura na sensação térmica é nove vezes maior que a da umidade.

Fanger (1970) conclui em seu estudo que é impossível obter num ambiente uma combinação de variáveis de conforto que satisfaça plenamente todos os integrantes de um grupo, correspondendo a, no mínimo 5%, de insatisfeitos. É fato que, em muitos casos, as edificações não são pensadas e projetadas para garantir o máximo de conforto térmico do usuário, nem na conservação de energia, e sim em função de tendências estéticas ou exigências técnicas de produção.

Para uma boa sensação de conforto pelo usuário, as edificações precisam levar em consideração a ventilação cruzada do ar por meio de janelas, portas ou outras aberturas. A velocidade do ar é uma variável importante para a obtenção de conforto térmico pelos indivíduos, pois facilita a troca de calor por convecção e por evaporação, devido a maior quantidade de partículas que entram em contato com a pele. A velocidade aceitável em ambientes interiores varia de 0.5 a

2.0 m/s (Boutet, 1991), sendo este limite baseado em problemas práticos, como desordem de papéis sobre mesa, ao invés de se basear em exigências de conforto.

Nesse contexto, a ventilação natural em ambientes internos provocada pelas torres de vento se mostra uma ferramenta interessante, pois ao aumentar a velocidade do ar, irá proporcionar maior sensação de conforto térmico pelos usuários.

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA

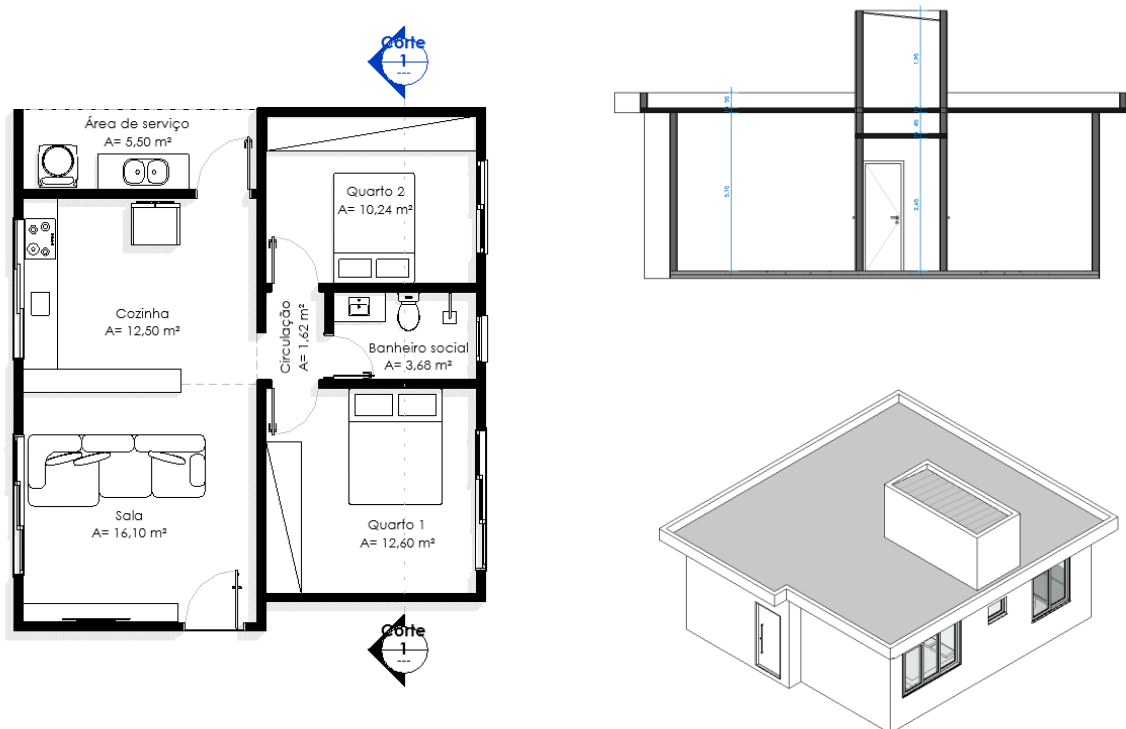
Para a realização do estudo proposto e alcançar os objetivos da pesquisa, foram adotadas as seguintes etapas metodológicas: elaboração do projeto de adaptação das torres de vento para uma residência unifamiliar térrea; definição dos parâmetros de ensaio; análise das características do vento e do conforto gerado nos ambientes através do *software* Ansys Fluent versão estudante.

3.1 ELABORAÇÃO DO PROJETO

O projeto foi elaborado usando o Revit, um *software* desenvolvido pela Autodesk, baseado no conceito de Modelagem da Informação da Construção (BIM), permitindo a elaboração de modelos 3D inteligentes com sua interface visual, consequentemente reduzindo possíveis erros e otimizando o fluxo de trabalho.

O projeto escolhido foi de uma casa de 70 m² com 2 quartos, 1 banheiro social, sala, cozinha e área de serviço, como mostrado na (Figura 13). Foi considerada a cobertura sendo laje impermeabilizada para que a altura da torre juntamente com o barrilete fosse diminuída.

Figura 13 - Esquema da edificação sem torre de vento



Fonte: Autoria própria (2025)

As dimensões das aberturas de janelas estão representadas a seguir (Tabela 2):

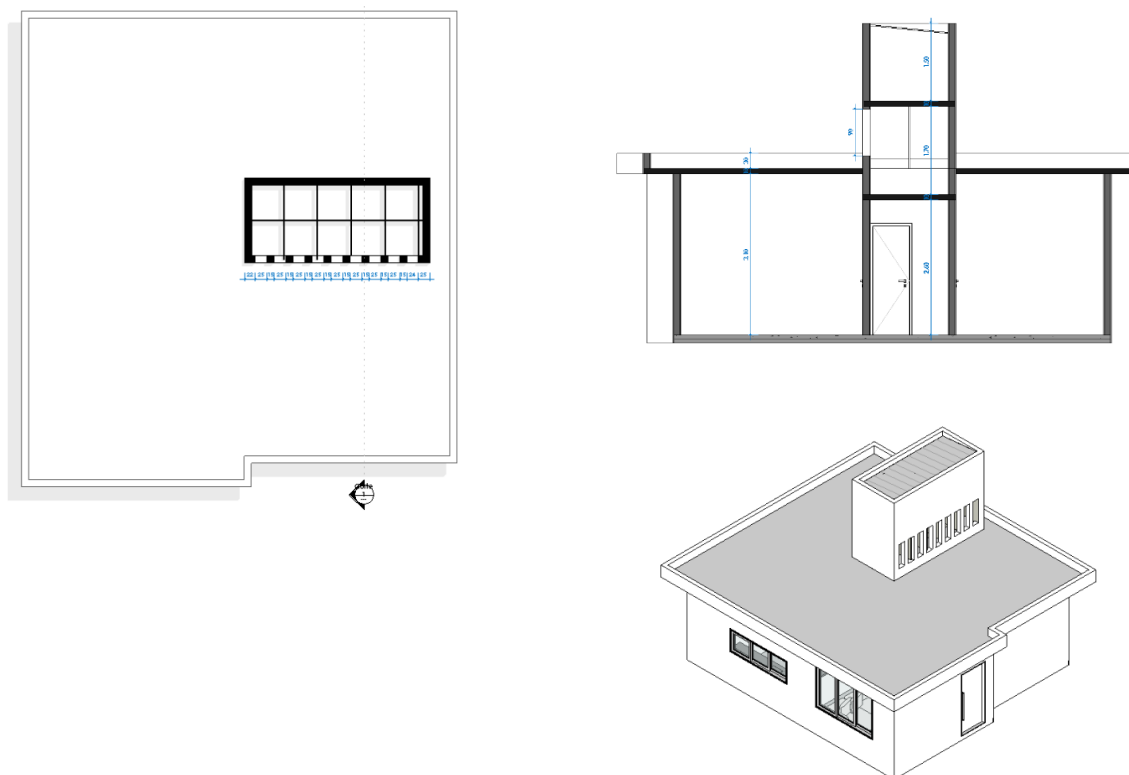
Tabela 2 - Dimensões aberturas de janelas

JANELA	AMBIENTE	ABERTURA (lxh) (m)
J1	Quartos	1,50 x 1,00
J2	Banheiro	0,80 x 0,80
J3	Cozinha	1,50 x 0,50
J4	Sala	2,00 x 1,00

Fonte: Autoria própria (2025)

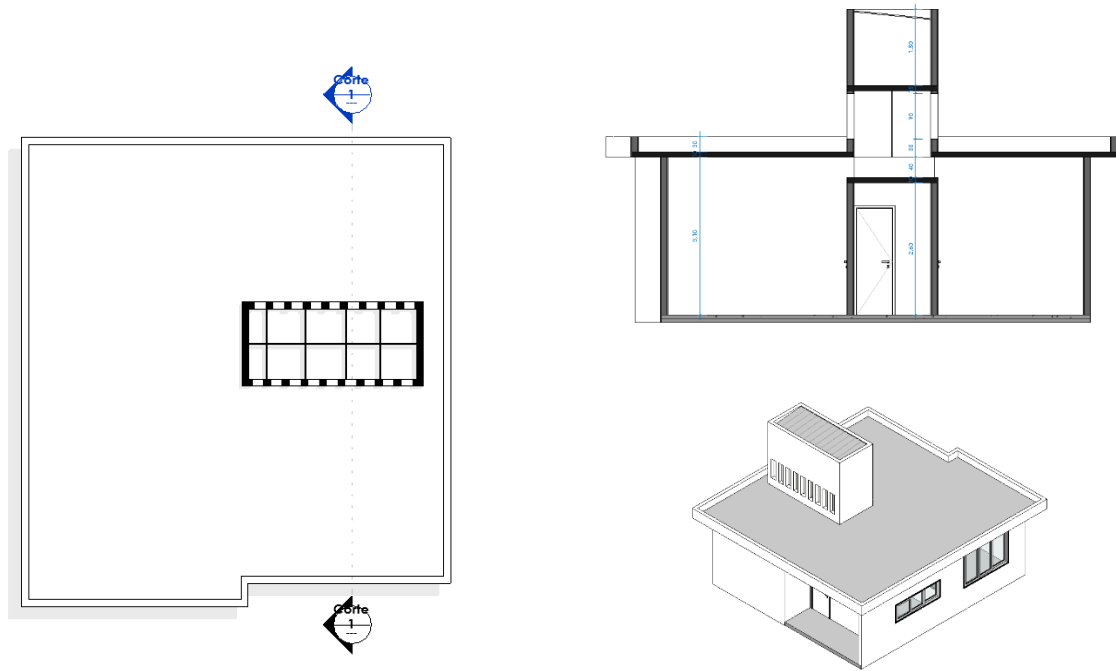
Para esse trabalho foram adotados três tipos de torres, para poder comparar os resultados, com as seguintes geometrias: unidirecional (uma abertura) (Figura 14), bidirecional (duas aberturas) (Figura 15) e tetradirecional (quatro aberturas) (Figura 16), já que são utilizadas com mais frequência.

Figura 14 - Esquema de edificação com torre unidirecional



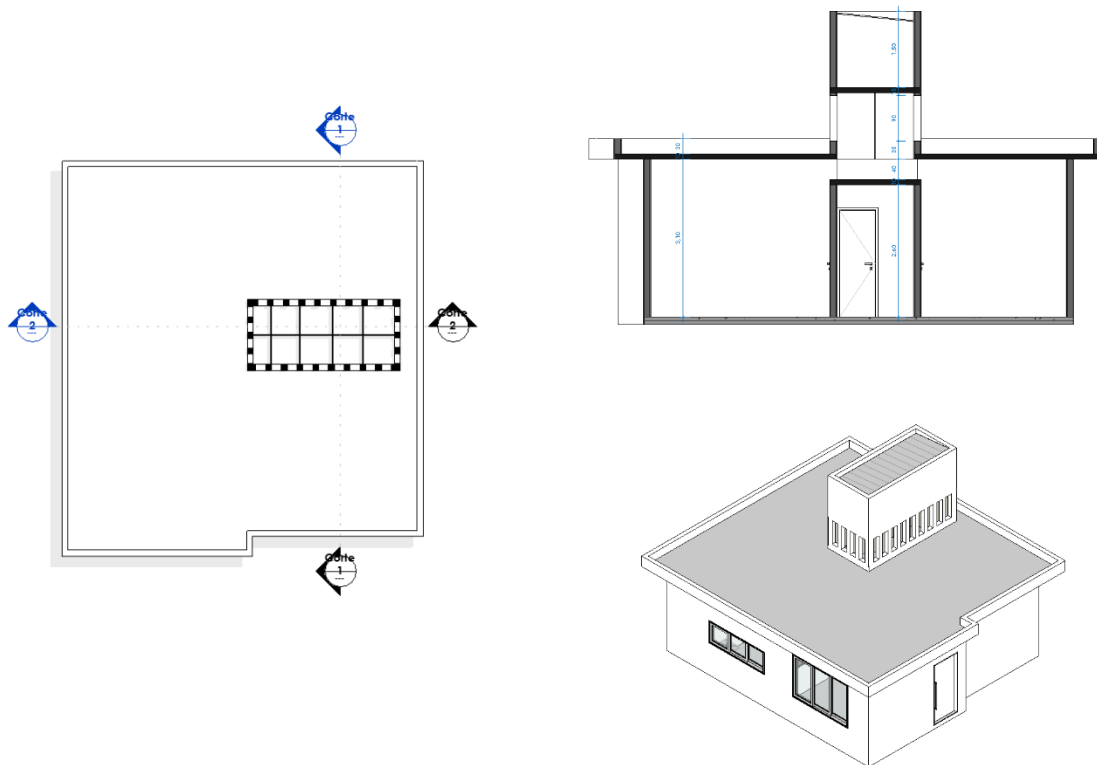
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 15 - Esquema de edificação com torre bidirecional



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 16 - Esquema de edificação com torre tetradirecional



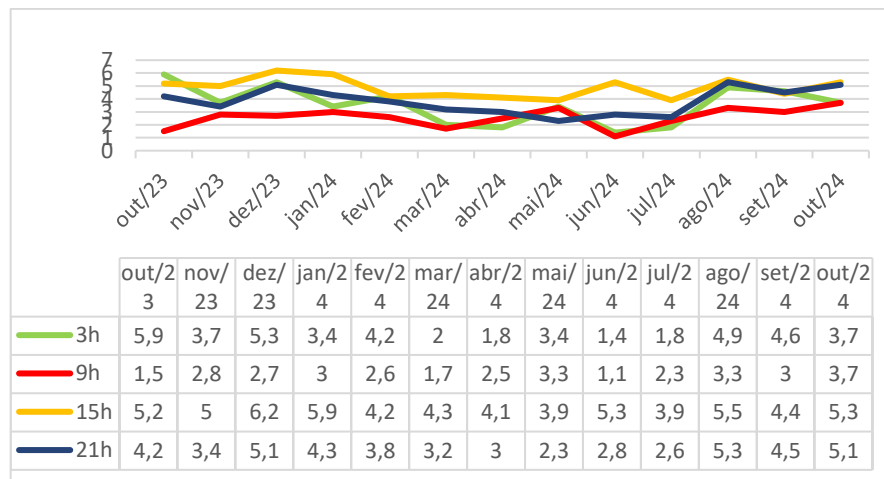
Fonte: Autoria própria (2025)

3.2 PARÂMETROS DE ENSAIO

A determinação da velocidade de vento e sua direção prevalente foi realizada através de estudos de dados climáticos, coletados no banco de dados do INMET, considerando o período de um ano, de outubro de 2023 a outubro de 2024. Esse período de tempo foi escolhido para que a simulação seja feita com dados recentes e que melhor se aproximem de dados futuros.

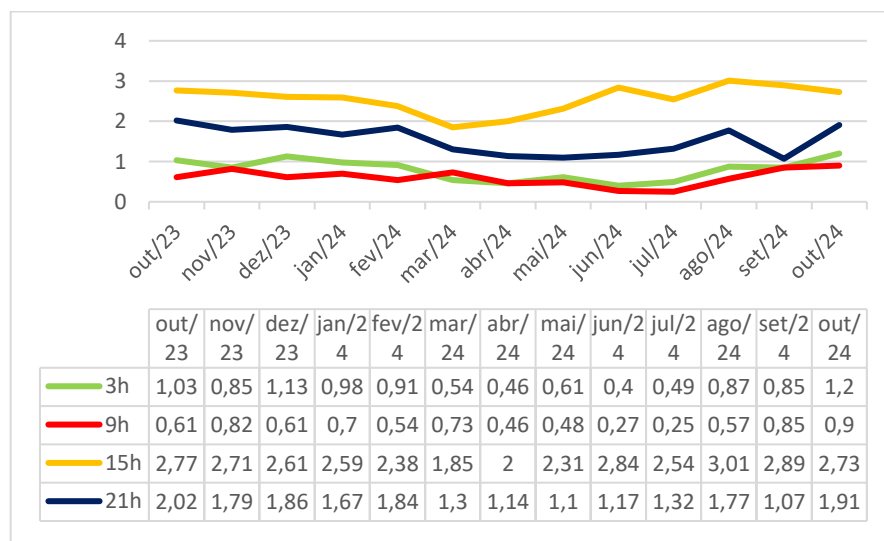
Para realizar as simulações, foram adotados para velocidade do vento os valores de 2 m/s e 5 m/s (INMET 2024). O primeiro associado à média no horário de 15 horas (Figura 25), o segundo por ser um valor mais próximo aos valores máximos obtidos para o horário de 15 horas durante o dia (Figura 24).

Figura 17 - Velocidade máxima do vento no mês registrada em diferentes horários do dia



Fonte: Autoria própria (2025)

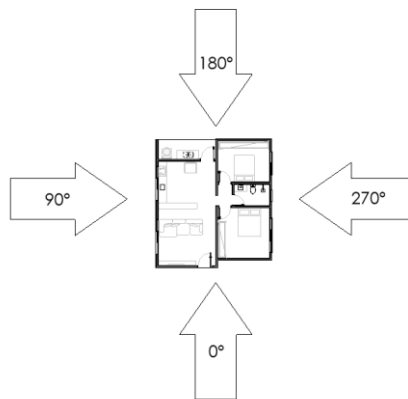
Figura 18 - Velocidade média do vento no mês registrada em diferentes horários do dia



Fonte: Autoria própria (2025)

Foram feitas simulações com o vento em quatro direções, mais precisamente a cada 90°, para analisar qual melhor orientação irá se adequar ao modelo e as aberturas da casa (Figura 17). Para os modelos unidirecional e bidirecional, foram feitas apenas simulações nas posições 0° e 180°, pois não possuem aberturas nas outras direções. Para a torre tetradirecional foram simuladas nas 4 direções.

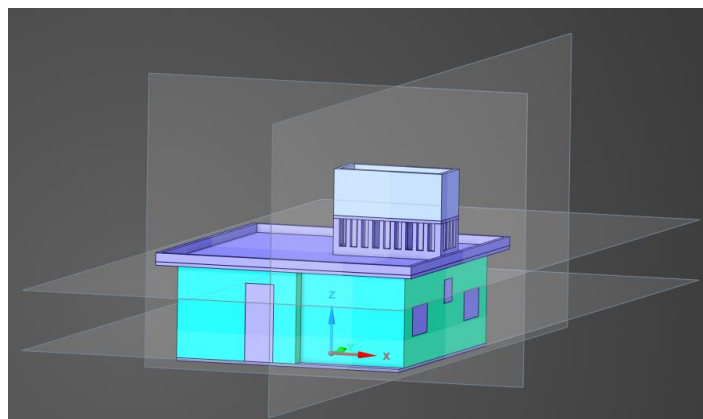
Figura 19 - Posição do vento para simulações



Fonte: Autoria própria (2025)

Os planos para análises dos dados obtidos das simulações estão representados na Figura 18. Foi posicionado um plano na altura de 1,00m, altura em contato com o corpo das pessoas, tanto em pé, quanto sentadas. Outro plano nas aberturas internas da torre de vento para verificar como é dado o fluxo de vento para dentro da residência. Os outros dois planos foram passados cortando a torre de vento no sentido transversal e longitudinal, para analisar o fluxo no seu interior.

Figura 20 - Planos de corte para análise de resultados



Fonte: Autoria própria (2025)

3.3 SIMULAÇÃO NO SOFTWARE ANSYS FLUENT

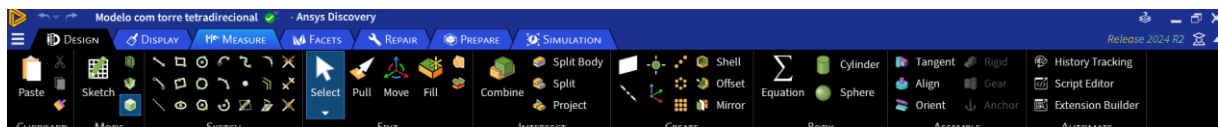
O *software* escolhido para simulação dos ensaios foi o Ansys Fluent versão estudante, por ser gratuito e por oferecer várias funcionalidades. As simulações serão feitas seguindo as etapas adotadas por Andrade (2013).

3.3.1 Modelagem no *software*

A primeira etapa foi a modelagem da casa dentro do *software*. Apesar da ferramenta possibilitar a importação de arquivos do Revit, foi preferível modelar o projeto do zero dentro da plataforma, pois o modelo do Revit carrega muitas informações de detalhes de materiais, como portas, janelas, paredes e pisos o que prejudica na reparação do projeto, na organização das camadas e na criação da malha.

A modelagem foi feita dentro do Ansys Discovery R2, espaço do *software* dedicado a criação de geometrias de forma intuitiva e de forma ágil, além de possibilitar a realização de simulações em tempo real enquanto se constrói ou modifica a geometria. No geral, os desenhos são feitos utilizando ferramentas como linha, círculos, retângulos e curvas, utilizando em conjunto a ferramenta Pull para criar os modelos tridimensionais (Figura 19).

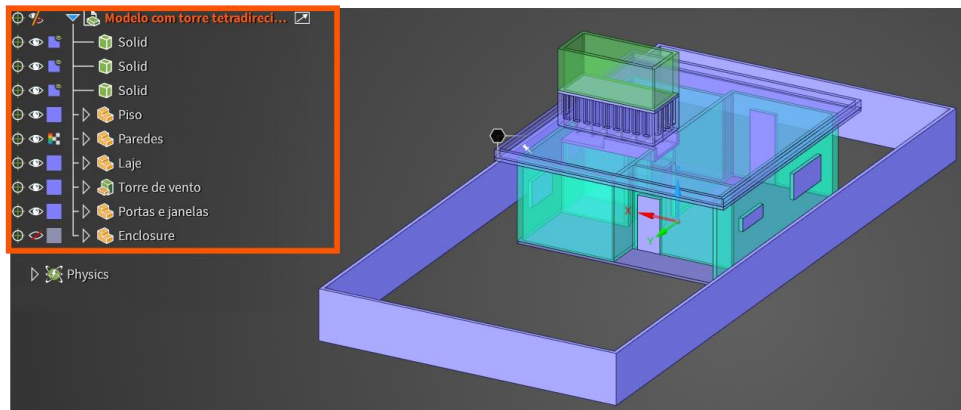
Figura 21 - Painel de comando do *software* Ansys Discovery



Fonte: Autoria própria (2025)

As medidas foram seguidas conforme o projeto do Revit, garantindo o nível de detalhamento e confiabilidade nos resultados. A modelagem no *software* também facilitou a separação das diferentes camadas do projeto, como pisos, paredes, lajes e portas e janelas, possibilitando a retirada de alguns desses componentes da simulação (Figura 20). Foram considerados os muros para um lote com dimensões de 12x25m, já que eles exercem grande influência no fluxo de ar externo.

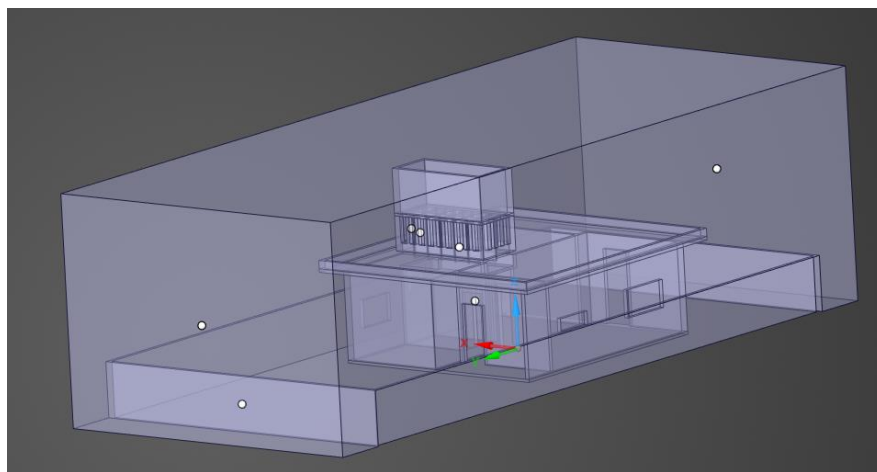
Figura 22 - Modelagem da casa dentro do *software* Ansys Discovery



Fonte: Autoria própria (2025)

Após a modelagem, foi iniciada a preparação do modelo para as simulações. Para isso, foram checadas se havia interferência entre as faces, possíveis aberturas, faces duplicadas ou faces pequenas, que poderiam prejudicar os resultados. A etapa seguinte foi criar o domínio de fluido envolvendo o objeto. Essa ferramenta irá preencher todos os espaços vazios dentro dela, sem contabilizar as partes sólidas do modelo (Figura 21).

Figura 23 - Criação do domínio do modelo



Fonte: Autoria própria (2025)

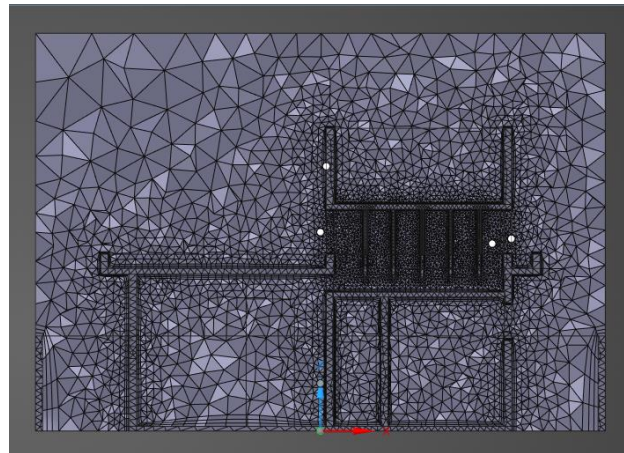
3.3.2 Determinação da malha

A malha é a discretização do espaço fluido dentro do domínio, sendo gerada automaticamente pelo programa. Os elementos são formados por tetraedros, distribuídos de forma regular, sendo que a quantidade total de elementos determina a capacidade computacional necessária para rodar a simulação.

Para a simulação foi determinado que o programa gerasse a geométrica global automaticamente. Para as áreas internas e próximas as faces e arestas, foi determinado uma

geometria local com tamanho máximo de 13 cm e nas divisórias da torre de vento um valor máximo de 5 cm (Figura 22). Esse tamanho máximo garante que o fluido não passe pelas paredes, já que possui largura menor.

Figura 24 - Detalhamento da malha



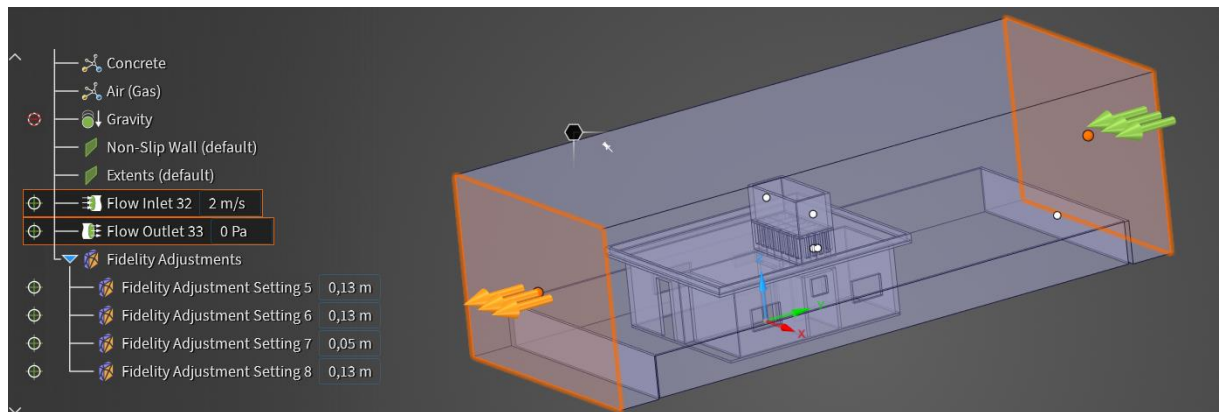
Fonte: Autoria própria (2025)

Quanto menor a dimensão da malha, mais precisa será a simulação, porém será necessário maior poder de processamento pelo computador. Como a versão para estudante possui um limite de 1.024.000 elementos para a simulação, foi necessário diminuir o refinamento da malha, aumentando o tamanho dos elementos em suas bordas mais externas. A quantidade de elementos da malha ficou entre 900 mil a 1 milhão, para aproveitar o máximo possível da ferramenta. Apesar desse aumento no refinamento da malha, os resultados obtidos se apresentaram confiáveis, por diminuir o tamanho da malha em locais importantes do domínio.

3.3.3 Condições de contorno

A localização de entrada e saída do domínio foram determinadas de acordo com simulação realizada. Para a entrada os valores da velocidade para as simulações foram de 2 m/s e 5 m/s, enquanto o valor da saída foi de 0 Pa, que é o equivalente a pressão atmosférica (Figura 23).

Figura 25 - Entrada e saída do fluido no domínio



Fonte: Autoria própria (2025)

Foi definido o modelo de turbulência k-Epsilon, por oferecer melhor relação custo (tempo de processamento) - benefício (precisão). O número de iterações foi deixado como o padrão estabelecido pelo programa, sendo o valor máximo igual a 400 iterações.

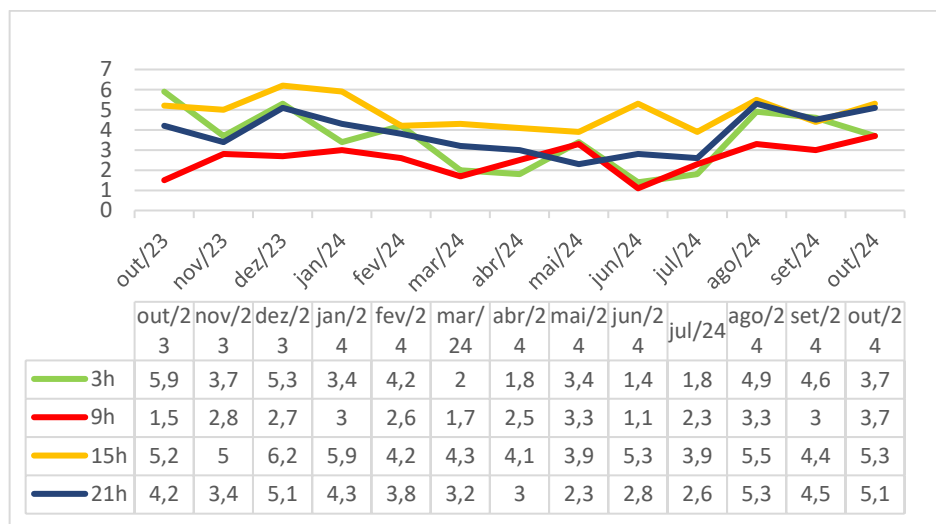
CAPÍTULO 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados apresentam os dados de velocidade e temperatura coletados no banco de dados do INMET para a cidade de Jataí. Também apresenta as imagens das simulações para os modelos sem torre de vento, com torre unidirecional, bidirecional e tetradirecional, e uma tabela de resumo das velocidades médias dentro dos ambientes da residência.

4.1 ANÁLISE DOS DADOS DO INMET

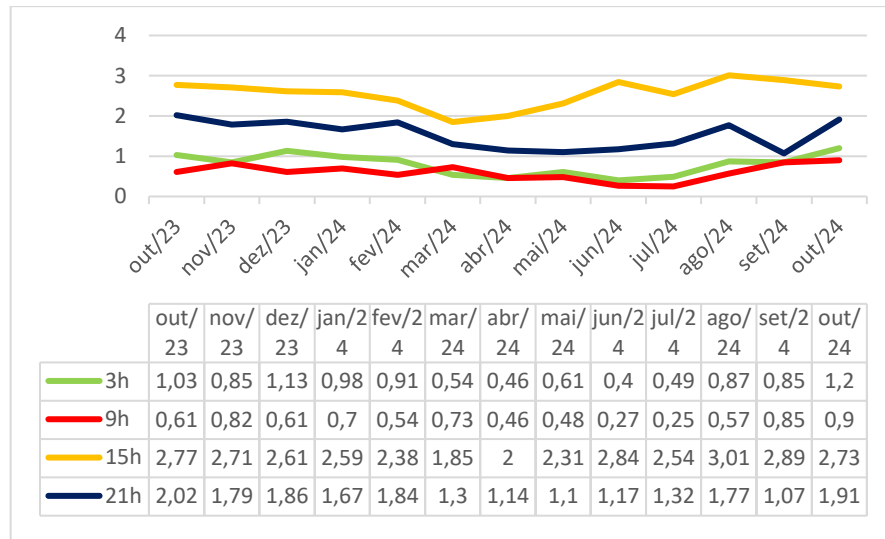
Nas figuras abaixo é possível comparar como a velocidade do ar e a temperatura variam durante o dia para a cidade de Jataí. As maiores velocidades de ar ocorrem durante o período vespertino, às 15 horas, chegando ao valor máximo de 6,2 m/s registrado no mês de dezembro de 2023 (Figura 24). O horário do dia em que a velocidade do ar é mais lenta é às 9 horas da manhã, com valor mais alto de 3,3 m/s. As médias horárias de velocidade seguem o mesmo padrão dos valores máximos, sendo que o maior valor foi de 3,01 m/s para o mês de agosto (Figura 25).

Figura 26 - Velocidade máxima do vento no mês registrada em diferentes horários do dia



Fonte: Autoria própria (2025)

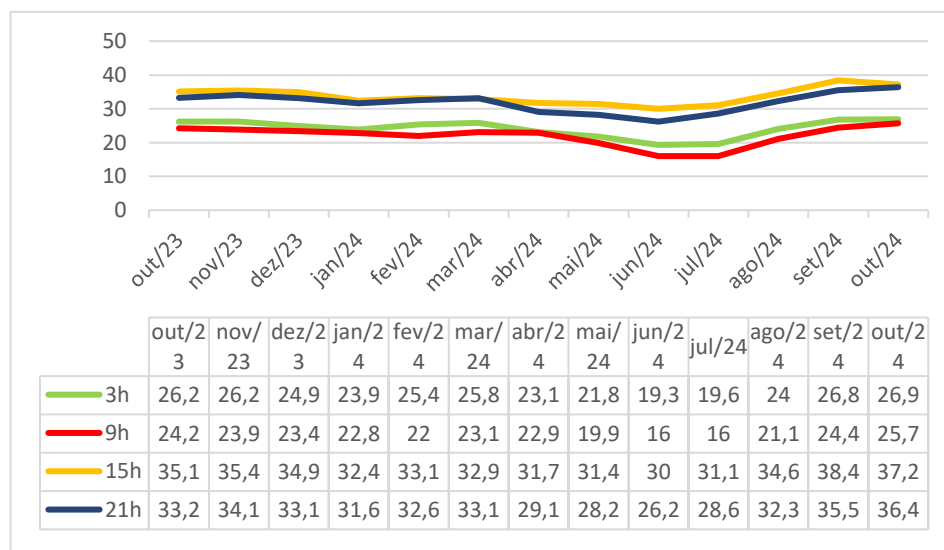
Figura 27 - Velocidade média do vento no mês registrada em diferentes horários do dia



Fonte: Autoria própria (2025)

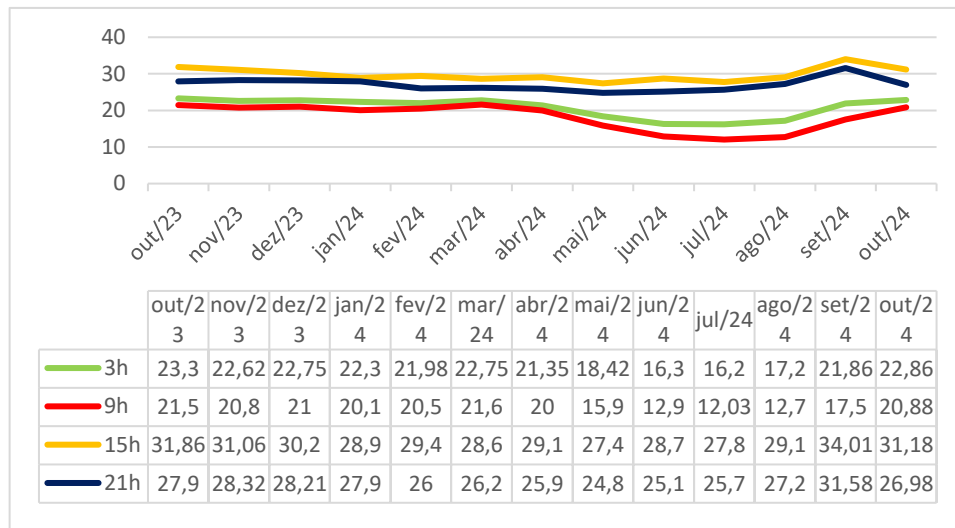
Quanto a temperatura, pôde-se obter os seguintes resultados para o período. Os maiores valores foram registrados no período das 15 horas, com o valor de 38,4 °C no mês de setembro de 2024 (Figura 26) e média mensal com valor de 34,01 °C também para o mês de setembro de 2024 (Figura 27). Os menores valores de temperatura aconteceram no período das 9 horas, com o valor máximo para esse horário de 25,7 °C no mês de outubro 2024.

Figura 28 - Temperatura máxima no mês registrada em diferentes horários do dia



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 29 - Temperatura média no mês registrada em diferentes horários do dia



Fonte: Autoria própria (2025)

Analizando todos os dados da planilha do INMET para a cidade de Jataí, considerando todos os horários do dia, todos os dias do mês, o valor máximo de temperatura registrado no período de um ano foi de 39 °C e o valor máximo de velocidade do ar de 10,8 m/s.

4.2 SIMULAÇÕES NO SOFTWARE ANSYS FLUENT

As imagens de contorno das simulações de velocidade realizadas no *software* Ansys Fluent encontram-se representadas nas figuras 28 a 61.

As figuras mostram como é o comportamento do vento externo e interno a residência. Os valores em azul escuro representam menores velocidades, enquanto os valores em vermelho representam as velocidades mais altas, sendo representados as velocidades em faixas numéricas na legenda das figuras.

As plantas e cortes de visualização geral mostram o comportamento do vento levando em consideração os valores mínimos e máximos de velocidade. Os detalhamentos da cozinha/sala, quarto 1 e quarto 2 foi reduzida a faixa de valores para ter uma melhor visualização da circulação do ar interno. A planta na altura das aberturas da torre mostra como o vento é inicialmente distribuído dentro da residência.

4.2.1 Modelo sem torre de vento

Para as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 0° , no modelo da casa sem a torre de vento, pode-se notar que a maior circulação de ar ocorre na sala/cozinha, devido a continuidade do fluxo pelas portas, enquanto a velocidade nos quartos os valores ficam próximo de 0 m/s . A velocidade média no interior da edificação está em torno de $0,5 \text{ m/s}$ (para $V1$), $0,8 \text{ m/s}$ (para $V2$). Embora os dois perfis de velocidade sejam semelhantes, o que apresenta melhor distribuição do ar interno é o de velocidade de 5 m/s ($V2$) (Figura 28).

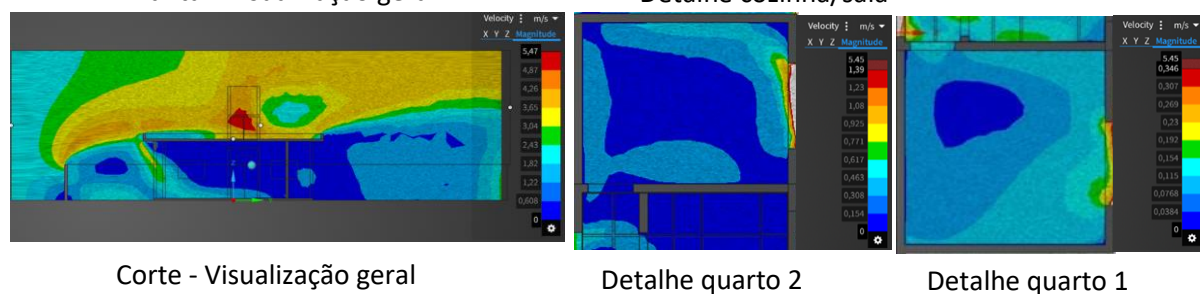
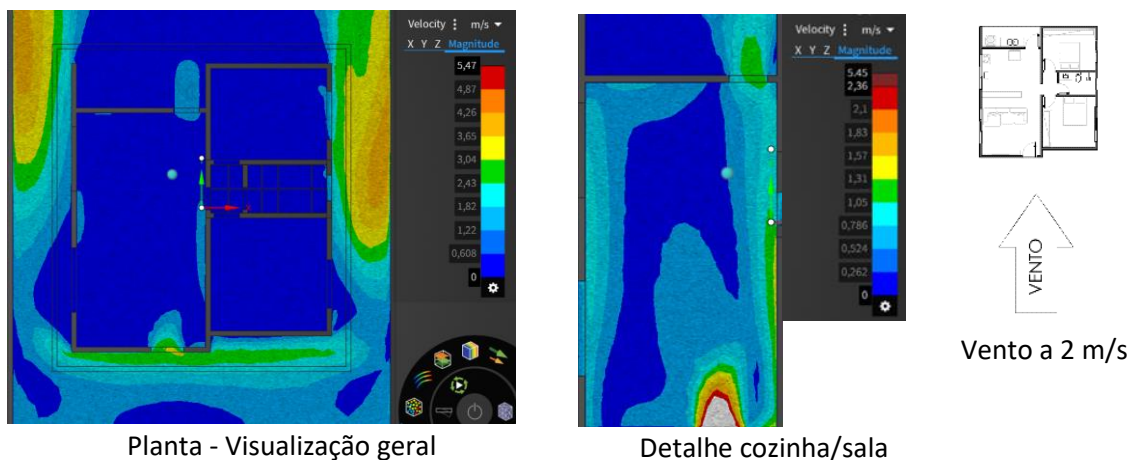
Para as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 90° , no modelo da casa sem a torre de vento, percebe-se que não há uma circulação de ar adequada no interior da edificação (velocidades próximas de 0 m/s). Isso ocorre devido a interferência do muro no fluxo de ar, diminuindo a passagem pelas janelas. Dos dois perfis considerados ($V1$ e $V2$), o de maior velocidade ($V2$) mostra maior circulação interna do ar, pois gera menos pontos de ar parado (Figura 29).

Para as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 180° , no modelo da casa sem a torre de vento, observa-se que há uma baixa circulação de ar nos quartos, devido a posição desfavorável em relação ao vento. A melhor distribuição de ar ocorre na sala/cozinha onde os valores médios atingidos ficam em torno de $0,4 \text{ m/s}$ (para $V1$) e de $1,0 \text{ m/s}$ (para $V2$) (Figura 31).

Para as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 270° , no modelo da casa sem a torre de vento, observa-se que há uma circulação de ar maior em comparação à posição de 90° , pois o ar que entra pela janela do banheiro melhora a circulação cruzada da casa. Dos dois perfis considerados ($V1$ e $V2$), o de maior velocidade ($V2$) mostra maior circulação interna do ar, pois gera menos pontos de ar parado (Figura 30).

Figura 30 - Vetores de velocidade do vento a 0° para modelo sem torre de vento: a) considerando a velocidade a 2 m/s; b) considerando a velocidade a 5 m/s

a) Vento a 2 m/s



b) Vento a 5 m/s

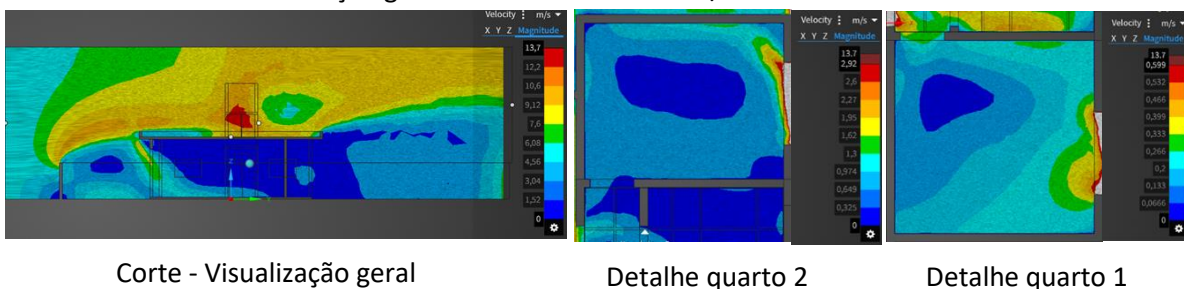
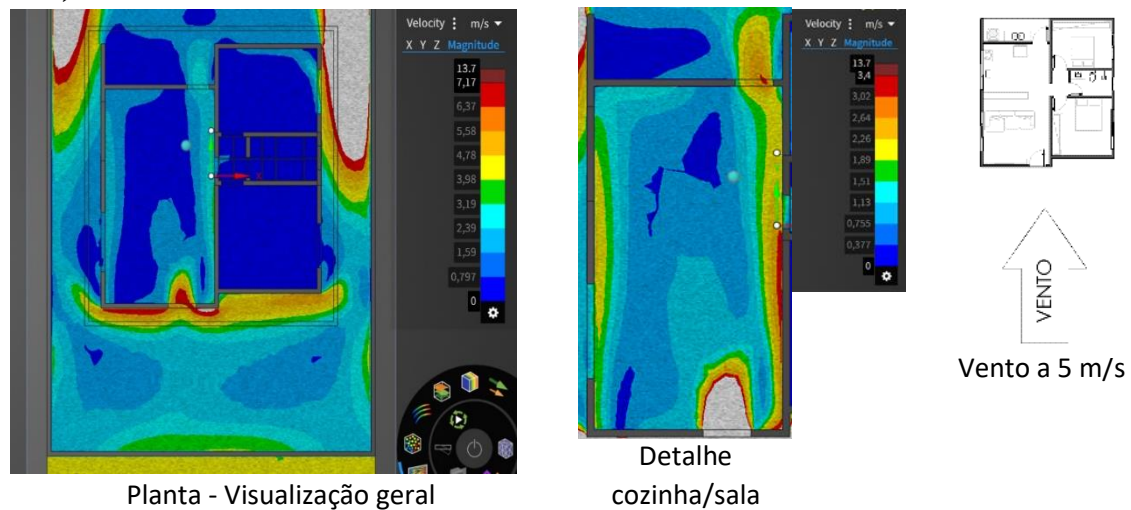
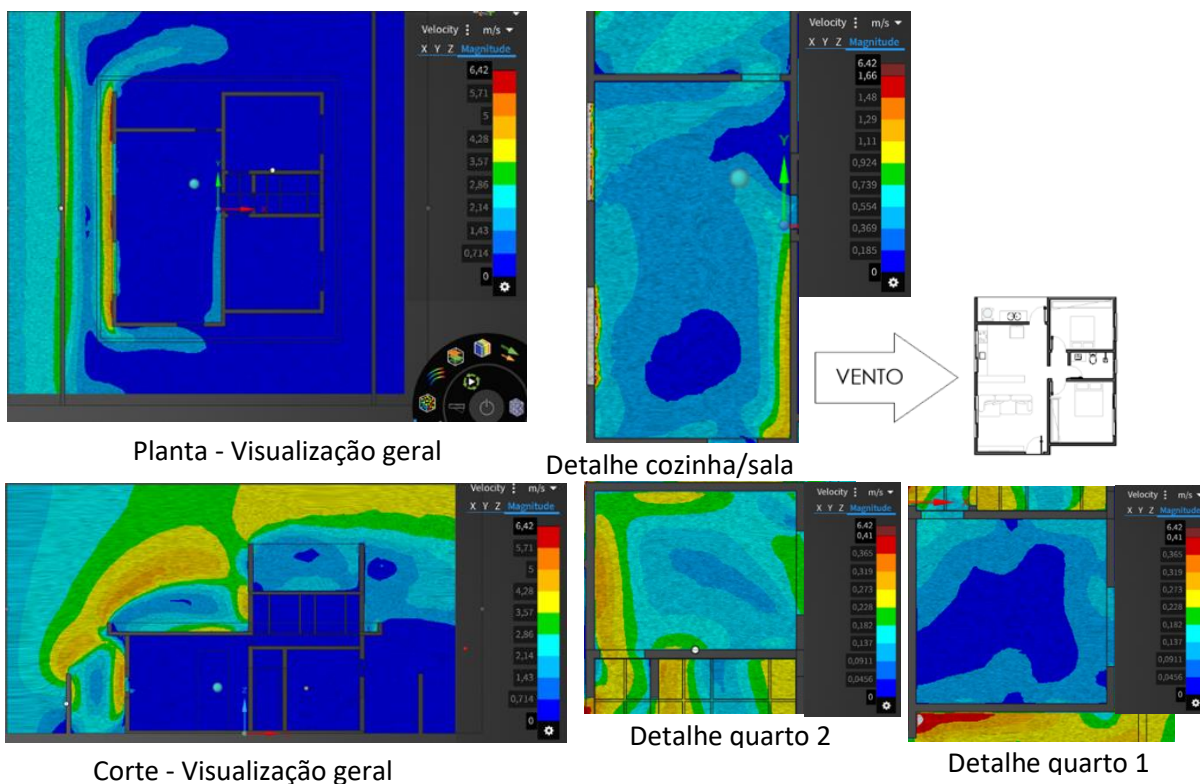
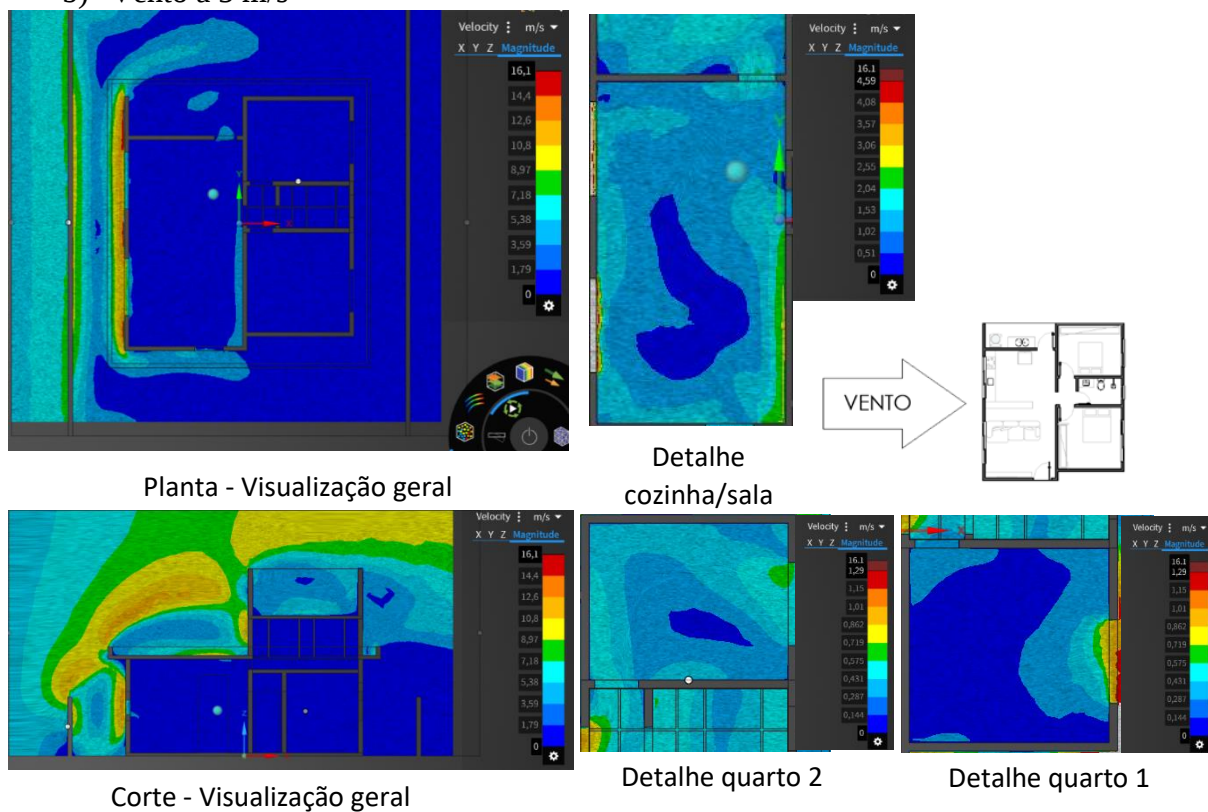


Figura 31 - Vetores de velocidade do vento a 90° para modelo sem torre de vento: a) considerando a velocidade a 2 m/s; b) considerando a velocidade a 5 m/s

a) Vento a 2 m/s



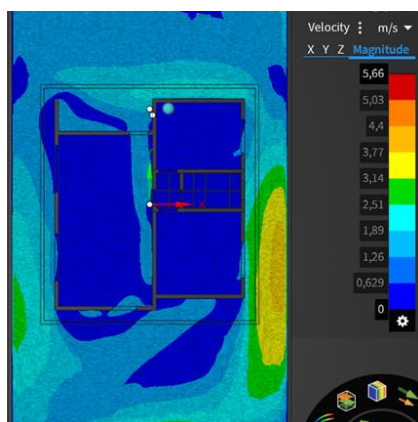
b) Vento a 5 m/s



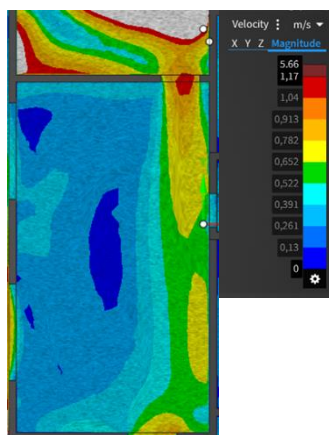
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 32 - Vetores de velocidade do vento a 180° para modelo sem torre de vento: a) considerando a velocidade a 2 m/s; b) considerando a velocidade a 5 m/s

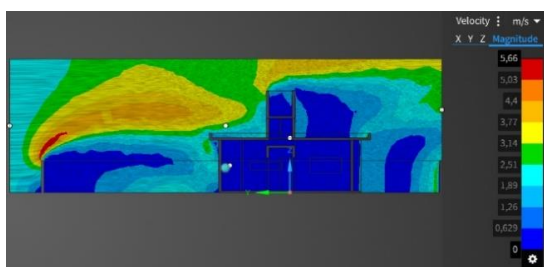
a) Vento a 2 m/s



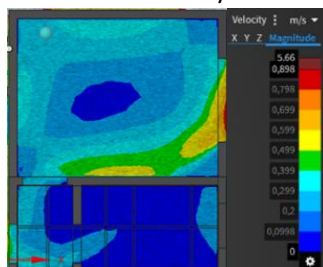
Planta - Visualização geral



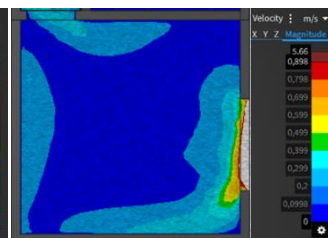
Detalhe cozinha/sala



Corte - Visualização geral

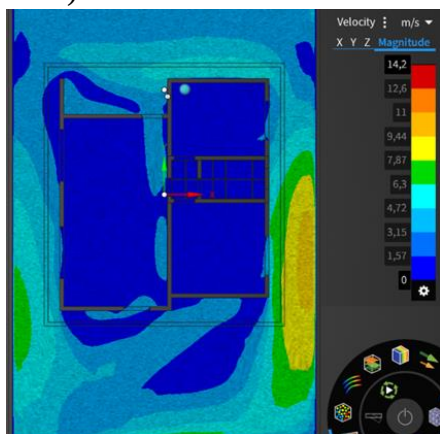


Detalhe quarto 2

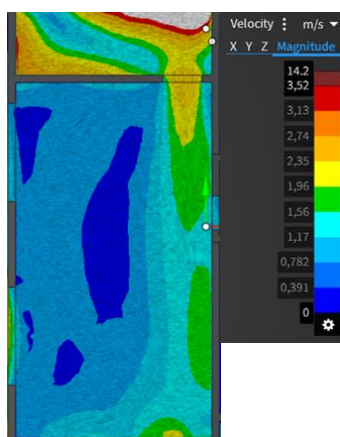


Detalhe quarto 1

b) Vento a 5 m/s



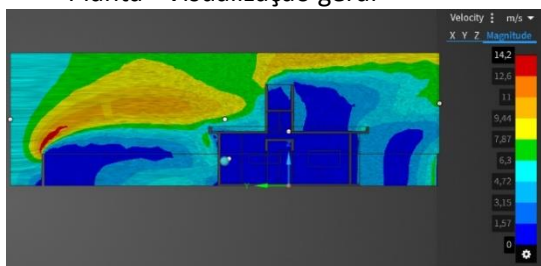
Planta - Visualização geral



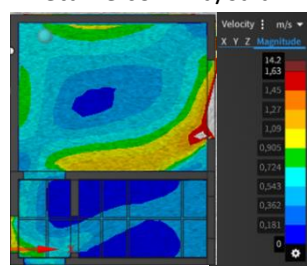
Detalhe cozinha/sala



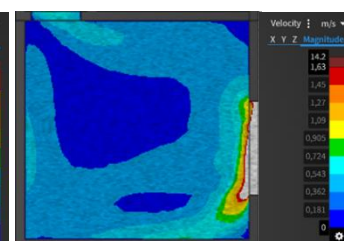
Vento a 5 m/s



Corte - Visualização geral



Detalhe quarto 2

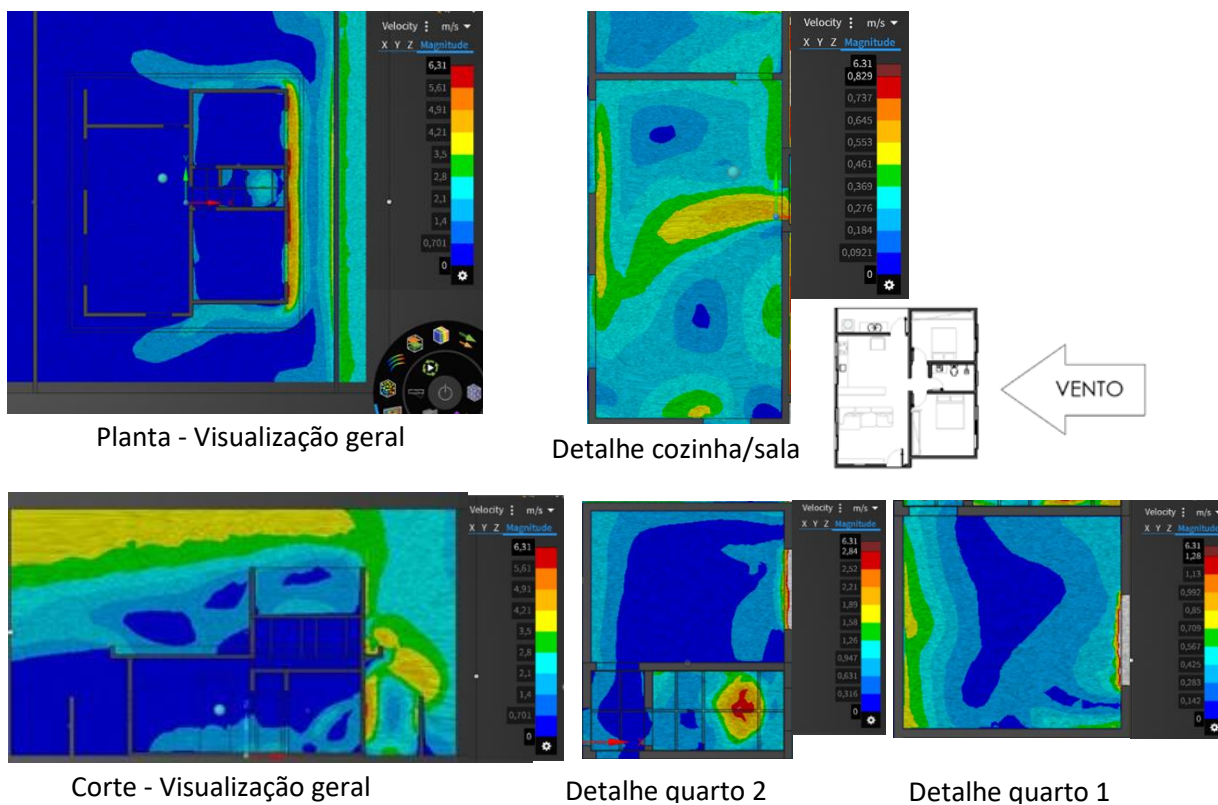


Detalhe quarto 1

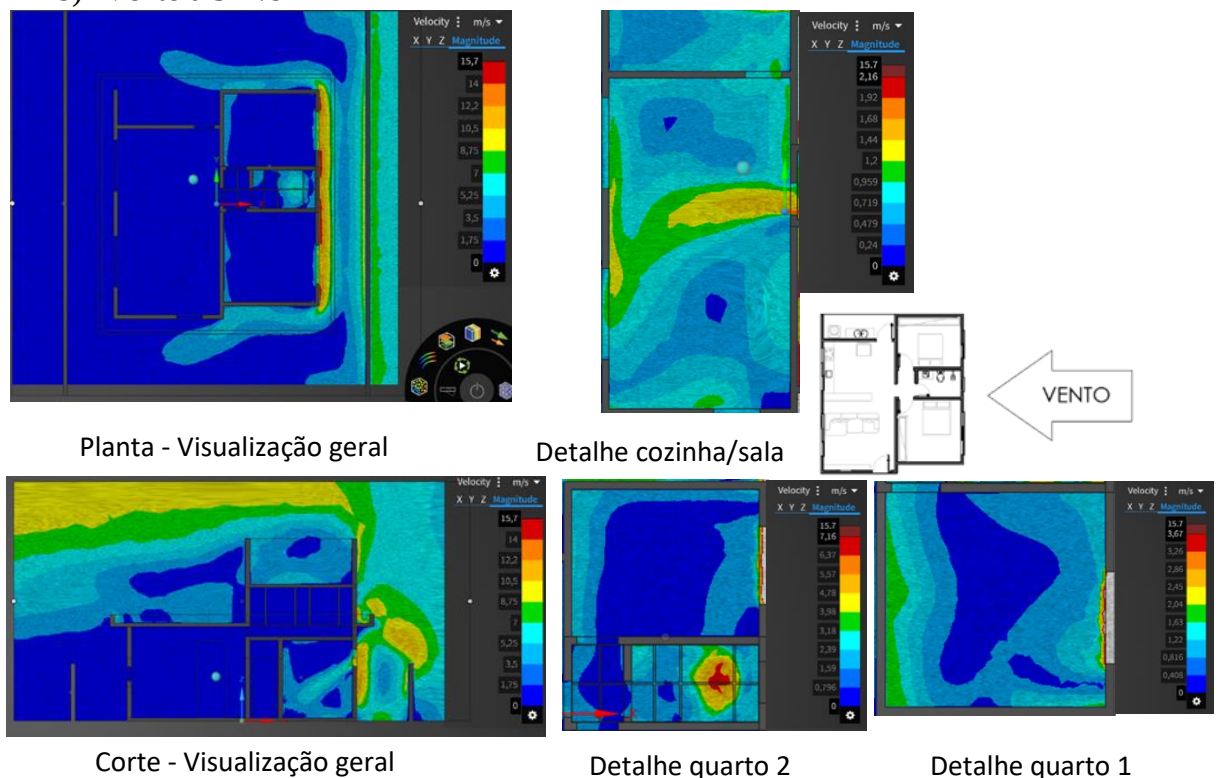
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 33 - Vetores de velocidade do vento a 270° para modelo sem torre de vento: a) considerando a velocidade a 2 m/s; b) considerando a velocidade a 5 m/s

a) Vento a 2 m/s



b) Vento a 5 m/s

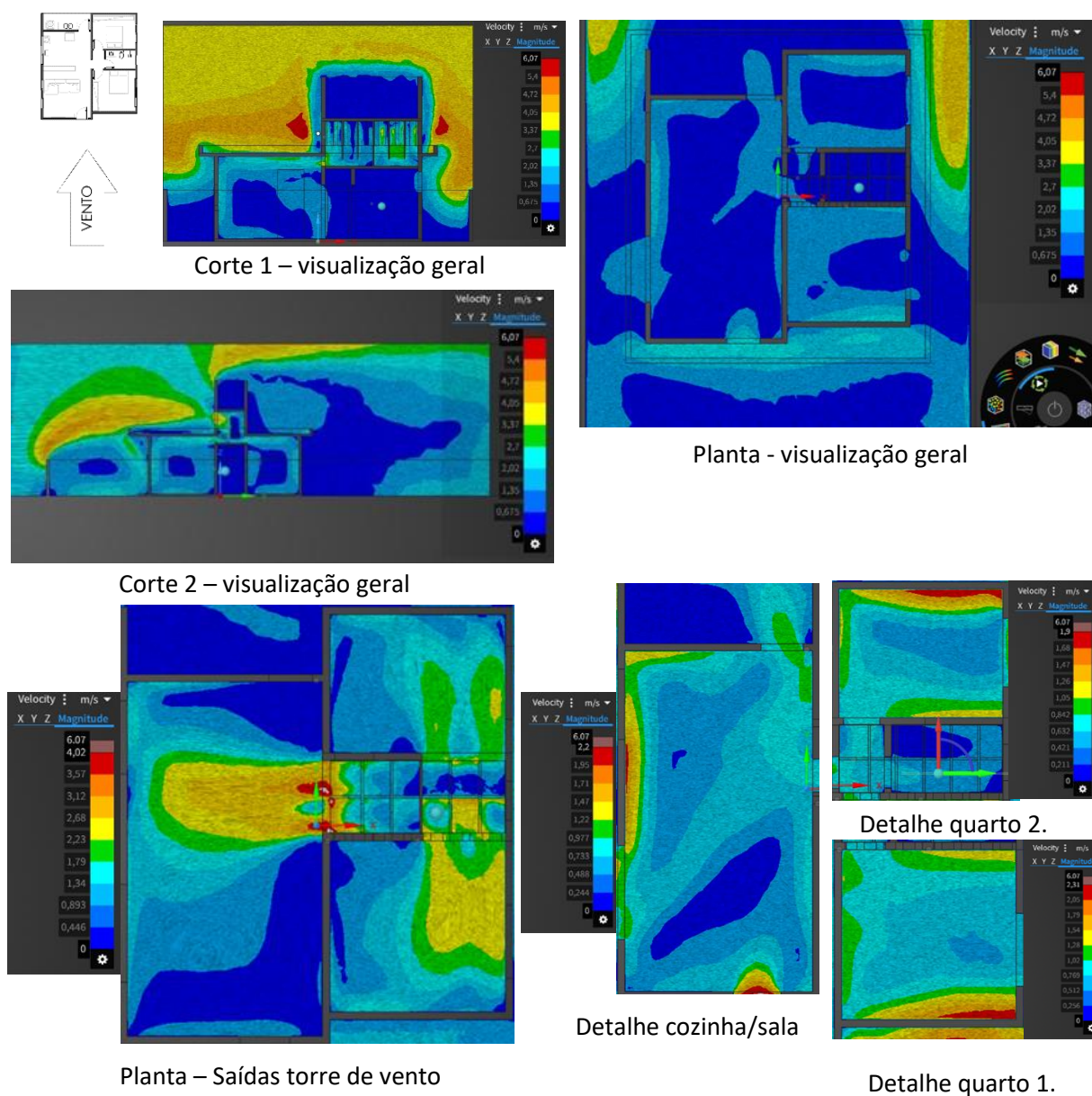


Fonte: Autoria própria (2025)

4.2.2 Modelo com torre de vento unidirecional

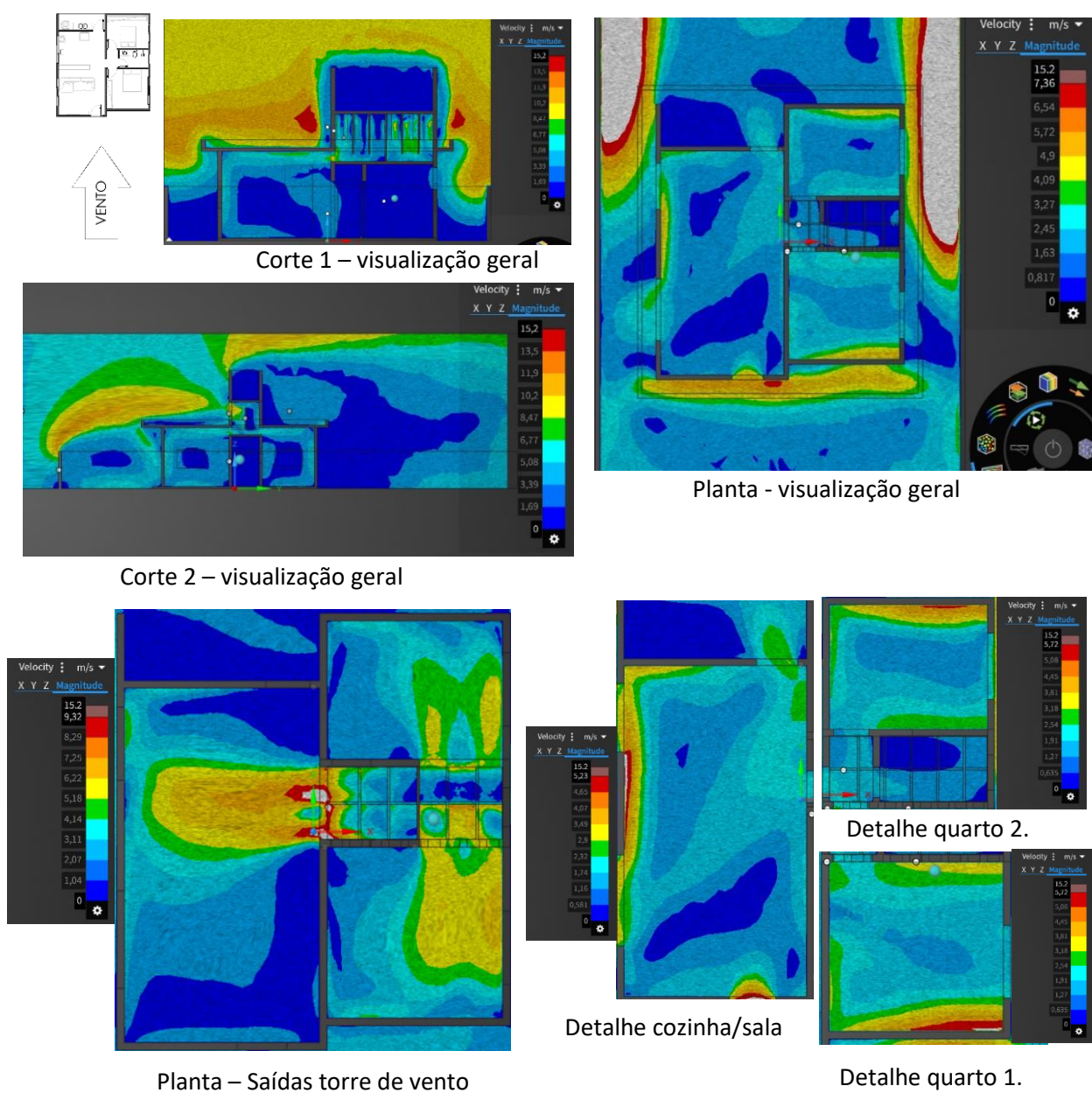
Para as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 0° , no modelo da casa com torre de vento unidirecional com as portas e janelas abertas, houve um aumento considerável na distribuição de vento pela casa, em comparação com o modelo sem torre de vento, principalmente dentro dos quartos. As maiores velocidades no interior da edificação se encontram nas saídas da torre de vento e nas paredes opostas a elas, sendo que os valores médios ficaram em torno de 1 m/s (para $V1$), 2 m/s (para $V2$). Embora os dois perfis de velocidade sejam semelhantes, o que apresenta melhor distribuição do ar interno é o de velocidade de 5 m/s ($V2$) (Figura 32 e 33).

Para as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 180° , no modelo da casa com torre de vento unidirecional, houve também uma melhora na distribuição do ar, em comparação com o modelo sem torre de vento, dentro dos quartos, com a torre mudando a trajetória do ar dentro da casa. Considerando a semelhança entre os dois perfis de velocidade, o que apresenta melhor distribuição do ar interno é o de velocidade de 5 m/s ($V2$) (Figura 34 e 35).



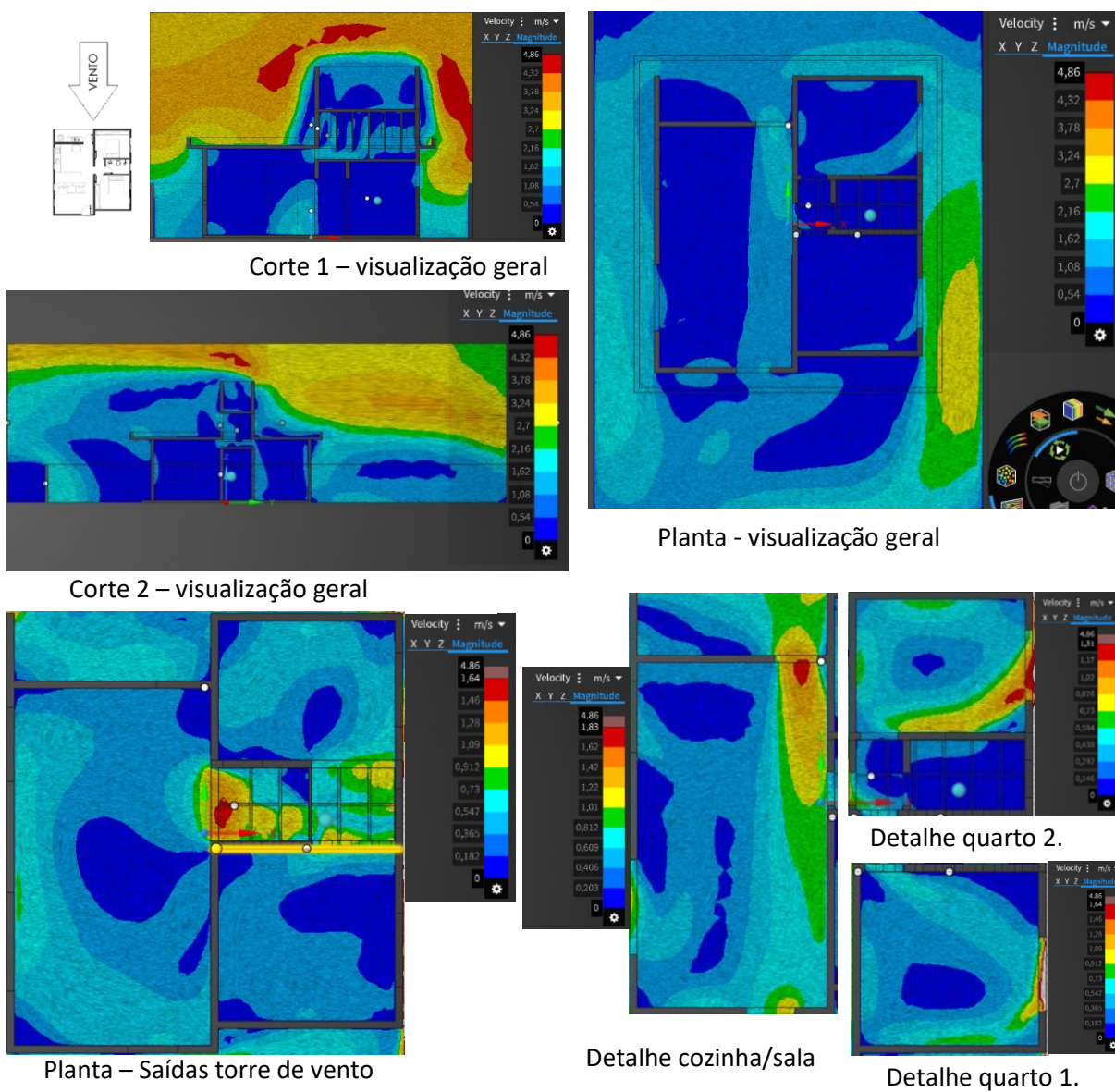
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 35 - Velocidade do vento de 5 m/s a 0° para modelo de torre de vento unidirecional



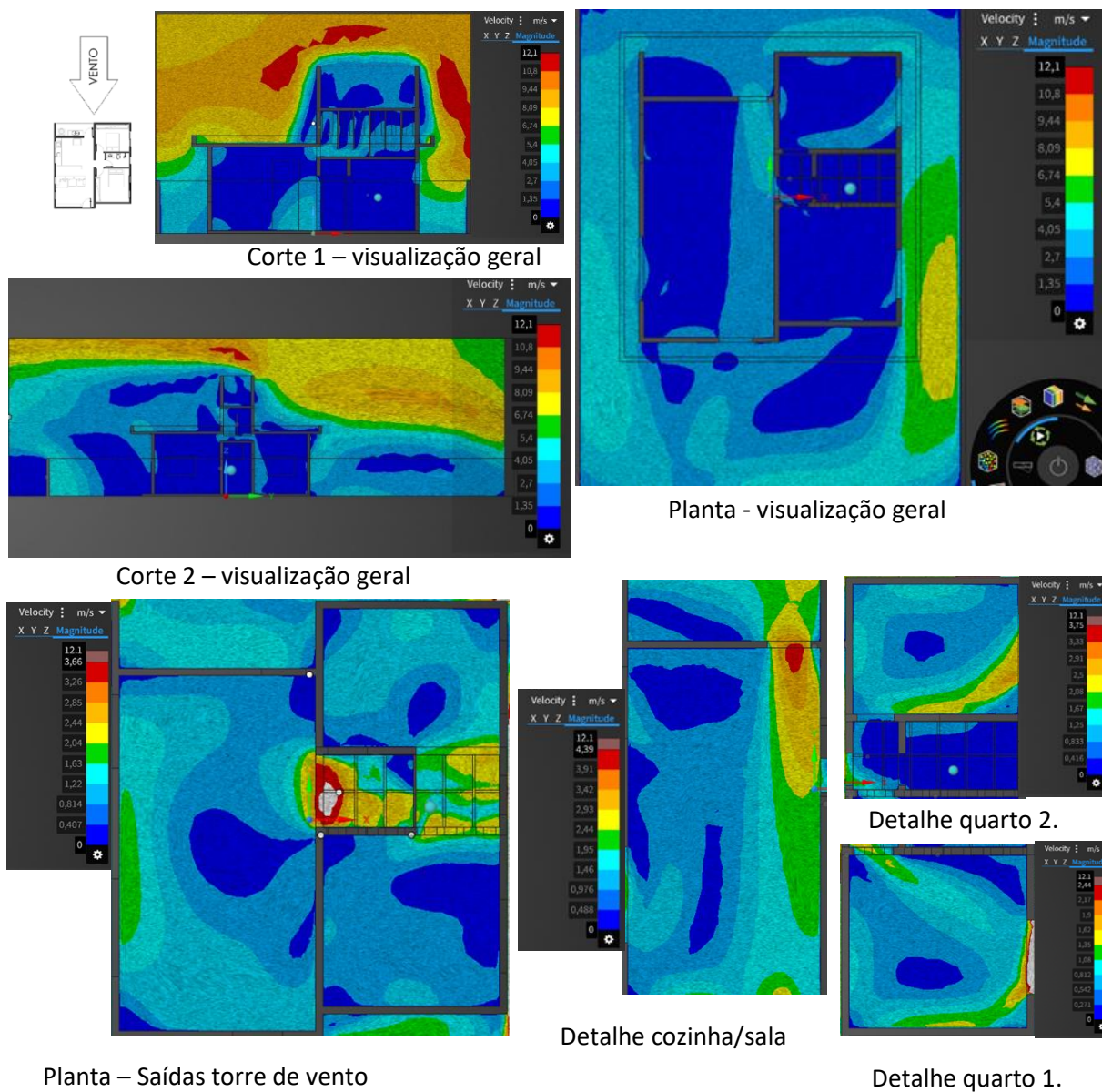
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 36 - Velocidade do vento de 2 m/s a 180° para modelo de torre de vento unidirecional



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 37 - Velocidade do vento de 5 m/s a 180° para modelo de torre de vento unidirecional



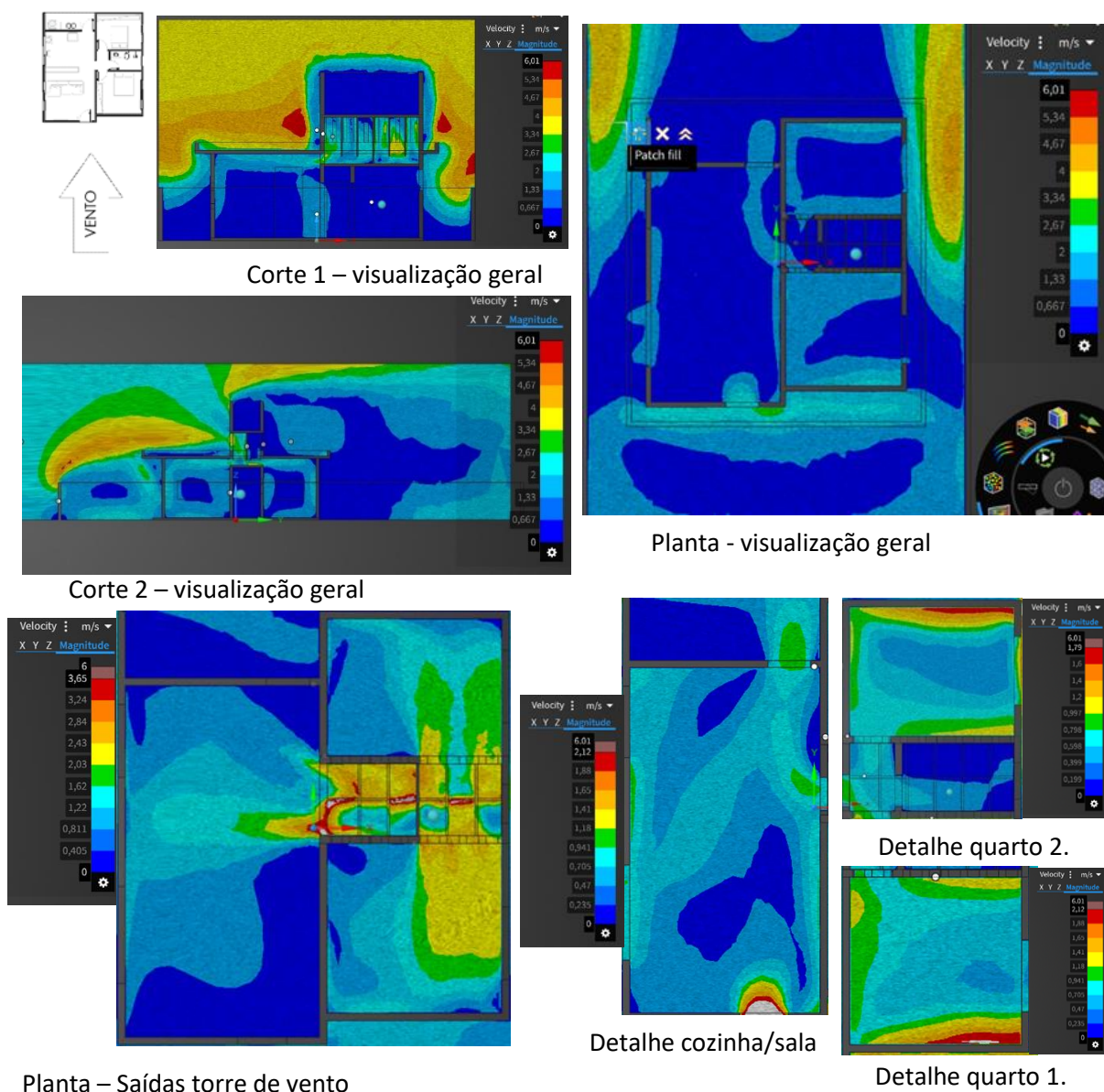
Fonte: Autoria própria (2025)

4.2.3 Modelo com torre de vento bidirecional

Para as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 0° , no modelo da casa com torre de vento bidirecional com as portas e janelas abertas, os perfis de velocidade foram próximos ao obtido com a torre unidirecional, sendo que as maiores velocidades no interior da edificação também se encontram nas saídas da torre de vento e nas paredes opostas a elas. Os valores médios da simulação ficaram em torno de $0,7 \text{ m/s}$ (para $V1$), $2,0 \text{ m/s}$ (para $V2$) (Figuras 36 e 37).

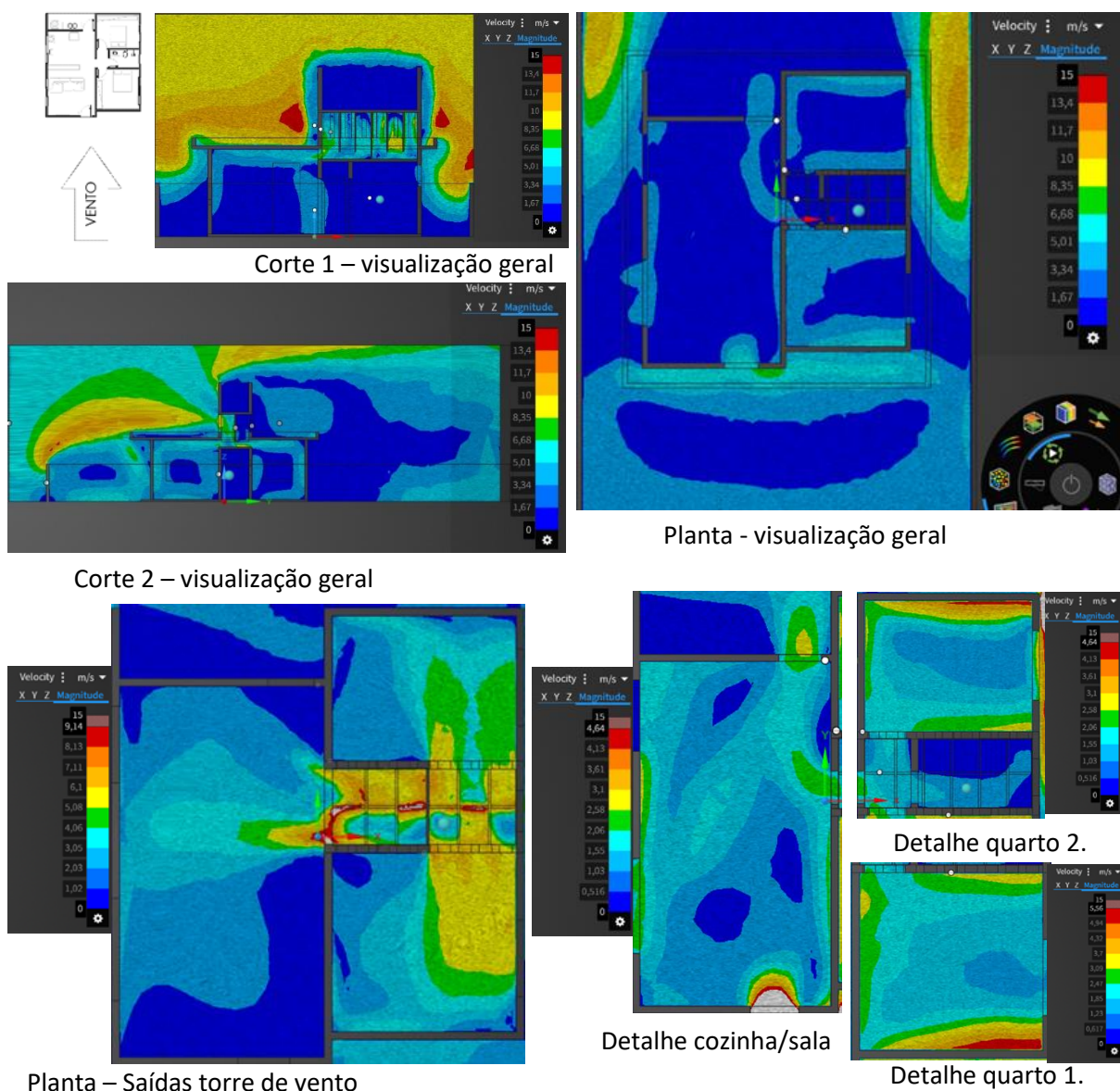
Analisando os dois casos simulados ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 180° , no modelo da casa com torre de vento bidirecional com as portas e janelas abertas, pode-se notar que o ar foi melhor distribuído nos quartos, sem ponto de ar parado. Os valores da simulação ficaram em torno de $0,5 \text{ m/s}$ (para $V1$), $1,0 \text{ m/s}$ (para $V2$) (Figuras 38 e 39).

Figura 38 - Velocidade do vento de 2 m/s a 0° para modelo de torre de vento bidirecional



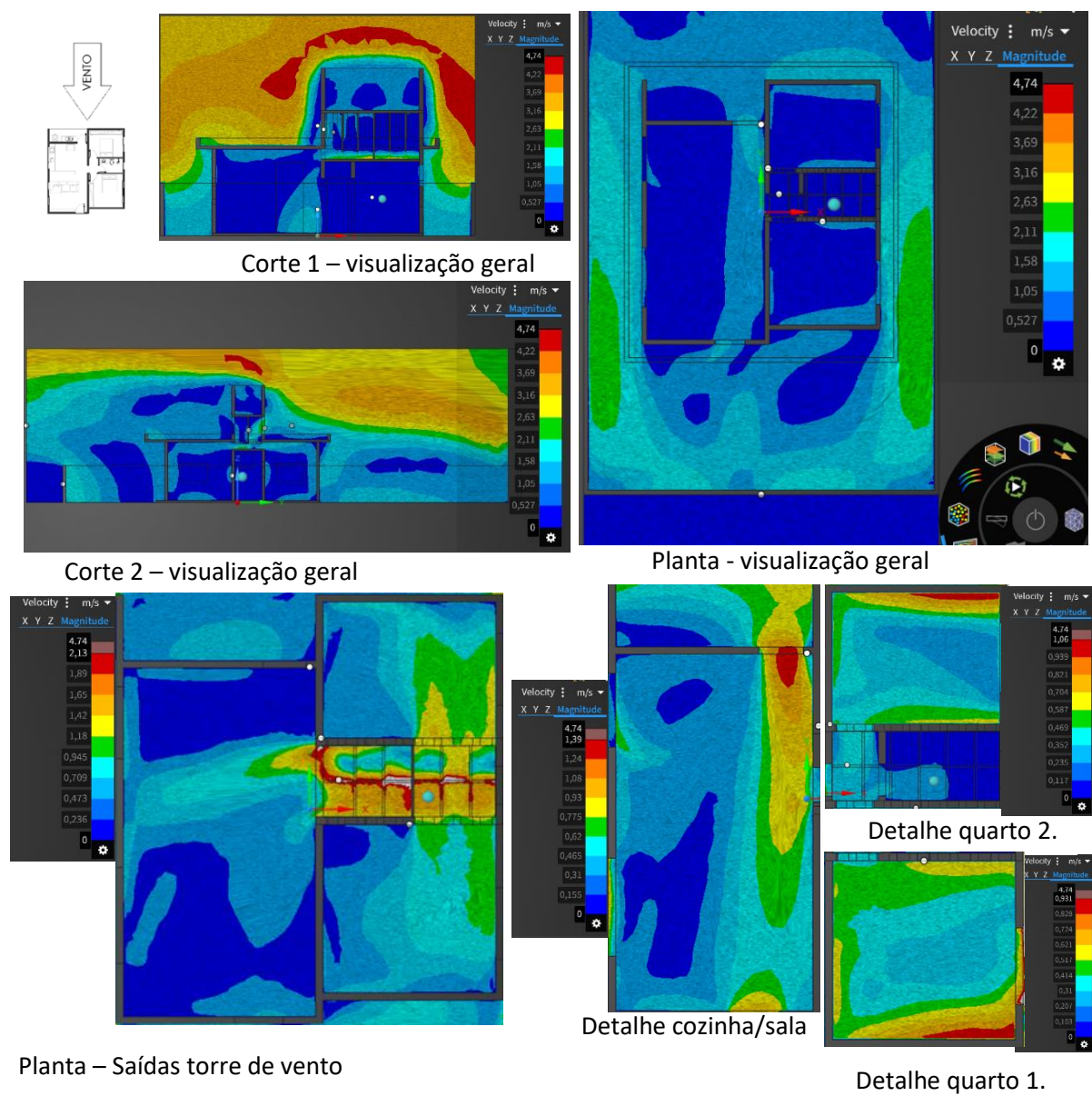
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 39 - Velocidade do vento de 5 m/s a 0° para modelo de torre de vento bidirecional



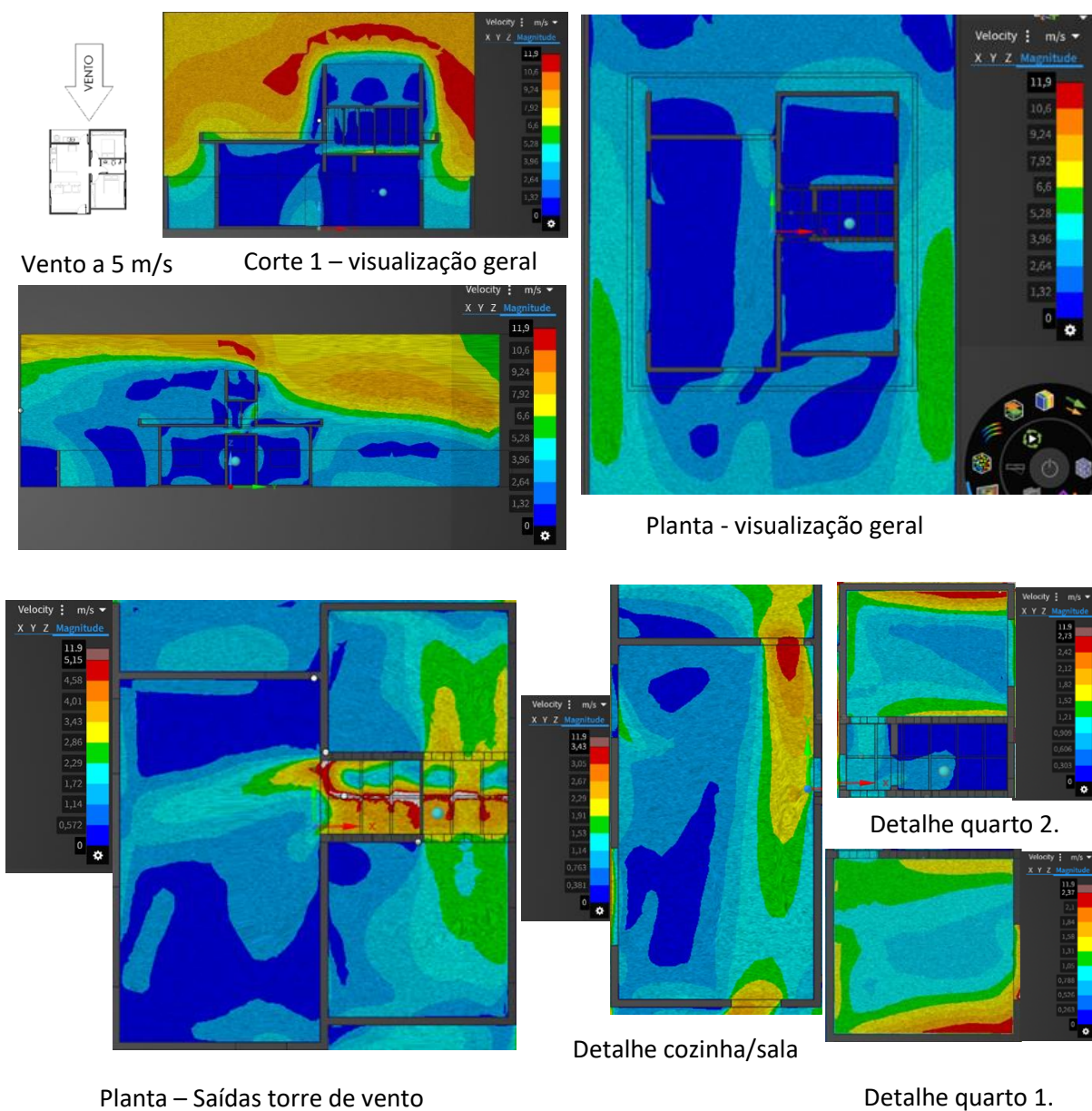
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 40 - Velocidade do vento de 2 m/s a 180° para modelo de torre de vento bidirecional



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 41 - Velocidade do vento de 5 m/s a 180° para modelo de torre de vento bidirecional



Fonte: Autoria própria (2025)

4.2.4 Modelo com torre tetradirecional (portas e janelas abertas)

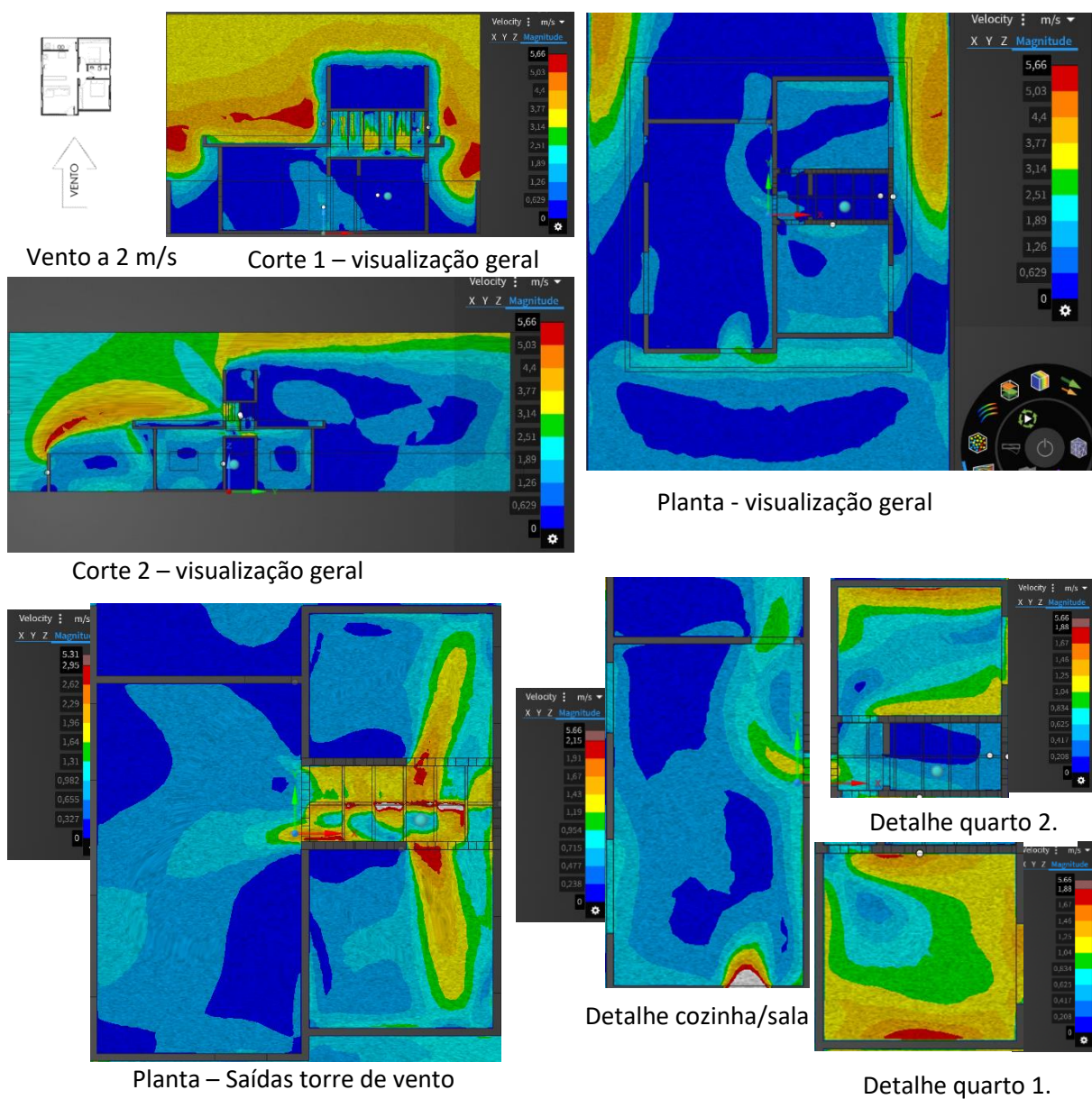
Para as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 0° , no modelo da casa com torre de vento tetradirecional com as portas e janelas abertas, houve uma distribuição mais uniforme dentro dos quartos, com valores da simulação que ficaram em torno de $1,0 \text{ m/s}$ (para $V1$) e $2,0 \text{ m/s}$ (para $V2$). Na sala, a distribuição foi menor, tendo alguns pontos com velocidade próxima de 0 m/s (Figuras 40 e 41).

Considerando as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 180° , no modelo da casa com torre de vento tetradirecional com as portas e janelas abertas, os valores da simulação ficaram em torno de $0,5 \text{ m/s}$ (para $V1$) e $1,0 \text{ m/s}$ (para $V2$). Embora os perfis de velocidade sejam semelhantes, o que apresenta melhor distribuição do ar interno é o de velocidade de simulação de 5 m/s (Figuras 42 e 43).

Para os dois casos simulados ($V1 = 2 \text{ m/s}$ e $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 90° , na torre de vento tetradirecional com as portas e janelas abertas, apesar dos valores da simulação não obter valores maiores de velocidade dentro dos ambientes internos, pode-se notar que houve uma melhora em comparação com o modelo sem torre de vento. Os valores da simulação ficaram em torno de $0,4 \text{ m/s}$ (para $V1$) e $0,6 \text{ m/s}$ (para $V2$) (Figuras 44 e 45).

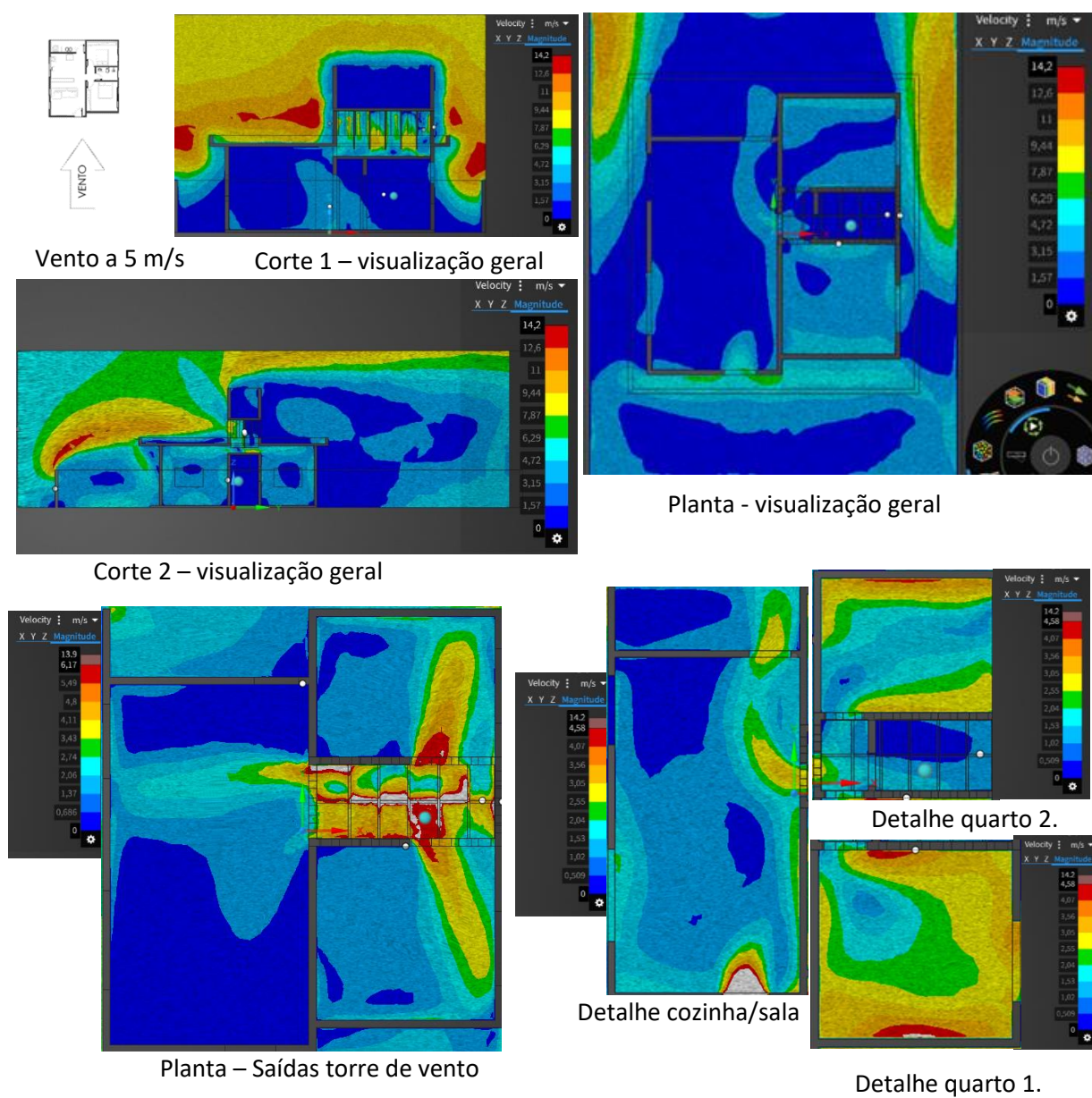
Para os dois casos simulados ($V1 = 2 \text{ m/s}$ e $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 270° , na torre de vento tetradirecional com as portas e janelas abertas, os valores da simulação ficaram em torno de $0,4 \text{ m/s}$ para $V1$, e $0,7 \text{ m/s}$ para $V2$, devido a interferência do muro nas aberturas de portas e janelas e pelo vento estar na direção da menor abertura da torre (Figuras 46 e 47).

Figura 42 - Velocidade do vento de 2 m/s a 0° para modelo de torre de vento tetradirecional



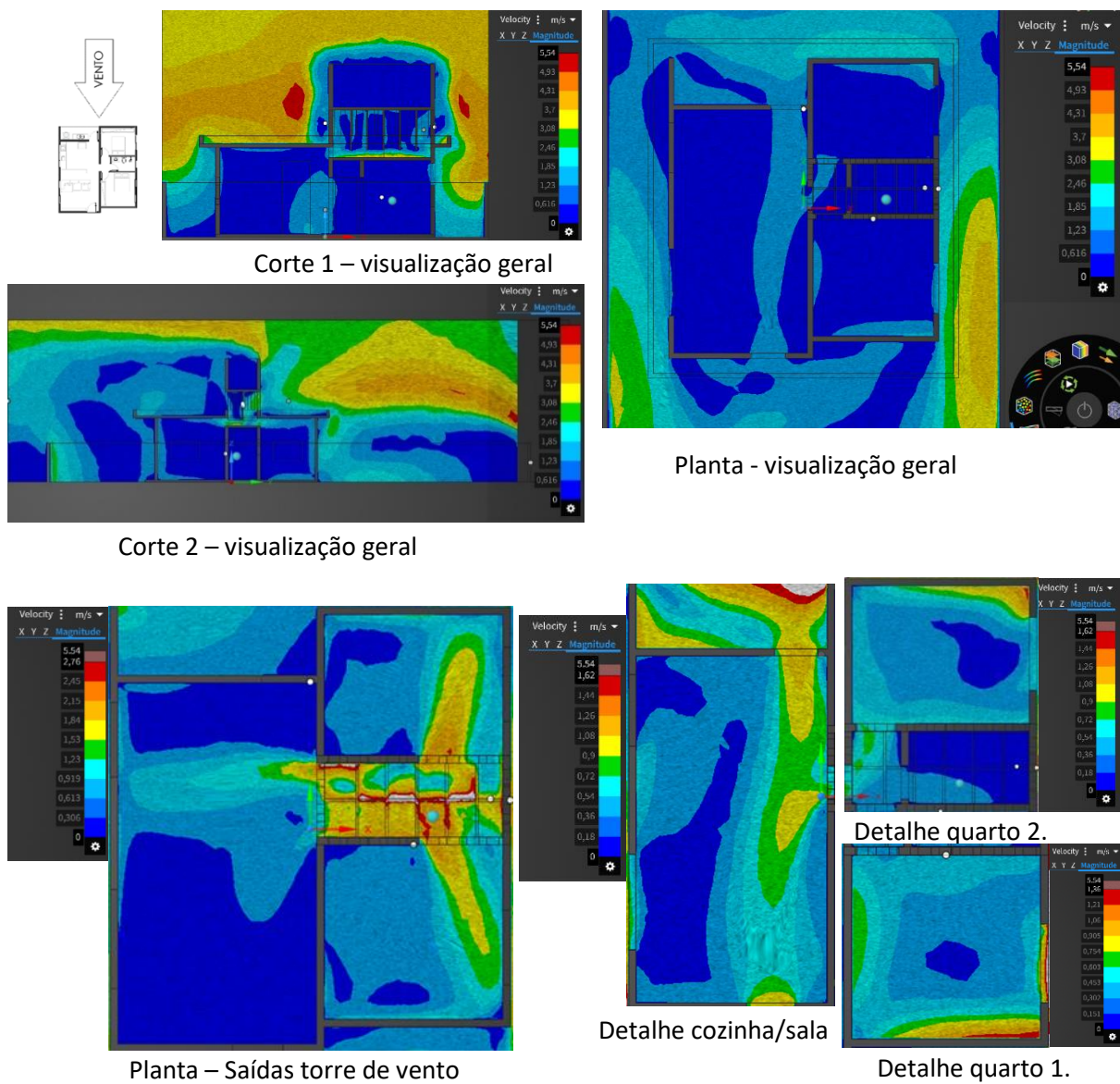
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 43 - Velocidade do vento de 5 m/s a 0° para modelo de torre de vento tetradirecional



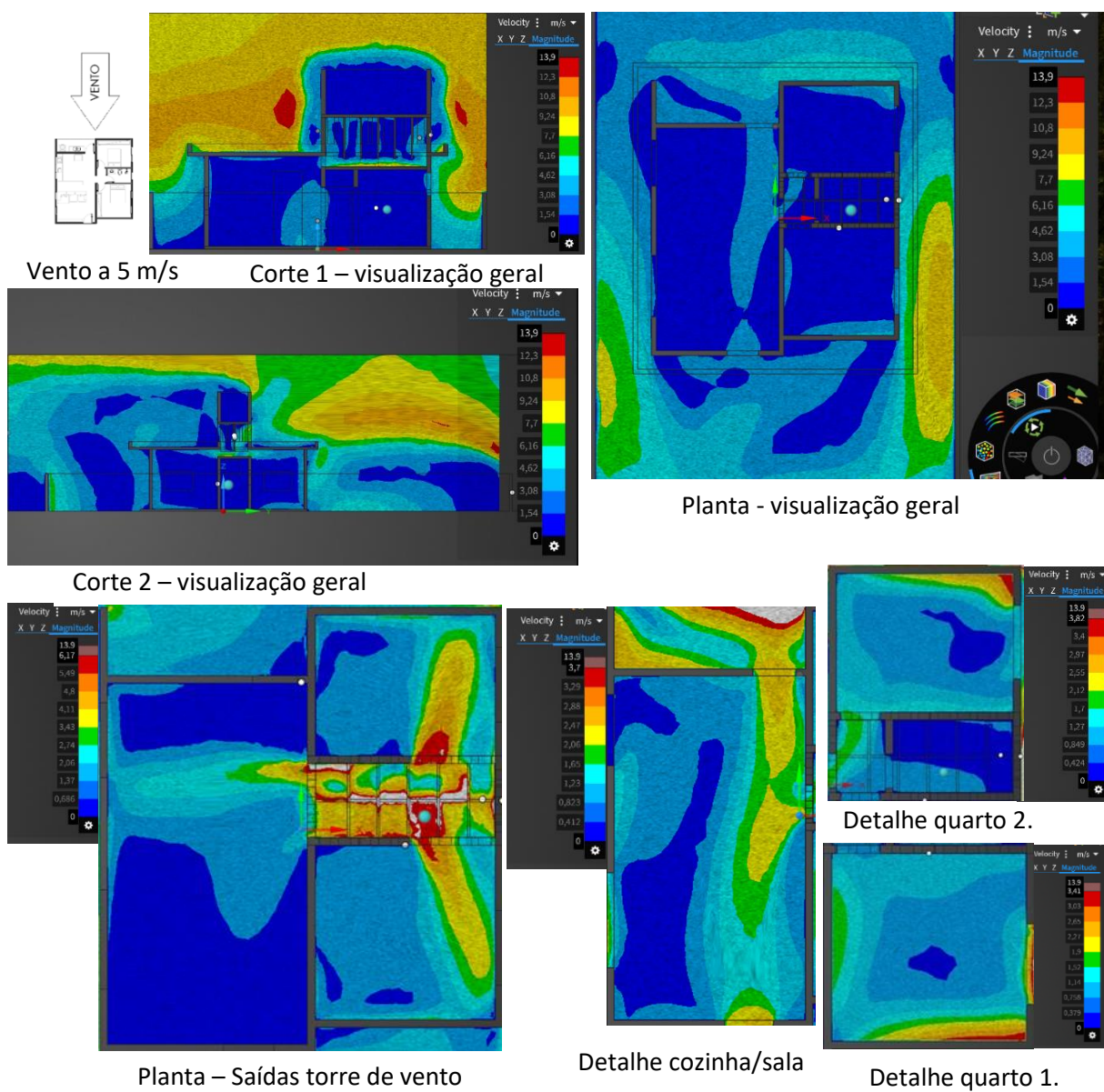
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 44 - Velocidade do vento de 2 m/s a 180° para modelo de torre de vento tetradirecional



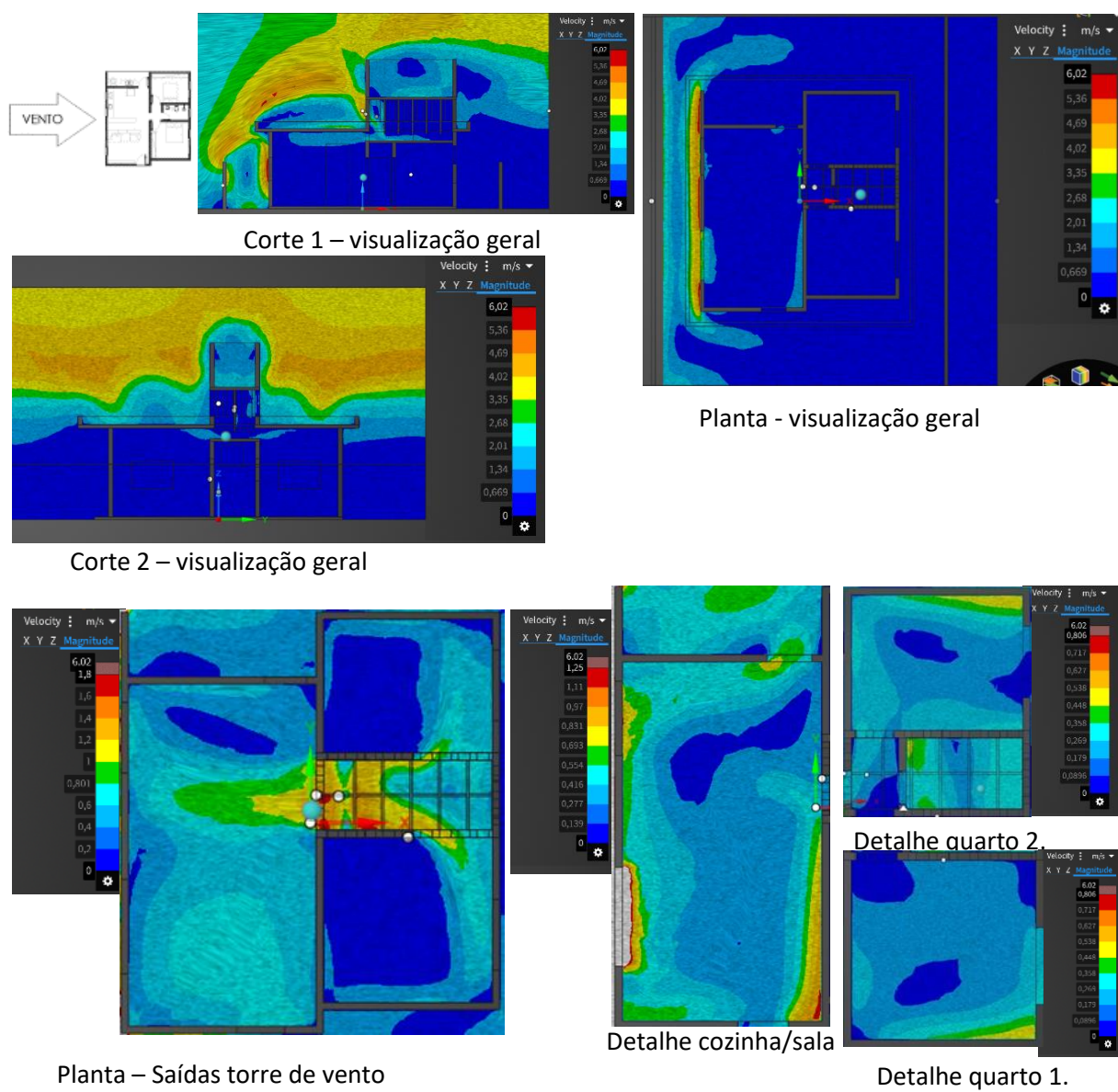
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 45 - Velocidade do vento de 5 m/s a 180° para modelo de torre de vento tetradirecional



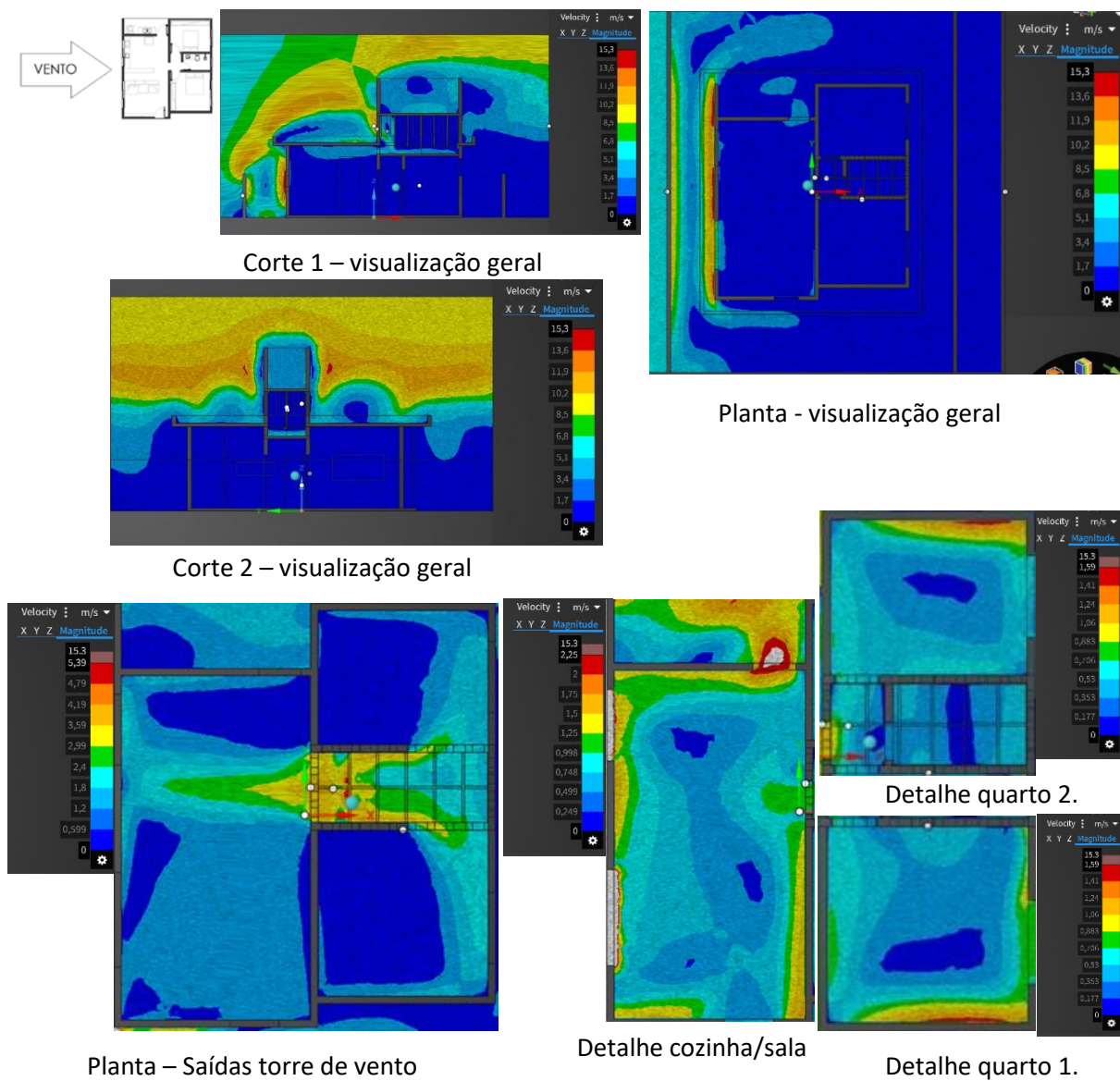
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 46 - Velocidade do vento de 2 m/s a 90° para modelo de torre de vento tetradirecional



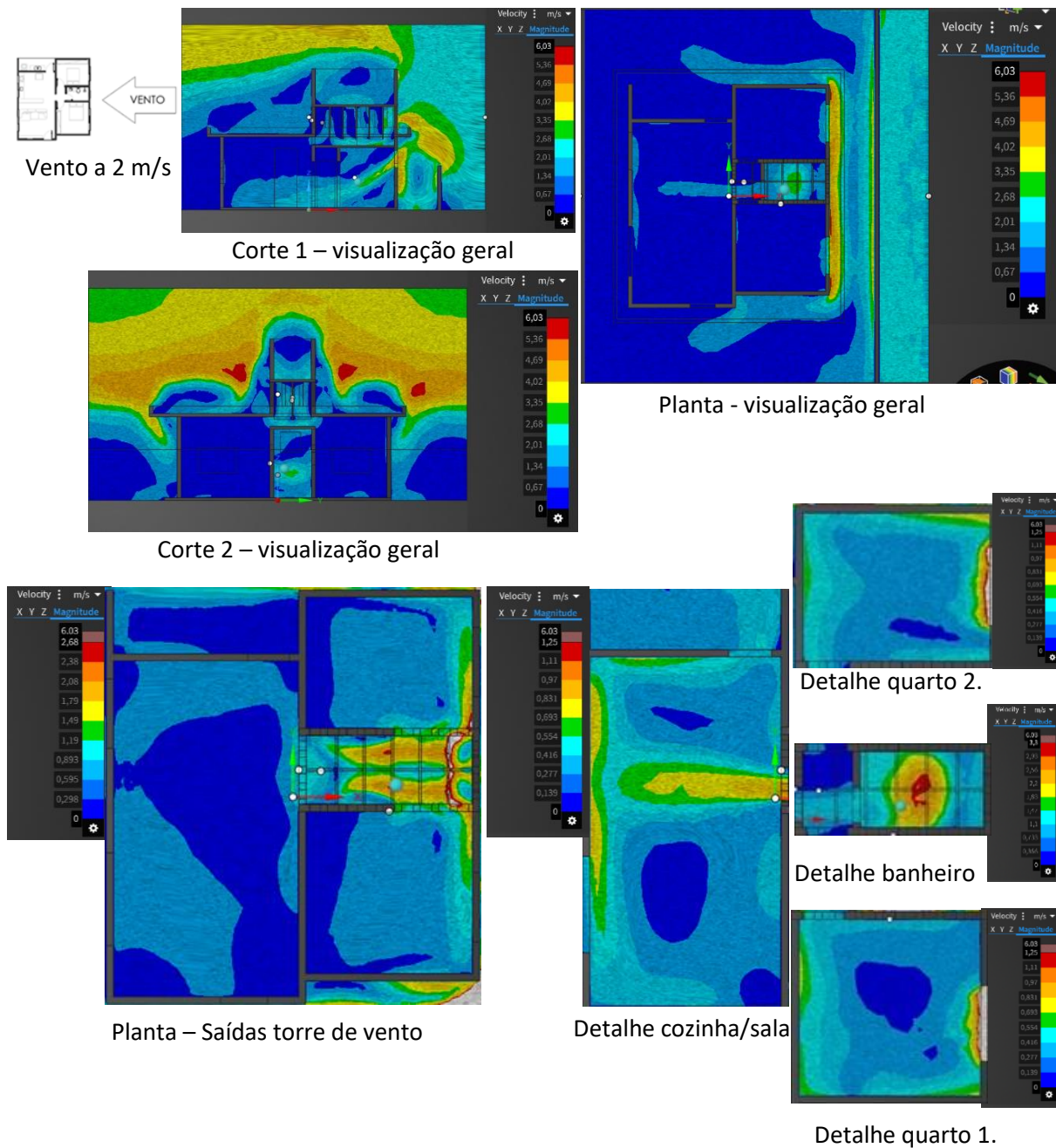
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 47 - Velocidade do vento de 5 m/s a 90° para modelo de torre de vento tetradirecional



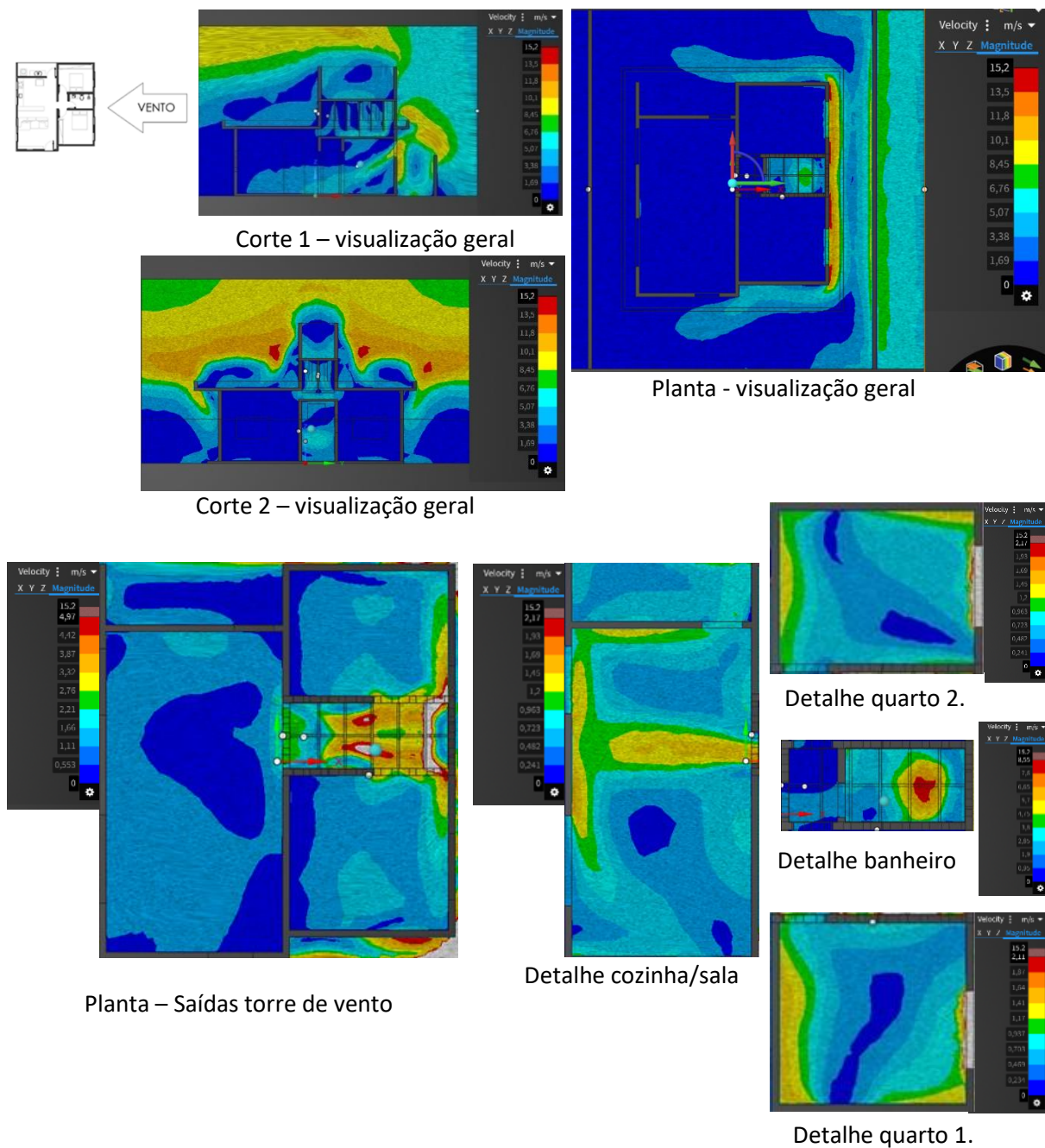
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 48 - Velocidade do vento de 2 m/s a 270° para modelo de torre de vento tetradirecional



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 49 - Velocidade do vento de 5 m/s a 270° para modelo de torre de vento tetradirecional



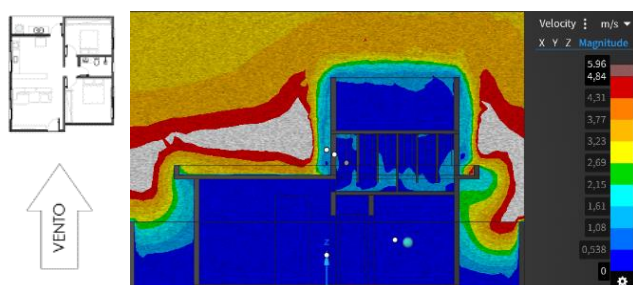
Fonte: Autoria própria (2025)

4.2.5 Modelo com torre unidirecional (portas e janelas fechadas)

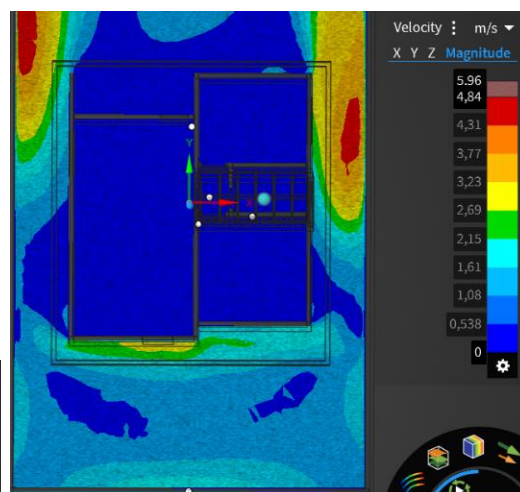
Para as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 0° , no modelo da casa com torre de vento unidirecional com as portas e janelas fechadas, a circulação de ar ficou próxima de 0 m/s nos quartos, tendo uma melhor circulação na cozinha/sala. Isso ocorre por não haver outra abertura, diminuindo a circulação. Os valores da simulação ficaram em torno de $0,05 \text{ m/s}$ (para $V1$), $0,1 \text{ m/s}$ (para $V2$) (Figuras 48 e 49).

Para as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 180° , no modelo da casa com torre de vento unidirecional com as portas e janelas fechadas, a circulação de ar também ficou próxima de 0 m/s nos quartos e na cozinha/sala. Os valores da simulação ficaram em torno de $0,06 \text{ m/s}$ (para $V1$), $0,12 \text{ m/s}$ (para $V2$) (Figuras 50 e 51).

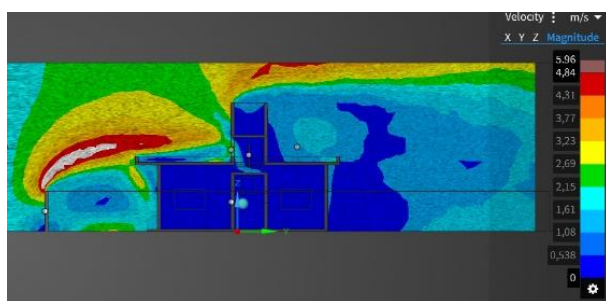
Figura 50 - Velocidade do vento de 2 m/s a 0° para modelo de torre de vento unidirecional



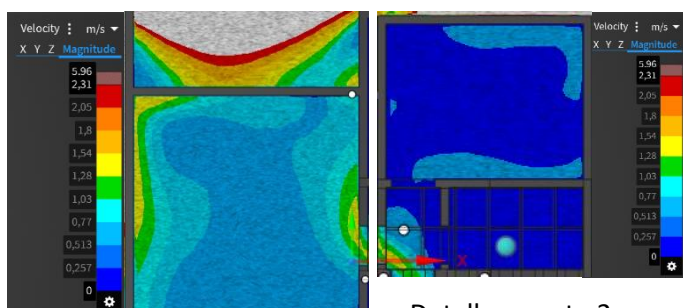
Corte 1 - Visualização geral



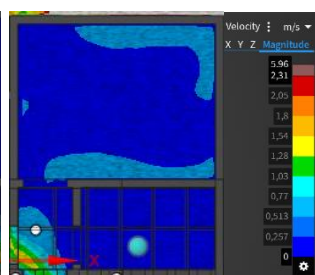
Planta - Visualização geral



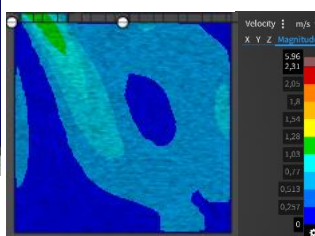
Corte 2 - Visualização geral



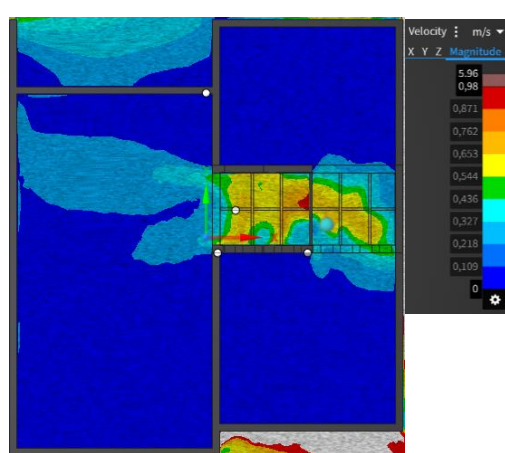
Detalhe cozinha/sala



Detalhe quarto 2



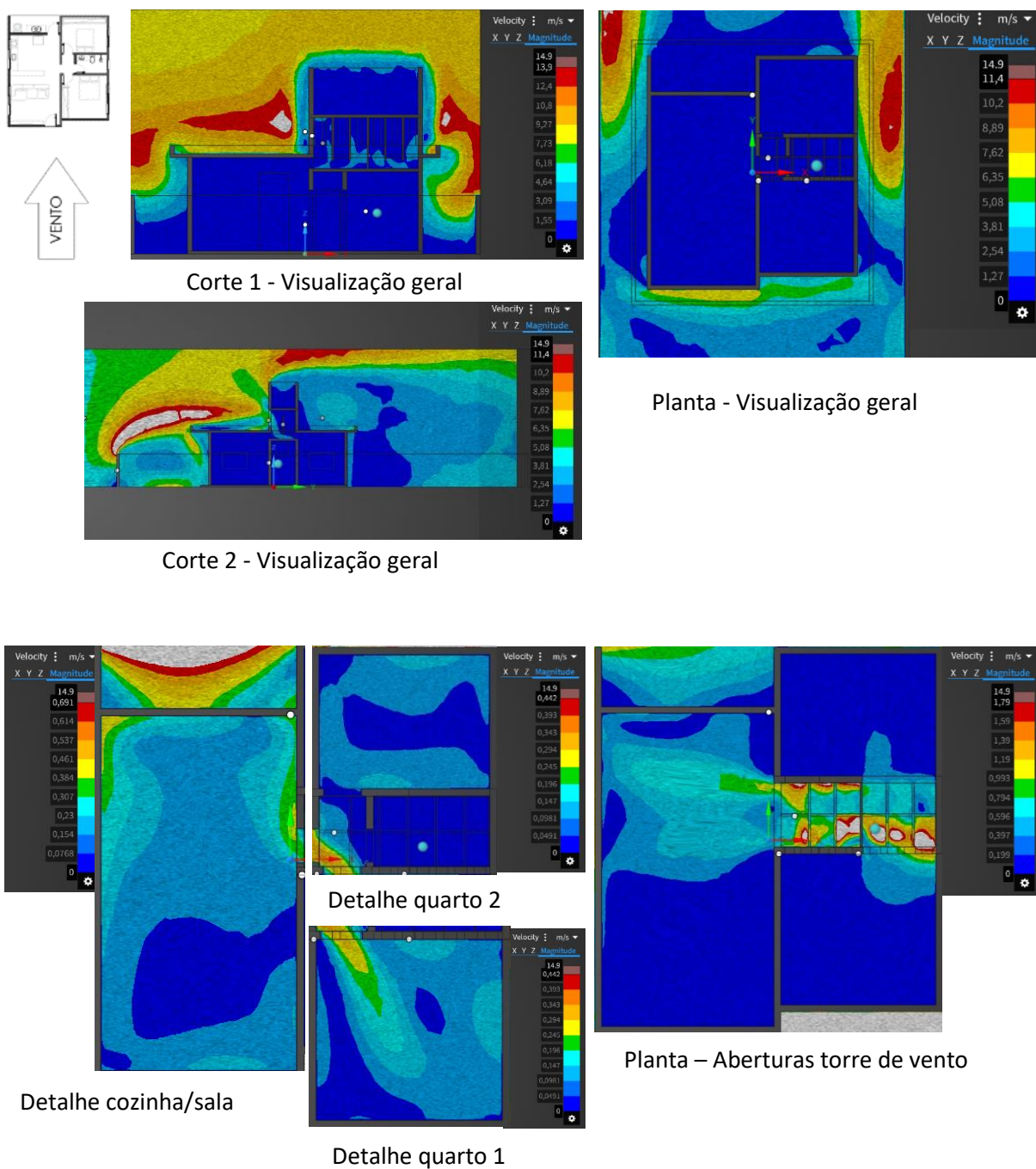
Detalhe quarto 1



Planta - Aberturas torre de vento

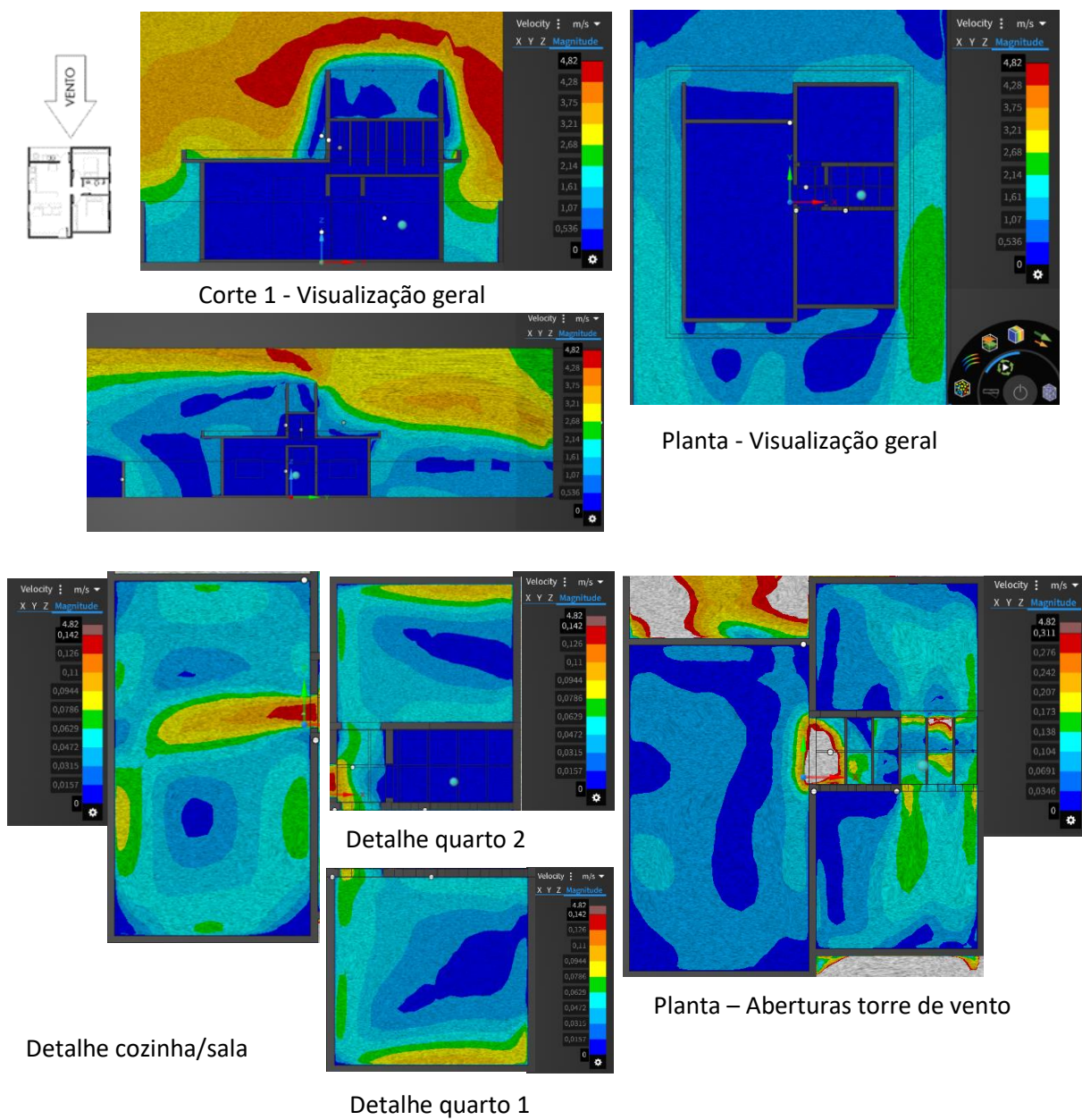
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 51 - Velocidade do vento de 5 m/s a 0° para modelo de torre de vento unidirecional



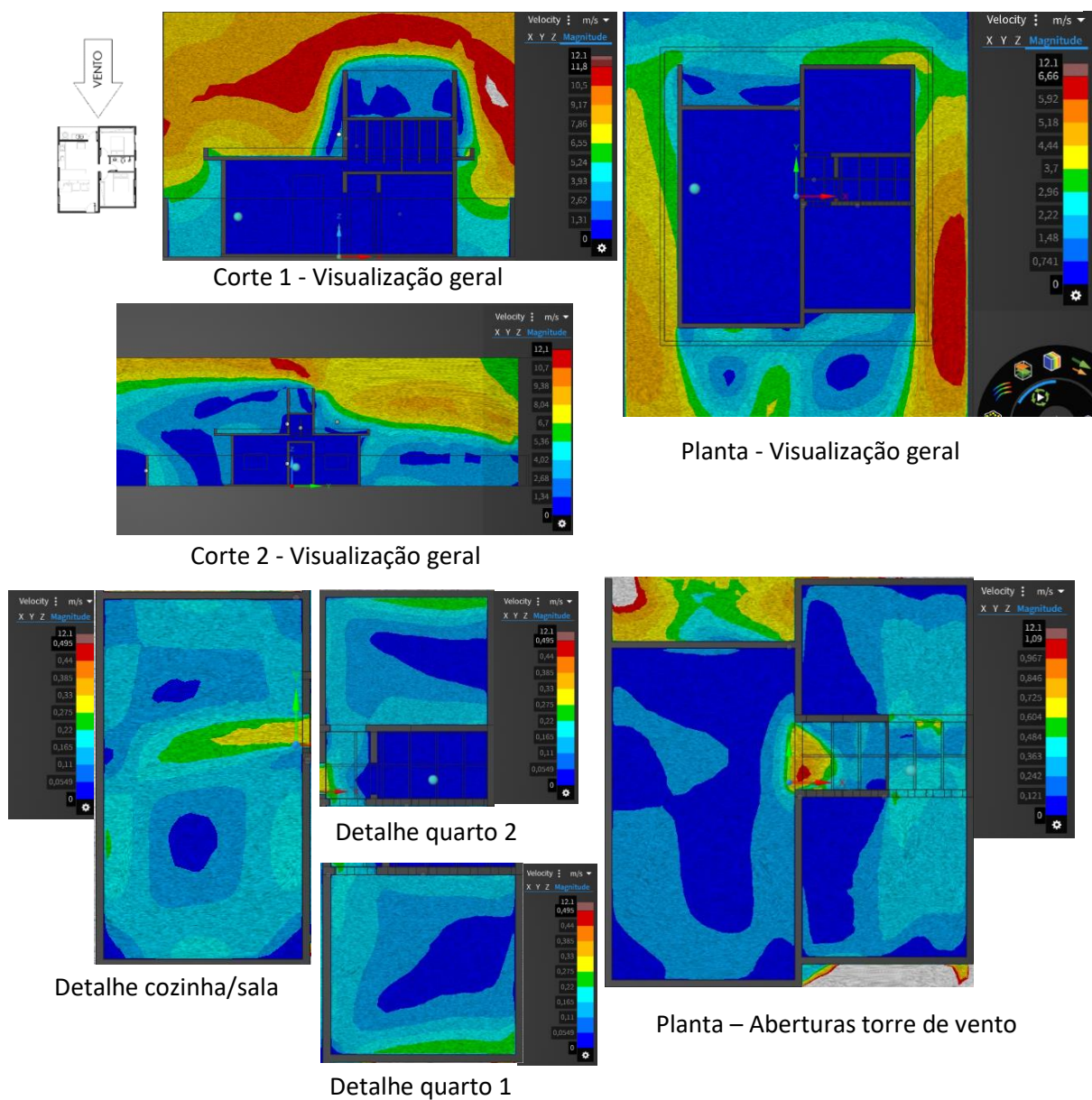
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 52 - Velocidade do vento de 2 m/s a 180° para modelo de torre de vento unidirecional



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 53 - Velocidade do vento de 5 m/s a 180° para modelo de torre de vento unidirecional



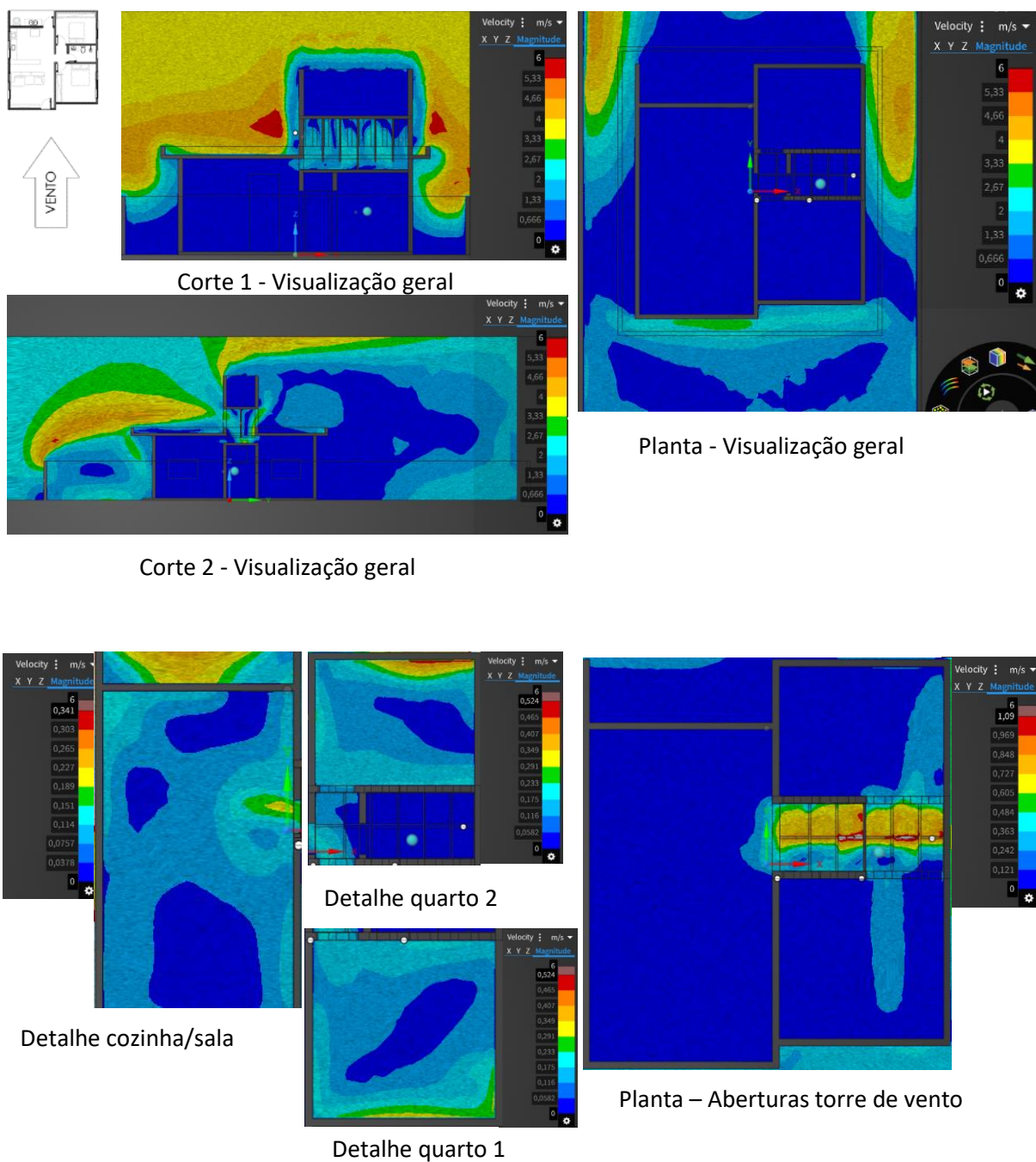
Fonte: Autoria própria (2025)

4.2.6 Modelo com torre bidirecional (portas e janelas fechadas)

Analisando as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 0° , no modelo da casa com torre de vento bidirecional com as portas e janelas fechadas, pode-se notar uma pequena melhora em relação ao modelo unidirecional, devido a circulação entre a entrada e saída da torre de vento, aumentando a velocidade do ar. Os valores da simulação ficaram em torno de $0,1 \text{ m/s}$ (para $V1$), $0,3 \text{ m/s}$ (para $V2$) (Figura 52 e 53).

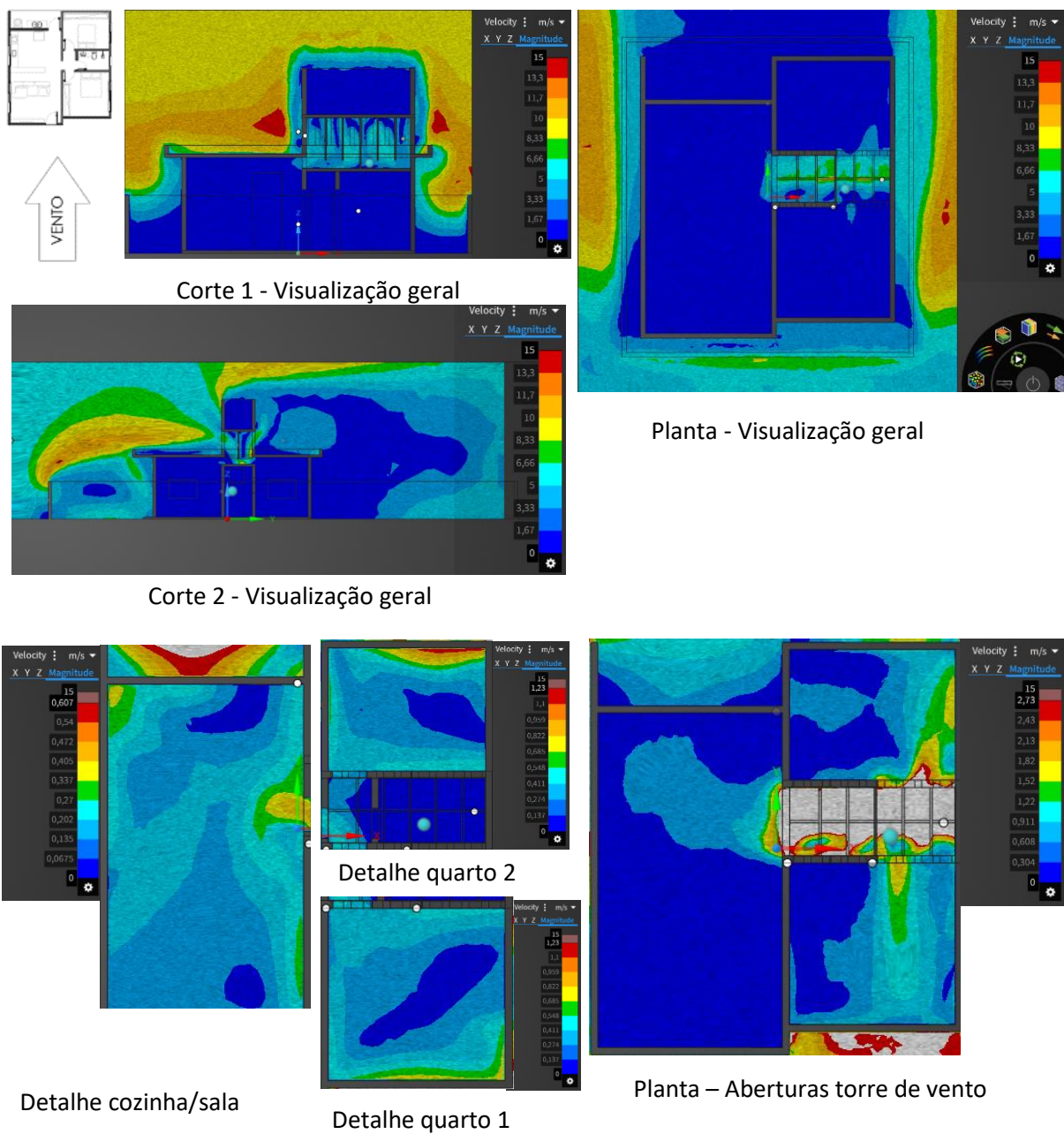
Para as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 180° , no modelo da casa com torre de vento bidirecional com as portas e janelas fechadas, as velocidades do ar nos quartos ficaram próximas de 0 m/s , devido principalmente por não haver outro ponto de abertura na casa. Os valores médios da simulação ficaram em torno de $0,06 \text{ m/s}$ (para $V1$), $0,2 \text{ m/s}$ (para $V2$) (Figura 54 e 55).

Figura 54 - Velocidade do vento de 2 m/s a 0° para modelo de torre de vento bidirecional



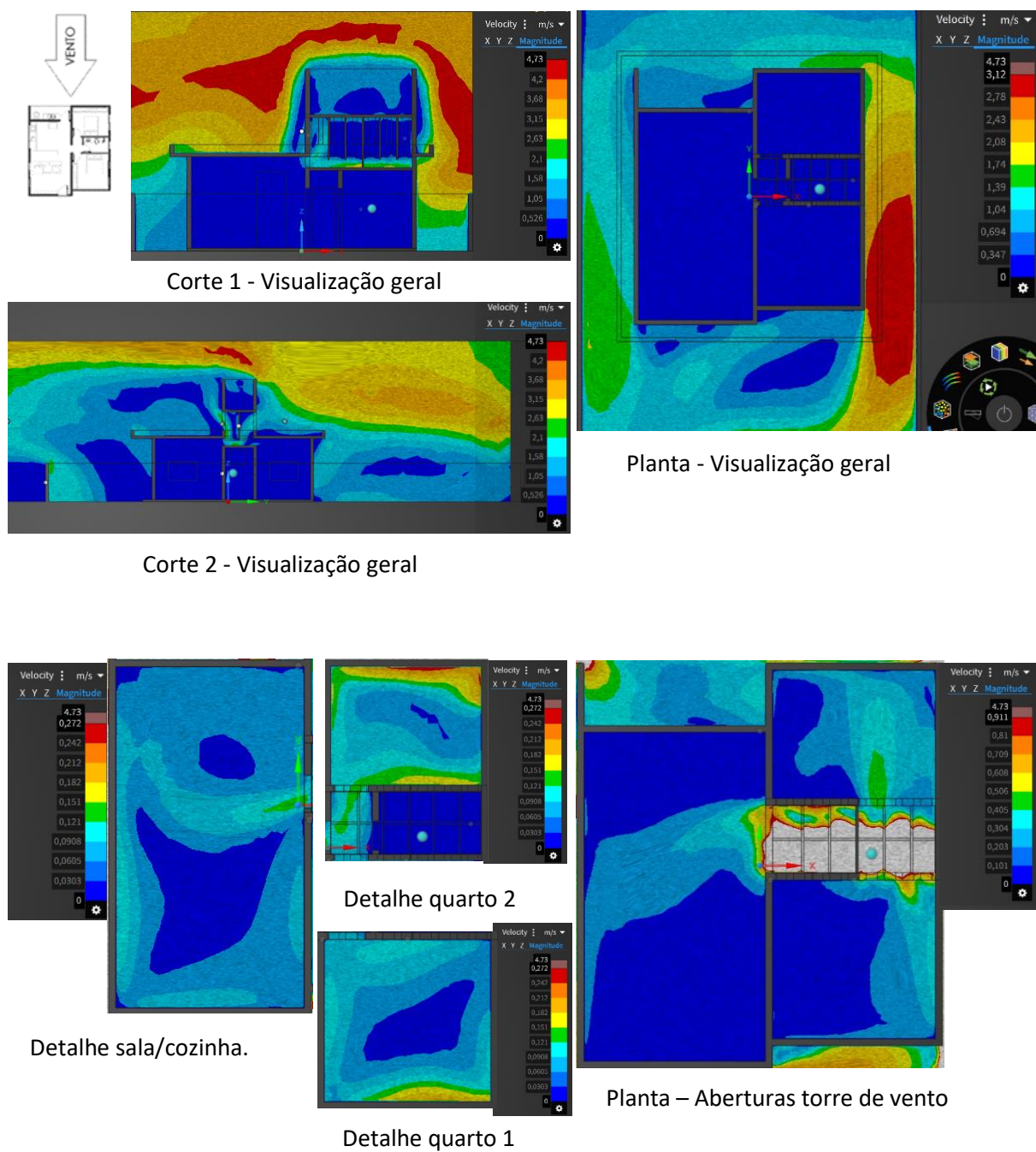
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 55 - Velocidade do vento de 5 m/s a 0° para modelo de torre de vento bidirecional



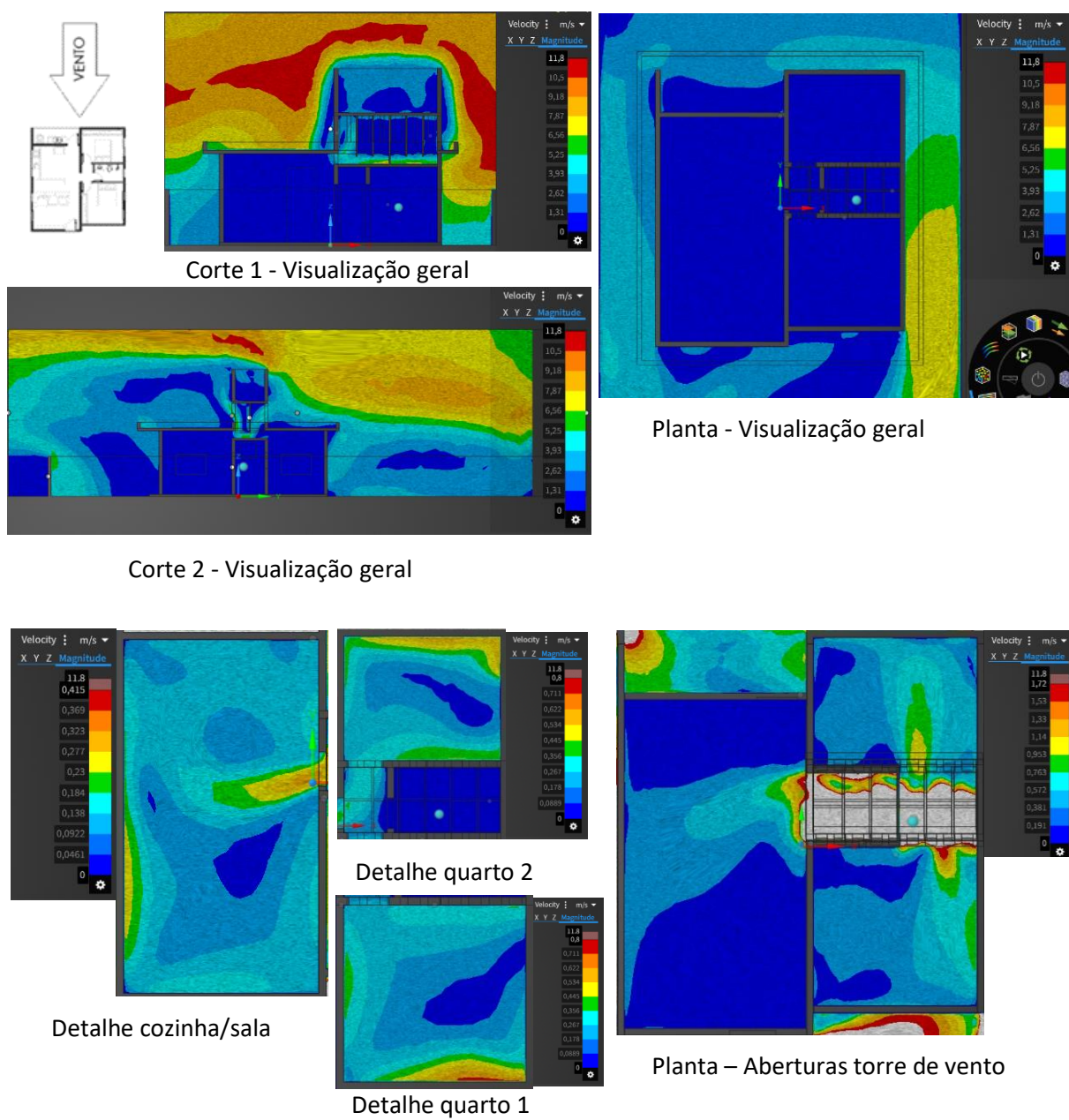
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 56 - Velocidade do vento de 2 m/s a 180° para modelo de torre de vento bidirecional



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 57 - Velocidade do vento de 5 m/s a 180° para modelo de torre de vento bidirecional



Fonte: Autoria própria (2025)

4.2.7 Modelo com torre tetradirecional (portas e janelas fechadas)

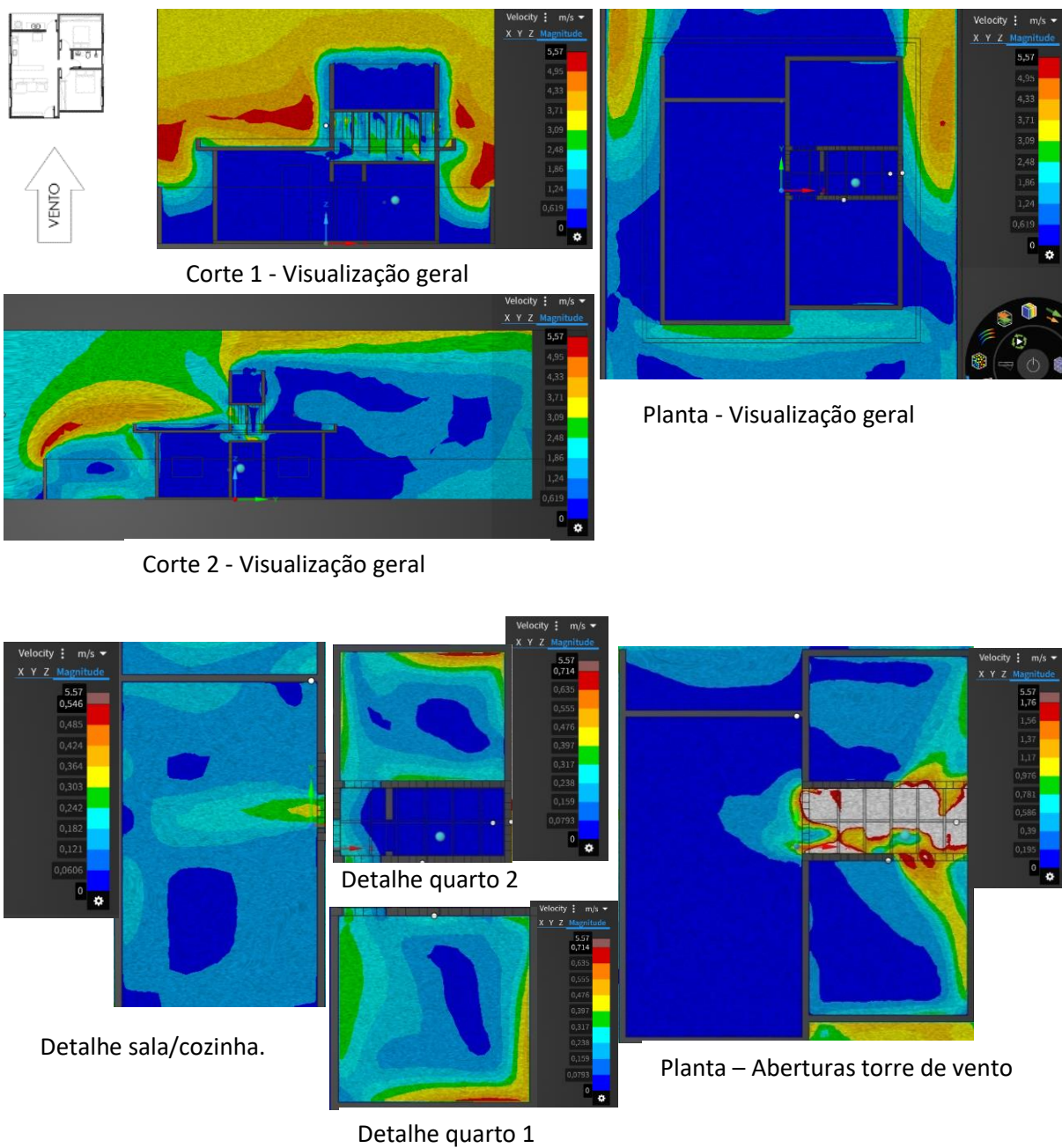
Considerando as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 0° , no modelo da casa com torre de vento tetradirecional com as portas e janelas fechadas, houve uma melhora de circulação nos quartos em relação aos outros modelos. Os valores da simulação ficaram em torno de $0,2 \text{ m/s}$ (para $V1$) e $0,5 \text{ m/s}$ (para $V2$) (Figuras 56 e 57).

Para as duas velocidades simuladas ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 180° , no modelo da casa com torre de vento tetradirecional com as portas e janelas fechadas, pode-se notar que há uma boa distribuição de ar interno. Os valores da simulação ficaram em torno de $0,15 \text{ m/s}$ (para $V1$), $0,4 \text{ m/s}$ (para $V2$) (Figuras 58 e 59).

Na torre tetradirecional com as portas e janelas fechadas, para os dois casos simulados ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 90° , a circulação interna do ar nos quartos ficou próxima de 0 m/s com vários pontos de ar parado, enquanto na cozinha há uma melhor distribuição devido a maior quantidade de vento entrando pela torre (Figuras 60 e 61).

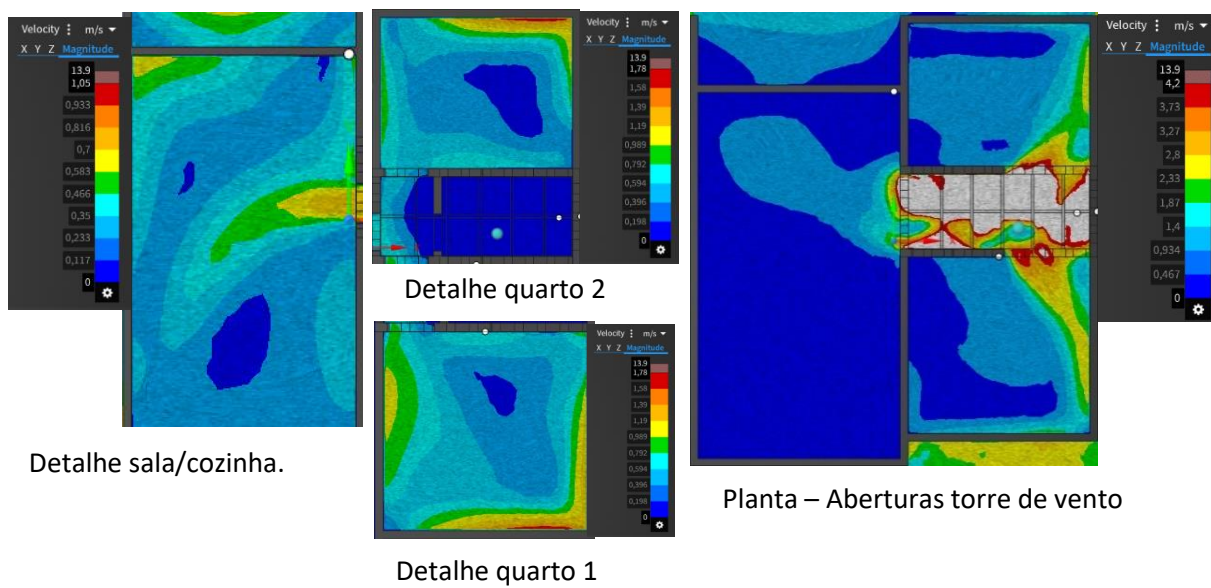
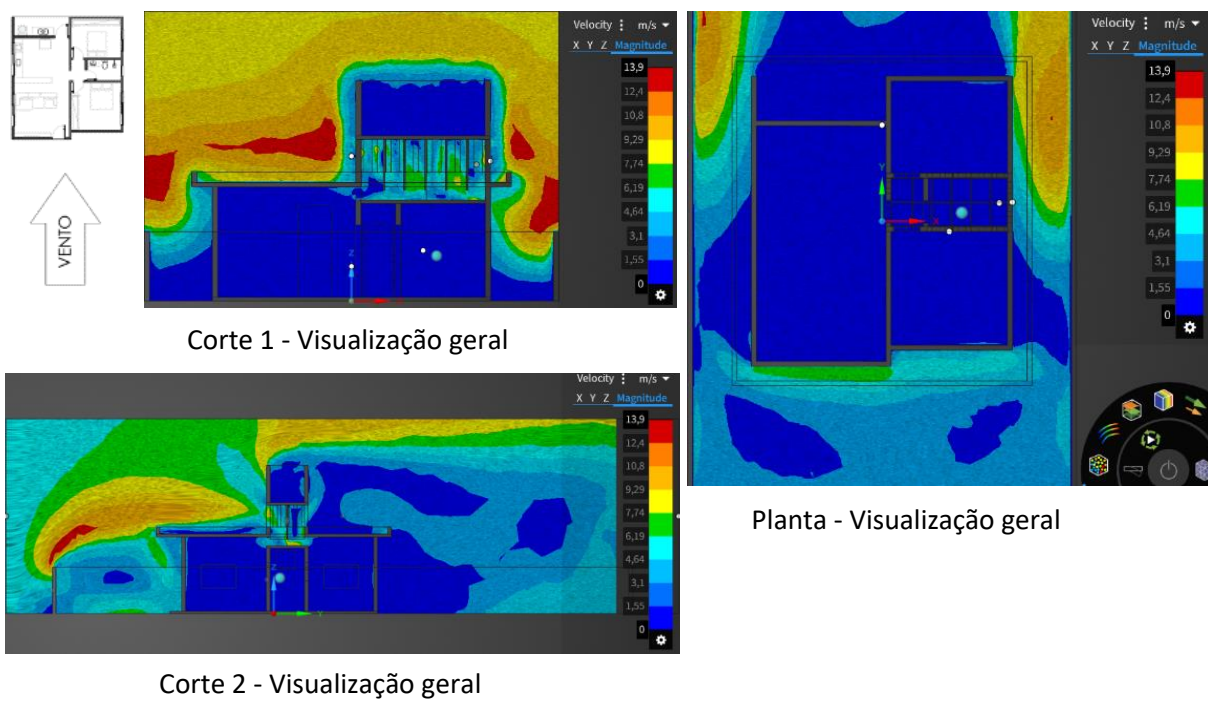
Na torre tetradirecional com as portas e janelas fechadas, para os dois casos simulados ($V1 = 2 \text{ m/s}$, $V2 = 5 \text{ m/s}$) a 270° , houve uma melhora do fluxo de ar nos quartos, devido à disposição da torre de vento. Porém os valores ficaram próximos de 0 m/s . Considerando os dois perfis analisados, o que apresenta maior circulação de ar interno é o de $V=5 \text{ m/s}$ (Figuras 62 e 63).

Figura 58 - Velocidade do vento de 2 m/s a 0° para modelo de torre de vento tetradirecional



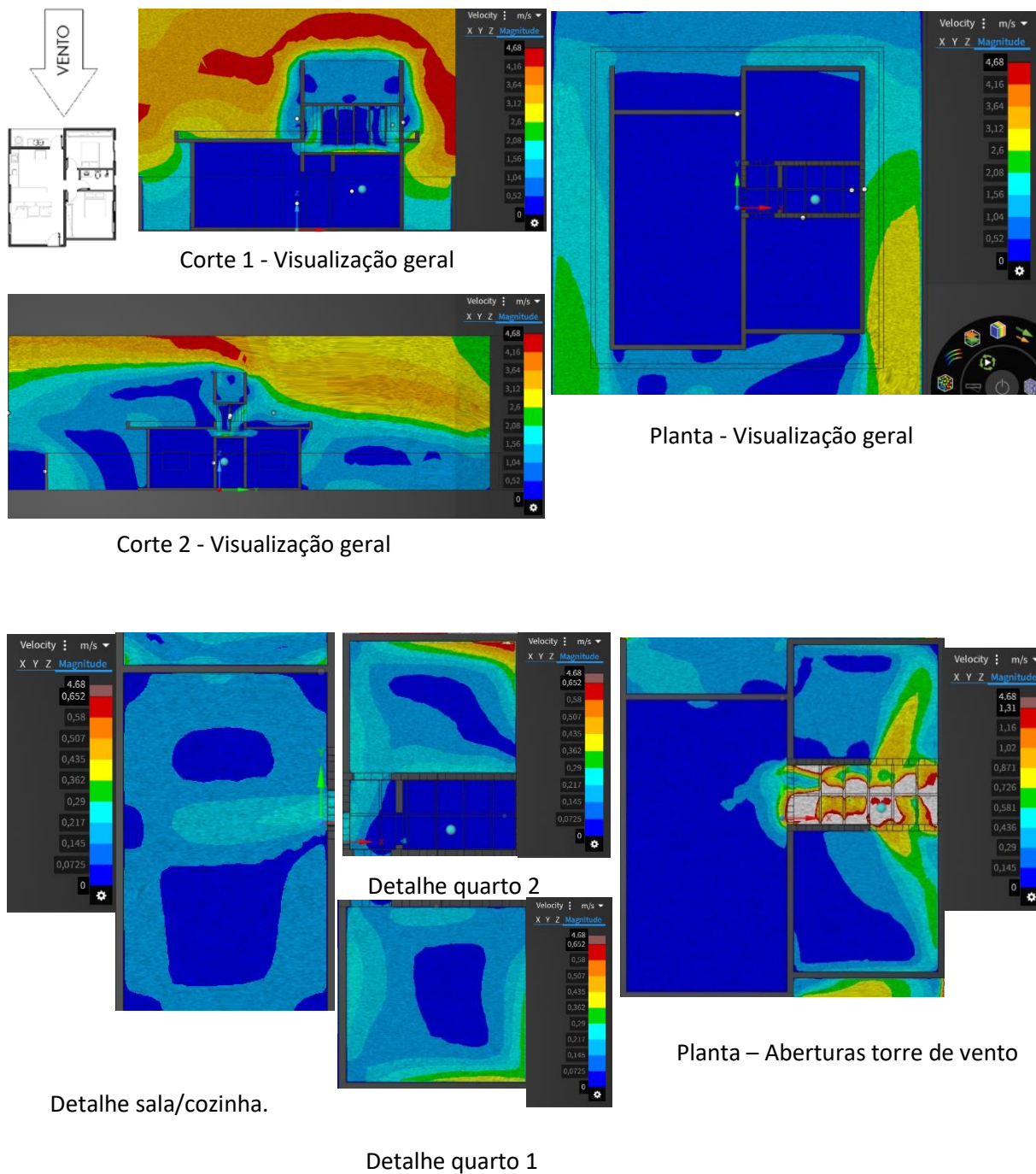
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 59 - Velocidade do vento de 5 m/s a 0° para modelo de torre de vento tetradirecional



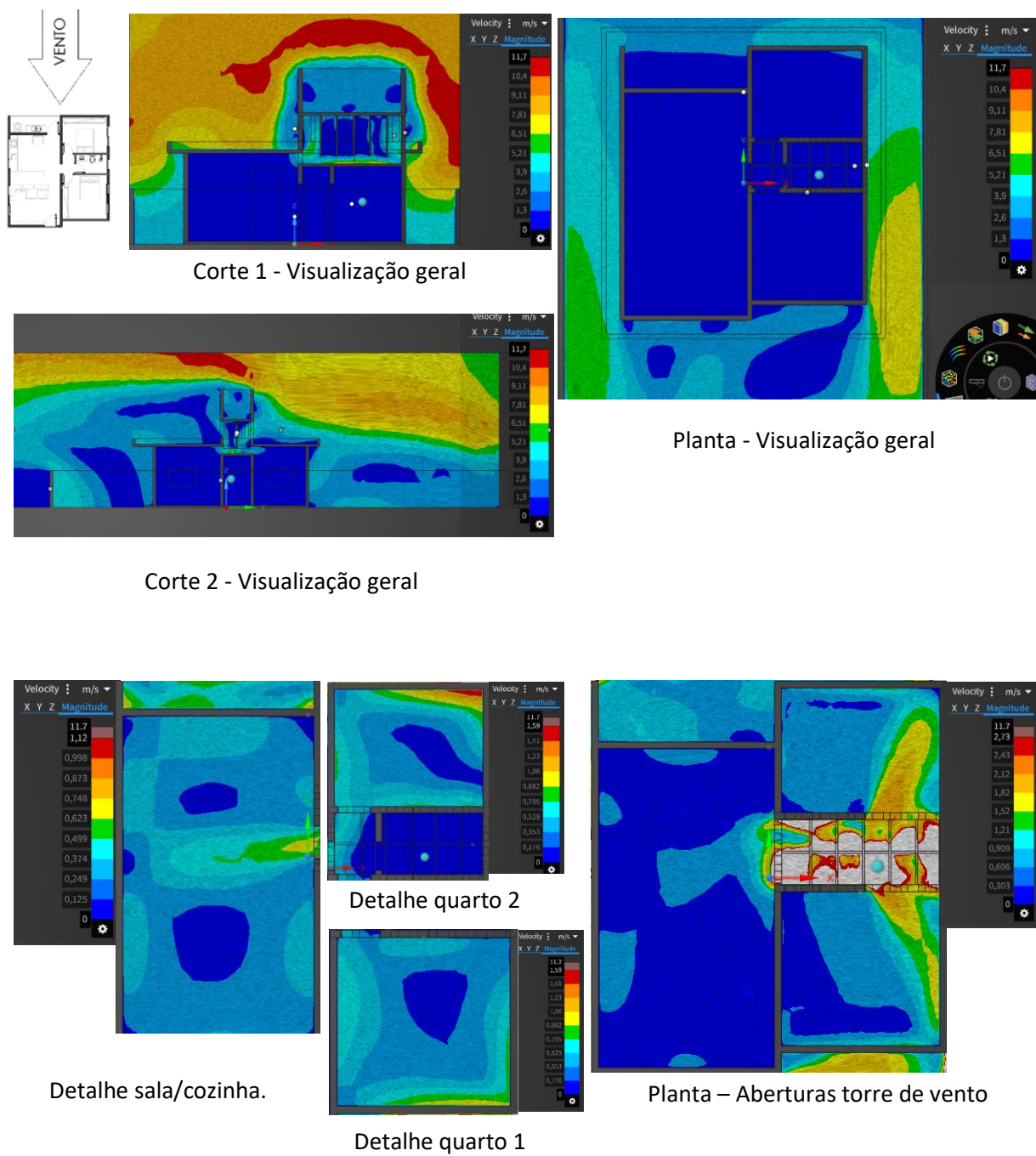
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 60 - Velocidade do vento de 2 m/s a 180° para modelo de torre de vento tetradirecional



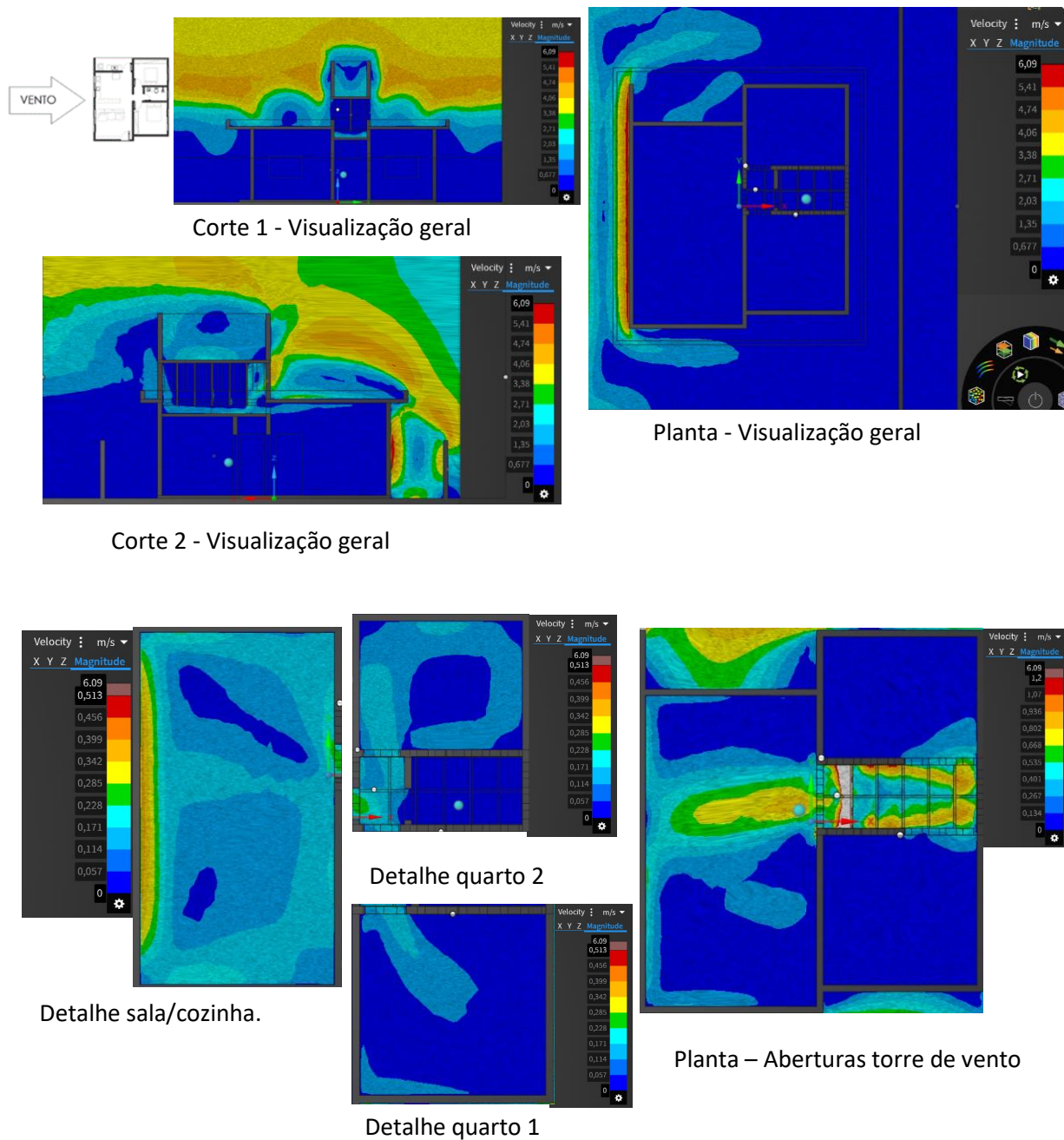
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 61 - Velocidade do vento de 5 m/s a 180° para modelo de torre de vento tetradirecional



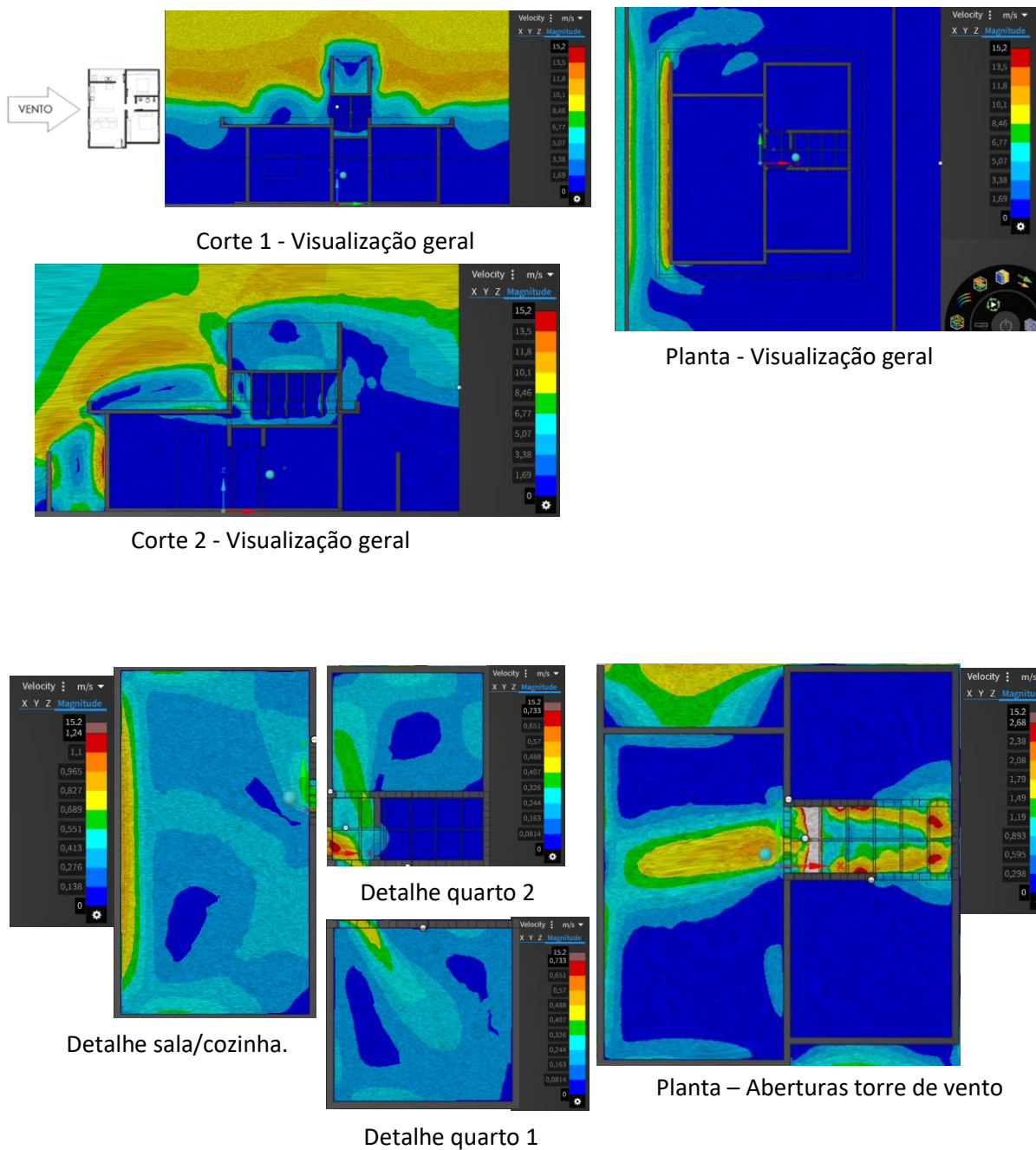
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 62 - Velocidade do vento de 2 m/s a 90° para modelo de torre de vento tetradirecional



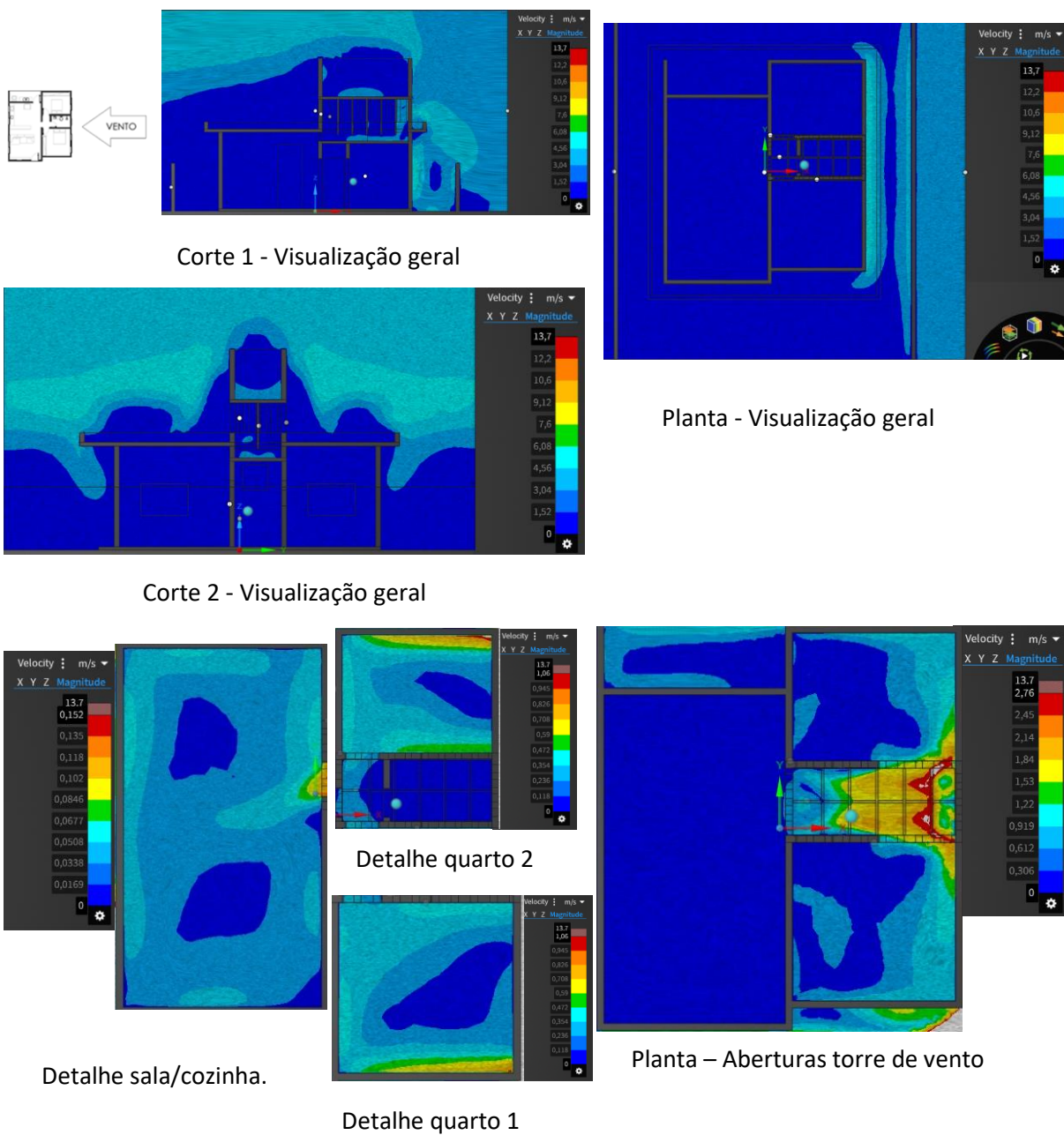
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 63 - Velocidade do vento de 5 m/s a 90° para modelo de torre de vento tetradirecional



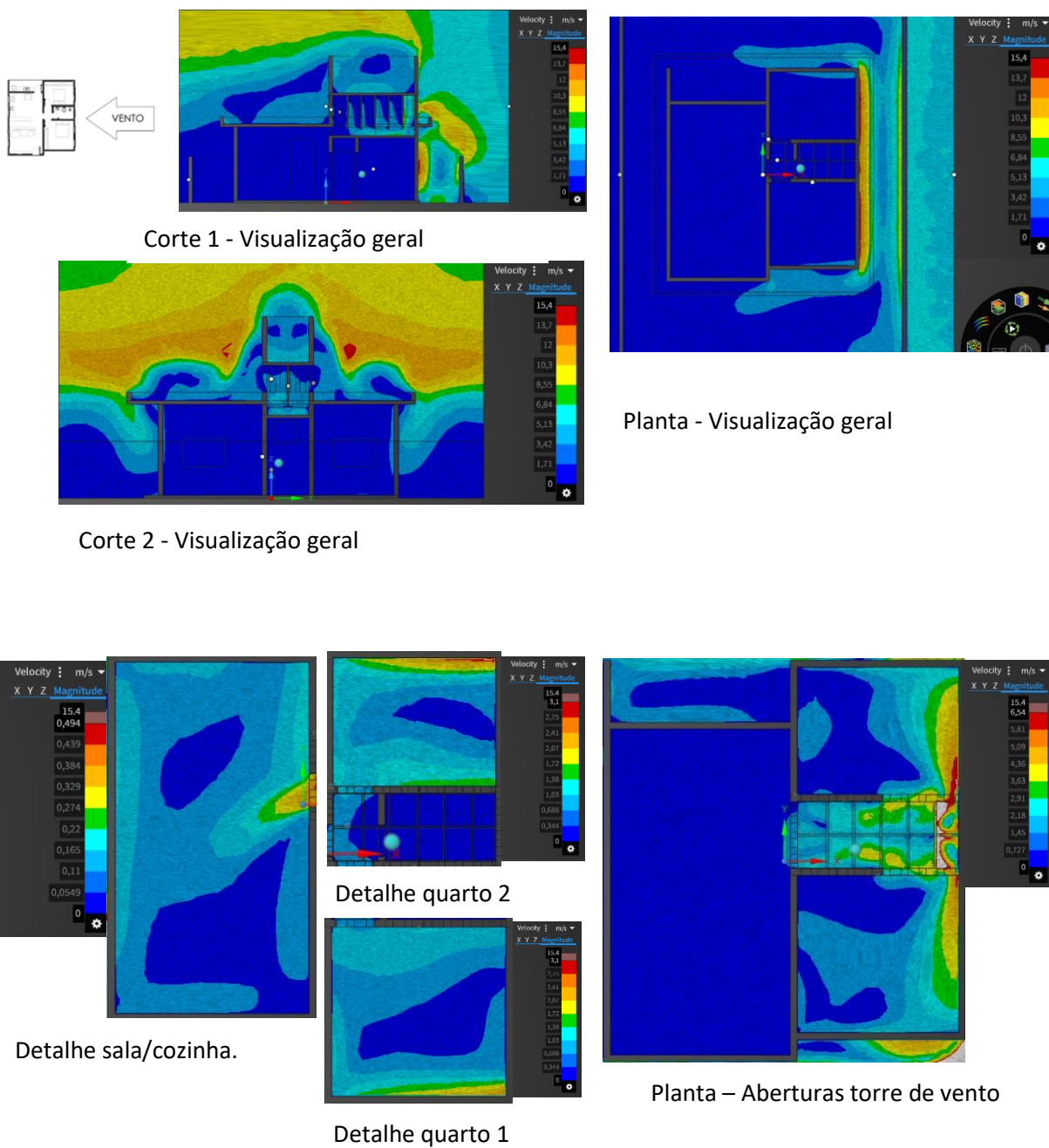
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 64 - Velocidade do vento de 2 m/s a 270° para modelo de torre de vento tetradirecional



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 65 - Velocidade do vento de 5 m/s a 270° para modelo de torre de vento tetradirecional



Fonte: Autoria própria (2025)

4.2.8 Resumo dos valores obtidos pela simulação

As tabelas 3, 4 e 5, fazem um resumo dos resultados obtidos pelas simulações com o software, colocando os valores de velocidade média nos diferentes ambientes da casa. Esses resultados são encontrados fazendo uma média dos valores para o plano com um metro de altura em relação ao piso.

Para as simulações da casa sem a torre de vento, é possível verificar que a velocidade interna média na sala ficou por volta de 1,0 m/s para o vento de 5m/s em todas as direções. Porém a velocidade nos quartos foi baixa, com pouca circulação de ar (tabela 3) (figura 66).

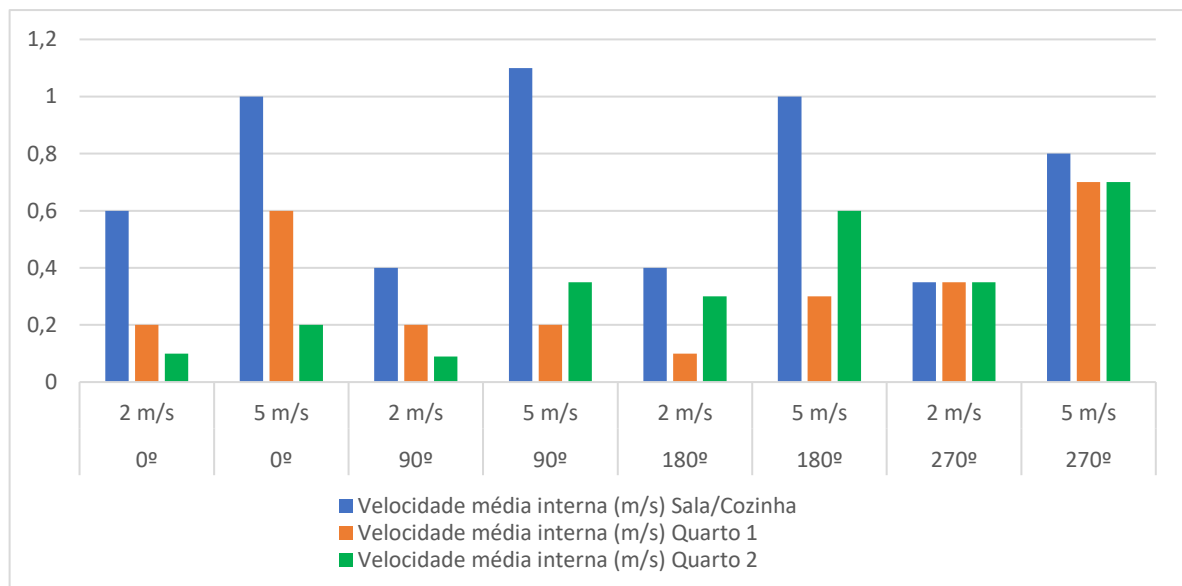
Tabela 3 - Resumo dos resultados modelo sem torre de vento

Modelo	Posição	Esquadrias	Velocidade externa (m/s)	Velocidade média interna (m/s)		
				Sala/Cozinha	Quarto 1	Quarto 2
Sem torre	0°	A	2	0,6	0,2	0,1
Sem torre	0°	A	5	1,0	0,6	0,2
Sem torre	90°	A	2	0,4	0,2	0,09
Sem torre	90°	A	5	1,1	0,2	0,35
Sem torre	180°	A	2	0,4	0,1	0,3
Sem torre	180°	A	5	1,0	0,3	0,6
Sem torre	270°	A	2	0,35	0,35	0,35
Sem torre	270°	A	5	0,8	0,7	0,7

*A: Abertas; F: Fechadas

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 66 – Velocidade para modelo sem torre de vento



Fonte: Autoria própria (2025)

Para os modelos com torre de vento (portas e janelas abertas) os resultados obtidos foram significativos em relação ao modelo sem torre de vento. Como exemplo, a torre unidirecional na direção 0° com velocidade de 5,0 m/s, os valores na cozinha duplicaram, enquanto nos quartos aumentou consideravelmente. Tudo isso devido ao direcionamento, em todos os modelos, do vento dentro da torre, onde metade do ar captado foi para os quartos enquanto a outra metade foi para a cozinha/sala. Em todos os casos, a velocidade dentro dos quartos aumentou (tabela 4) (Figuras 67 e 68).

Tabela 4 - Resumo modelos com esquadrias abertas

Modelo	Posição	Esquadrias	Velocidade externa (m/s)	Velocidade média interna (m/s)		
				Sala/Cozinha	Quarto 1	Quarto 2
Unidirecional	0°	A	2	0,8	0,9	0,7
Unidirecional	0°	A	5	2,0	2,3	2,0
Unidirecional	180°	A	2	0,6	0,3	0,5
Unidirecional	180°	A	5	1,4	0,6	1,0
Bidirecional	0°	A	2	0,5	0,8	0,7
Bidirecional	0°	A	5	1,1	2,0	1,9
Bidirecional	180°	A	2	0,5	0,5	0,45
Bidirecional	180°	A	5	0,9	1,0	0,9
Tetradirecional	0°	A	2	0,5	1,0	0,8
Tetradirecional	0°	A	5	1,0	2,5	2,1
Tetradirecional	90°	A	2	0,4	0,2	0,3
Tetradirecional	90°	A	5	0,7	0,4	0,5
Tetradirecional	180°	A	2	0,5	0,4	0,4
Tetradirecional	180°	A	5	1,0	1,1	1,1
Tetradirecional	270°	A	2	0,4	0,4	0,3
Tetradirecional	270°	A	5	0,7	0,6	0,7

*A: Abertas; F: Fechadas

Figura 67 - Velocidade média para modelos com esquadrias abertas

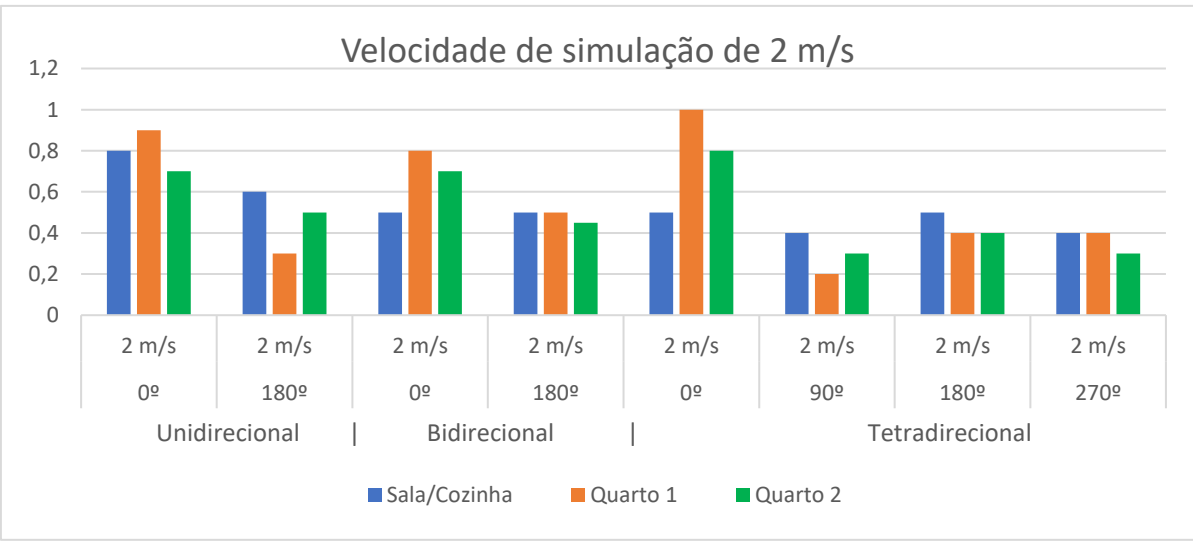
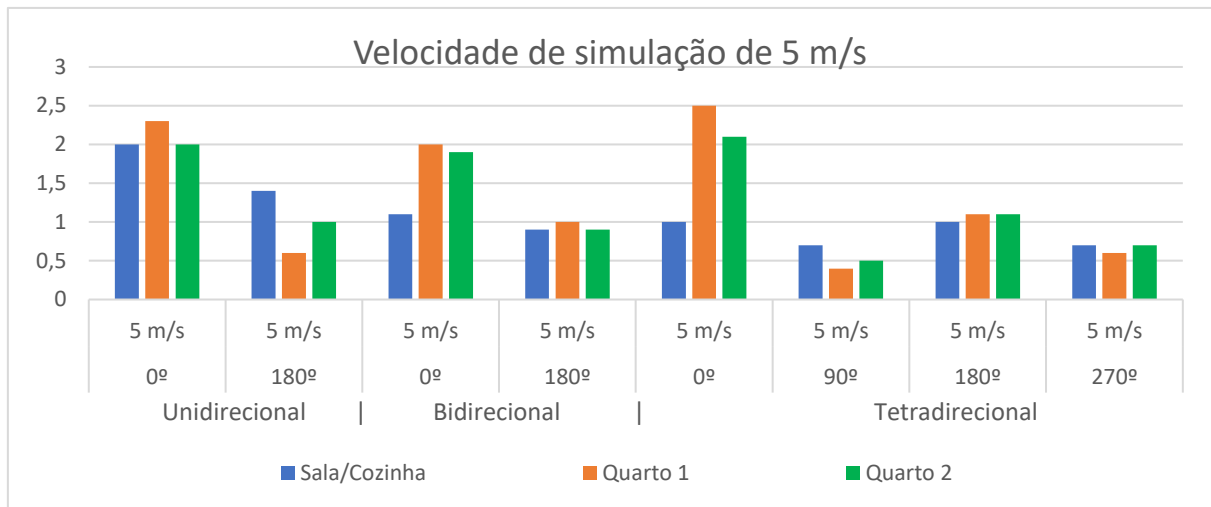


Figura 68 - Velocidade média para modelos com esquadrias abertas



Fonte: Autoria própria (2025)

Para os modelos com torre de vento (portas e janelas fechadas) os resultados de velocidade média representados na tabela 5, não foram muito satisfatórios para a altura de um metro, ficando abaixo do recomendado por Boutet, entre 0,5 m/s e 2,0 m/s, porém, há locais dentro dos ambientes que é alcançada essa métrica. Apesar das circunstâncias, houve circulação interna do ar, bem como a troca contínua por ar fresco dentro da residência, mostrando que o sistema é eficaz nesse contexto (Tabela 5) (Figuras 69 e 70).

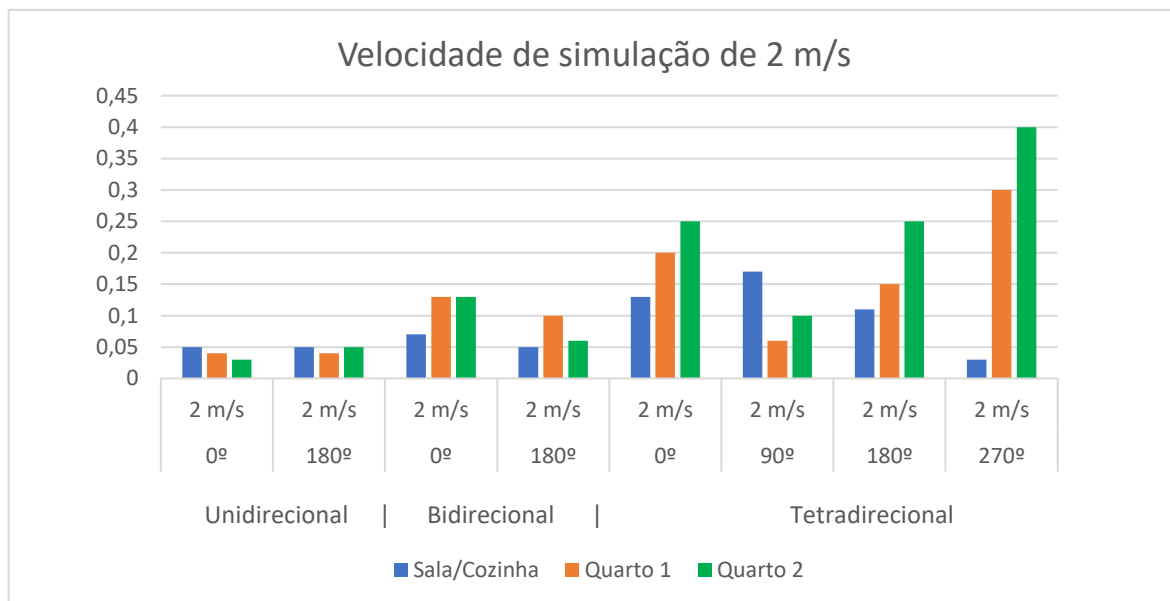
Tabela 5 - Resumo modelos com esquadrias fechadas

Modelo	Posição	Esquadrias	Velocidade externa (m/s)	Velocidade média interna (m/s)		
				Sala/Cozinha	Quarto 1	Quarto 2
Unidirecional	0°	F	2	0,05	0,04	0,03
Unidirecional	0°	F	5	0,12	0,08	0,07
Unidirecional	180°	F	2	0,05	0,04	0,05
Unidirecional	180°	F	5	0,12	0,1	0,1
Bidirecional	0°	F	2	0,07	0,13	0,13
Bidirecional	0°	F	5	0,18	0,3	0,35
Bidirecional	180°	F	2	0,05	0,1	0,06
Bidirecional	180°	F	5	0,15	0,2	0,25
Tetradirecional	0°	F	2	0,13	0,2	0,25
Tetradirecional	0°	F	5	0,35	0,6	0,5
Tetradirecional	90°	F	2	0,17	0,06	0,1
Tetradirecional	90°	F	5	0,35	0,18	0,2
Tetradirecional	180°	F	2	0,11	0,15	0,25
Tetradirecional	180°	F	5	0,3	0,4	0,4
Tetradirecional	270°	F	2	0,03	0,3	0,4
Tetradirecional	270°	F	5	0,1	0,7	0,8

*A: Abertas; F: Fechadas

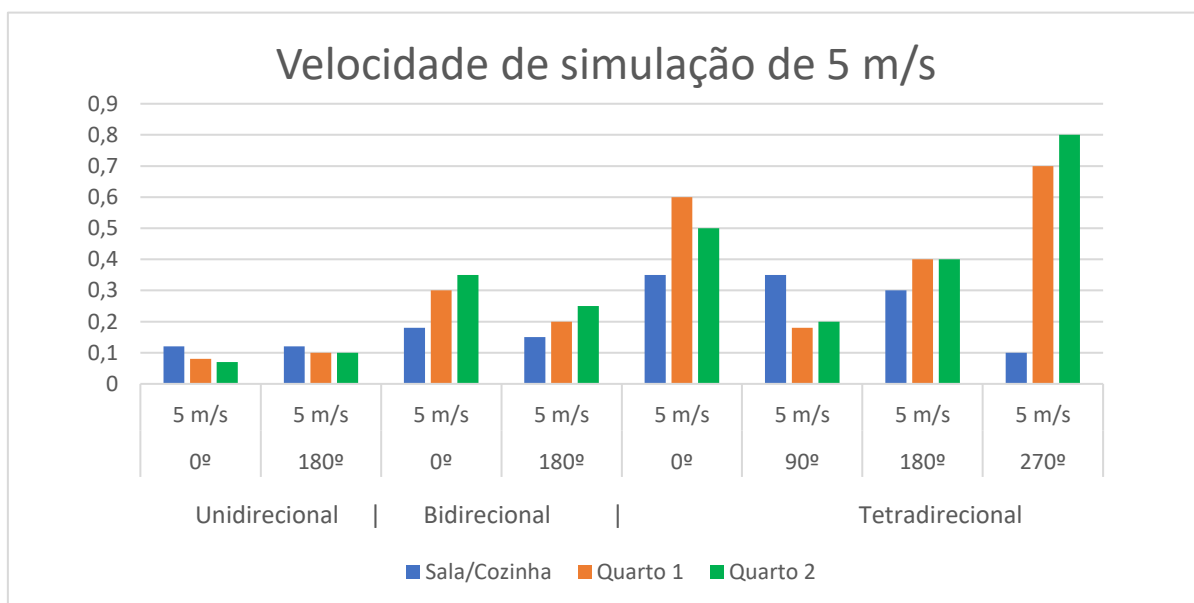
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 69 - Velocidade média para modelos com esquadrias fechadas



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 70 - Velocidade média para modelos com esquadrias fechadas



Fonte: Autoria própria (2025)

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

Após análise dos resultados obtidos através das simulações no *software* Ansys Fluent, pode-se concluir que a eficiência do sistema está relacionada ao número de aberturas de entrada de ar, às dimensões dessas aberturas, quanto maior a área de entrada, maior será a captação de ar e a distância entre divisórias internas da torre.

Para o modelo da casa com portas e janelas abertas na direção 0° na altura de 1,00m, a torre tetradirecional apresentou um fluxo maior e mais uniforme de vento nos quartos, porém ficou com distribuição menor de ar na sala comparado com as outras torres. Os perfis de distribuição da torre unidirecional e bidirecional se mostraram semelhantes, com velocidades próximas em todos os ambientes.

Para o modelo da casa com portas e janelas abertas na direção 180° na altura de 1,00m, a torre bidirecional apresentou uma melhor distribuição do fluxo de ar nos ambientes, porém a torre tetradirecional obteve os maiores valores de velocidade do ar interna.

Para as direções 90° e 270° , a torre tetradirecional se mostrou melhor, pois possui aberturas nessas direções.

Nos casos em que as esquadrias da casa estão fechadas, a torre de vento proporcionou circulação de ar interno, apesar da velocidade ser inferior quando as esquadrias estão abertas. Para esse caso, a torre tetradirecional apresentou melhores resultados, com velocidades do ar mais alta nos ambientes.

Comparando os três modelos de torre de vento quanto a velocidade do ar interno, conclui-se que a torre tetradirecional é mais eficiente por apresentar maiores valores de velocidade, em todas as posições de vento incidente. Também se mostrou mais interessante por captar o vento em todas as direções, o que não é possível nos outros modelos.

A aplicação prática dos captores de vento deverá considerar outros aspectos não tratados neste estudo, tais como a incidência de chuvas e poeira, variação de temperatura, bem como a redução no fluxo do ar proporcionada por diferentes elementos de fechamento das aberturas da torre (janelas, grades, telas, cobogós, etc.).

5.1 SUGESTÃO DE PESQUISAS FUTURAS

Refazer os ensaios e as simulações considerando as torres inseridas em meio urbano (edificações ao redor)

Aumentar o número de divisórias e verificar a influência na ventilação interna da edificação.

Fazer um orçamento para verificar o custo a mais que a torre terá na construção, para viabilizar o modelo.

Aumentar a altura da torre, aumentando assim a área de captação e verificar a influência na circulação do ar.

Fazer simulações para verificar a influência que o vento captado pela torre de vento fará com a temperatura interna da residência.

Fazer simulação para outro modelo de residência.

Fazer simulações com o software completo, aumentando o refinamento e diminuindo o tamanho da malha.

REFERÊNCIAS

ABDEL, Hana. **Jalal-abad Villa / Hajm.e.Sabz**. [S. l.], 1 maio 2021. Disponível em: <https://www.archdaily.com/960898/jalal-abad-villa-haj-sabz>. Acesso em: 10 abr. 2024.

AHMADKHANI, B.; MALEKI, B. A. Wind catcher: passive and low energy cooling system in iranian vernacular architecture. **IJTPE Journal**, [s. l.], v. 8, p. 130–137, 2011.

ANDRADE, N., **Estudo da Ventilação Natural em Edificações com Captadores de Vento Multidirecionais por Meio de Ensaios em Túnel de Vento e Simulações Computacionais**. 2013, 285 f. Tese (doutorado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, CAMPINAS 2013.

ANDRADE, N.; LABAKI, L.; CARAM, R.; GRECO-JUNIOR, P. Influência do número de divisórias dos captadores de vento na ventilação natural de edificações. **XV ENTAC**. [s. l.], 11 nov. 2014.

ARYAN A.; EHSAN Z.; AMIN S.; MASOUD K., Wind Catchers: Remarkable Example of Iranian Sustainable Architecture. **Journal of Sustainable Development**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 89-97, 19 maio 2010.

BELLINI, Priscila. **Oriente Médio: um destino exótico (e excelente) para o seu intercâmbio**. [S. l.], 15 jun. 2016. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/Carreira/noticia/2016/07/oriente-medio-um-destino-exotico-e-excelente-para-o-seu-intercambio.html>. Acesso em: 13 abr. 2024.

BITTENCOURT, L.S.; LOBO, D.G.F. A influência da localização das aberturas na ventilação natural de edificações escolares. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 2003, Fortaleza. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2003.

BOJEK, Piotr. **Renewables**: The global power mix will be transformed by 2028. [S. l.]: International Energy Agency: IEA, 11 jul. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/renewables>. Acesso em: 25 mar. 2024.

BOUTET, T.S. Controlling air movement: a manual for architects and builders. New York: MacGraw-Hill, 1991.

CONSTRUÍDO, A.; ALEGRE, P. A influência dos captadores de vento na ventilação natural de habitações populares localizadas em climas quentes e úmidos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.3 2, p. 57–67, 2003.

DELMASTRO, Chiara. **Space Cooling**. [S. l.]: International Energy Agency: IEA, 12 jul. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/space-cooling>. Acesso em: 15 mar. 2024.

ELBOROMBALY, H.; PRIETO L. Adaptation of Vernacular Designs for Contemporary Sustainable Architecture in Middle East and Neotropical region. **Asian Journal of Computer Science And Information Technology**, [s.l: s.n.], 2015. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/281282008>>.

FANGER, O. **Thermal Comfort - Analysis and Application in Environmental Engineering**. Copenhagen, 1970.

FERNANDES, J.; MATEUS, R. Arquitetura vernacular : uma lição de sustentabilidade. [s.l.], 205-216, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/268221925>.

FINOTTI, Leonardo. **Hospital Sarah, Río de Janeiro**. [S. l.], 27 jan. 2008. Disponível em: <https://arquitecturaviva.com/obras/hospital-sarah-rio-de-janeiro>. Acesso em: 21 abr. 2024.

FOROOZESH, J. et al. CFD modeling of the building integrated with a novel design of a one-sided wind-catcher with water spray: Focus on thermal comfort. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 53, 1 out. 2022.

GHOULEM M.; EL MOUEDDEB K.; NEHDI E.; ZHONG F.; CALAUTIT J., Analysis of passive downdraught evaporative cooling windcatcher for greenhouses in hot climatic conditions: Parametric study and impact of neighbouring structures. **Biosystems Engineering**, [s.l.], v. 197, p. 105–121, 1 set. 2020.

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. *Portal.inmet.gov.br*, 9 Jan. 2024, <portal.inmet.gov.br/noticias/ano-de-2023-%C3%A9-o-mais-quente-da-hist%C3%B3ria-do-brasil>.

LIU M.; NEJAT P.; CAO P.; JIMENEZ-BESCOS C.; CALAUTIT J. A critical review of windcatcher ventilation: Micro-environment, techno-economics, and commercialisation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], 2023.

LUKIANCHUKI M.; SHIMOMURA A.; SILVA F.; CARAM R. Sheds extratores e captadores de ar: influência da geometria e da dimensão das aberturas no desempenho da ventilação natural nas edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 83–104, jan. 2016.

LUKIANCHUKI, M. A.; CARAM, R. M. Análise do conforto térmico na obra de João Filgueiras Lima, Lelé: hospitais SARAH de Salvador e do Rio De Janeiro. Paranoá, Brasília, no 12, 2014.

MAHMOUDI, M., 2007. Wind Catcher: The Symbol of Iranian Architecture. Yazda Publications, Tehran.

MARTINS, T.A.L.; BASTOS, L.E.G.; BARROSO-KRAUSE, C.; BITTENCOURT, L.S.; PASSOS, I. O uso de torres de vento em edificações residenciais geminadas de meia morada. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2009, Natal. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2009.

MOSTAFAEIPOUR A.; BARDEL B.; MOHAMMADI K.; SEDAGHAT A.; DINPASHOH Y. Economic evaluation for cooling and ventilation of medicine storage warehouses utilizing wind catchers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 38, p. 12-19, 2013.

Organização Meteorológica Mundial (OMM), **State of the Global Climate 2023**. Geneva, 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/1347_Statement_2023_en.pdf#page=1&zom=auto,-40,848>. Acesso em: mar 2024.

PIRHAYATI M.; AINECHI S.; TORKJAZI M.; ASHRAFI E. Ancient Iran, the Origin Land of Wind Catcher in the World. **Research Journal of Environmental and Earth Sciences**, v. 5, n. 8, p. 433–439, 20 ago. 2013.

RIVERO, R. Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural. Tradução de José Miguel Aroztegui. Porto Alegre: D. C. Luzzatto, 1985.

ROAF S. The traditional technology trap: Stereotypes of Middle Eastern traditional building types and technologies. **Trialog**, [s.l.], v. 25, p. 26-33. 1990. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/281582453>>.

ROAF, S. Air-conditioning avoidance: lessons from the windcatchers of Iran. **Proc. Conf. "passive and Low Energy Cooling for the Built Environment"**, [s.l.], p. 1053-1057, 2005. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/237768160>>.

ROHLES, F.H. ; NEVINS, R.G. ; SPRINGER, W; FEYERHERM, A.M. **Temperature-Humidity chart for thermal comfort of seated persons**. In: ASHRAE Transactions, v. 72, part. I, 1966.

RUAS, A. C. **Avaliação de conforto térmico de conforto térmico, Contribuição à aplicação prática das normas internacionais**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, [s.n.], CAMPINAS 1999.

SILVA A.; CHRISTAKOU E.; SILVA L.; SILVA JÚNIOR F.; GURJAO C. Estudo de Torre de Vento: Ensaio em Túnel de Vento em Edificações Residenciais. **Cadernos de arquitetura e urbanismo**, n. 27, p. 37–58, 8 maio 2020.

STOUHI, Dima. **O que é uma torre de vento?**. [S. l.], 6 dez. 2021. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/971476/o-que-e-uma-torre-de-vento>. Acesso em: 21 mar. 2024.