

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Faculdade de Arquitetura e Urbanismo**  
**Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo**

**Dissertação**



**OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA POR MEIO DE GESTÃO E CONTROLE RACIONAL  
DE VENTILADORES DE TETO EM FUNÇÃO DE MÉTRICAS DE CONFORTO  
TÉRMICO.**

**Monica Wilges**

**Pelotas, 2024**



**Monica Wilges**

**OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA POR MEIO DE GESTÃO E CONTROLE RACIONAL DE VENTILADORES DE TETO EM FUNÇÃO DE MÉTRICAS DE CONFORTO TÉRMICO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Antonio César Silveira Baptista Silva  
Coorientador: Prof. Dr. Anderson Priebe Ferrugem

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação da Publicação

W664o Wilges, Monica

Otimização energética por meio de gestão e controle racional de ventiladores de teto em função de métricas de conforto térmico [recurso eletrônico] / Monica Wilges ; Antonio César Silveira Baptista Silva, Anderson Priebe Ferrugem, orientadores. — Pelotas, 2024.  
135 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Conforto térmico. 2. EnergyPlus. 3. Ventiladores de teto. 4. Velocidade do ar. I. Silva, Antonio César Silveira Baptista, orient. II. Ferrugem, Anderson Priebe, orient. III. Título.

CDD 720

Monica Wilges

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA POR MEIO DE GESTÃO E CONTROLE RACIONAL  
DE VENTILADORES DE TETO EM FUNÇÃO DE MÉTRICAS DE CONFORTO  
TÉRMICO.

Dissertação aprovada, como requisito à obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Data da defesa: 18/09/2024

Banca examinadora:

Prof. Dr. Prof. Antonio Cesar Silveira Baptista da Silva (Orientador)  
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Anderson Priebe Ferrugem (Coorientador)  
Doutor em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha  
Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Fernando Simon Westphal  
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Roberto Lamberts  
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de Leeds

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ, através do Programa MAI/DAI para o fortalecimento do empreendedorismo e da inovação tecnológica, em parceria empresarial.

## **Agradecimentos**

Quero expressar minha profunda gratidão por ter alcançado este momento crucial em minha jornada profissional, um marco que nunca imaginei atingir. Este trabalho representa muito mais do que simplesmente adquirir conhecimento e obter um título; para mim, ele simboliza uma verdadeira superação, uma jornada onde ultrapassei meus próprios limites. Este momento significativo não teria sido possível sem o apoio incondicional do meu noivo. Sua presença foi fundamental e sem ele, certamente, esta jornada não teria chegado ao seu desfecho.

Quero estender meu mais sincero agradecimento ao Gabriel Bessa, bolsista do curso de graduação em Ciências da Computação, cujo apoio incansável foi essencial para alcançar os melhores resultados possíveis neste trabalho. Agradeço por toda a colaboração e parceria que nos trouxeram até aqui.

Expresso minha gratidão ao meu orientador, cujo ensinamento compartilhado e paciência ao longo desta árdua jornada foram fundamentais para o meu crescimento. Agradeço também ao meu coorientador por sua assistência e valiosos ensinamentos ao longo do caminho.

Não posso deixar de mencionar meus amigos e familiares, cujo apoio inabalável foi uma fonte constante de encorajamento durante todo este processo. À minha sogra, em especial, agradeço por sua paciência e carinho, sempre pronta a ajudar nos momentos em que mais precisei. Agradecimento especial ao CNPQ pelo apoio financeiro, possibilitando a realização desta pesquisa.

## Resumo

O século XXI apresenta desafios críticos para a sustentabilidade global, destacando a relação entre a crescente demanda por energia elétrica e seus impactos ambientais, especialmente no setor de construção civil, que é responsável por uma parte significativa das emissões de gases de efeito estufa. O uso intensivo de condicionadores de ar, que consome cerca de 20% da eletricidade global em edifícios, agrava esse cenário, levando à necessidade de adotar estratégias para reduzir o consumo de energia e melhorar o conforto térmico. No Brasil, onde o clima quente e úmido predomina, utilizar a velocidade do ar é uma estratégia eficaz para manter o conforto e reduzir o consumo de energia dos sistemas de refrigeração. Por conta disso, o objetivo dessa pesquisa é verificar, através da simulação computacional, a influência da utilização da velocidade do ar com o uso de ventiladores de teto na economia de energia em uma edificação automatizada. Para isso, foi utilizado o *EnergyPlus* para a modelagem de edificação de ensino e utilizado uma API Python, possibilitando uma automação eficiente no uso da edificação real. O intuito do algoritmo proposto é utilizarmos ao máximo as condições passivas do prédio, sempre considerando o conforto dos usuários. Ou seja, a prioridade de funcionamento do sistema é utilizar, primeiramente, a ventilação natural; em seguida, acionar os ventiladores em caso de desconforto por calor; e, por último, ativar o ar-condicionado em conjunto com os ventiladores, ajustando o *setpoint* necessário para garantir o conforto térmico. Essa estratégia automatizada permite uma redução de aproximadamente 60% no consumo de energia elétrica para condicionamento, mantendo o conforto dos usuários durante o verão em uma edificação NZEB localizada em clima subtropical.

**Palavras-chave:** Conforto térmico; EnergyPlus; Ventiladores de teto; Velocidade do ar;

## **Abstract**

The 21st century presents critical challenges for global sustainability, highlighting the relationship between the growing demand for electrical energy and its environmental impacts, especially in the construction sector, which is responsible for a significant part of greenhouse gas emissions. The extensive use of air conditioners, which consume around 20% of global electricity in buildings, worsens this scenario, leading to the need to adopt strategies to reduce energy consumption and improve thermal comfort. In Brazil, where the hot and humid climate prevails, using air speed is an effective strategy to maintain comfort and reduce energy consumption in refrigeration systems. Therefore, the objective of this research is to verify, through computer simulation, the influence of using air speed with the use of ceiling fans on energy savings in an automated building. To achieve this, EnergyPlus was used to model the building and a Python API was used, enabling efficient task automation. The aim of the programming is to make maximum use of the passive conditions of the building, always considering the comfort of users. In other words, the operating priority is the use of natural ventilation, then the use of fans in case of discomfort due to heat and the next step, activating the air conditioning and determining the setpoint necessary for comfort. With the operation of this automation, you can observe a reduction of approximately 60% in electricity consumption for conditioning, in the summer period and always maintaining user comfort.

**Keywords:** Thermal comfort; Energy Plus; Ceiling fans; Air speed;

## Lista de Figuras

Figura 1 Aceitabilidade térmica relacionada a velocidade do ar .....	22
Figura 2 Incremento na temperatura de conforto para diferentes velocidades do ar. Fonte: Nicol (2004).....	23
Figura 3 Padrões diurnos de temperatura externa e interna de uma sala fechada dia e noite e uma sala ventilada a noite e fechada durante o dia. Fonte: Givoni (1991) .....	24
Figura 4 Velocidade do ar de acordo com o incremento de temperatura. Fonte: ISO 7730 (2005) .....	26
Figura 5 Faixas aceitáveis de temperatura operacional e velocidade média do ar para as zonas de conforto de 1,0 e 0,5 <i>clo</i> . Fonte: ASHRAE 55 (2017)	30
Figura 6 Temperatura operativa aceitável para intervalos de espaços naturalmente condicionados. Fonte: ASHRAE 55 (2017) .....	31
Figura 7 Velocidade do ar necessária para compensar o aumento da temperatura	32
Figura 8 Consumo de energia elétrica total dos usuários e da automação. Fonte: Hax <i>et al.</i> (2022) .....	38
Figura 9 Uso da ventilação natural para manutenção do conforto. Fonte: Hax <i>et al.</i> (2022) .....	38
Figura 10 Comparação dos resultados da avaliação energética legislativa no Reino Unido. EPC: energy performance certificate - certificado de desempenho energético (testes de conformidade). DEC: display energy certificate - exibição do certificado energético (exibição pública). Fonte: DE WILD, 2014.....	40

Figura 11 Diagramas esquemáticos das zonas de fluxo de ar geradas por um ventilador de teto com sopro para baixo (a) e sopro para cima (b). Fonte: Omrani <i>et al.</i> (2021).....	46
Figura 12 Fluxo de ar gerado pelo ventilador de teto. Fonte: Babich <i>et al.</i> (2017)..	47
Figura 13 Taxa de fluxo volumétrico. Fonte: Adeeb <i>et al.</i> (2015) .....	48
Figura 14 Eficiência energética. Fonte: Adeeb <i>et al.</i> (2015) .....	48
Figura 15 Fluxograma geral da pesquisa. Fonte: Autora (2024).....	49
Figura 16 Implantação. Fonte: autora sobre imagem do Google Maps (2024) .....	52
Figura 17 Fachada do projeto. Fonte: Proplan UFPel (2024) .....	52
Figura 18 Estudo da distribuição de ventiladores de teto. Fonte: <a href="https://centerforthebuiltenvironment.github.io/fan-tool/">https://centerforthebuiltenvironment.github.io/fan-tool/</a> acesso em 02/03/2023.....	54
Figura 19 Planta baixa do pavimento térreo. Fonte: Autora (2023) .....	57
Figura 20 Planta baixa do segundo pavimento. Fonte: Autora (2023) .....	58
Figura 21 Planta baixa do terceiro pavimento. Fonte: Autora (2023).....	59
Figura 22 Corte longitudinal do prédio. Fonte: Autora (2023) .....	59
Figura 23 Modelagem do prédio no plugin Euclid. Fonte: Autora (2024) .....	60
Figura 24 – Composição dos materiais empregados na edificação.....	61
Figura 25 – Isolamento representativo do vestuário em função da temperatura do ar externo às 06h00. Fonte: ASHRAE (2017) .....	67
Figura 26 – Funcionamento do <i>clo</i> dinâmico em relação a temperatura externa para o inverno. Fonte: autora (2024).....	68
Figura 27 – Gráfico da relação velocidade e temperatura operativa, segundo a ASHRAE (2020). Fonte: autora (2024) .....	76
Figura 28 – Gráfico da relação temperatura operativa e velocidade do ar, segundo a ASHRAE (2020). Fonte: autora (2024) .....	77
Figura 29 – Fluxograma Caso Base. Fonte: autora (2024).....	79
Figura 30 – Fluxograma Caso 01. Fonte: autora (2024).....	82
Figura 31 – Fluxograma da sub-rotina – Cálculo da velocidade do ventilador pelo Conforto Adaptativo Fonte: autora (2024) .....	83
Figura 32 – Fluxograma da sub-rotina – Cálculo velocidade do ventilador pelo PMV. Fonte: autora (2024) .....	84
Figura 33 – Fluxograma da sub-rotina – Cálculo velocidade do ventilador pelo PMV sem ar-condicionado Fonte: autora (2024) .....	85

Figura 34 – Fluxograma da sub-rotina – Cálculo Temperatura Ideal com PMV. Fonte: autora (2024) .....	86
Figura 35 – Fluxograma da simulação Caso 02. Fonte: autora (2024) .....	87
Figura 36 – Fluxograma da simulação Caso 03. Fonte: autora (2024) .....	89
Figura 37 – Interface aplicativo. Fonte: autora (2024) .....	90
Figura 38 – Simulação caso Base com PMV 0,5 ano completo. Fonte: autora (2024) .....	92
Figura 39 – Simulação Caso Base com PMV 0,5 no período do inverno. Fonte: autora (2024) .....	95
Figura 40 – <i>Clo</i> dinâmico no período de inverno. Fonte: autora (2024) .....	95
Figura 41 – Simulação caso Base com PMV 0,5 nos dias de inverno. Fonte: autora (2024) .....	96
Figura 42 – Simulação Caso Base com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024) .....	97
Figura 43 – Acionamento Ar-Condicionado Caso Base com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024).....	97
Figura 44 – Simulação caso Base com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024) .....	98
Figura 45 – Simulação Caso 01 com PMV 0,5 ano completo. Fonte: autora (2024)	98
Figura 46 – Simulação Caso 01 com PMV 0,5 no período de inverno. Fonte: autora (2024) .....	101
Figura 47 – Simulação Caso 01 com PMV 0,5 nos dias de inverno. Fonte: autora (2024) .....	101
Figura 48 – Simulação Caso 01 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024) .....	103
Figura 49 – Ventiladores de teto Caso 01 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024) .....	104
Figura 50 – Acionamento Ar-Condicionado Caso 01 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024).....	104
Figura 51 – Simulação Caso 01 com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024) .....	105
Figura 52 – Ventiladores de teto da simulação Caso 01 com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024).....	105

Figura 53 – Simulação Caso 02 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024) .....	107
Figura 54 – Ventiladores de teto na simulação Caso 02 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024) .....	108
Figura 55 – Acionamento do Ar-condicionado na simulação Caso 02 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024) .....	108
Figura 56 – Simulação Caso 02 com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024) .....	108
Figura 57 – Ventiladores de teto na simulação Caso 02 com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024) .....	109
Figura 58 – Simulação Caso 03 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024) .....	111
Figura 59 – Simulação Caso 03 com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024) .....	111
Figura 60 – Acionamento do ar-condicionado do Caso 03 com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024) .....	112
Figura 61 – Gráfico de resumos de energia para cada simulação no período do verão. Fonte: autora (2024) .....	114

## Lista de Tabelas

Tabela 1 Valores mínimos de velocidade do ar atingindo 90% de aceitabilidade térmica .....	23
Tabela 2 Limites de velocidade do ar e suas reações .....	23
Tabela 3 Escala PMV .....	26
Tabela 4 Temperatura operativa de acordo com a categoria A, B e C.....	27
Tabela 5 Aumentos do limite de temperatura operativa aceitável em Condicionamento Natural Controlado por Ocupante .....	31
Tabela 6 Exemplos de valores de projetos recomendados da temperatura operativa interior dos edifícios e sistemas de HVAC.....	32
Tabela 7 Limites de velocidade do ar consideradas aceitáveis pela literatura .....	34
Tabela 8 Relação dos ventiladores de teto mais eficiente .....	55
Tabela 9 Cálculo da velocidade média das células .....	56
Tabela 10: Características dos materiais utilizados na simulação .....	60
Tabela 11: Características dos materiais utilizados na simulação .....	61
Tabela 12: Características da simulação base .....	62
Tabela 13: Características da simulação da pesquisa .....	63
Tabela 14: Quantidade de pessoas por sala .....	64
Tabela 15: Iluminação .....	64
Tabela 16: Valores de referência para o solo .....	66
Tabela 17: Valores de referência para o trocador de calor .....	71
Tabela 18: Ar-condicionados estabelecidos para o prédio e as devidas vazões.....	72
Tabela 19: Dias típicos de projeto inverno e verão .....	73
Tabela 20: Vazões calculadas para os ambientes do Anexo FAUrb.....	74
Tabela 21: Valores de referência para a infiltração.....	75

Tabela 22: Resultados da simulação do Caso base com PMV 0,5 para o ano inteiro .....	92
Tabela 23: Resultados consumo para todo o ano da simulação do Caso base .....	93
Tabela 24: Resultados consumo para o período de verão da simulação do Caso base.....	94
Tabela 25: Resultados simulação Caso 01 com PMV 0,5 para o ano inteiro.....	99
Tabela 26: Consumo detalhado da simulação Caso 01 com PMV 0,5 para o ano inteiro.....	99
Tabela 27: Consumo para o período de verão da simulação do Caso 01 .....	102
Tabela 28: Resultados simulação Caso 02 com PMV 0,5 para o ano inteiro.....	106
Tabela 29: Consumo detalhado da simulação Caso 02 com PMV 0,5 para o ano inteiro.....	106
Tabela 30: Resultados consumo para o período de verão da simulação do Caso 02 .....	107
Tabela 31: Resultados simulação Caso 03 com PMV 0,5 para o ano inteiro.....	110
Tabela 32: Consumo detalhado da simulação Caso 03 com PMV 0,5 para o ano inteiro.....	110
Tabela 33: Resultados consumo para o período de verão da simulação do Caso 03 .....	110
Tabela 34: Resultados consumo para o período de verão das simulações .....	112
Tabela 35: Resultados simulação Caso base com PMV 0,2 .....	128
Tabela 36: resultados simulação Caso Base com PMV 0,7 .....	128
Tabela 37: Resultados simulação Caso base com PMV 1,0 .....	129
Tabela 38: Resultados simulação Caso 01 com PMV 0,2 .....	129
Tabela 39: Resultados simulação Caso 02 com PMV 0,7 .....	129
Tabela 40: Resultados simulação Caso 02 com PMV 1,0 .....	130
Tabela 41: Resultados simulação Caso 02 com PMV 0,2 .....	130
Tabela 42: Resultados simulação Caso 02 com PMV 0,7 .....	130
Tabela 43: Resultados simulação Caso 02 com PMV 1,0 .....	130
Tabela 44: Resultados simulação Caso 03 com PMV 0,2 .....	131
Tabela 45: Resultados simulação Caso 03 com PMV 0,7 .....	131
Tabela 46: Resultados simulação Caso 03 com PMV 1,0 .....	132
Tabela 47: Compilado energia e desconforto para o ano todo com PMV 0,2 .....	132
Tabela 48: Compilado energia e desconforto para o ano todo com PMV 0,7 .....	132

Tabela 49: Compilado energia e desconforto para o ano todo com PMV 1,0 ..... 133

## Lista de Siglas e Abreviaturas

clo	Clothing
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COP	Coeficiente de Performance
EMS	Energy Management System
EPE	Empresa de Energia Elétrica
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
IA	Inteligência Artificial
IN-C	Instrução Normativa Inmetro para edificações comerciais, de serviços e públicas
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
met	Taxa metabólica
NBR	Norma Brasileira
NZEB	Near Zero Energy Building
PMV	Voto Médio Previsto
PPD	Porcentagem Prevista de Insatisfeitos
RPM	Rotação por Minuto
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações. Comerciais, de Serviços e Públicas
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.
UFPEL	Universidade Federal de Pelotas

## Sumário

1	Introdução .....	13
1.1	Apresentação do tema .....	13
1.2	Justificativa do tema .....	16
1.3	Objetivos .....	18
1.3.1	<b>Objetivo geral</b> .....	18
1.3.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	18
2	Revisão da literatura.....	19
2.1	O uso do EnergyPlus para simulação computacional.....	19
2.2	Uso da velocidade do ar: conforto térmico a partir de estudos e normativas ....	21
2.2.1	<b>ASHRAE 55, EN 15.251 e NBR 16.401: conforto térmico e qualidade do ar interior em destaque</b> .....	28
2.3	Definição das condições de conforto .....	34
2.4	Influência do comportamento do usuário no consumo de energia .....	37
2.5	Automação, edifícios inteligentes e consumo de energia: conceitos e impactos .....	40
2.5.1	<b>Qualidade do ar interno</b> .....	42
2.6	Ventiladores de teto .....	45
3	Método .....	48
3.1	Etapas da pesquisa .....	49
3.2	Definição das condições de conforto e velocidades do ar .....	50
3.3	Definição do caso base .....	51
3.4	Ventiladores de teto: Dimensionamento .....	53
3.5	Modelagem no EnergyPlus .....	60
3.5.1	<b>Padrão de ocupação, equipamentos e iluminação artificial</b> .....	63
3.5.2	<b>Configuração da temperatura do solo - GroundDomain:Slab</b> .....	65
3.5.3	<b>Uso da velocidade do ar no EnergyPlus</b> .....	66
3.5.4	<b>Campo <i>people</i></b> .....	66
3.5.5	<b>Campo <i>ElectricEquipment</i></b> .....	69

<b>3.5.6</b>	<b>Modelagem do trocador de calor</b>	<b>70</b>
<b>3.5.7</b>	<b>Modelagem do sistema de condicionamento artificial</b>	<b>71</b>
<b>3.5.8</b>	<b>Configuração da ventilação natural</b>	<b>74</b>
<b>3.5.9</b>	<b>Configuração do incremento da temperatura operativa segundo o conforto adaptativo da ASHRAE (2020)</b>	<b>75</b>
<b>3.5.10</b>	<b>Configuração da programação em Python</b>	<b>77</b>
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>90</b>
<b>4.1</b>	<b>Caso base</b>	<b>92</b>
<b>4.2</b>	<b>Simulação Caso 01</b>	<b>98</b>
<b>4.3</b>	<b>Simulação Caso 02 – Janela Fechada</b>	<b>106</b>
<b>4.4</b>	<b>Simulação Caso 03 - Sem ventilador</b>	<b>109</b>
<b>5</b>	<b>Compilado de consumo das simulações para o verão</b>	<b>112</b>
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>115</b>
<b>7</b>	<b>Limitações da pesquisa</b>	<b>118</b>
<b>8</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b>	<b>119</b>
<b>9</b>	<b>Referências</b>	<b>120</b>



# 1 Introdução

## 1.1 Apresentação do tema

O século XXI testemunha desafios cruciais para a sustentabilidade global, destacando-se a preocupante relação entre a crescente demanda por energia elétrica e seus efeitos adversos sobre o meio ambiente. A presente proposta de pesquisa emerge desse cenário crítico, impulsionada pela necessidade de repensar a utilização da energia elétrica, sobretudo no setor da construção civil, um dos principais protagonistas das emissões de gases de efeito estufa.

O impacto ambiental decorrente do aquecimento global é inegável, com projeções alarmantes emitidas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), espera-se que a magnitude da temperatura média global da superfície aumente na faixa de 0,3 °C a 4,8 °C até o final do século 21 em relação ao período 1986-2005, destacando assim a urgência de intervenções eficazes para mitigar as emissões de gases de efeito estufa.

É notório que o setor de construção desempenha um papel significativo nesse panorama, responsável por quase um terço das emissões globais de gases de efeito estufa, além de um consumo de até 40% da energia total em alguns países desenvolvidos (BERARDI, 2017).

Um dos fatores exacerbadores desse cenário é o uso intensivo de condicionadores de ar, que, de acordo com a Agência Internacional de Energia (2018), consome quase 20% da eletricidade total em edifícios em todo o mundo. A crescente demanda por resfriamento de ambientes não apenas exerce pressão nos sistemas de eletricidade, mas também contribui para o aumento das emissões de CO<sub>2</sub>, com

estimativas indicando um triplo aumento no uso de condicionadores até 2050 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019).

Esses desafios destacam a necessidade de adotar estratégias inovadoras e sustentáveis na gestão de energia. Conforme os relatórios da EPE (2022), o setor público representou 7,5% do consumo final de energia elétrica em 2021, enquanto a soma dos setores público e comercial atingiu 23,2%. Deste total, aproximadamente 50% são destinados ao condicionamento ambiental (Lamberts, Cândido, De Vecchi, 2014), por isso a grande preocupação no conforto dos usuários juntamente com a economia de energia.

Para mitigar o aquecimento global, uma das alternativas é melhorar o desempenho energético das edificações. Nesse contexto, o uso da ventilação natural é uma das medidas adaptativas mais eficazes que podem reduzir a utilização para refrigeração nos edifícios e também as emissões de gases de efeito estufa, além disso a ventilação natural provou ter um grande impacto na Qualidade do Ar Interior (QAI), na qual está diretamente associada ao bem-estar das pessoas, dado esse se mostra relevante, pois as pessoas passam quase 90% do seu tempo em um ambiente interno (ZHAO *et al.*, 2018).

Para alcançar o conforto térmico dos usuários e aumentar o uso da ventilação natural, pode-se adotar uma operação híbrida que combine ventilação natural com ventilação mecânica, utilizando ventiladores e ainda ampliando as temperaturas de *setpoint* de refrigeração. Dessa forma, o sistema de refrigeração só seria ativado quando as condições térmicas internas se tornassem desconfortáveis (ANDRÉ *et al.*, 2022; TUCK *et al.*, 2019).

Kim e de Dear (2021) realizaram pesquisas onde demonstraram que edifícios com operação de modo híbrido é uma solução confortável de baixo consumo de energia e que pode atingir uma economia de energia entre 10 e 50% em comparação com prédios totalmente climatizados. Para que haja essa economia, os usuários desempenham um papel importante na utilização dos espaços, no entanto, para minimizar esse impacto, a automatização de janelas demonstra economias significativas (SORGATO *et al.*, 2016)

No Brasil, onde o clima prevalece quente e úmido, uma das alternativas de conforto é uma maior movimentação do ar que permite manter o conforto dos usuários em grande parte do ano e ainda reduzir o consumo de condicionamento artificial. Os

ocupantes de ambiente com ventilação natural e modo híbrido de condicionamento aceitam uma maior movimentação do ar (CANDIDO *et al.*, 2010; DE VECCHI *et al.*, 2017; LAMBERTS *et al.*, 2013).

Ventiladores de teto são dispositivos econômicos e energeticamente eficientes, comumente usados em edifícios em climas tropicais e subtropicais (Omrani *et al.*, 2021). Esses dispositivos têm demonstrado grande potencial em estender a aplicação da ventilação natural, assim como, ampliar a faixa de temperatura na qual os ocupantes se sentem termicamente confortáveis através da geração de fluxo de ar elevado e do aumento da transferência de calor por convecção (LIPCZYNSKA *et al.*, 2018). No estudo realizado por Bamdad *et al.* (2022) em edificações de escritório e no clima australiano, foi possível identificar uma economia de energia em 23% com o uso de ventiladores de teto integrados com a ventilação natural.

Nesse mesmo sentido, a pesquisa realizada por Cândido *et al.*, 2010 em salas de aula em Alagoas e resultaram conforto dos ocupantes com temperatura operacional de 30°C e uma velocidade do ar de 0,90m/s.

A ventilação representa uma estratégia significativa e sustentável para mitigar as mudanças climáticas. No entanto, destaca-se que o potencial de economia de energia pode ser otimizado quando a velocidade do ar dentro da zona ocupada ultrapassa 0,3 m/s (ASHRAE, 2020).

Lipczynska *et al.* (2018) realizaram uma pesquisa experimental com o objetivo de analisar como a utilização dos ventiladores de teto afetam tanto o consumo de energia do sistema de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC) quanto o conforto térmico dos ocupantes em um edifício de escritórios. Os resultados indicaram que, ao utilizar ventiladores de teto juntamente com ar-condicionado, foi possível elevar o ponto de ajuste da temperatura em até 4 °C, proporcionando uma melhoria significativa na aceitabilidade térmica pelos ocupantes.

Nota-se a relevância dessa estratégia de conforto com o uso racional do ar-condicionado, possibilitando uma economia energética considerável. Os ventiladores de teto utilizados juntamente com o ar-condicionado proporcionam conforto em uma faixa de temperatura mais ampla, usando menos energia do que apenas o ar-condicionado (MILLER, 2021).

Diante desse cenário, os profissionais da construção civil têm uma parcela de responsabilidade em minimizar esses impactos, propondo projetos com estratégias

bioclimáticas passivas, pensando sempre em integrar a arquitetura com o clima local. Embora o uso de condicionadores seja por vezes inevitável, reconhecemos a importância de escolher modelos mais eficientes e incorporar ventiladores de teto para aprimorar a sensação térmica dos ocupantes. Isso constitui o foco da pesquisa apresentada neste estudo.

## 1.2 Justificativa do tema

Pode-se concluir, pelos fatos apresentados, que a necessidade de resfriamento de ambientes é emergente num cenário de aquecimento global, entretanto a forma de utilizá-lo precisa ser estudada. Sendo assim, entende-se a importância de estudos e pesquisas que se dediquem a mostrar possibilidades e alternativas para o uso eficiente da energia em edifícios sem perder de vista o conforto dos usuários.

Nesse contexto, a maior parte do território brasileiro é caracterizada por um clima quente e úmido (Cândido *et al.*, 2010). Uma abordagem eficaz para melhorar a sensação térmica nessas áreas é a adoção de uma estratégia simples de resfriamento, baseada na movimentação do ar. Essa prática visa aprimorar o conforto por meio do aumento da convecção e evaporação, sendo facilmente implementada através do uso de ventiladores e da promoção da ventilação natural.

Em um estudo conduzido por Lipczynska *et al.* (2018), que investigou o conforto dos ocupantes em escritórios localizados em Singapura, caracterizado por um clima tropical, ficou evidente que o emprego de ventiladores de teto proporciona diversas vantagens significativas. Entre essas vantagens, destacam-se o aumento da percepção de frescor no ambiente, maior controle pessoal sobre a temperatura, prevenção da sonolência e a ausência do risco de resfriamento excessivo, algo que pode ocorrer com sistemas de ar-condicionado.

Estudos comprovam a eficiência de ventiladores para o resfriamento de ambientes com satisfação dos usuários como os de Schiavon e Melikov (2009) e Zhai *et al.* (2015). Os autores mostram respectivamente que o ventilador de teto tem um efeito de resfriamento mais uniforme considerando o corpo como um todo e, em climas quentes e úmidos identificaram que a velocidade do ar a 1,2 m/s proporcionou conforto a 30°C e 80% de umidade relativa, em uma câmara climatizada, com atividade sedentária e *c/o* de 0,5, na qual a temperatura estabelecida está além da temperatura

limite de conforto, definida pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).

No clima subtropical úmido na China, mesma classificação de Pelotas segundo Köppen, em edifícios com ventilação natural e artificial, foi realizada uma pesquisa para avaliar a satisfação dos usuários e esses demonstraram aceitar temperatura mais altas nos locais com ventilação natural do que nos edifícios apenas com ar-condicionado, tendo como temperaturas neutras 28,3°C e 27,7°C em edifícios naturalmente ventilados e com ar-condicionado, respectivamente (YANG E ZHANG, 2008). Essa aceitabilidade tem relação com a sensação de frescor decorrente da movimentação do ar. O vento que incide na pele das pessoas tem como efeito retirar o ar saturado de umidade da superfície da pele e assim facilitar a continuidade da evaporação do suor.

O uso eficiente da ventilação natural juntamente com resfriamento noturno, aliado a aberturas posicionadas e dimensionadas adequadamente para os ambientes, e o uso do ar-condicionado de maneira eficaz e moderada são estratégias possíveis para economia de energia. De acordo com Cook *et al.* (2022) essas estratégias tornam possível uma economia de 55% em relação a edificações com apenas o uso de ar-condicionado (pesquisa realizada em edifícios residenciais e climas da Índia).

Além de melhorar o conforto térmico, pesquisas comprovam que a alta velocidade do ventilador pode ter um efeito benéfico na qualidade do ar percebida. Podemos classificar os benefícios desse equipamento em termos de fluxo de ar, conforto térmico, eficiência energética e qualidade do ar percebida (OMRANI *et al.*, 2021).

Os estudos envolvendo questões de ventilação utilizam o incremento da temperatura de conforto com o uso de ventiladores de teto e usam a simulação computacional para análise dos benefícios. Essas são condições importantes que serão utilizadas na pesquisa aqui apresentada.

O software selecionado para a realização da pesquisa é o EnergyPlus, amplamente difundido e utilizado por pesquisadores. Além disso, trata-se de uma ferramenta gratuita e de fácil acesso. Araújo e Scalco (2018) utilizaram o EnergyPlus para comparação de projetos educacionais padrão e nas modelagens com as estratégias de conforto com o uso da velocidade do ar e com o incremento da temperatura do ar. Assim como a pesquisa de Cook *et al.*, (2022) utilizou o mesmo

software para avaliar a economia de energia de dormitórios em prédios habitacionais com a utilização de ventiladores de teto, sendo que a temperatura operativa foi aumentada conforme a ASHRAE 2017, permitindo um incremento de 1,2, 1,8 e 2,2°C para velocidades internas do ar de 0,6, 0,9 e 1,2 m/s, respectivamente.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo geral

Essa pesquisa tem como objetivo geral de verificar, através da simulação computacional, a influência da utilização da velocidade do ar com o uso de ventiladores de teto na economia de energia em uma edificação automatizada.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Definir as metodologias a serem empregadas para análise do conforto dos usuários, considerando as formas passivas de conforto e de condicionamento artificial;
- Determinar as velocidades dos ventiladores de teto utilizados no projeto de acordo com o conforto dos ocupantes e com as normas estabelecidas;
- Definir o *setpoint* do ar-condicionado quando este estiver em uso simultâneo com os ventiladores de teto;
- Verificar o impacto dos ventiladores de teto no conforto térmico dos usuários e no consumo de energia.

## 2 Revisão da literatura

A revisão da literatura aqui apresentada tem como objetivo apresentar estudos que envolvem temáticas abordadas nessa pesquisa e que poderão dar sustentação a metodologia proposta.

### 2.1 O uso do EnergyPlus para simulação computacional

A simulação computacional é largamente utilizada como um instrumento para verificação e análise de edifícios, pois seu objetivo é representar a realidade da maneira mais aproximada possível e analisar seu comportamento energético, térmico, acústico, lumínico, entre outros. Uma grande vantagem no uso dessa ferramenta é a possibilidade de avaliar as tomadas de decisão sem a necessidade de implantação no edifício real, permitindo assim, fazer experimentos da edificação a ser construída sem o custo da implantação dos testes.

Na fase de projeto, a simulação possibilita testar inúmeras soluções e possibilidades e, com isso, determinar a melhor decisão na questão das estratégias de conforto e consumo de energia. Em construções já existentes há a vantagem para intervenções de maneira assertiva sem custos desnecessários.

Para a simulação computacional optou-se pela escolha do software EnergyPlus, lançado em 2001. Esse é um software distribuído de forma gratuita, que permite a simulação do comportamento termoenergético de edificações, levando-se em consideração critérios de aquecimento, resfriamento, iluminação, ventilação, cálculo de índices de conforto térmico, entre outras como explicam Santos *et al.* (2018).

Algumas informações são necessárias para a devida análise do modelo, como por exemplo a modelagem do edifício, identificando as zonas térmicas com suas

dimensões e aberturas. Para a inserção desses dados, há uma forma facilitada de inserir a forma gráfica da volumetria a ser analisada que é o uso do plugin do Skethup, chamado Euclid.

O arquivo climático com os dados do clima também deve ser fornecido, assim como todas as informações do prédio, como: materiais, equipamentos instalados, climatização, forma de utilização do local e consumo (GOMES, 2019).

Um dos obstáculos no uso desse software pelos projetistas, segundo Ataíde (2008) é sua dificuldade da interpretação de sua interface, exigindo algum treinamento para sua utilização. Para a obtenção dos relatórios corretos de saída é necessária a introdução de uma série de dados de entrada, como a modulação volumétrica, localização, orientação, entorno, dados climáticos, especificação dos materiais, rotinas dos usuários e ganhos internos.

A simulação com o EnergyPlus oferece benefícios como uma análise abrangente do desempenho energético de um edifício. O software permite também uma integração com uma *Application Programming Interface* (API) Python. Esta API permite ao usuário recuperar e definir valores de variáveis de simulação, abrindo novas possibilidades de integrações personalizadas (JARED E DRENKOW, 2023).

A API do EnergyPlus para Python permite chamar o EnergyPlus como uma biblioteca a partir de um script Python. Isso permite enviar e receber informações entre os programas, substituindo a linguagem de programação interna do EnergyPlus por scripts Python, que oferecem possibilidades praticamente ilimitadas (GRYGIEREK e FERDYN-GRYGIEREK, 2022)

Em suma, a utilização da API Python com o EnergyPlus amplia as capacidades de análise e otimização de projetos de edifícios, essa integração permite uma automação eficiente de tarefas, possibilitando a execução de simulações com diferentes parâmetros. Permite uma exploração mais abrangente das características de funcionamento da edificação, levando a decisões mais eficazes em termos de eficiência energética.

Essa ferramenta possibilita controles avançados durante o processo da simulação no EnergyPlus, realizando a leitura e a troca de informações durante a simulação a cada passo de tempo, possibilita controlar diversas variáveis utilizadas na edificação. Além disso, ela permite simular estratégias de controle que não são possíveis com os objetos de controle padrão do EnergyPlus. Os algoritmos de alto

nível desse sistema proporcionam tomar decisões de controle instantâneas e de acordo com a realidade do funcionamento do edifício real (ELLIS *et al.*, 2007).

## **2.2 Uso da velocidade do ar: conforto térmico a partir de estudos e normativas**

A pesquisa realizada por De Dear e Brager (2002), identificou a percepção dos usuários em relação à velocidade do ar interno. Constataram que a baixa velocidade do ar, conforme os padrões da ASHRAE, deixou os usuários insatisfeitos. Portanto, com o aumento da velocidade é possível melhorar a qualidade do ar percebida pelos usuários, além de economizar a energia consumida pelo sistema de ar-condicionado.

De Vecchi *et al.* (2013) desenvolveram um estudo com o objetivo de “avaliar o efeito da velocidade do ar (entre 0,20 e 1,35 m/s) no conforto térmico de ocupantes em salas de aula com sistema de condicionamento híbrido (ventiladores de teto e ar-condicionado)”, o experimento teve como temperatura média operativa 24,3°C e temperatura média externa 22,4°C. Foi possível observar um menor número de insatisfeitos na sala de aula quando há a integração dos ventiladores de teto com o condicionamento artificial do que apenas o uso de ventiladores de teto, assim como uma satisfação dos usuários com uma temperatura operativa de 28°C com o uso simultâneo desses equipamentos. Além de demonstrar essa possibilidade de aceitação dos usuários com a utilização de um *setpoint* maior, a pesquisa de De Vecchi *et al.* (2013), demonstra uma grande admissão da velocidade do ar acima de 0,90 m/s em situações com ar-condicionado e ventiladores de teto em uso simultâneo, conforme Figura 1. Nesse estudo, demonstrou-se o conforto dos usuários em utilizar uma velocidade do ar maior juntamente a utilização de *setpoint* de ar-condicionado mais alto, possibilitando assim uma economia energética considerável.

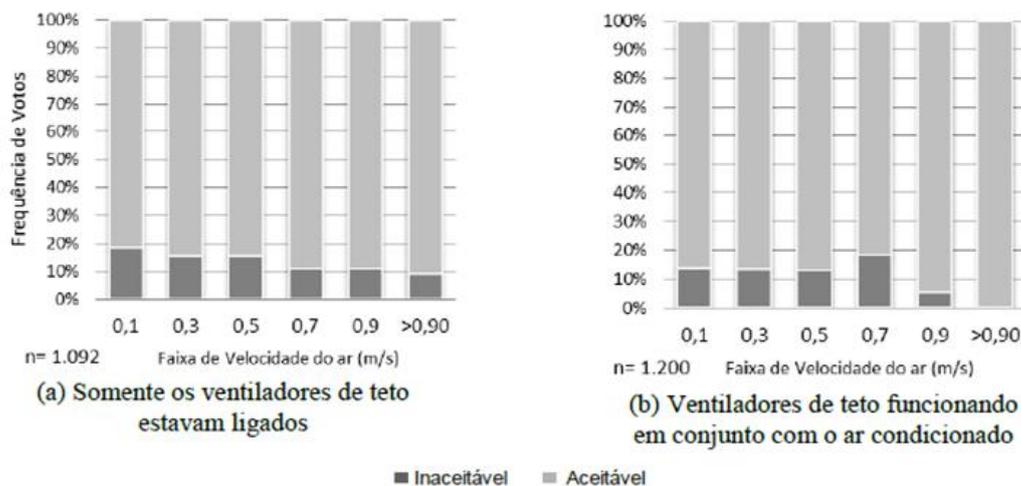


Figura 1 Aceitabilidade térmica relacionada a velocidade do ar  
Fonte: De Vecchi et al (2013)

Na mesma perspectiva de satisfação/insatisfação de usuários, Raftery *et al.* (2019) demonstram em seu estudo de campo em escritórios com ventiladores de teto em conjunto com ar-condicionado, que os ocupantes se sentiam igualmente confortáveis a 26-27°C com maior movimentação de ar do que com 23°C sem a movimentação de ar.

A pesquisa de Miller *et al.* (2021) vem para reforçar a aceitabilidade dos usuários com a utilização de condicionadores de ar juntamente com ventiladores de teto. Os entrevistados preferiram o uso simultâneo desses equipamentos e ainda preferiram a conveniência da automação do ventilador baseada em temperatura ao controle manual. Nesse estudo foi possível observar que a porcentagem de horas em desconforto conforme o padrão ASHRAE 55 pelo modelo de conforto térmico PMV, diminuiu de 54% para 16% com a instalação dos ventiladores.

Cândido, De Dear e Lamberts (2011) realizaram um estudo na cidade de Maceió, de clima tropical úmido-seco, com temperaturas médias mensais variando de 24 a 26°C em salas de aula universitárias. O objetivo do estudo foi avaliar o conforto dos usuários em relação a aceitabilidade térmica e de movimento do ar. Observaram que os ocupantes exigiam mais velocidade do ar, mesmo sendo encontrada uma aceitabilidade térmica de 90% dentro das previsões do padrão de conforto adaptativo ASHRAE. Através desse trabalho, foi possível estabelecer valores mínimos de velocidade do ar atingindo 90% de aceitabilidade térmica e de movimento do ar de acordo com a tabela a seguir:

**Tabela 1 Valores mínimos de velocidade do ar atingindo 90% de aceitabilidade térmica**

Temperatura operativa	Velocidade do ar
24 a 27°C	0,40m/s
27 a 29°C	0,41–0,8m/s
29 a 31°C	>0,81m/s

Fonte: Adaptado de Cândido, De Dear e Lamberts (2011)

Nicol (2004) demonstra em sua pesquisa que a movimentação do ar em climas tropicais tem a característica de aumentar a temperatura de conforto conforme observado no gráfico abaixo, de acordo com a equação desenvolvida (Equação 01).

$$\text{Incremento da temperatura de conforto} = 7 - \frac{50}{4 + 10v^{0,5}} \text{ } ^\circ\text{C} \quad [\text{Eq.01}]$$

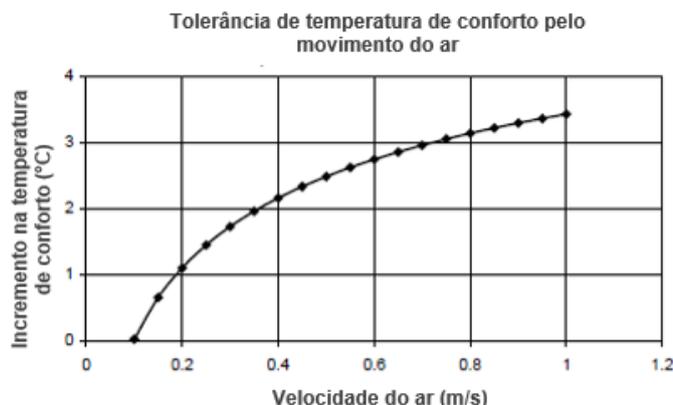


Figura 2 Incremento na temperatura de conforto para diferentes velocidades do ar. Fonte: Nicol (2004)

A movimentação do ar, seja um vento natural ou gerado por um ventilador, tem um efeito de resfriamento cuja sensação depende em grande parte da velocidade desse movimento. Em condições cotidianas, as reações subjetivas médias às velocidades estão apresentadas na tabela abaixo e estão de acordo com Auliciems e Szokolay, 2007.

**Tabela 2 Limites de velocidade do ar e suas reações**

Velocidade do ar (m/s)	Percepção dos usuários
<0,25	despercebida
0,25 – 0,50	Agradável
0,50 – 1,00	Consciência do movimento do ar
1,00 – 1,50	Incômodo
>1,50	Irritantemente Incômodo

Fonte: Adaptado de Auliciems e Szokolay, 2007

A movimentação do ar tem dois efeitos significativos no conforto dos usuários, um deles é a perda de calor por convecção da superfície do corpo ou roupa e o outro é a evaporação da umidade da pele. Os dois são diretamente proporcionais à velocidade do ar. Sem a movimentação, uma camada de ar praticamente saturada é formada na superfície do corpo, o que reduz a evaporação adicional.

Sob condições quentes, a velocidade do ar em 1,0 m/s é agradável e até 1,5 m/s é aceitável, no entanto, valores acima desses podem ocasionar que objetos leves sejam soprados, criando assim efeitos de incômodo indiretos (GIVONI, 1991).

É importante citar a pesquisa realizada por Givoni (1991) onde o autor considerou o uso de aberturas nas salas. Em sua pesquisa sobre resfriamento convectivo, comparou duas salas idênticas medindo 4 m x 4 m x 2,5 m, com cor externa clara, paredes e coberturas de concreto com 20 cm de espessura, isoladas externamente por 5 cm de EPS e rebocada. A diferença entre elas foi a forma de utilização das aberturas: em uma das salas as aberturas ficaram abertas durante a noite e fechadas durante o dia e, na outra sala as aberturas foram mantidas sempre fechadas. De acordo com a figura a seguir, é possível notar a diferença de temperatura interna das salas em comparação com a temperatura externa.

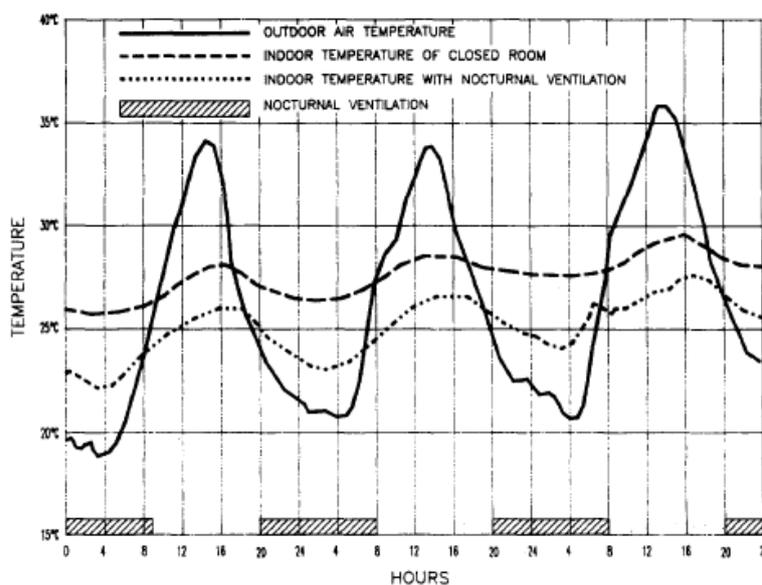


Figura 3 Padrões diurnos de temperatura externa e interna de uma sala fechada dia e noite e uma sala ventilada a noite e fechada durante o dia. Fonte: Givoni (1991)

Este estudo ressalta a relevância da ventilação apropriada e da escolha do sistema construtivo adequado. Graças à inércia térmica das paredes e à ventilação natural durante a noite, a sala se manteve a uma temperatura consideravelmente mais

baixa do que ao ambiente externo, proporcionando conforto aos ocupantes. É crucial notar a necessidade de manter a edificação fechada durante o dia, uma vez que, caso contrário, a temperatura interna se aproximaria da temperatura externa, resultando em desconforto. Quanto ao conforto diurno dos ocupantes, a renovação do ar no ambiente é essencial, e, portanto, devem ser consideradas outras estratégias, como o uso de fluxo de ar por meio de tubos de resfriamento subterrâneo ou a alternância do uso de ar-condicionado com a ventilação cruzada.

Em climas quentes e úmidos nos quais a temperatura máxima do ar exterior não exceda cerca de 28-32°C e a amplitude de temperatura diurna é inferior a cerca de 10°C, a ventilação é a estratégia mais simples e efetiva para o conforto dos ocupantes em ambientes residenciais com uma velocidade do ar interior de 1,5 a 2,0 m/s (GIVONI, 1991).

Ainda reportando às questões que dizem respeito ao conforto térmico dos usuários em edifícios e à movimentação do ar cita-se a *International Organization for Standardization (ISO) 7730*. Essa Norma Internacional tem como objetivo apresentar métodos para prever a sensação térmica geral e o grau de desconforto de pessoas expostas a ambientes térmicos moderados. A norma utiliza o cálculo PMV (voto médio previsto) e PPD (porcentagem prevista de insatisfeitos), dando ao ambiente condições consideradas aceitáveis para o conforto térmico geral, bem como aquelas que representam desconforto local.

A velocidade do ar em um espaço influencia a troca de calor por convecção entre uma pessoa e o ambiente. Isso influencia o conforto térmico geral do corpo através da perda de calor. A ISO 7730 não determina velocidade mínima do ar necessária para o conforto térmico. No entanto, o aumento da velocidade do ar pode ser usado para compensar a sensação de calor causada pelo aumento da temperatura.

Em condições de verão a temperatura de conforto pode ser incrementada se a velocidade do ar for aumentada, sendo que esse controle deve ser ajustável pelos ocupantes e em etapas não superiores a 0,15m/s.

O quanto a temperatura pode ser elevada está demonstrada na Figura 5, que tem como ponto de referência das curvas a temperatura de 26°C e velocidade do ar de 0,20 m/s. As combinações de velocidade do ar e de temperatura definidos pelas linhas nesta figura resultam na mesma transferência total de calor da pele. Os

benefícios que podem ser obtidos com o aumento da velocidade do ar dependem da roupa, da atividade e da diferença entre a temperatura da superfície da roupa/pele e a temperatura do ar. A Figura 5 mostra a velocidade do ar que é exigido para roupas típicas de verão (0,5 clo) e atividades sedentárias (1,2 met).

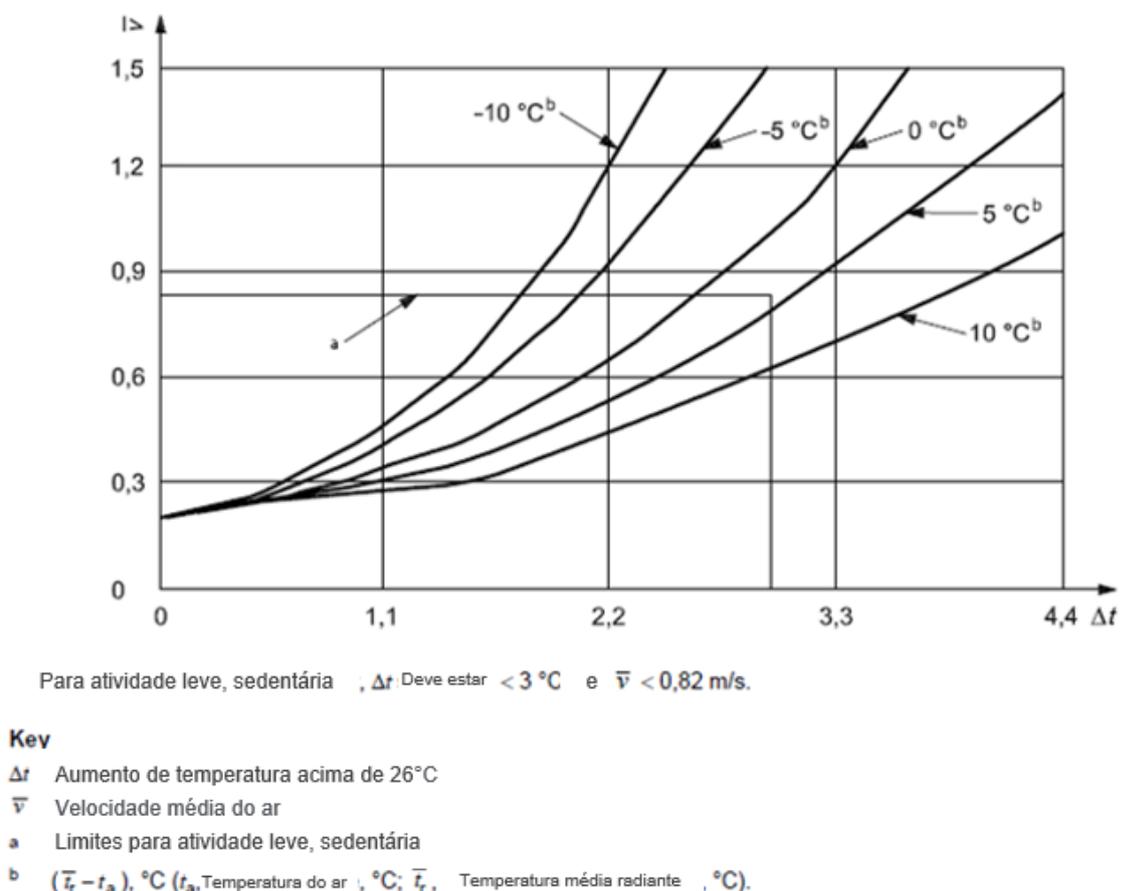


Figura 4 Velocidade do ar de acordo com o incremento de temperatura. Fonte: ISO 7730 (2005)

A partir dos estudos de Fanger (1972), a ISO apresenta a escala de conforto com índices de PMV. Esse índice é obtido a partir dos dados de temperatura, temperatura média radiante, velocidade e umidade relativa do ar, atividade metabólica e da vestimenta. Na escala, o zero é considerado um valor neutro, graduações negativas são para sensações de frio e graduações positivas para sensações de calor, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 Escala PMV

3	muito quente
2	quente
1	Ligeiramente quente
0	neutro
-1	Ligeiramente frio
-2	frio
-3	muito frio

Fonte: ISO 7730 (2005)

A norma também traz alguns critérios de temperatura operativa juntamente com velocidade média do ar de acordo com níveis de atividade e conforme a estação do ano, de resfriamento (0,5 *clo*) e de aquecimento (1,0 *clo*) levando em consideração as categorias dos usuários A, B e C (Tabela 04). Sendo a categoria A refere-se uma percentagem de PMV em  $\pm 0,2$ , a categoria B a um PMV de  $\pm 0,5$  e a categoria C um PMV de  $\pm 0,7$ . Nota-se que a velocidade média para o verão fica entre 0,12m/s a 0,24m/s, uma velocidade bem abaixo do incremento indicado pela figura 5.

**Tabela 4 Temperatura operativa de acordo com a categoria A, B e C**

Tipo de espaço	Atividade W/m <sup>2</sup>	Categoria	Temperatura operativa (°C)		velocidade média máxima (m/s)	
			Verão	Inverno	Verão	Inverno
Sala de Aula	70	A	24,5 $\pm$ 1,0	22,0 $\pm$ 1,0	0,12	0,10
		B	24,5 $\pm$ 1,5	22,0 $\pm$ 2,0	0,19	0,16
		C	24,5 $\pm$ 2,5	22,0 $\pm$ 3,0	0,24	0,21

Fonte: ISO 7730 (2005)

A equação do PMV apresentada pela norma é razoavelmente complexa para que seja realizada de forma manual, contudo a norma traz uma linguagem de programação para a possibilidade de fazer um aplicativo, e assim, a ferramenta calcular com as informações do ambiente.

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\ -1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ -3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\}$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \left\{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \right\}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{for } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{for } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{for } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases}$$

[Eq.02]

Onde:

M é a taxa metabólica, em watts por metro quadrado (W/m<sup>2</sup>);

W é a potência mecânica efetiva, em watts por metro quadrado (W/m<sup>2</sup>);

I<sub>cl</sub> é o isolamento da roupa, em metros quadrados kelvin por watt (m<sup>2</sup> · K/W);

f<sub>cl</sub> é o fator de área de superfície da roupa;

t<sub>a</sub> é a temperatura do ar, em graus Celsius (°C);

t<sub>r</sub> é a temperatura radiante média, em graus Celsius (°C);

v<sub>ar</sub> é a velocidade relativa do ar, em metros por segundo (m/s);

p<sub>a</sub> é a pressão parcial do vapor de água, em pascal (Pa);

h<sub>c</sub> é o coeficiente de transferência de calor por convecção, em watts por metro quadrado kelvin [W/(m<sup>2</sup> · K)];

t<sub>cl</sub> a temperatura da superfície da roupa, em graus Celsius (°C).

Trebien *et al.* (2007) menciona a importância da inserção correta dos parâmetros Temperatura radiante média, MET e CLO, pois esses dados possuem um grande peso no cálculo. Uma variação pequena desses dados provoca uma grande diferença no resultado do PMV, pensando nisso, a inserção da vestimenta deve ser compatível com os usuários.

### 2.2.1 ASHRAE 55, EN 15.251 e NBR 16.401: conforto térmico e qualidade do ar interior em destaque

Projetar edifícios que satisfaçam os requisitos e parâmetros que observamos até aqui requer também que se recorra a normas que especifiquem os métodos e fundamentos para tal.

A ASHRAE 55 (2020) é um documento importante nesse contexto pois ele tem como objetivo “especificar as combinações de fatores ambientais térmicos internos e fatores pessoais que produzirão condições ambientais térmicas aceitáveis para os ocupantes”. Nele estão definidos os métodos que devem ser utilizados de acordo com

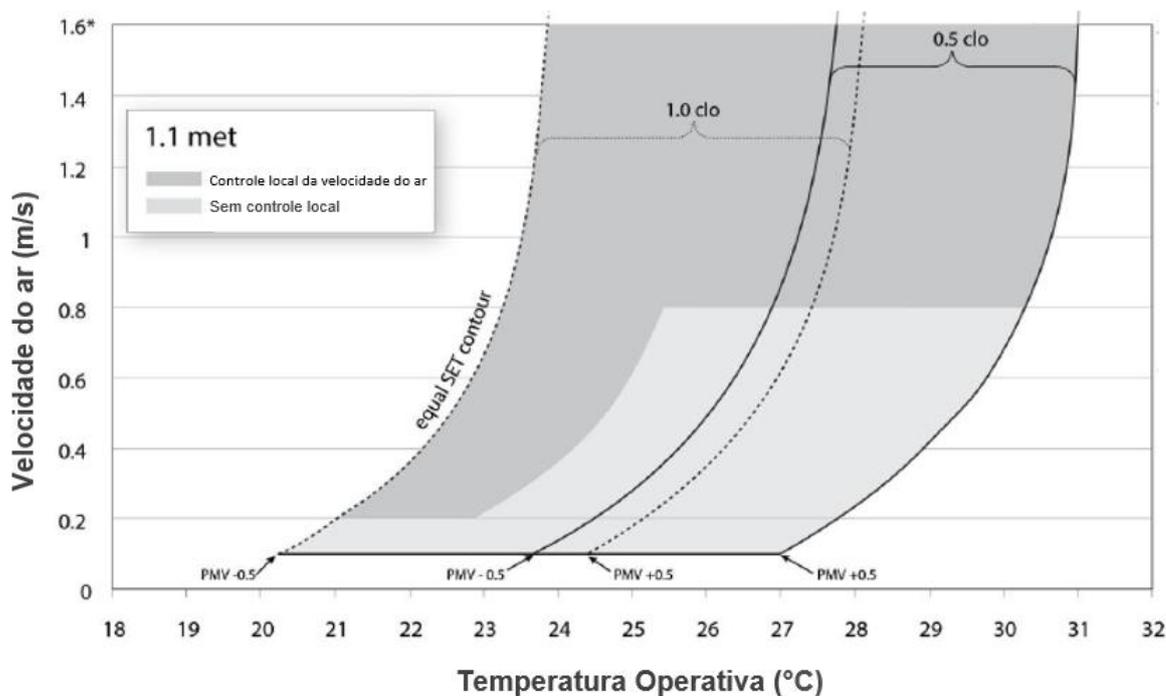
o condicionamento do local, se esse utiliza de condicionamento artificial, o método analítico se enquadra melhor (cálculo do PMV), já quando se trata de ambientes condicionados naturalmente, o método adaptativo representa melhor o conforto dos usuários.

Essa norma apresenta também um método de zona de conforto para velocidade do ar maior que 0,20m/s sendo a combinação do cálculo do Método Analítico com o modelo de Temperatura Efetiva Padrão (SET). Esta última é usada para contabilizar o efeito de resfriamento de velocidades do ar maiores que o máximo permitido na zona. A Figura 06 apresenta a temperatura operativa de acordo com as velocidades e se há controle da velocidade do ar ou não.

Para ser considerado um ambiente com controle, esse local deve atender a pelo menos um dos critérios a seguir:

- Ter um meio de controle para cada seis ocupantes ou menos.
- Ter um meio de controle para cada 84 m<sup>2</sup> ou menos.
- Em espaços multiuso, onde grupos se reúnem para atividades compartilhadas, como salas de aula e salas de conferência, pelo menos um controle deve ser fornecido para cada espaço, independentemente do tamanho.

A Figura 6 representa dois casos particulares do Método da Zona de Conforto de Velocidade do Ar Elevada e através dela é permitido determinar a faixa de temperatura operativa por interpolação linear entre os limites encontrados para cada zona da figura.



\*Não há limite superior para a velocidade do ar quando os ocupantes têm controle local.

Figura 5 Faixas aceitáveis de temperatura operacional e velocidade média do ar para as zonas de conforto de 1,0 e 0,5 *clo*. Fonte: ASHRAE 55 (2017)

De acordo com o gráfico, se considerarmos um PMV de 0,5, ou seja, atingindo um percentual de 90% de pessoas satisfeitas, *clo* de 0,5 e velocidade de 0,80m/s, podemos chegar a uma temperatura operacional em torno de 30°C.

Quando não há controle da velocidade do ar nos locais com atividades sedentárias (máximo 1,3 met) e isolamento de roupa é inferior a 0,6 *clo*, há critérios para evitar desconforto por frio causado pela corrente de ar. *Clo* abaixo de 0,70 e metabolismo até 1,3 met, a velocidade máxima permitida é de 0,80m/s quando a temperatura operacional estiver acima de 25,5°C; 0,20m/s quando as temperaturas operativas estão abaixo de 23°C; para temperaturas entre 22,5°C e 25,5°C a velocidade deve ser calculada pela equação 03, sendo que para a utilização dessa equação o valor de *clo* máximo é de 0,7.

$$V_a = 50,49 - 4,4047(t_o) + 0,096425(t_o)^2 \text{ (m/s, } ^\circ\text{C)} \quad [\text{Eq.03}]$$

O método adaptativo é utilizado para espaços onde os ocupantes se sentem confortáveis termicamente apenas com condicionamento natural de acordo com os seguintes critérios: sem sistema mecânico de resfriamento ou sistema de

aquecimento em operação; taxas metabólicas entre de 1,0 a 1,5 met; adaptação das vestimentas de acordo com condições térmicas internas e/ou externas, dentro de um intervalo de 0,5 a 1,0 clo; temperatura externa média predominante maior que 10°C e menor que 33,5°C (Figura 7).

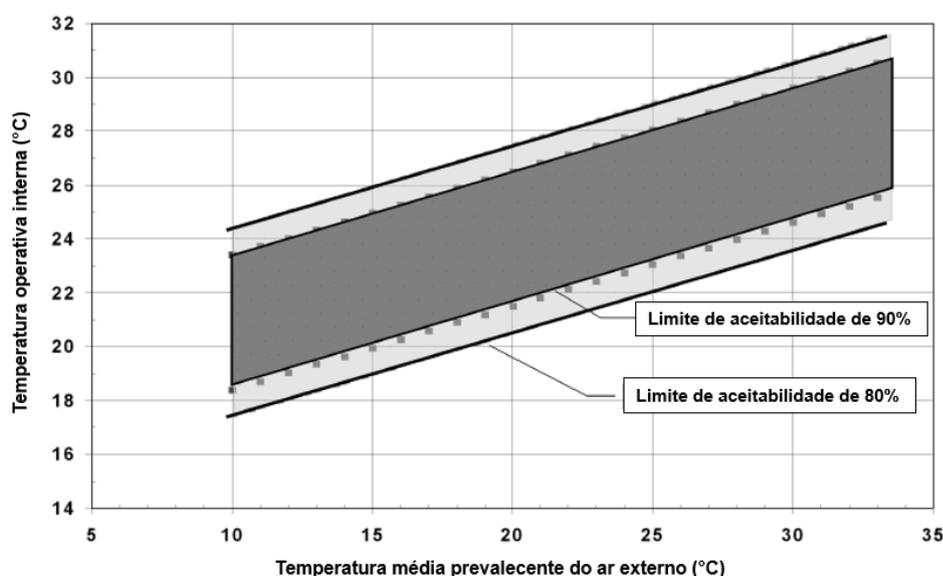


Figura 6 Temperatura operativa aceitável para intervalos de espaços naturalmente condicionados. Fonte: ASHRAE 55 (2017)

Para a determinação das temperaturas operativas nesse método são utilizadas as condições a seguir, tendo como referência a temperatura média do ar externa.

- Limite superior de aceitabilidade de 80%(°C) =  $0,31 \times T_{m\text{externa}} + 21,3$
- Limite inferior de aceitabilidade de 80%(°C) =  $0,31 \times T_{m\text{externa}} + 14,3$

A norma inclui uma tabela (Tabela 5) que ilustra o aumento dos limites superiores de temperatura em relação à velocidade do ar, caso a temperatura operativa exceda 25°C.

**Tabela 5 Aumentos do limite de temperatura operativa aceitável em Condicionamento Natural Controlado por Ocupante**

Velocidade média do ar Va 0,6m/s	Velocidade média do ar Va 0,9m/s	Velocidade média do ar Va 1,2m/s
1,2°C	1,8°C	2,2°C

Fonte: ASHRAE 55 (2017)

Outra norma que apresenta parâmetros de projeto e avaliação do desempenho energético de edifícios é a European Standards Norme (EN) 15.251. Essa norma aborda a qualidade do ar interno, conforto térmico, lumínico e acústico. Tem como

referência a ISO 7730 e a ISO 7726, e uma das principais preocupações é com a qualidade do ar interior e os níveis de CO<sub>2</sub>, portanto, considera a ventilação mecânica importante para essa renovação do ar.

Para a medição do conforto dos usuários em ambientes condicionado artificialmente, a EN utiliza o PMV. A norma também traz temperaturas operativas para aquecimento e resfriamento de acordo com o ambiente e a classificação I, II e III. A categoria I trata de usuários com alto nível de expectativa e locais ocupados por pessoas sensíveis e frágeis como idosos, crianças e doentes. O nível II deve ser utilizado para nova construções e estabelece nível normal de expectativa, já o nível III pode ser utilizado para edifícios existentes com nível moderado de expectativa dos usuários.

**Tabela 6 Exemplos de valores de projetos recomendados da temperatura operativa interior dos edifícios e sistemas de HVAC**

Tipo de espaço	Categoria	Temperatura operativa	
		Mínima ~1,0 clo	Máxima ~0,5 clo
Sala de aula	I	21	25
Atividade	II	20	26
~1,2 met	III	19	27

Quando se utiliza meios passivos de resfriamento, nas condições de verão, como a ventilação natural e artificial, o método adaptativo é utilizado para determinar as temperaturas operativas de acordo com as 3 categorias mencionadas anteriormente.

Para compensar a temperatura operativa alta (acima de 25°C), a velocidade do ar pode ser aumentada para compensar esse desconforto por calor (Figura 8). Esse controle deve estar diretamente acessível aos usuários.

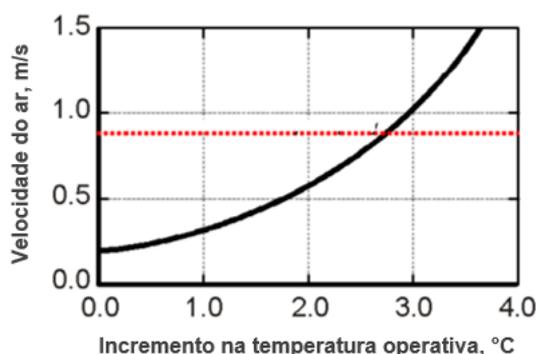


Figura 7 Velocidade do ar necessária para compensar o aumento da temperatura

Fonte: EN 15.251 (2006)

É importante complementar aqui as recomendações trazidas na NBR 16401 publicada em 2008. Essa norma é dividida em três partes, a primeira é focada no projeto e instalação de ar-condicionado, a parte 2 especifica parâmetros do ambiente interno em ambientes condicionados artificialmente e a parte 3 tem como objetivo determinar parâmetros mínimos para a obtenção de qualidade do ar interior.

A norma é bastante restritiva quanto aos limites de temperatura operativa, umidade relativa e velocidade do ar. Ela estabelece temperatura operativa interna entre 22,5°C e 25,5°C para umidade relativa de 60% para o verão, com *c/o* de 0,5 e a velocidade média do ar não pode ultrapassar 0,20m/s. Já para o inverno se estabelece temperaturas operativas entre 21°C e 23°C para a mesma umidade e com velocidade média de 0,15m/s (ABNT, 2008).

Apesar dessas limitações, a norma permite a elevação da velocidade do ar até 0,80 m/s como forma de compensar o aumento do limite superior da temperatura ambiente, desde que esse aumento não exceda 3°C. Além de favorecer uma maior movimentação do ar, a norma recomenda que esse fluxo seja controlado diretamente pelos usuários, garantindo um conforto térmico.

A norma 16401 está em fase de revisão, e na proposta de revisão apresentada em 2019, estabelece limites de velocidade de ar conforme a temperatura operativa, seguindo a ASHRAE 55, ou seja, para temperaturas operativas acima de 25,5 °C, limite de 0,80m/s sem controle do ar pelos usuários. (LAMBERTS, DE VECCHI e ANDRÉ, 2019)

As pesquisas e normas aqui brevemente mencionadas permitem identificar os benefícios do uso da maior movimentação de ar para o conforto dos usuários seja apenas com o uso de ventiladores ou com o uso conjunto com o ar-condicionado.

Para uma melhor visualização dos limites de velocidade estabelecidos em normas e estudos aqui mencionados, a tabela a seguir apresenta um resumo dos limites de velocidades de acordo com cada autor e a aplicação de cada pesquisa.

**Tabela 7 Limites de velocidade do ar consideradas aceitáveis pela literatura**

Autor (ano)	Limites de velocidade do ar	Temperatura operativa (°C)	Aplicação
Givoni (1994)	de 1,50 a 2,0m/s		Residencial
Nicol (2004)	1,0m/s	incremento de 3,4 °C	Ambientes de trabalho
ISO 7730 (2005)	0,82m/s	29 °C	Ambientes de trabalho
EN 15251 (2006)	1,50m/s	28,6 °C	Ambientes de trabalho
NBR 16401 (2008)	0,80m/s	29 °C	Ambientes internos
Cândido <i>et al.</i> , 2010	0,90m/s	30 °C	Salas de aula
De Vecchi (2013)	1,35m/s	28 °C	Salas de aula
Zhai <i>et al.</i> (2015).	1,20 m/s	30 °C	câmara climática com pessoas em atividades sedentárias
ASHRAE (2020)	0,80m/s (sem controle) sem limites (com controle)	25,5 °C 32 °C	Ambientes internos

Fonte: Autora (2023)

### 2.3 Definição das condições de conforto

Para a definição das condições de conforto dos usuários, é necessário estabelecer quais métodos de conforto se adaptam melhor ao local e a cada uso do edifício.

Rupp e Ghisi (2018) em sua análise de conforto térmico em edificações híbridas e com condicionamento central de ar-condicionado analisados na cidade de Florianópolis/SC, ou seja, um clima subtropical úmido, pôde concluir que os usuários inseridos nos escritórios com a ventilação em funcionamento, tendem a aceitar uma faixa mais ampla de temperaturas internas. Através dessa pesquisa, foi possível concluir a melhor maneira de analisar o conforto térmico dos usuários conforme os métodos contidos na ASHRAE 55, sendo então o modelo adaptativo mais coerente quando o modo ventilação natural está em funcionamento, pois as pessoas tendem a se adaptar a temperatura externa, principalmente com os ajustes de vestimenta. Já para o uso do sistema de ar-condicionado, o método analítico de Fanger foi que melhor representou o conforto dos usuários, não demonstrando uma relação da temperatura interna com a externa, indicando assim uma desconectividade com o clima da rua.

Através dessa pesquisa foi observado que a faixa PMV exigida pela ASHRAE 55 entre  $\pm 0,5$  não tem relação com a realidade, pois a aceitabilidade térmica analisada durante a operação do ar-condicionado em edificações híbridas pode variar entre  $\pm 1,0$ . Essa maior variação das condições térmicas internas tem grande benefício na economia de energia elétrica e ainda assim os usuários se mantêm em conforto. Além

dessa economia, a pesquisa comprova o conforto dos usuários com a utilização de estratégias passivas de condicionamento e ventilação híbrida, os resultados demonstram que os níveis de aceitabilidade térmica entre ar-condicionado central e ventilação híbrida são semelhantes.

A ISO 7730, baseada em voto médio previsto de Fanger, afirma não descrever de modo real o conforto dos usuários, mas que esses podem ser complementados com padrões de conforto adaptativos de pesquisas locais. Pesquisas de campo foram realizadas em climas tropicais, em situações que normalmente as pessoas vivenciam (não o ambiente desconhecido da câmara climática) e as respostas dos usuários diferem das previsões da ISO 7730, principalmente quando em ambientes naturalmente ventilados. A ISO 7730 prevê desconforto em temperaturas que as pessoas estariam em conforto e subestima a faixa de temperatura que as pessoas se sentem confortáveis, estimulando assim o uso de condicionamento artificial em momentos desnecessários (NICOL, 2004).

De Vecchi *et al.* 2013 apontam em seu estudo que o modelo adaptativo se enquadra melhor nos edifícios de operação mista, prevendo de maneira mais apropriada o conforto térmico dos usuários do que o modelo de Fanger. O conforto térmico adaptativo tem como características ampliar o potencial da utilização da ventilação natural, pois os usuários tendem a se adaptarem às condições da temperatura externa e, com isso, amplia o potencial de economia de energia.

A utilização da ventilação natural presume que não haja controle da umidade do ar, variável que é considerada constante pelo Conforto Adaptativo.

Entretanto, de acordo com pesquisas, o efeito da umidade relativa em relação a temperatura operativa é geralmente pequeno. Foram realizadas pesquisas com pessoas em atividades leves e *clo* de 0,6, em condições de 25 a 30°C e umidade de 70 e 35%, nessas circunstâncias não foi encontrada diferença significativa de temperatura preferida entre os usuários. Indivíduos em edifícios sem climatização localizado em um clima quente, desejam uma temperatura de conforto mais baixa se a umidade for alta ( $UR > 75\%$ ) do que se for baixa ( $RH < 64\%$ ), sendo essa diferença de temperatura de conforto é de cerca de 1°C (NICOL 2004).

No estudo conduzido por Buonocore *et al.* (2018), a influência da umidade relativa e da velocidade do ar na percepção térmica dos ocupantes foi investigada. A pesquisa foi realizada em salas de aula com sistemas de ventilação natural e

mecânica na cidade de São Luís, localizada no Nordeste do Brasil. Os resultados revelaram que a umidade relativa teve um impacto significativo na percepção térmica quando a temperatura operacional ultrapassou os 30°C. Por outro lado, a velocidade do ar desempenhou um papel crucial na mitigação do desconforto térmico. A umidade relativa acima de 70%, intensificou a sensação de calor e diminuiu a aceitabilidade térmica em temperaturas operativas acima de 30 °C. Além disso, a movimentação do ar mostrou-se essencial para o conforto dos usuários, assim, a partir dos 31°C de temperatura operativa, tornou-se indispensável o uso de refrigeração mecânica para garantir o conforto térmico.

Uma das principais razões sugeridas na literatura para a falta de sinal de umidade em modelos de conforto adaptativo é que os ocupantes em climas úmidos estão geralmente bem adaptados a umidade elevada (VELLEI et al, 2017). O uso de ventiladores, a abertura de janelas para aumentar a circulação do ar e o uso de roupas que melhorem a evaporação do suor têm sido sugeridos como ações adaptativas comuns em climas quentes e úmidos (RIJAL et al, 2015).

Nesse mesmo sentido, pesquisas na região de Florianópolis revelaram que a umidade relativa do ar não é significativa para a ocorrência de calor em ambientes não condicionados. Mesmo umidades relativas de até 100% não causam sensação de desconforto térmico. Em escritórios comerciais e estudantes universitários, foi constatado que, para umidades relativas entre 40% e 90%, essa variável não tem relevância para a sensação de calor, enquanto para o frio, o limite mínimo identificado foi de 45% (XAVIER, 2000; XAVIER e LAMBERTS, 2000).

Ballantyne *et al.* apud Nicol (2004) investigaram o efeito da umidade do ar nos dados de conforto coletados em 1960 para pesquisa de Fanger e concluíram que o efeito da umidade em relação aos votos das pessoas era pequeno quando os usuários estavam confortáveis, mas nos ambientes úmidos, as pessoas ficam desconfortáveis com uma mudança de temperatura menor do que comparado com locais secos, assim como o efeito da atividade se torna mais relevante.

Para promover a redução no consumo de energia nos sistemas de ar-condicionado, Chow *et al.* (2010) orienta a aumentar a movimentação do ar do ambiente, ao invés de reduzir a temperatura e umidade do ar, sendo levados em consideração o mesmo nível de sensação de conforto. Nessa pesquisa, Chow *et al.* (2010) realizou testes com 96 alunos de graduação em Hong Kong, em um dos testes

realizados foi mantida a mesma temperatura do ar, mas com umidades relativas distintas e a sensação térmica dos ocupantes se manteve igual, ou seja, não foi sensível a essa variável.

Através dessa análise e de estudos realizados, (OLIVEIRA *et al.* (2020), Rupp e Ghisi (2018), ASHRAE 55 (2017), GOMIS *et al.* (2021)), pode-se concluir que o uso do método do conforto adaptativo em prédios ventilados naturalmente é eficaz para avaliar o conforto térmico em edifícios com ventilação híbrida durante o uso da ventilação natural. Enquanto o modelo de Fanger é adequado para analisar o conforto quando a edificação está utilizando o sistema de climatização artificial (ASHRAE 55 (2017), ISO 7730 (2005), Rupp e Ghisi (2018)).

Definidos os métodos de avaliação do conforto do usuário e como avaliar o efeito da movimentação de ar na sensação térmica do usuário, tanto na condição de edificação naturalmente ventilada quanto condicionada artificialmente, torna-se relevante analisar o usuário frente às tomadas de decisão e operação.

## **2.4 Influência do comportamento do usuário no consumo de energia**

Podemos afirmar que os usuários têm uma grande influência no desempenho das edificações e muitas vezes não têm o domínio de todas as opções para estabelecer uma condição de conforto térmico. De acordo com Sorgato (2015), a busca por conforto térmico dos ambientes é onde os usuários mais interagem com os dispositivos, e esse conforto está ligado aos gostos individuais e a fatores fisiológicos e psicológicos. Assim torna-se importante e fundamental dar orientações para auxiliar esse usuário a tomar a melhor decisão, levando em consideração o conforto do mesmo.

Hax *et al.* (2022) avaliaram a influência do usuário no consumo de energia em uma edificação pública de ensino superior no sul do Brasil, na Zona Bioclimática 2, caracterizada por invernos rigorosos e verões quentes e úmidos.

Utilizando a simulação computacional, foram configurados diferentes perfis de usuários: proativo, intermediário e displicente. O usuário proativo busca o uso da luz natural, utilizando o sombreamento solar passivo e a integração da ventilação natural à artificial. O usuário intermediário não busca a integração da iluminação natural com a artificial, utiliza a ventilação híbrida como estratégia de ventilação. O usuário

displicente não faz uso de nenhuma estratégia passiva, tanto para ventilação quanto para iluminação natural, neste caso, utiliza predominantemente o condicionamento artificial. Além disso, este usuário ajusta o *setpoint* da temperatura de resfriamento e aquecimento para valores fora das normativas. Além dos usuários, foi elaborado um modelo de edifício automatizado, no qual ocorre a integração da iluminação e a ventilação natural com a artificial, assim como, do controle do dispositivo de sombreamento interno. Essa pesquisa tem como forma de operação do condicionamento artificial quando a temperatura interna fica fora do método adaptativo.

Os resultados demonstram claramente a influência do perfil usuário em comparação com a automação e o consumo real do edifício (Figura 9).

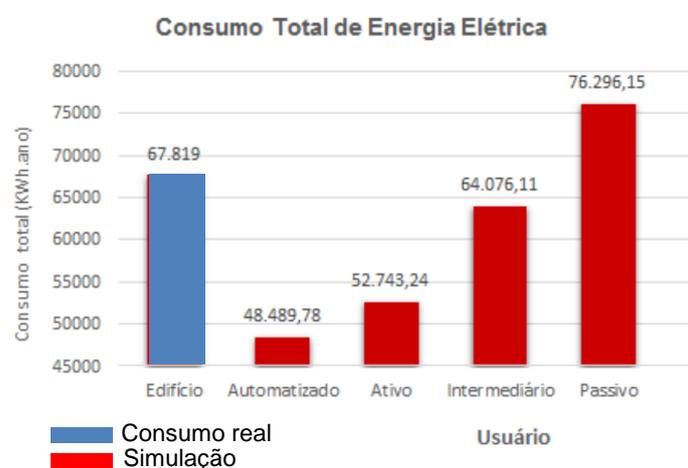


Figura 8 Consumo de energia elétrica total dos usuários e da automação. Fonte: Hax *et al.* (2022)

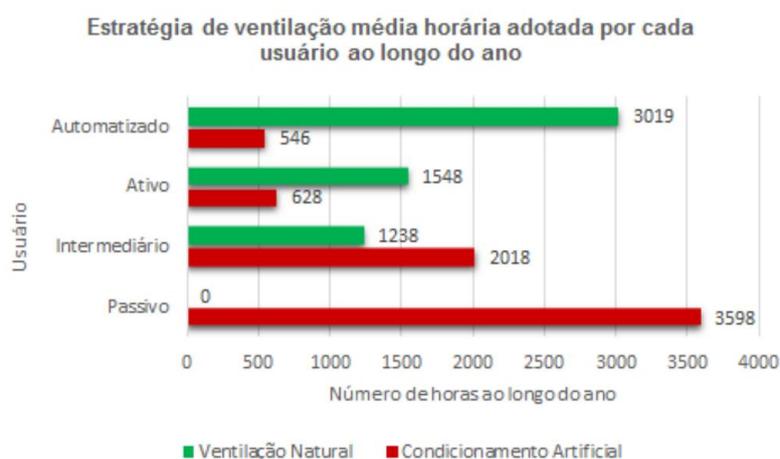


Figura 9 Uso da ventilação natural para manutenção do conforto. Fonte: Hax *et al.* (2022)

Através da pesquisa realizada por Hax *et al.* (2022), pode-se concluir que os modelos automatizados visam maximizar as estratégias passivas, buscando

minimizar o consumo de energia elétrica para condicionamento artificial e iluminação artificial, obtendo o máximo desempenho no que se refere à operação de sistemas. Além disso, destaca-se a quantidade de horas que a automação conseguiu manter as condições de conforto, somente com ventilação natural (Figura 10).

DE WILD (2014) aborda em seu estudo a diferença entre o desempenho energético previsto e o medido de edifícios. Ele identifica a diferença de cada certificado para o mesmo edifício, sendo que os Certificados de desempenho energético (EPC, para testes de conformidade) abordam apenas aquecimento e resfriamento, enquanto os certificados de exibição de energia (DEC, para exibição pública) incluem também os impactos das cargas de equipamentos, comportamento dos ocupantes e até variações climáticas. Como o DEC leva em consideração os usuários utilizando o edifício, essa pontuação acaba se tornando mais baixa que o certificado de desempenho energético. O DEC deve ser exibido de forma visível nas construções e é obrigatório em transações imobiliárias, demonstrando o consumo energético num período através de medições de eletricidade, gás e outros indicadores relevantes.

A Figura 11 demonstra os edifícios estudados na amostra, onde esses foram selecionados como edifícios de alto desempenho energético, como: classificação excelente BREEAM, certificação passiva, inclusão na lista de estudos de caso do Centro de Concreto do Reino Unido ou por terem conquistado um prêmio de sustentabilidade RIBA. É possível identificar que em apenas dois dos vinte casos, os resultados da rotulagem são os mesmos. Em todos os outros a classificação de conformidade é melhor do que a classificação de exibição. Essa discrepância entre os valores preditos e medidos, se justifica pelas condições de uso diferentes das previstas e as imprecisões nos modelos de simulação.

	Credenciais	tipo de edificação	EPC	DEC
Edifício 1	BREEAM Excelente	Tribunal	B	D
Edifício 2	BREEAM Excelente	Tribunal	B	E
Edifício 3	BREEAM Excelente	Tribunal	A	F
Edifício 4	BREEAM Excelente	Educacional	B	F
Edifício 5	BREEAM Excelente	Educacional	B	D
Edifício 6	BREEAM Excelente	Educacional	B	D
Edifício 7	BREEAM Excelente	Escritório	B	C
Edifício 8	BREEAM Excelente	Escritório	A+	E
Edifício 9	BREEAM Excelente	Educacional	B	G
Edifício 10	BREEAM Excelente	Tribunal	D	D
Edifício 11	BREEAM Excelente	Educacional	C	C
Edifício 12	BREEAM Excelente	Educacional	B	C
Edifício 13	BREEAM Excelente	Educacional	B	E
Edifício 14	passivehouse	Educacional	A+	B
Edifício 15	Case centro de concreto	Educacional	B	E
Edifício 16	Case centro de concreto	Educacional	B	F
Edifício 17	prêmio RIBA	Escritório	A	B
Edifício 18	prêmio RIBA	Escritório	B	C
Edifício 19	prêmio RIBA	Assistência médica	B	E
Edifício 20	prêmio RIBA	Educacional	B	D

Figura 10 Comparação dos resultados da avaliação energética legislativa no Reino Unido.

EPC: energy performance certificate - certificado de desempenho energético (testes de conformidade). DEC: display energy certificate - exibição do certificado energético (exibição pública). Fonte: DE WILD, 2014

Depois que um edifício é comissionado e em uso, o lado operacional tem grande fator para contribuição da lacuna de desempenho. O comportamento dos ocupantes geralmente é diferente das suposições realizadas em projeto, sendo essa a principal razão para a diferença de desempenho (MENEZES, 2012).

Esses dados evidenciam a influência do usuário na eficiência da edificação, mesmo que ela tenha sido projetada com estratégias adequadas ao clima local. Em se tratando de prédios públicos com diversos usuários, além de ajustes de velocidade do ar, os ajustes de temperatura conforme as condições de conforto são complexas e escapam do usuário comum, nesse sentido a automação e a inteligência artificial surgem como alternativas viáveis para solucionar essa questão.

## 2.5 Automação, edifícios inteligentes e consumo de energia: conceitos e impactos

Edificações que são automatizadas e aliam conforto e eficiência no uso da energia chamamos “edifício inteligente”. Alguns aspectos dos chamados edifícios inteligentes são conhecidos através dos estudos de Modifi e Akbari (2020). São eles: comunicação com os ocupantes e assim conhecer suas necessidades; entender o

ambiente interno por meio de sistemas de monitoramento; ter capacidade de aprendizagem para melhorar seu desempenho; ter uma comunicação adequada com a rede; e tomar decisões relacionadas à energia através dos seus sistemas de gestão de energia.

Para fazer uma avaliação dos edifícios inteligentes, considerando o uso e operação desses, Stavakrakis (2005) define o edifício inteligente como aquele que:

- fornece um ambiente produtivo e econômico ambientalmente através da otimização de seus quatro componentes básicos - estrutura, sistemas, serviços e gestão - e a inter-relações entre eles (com foco no benefício dos usuário, ou seja, criar o ambiente interno desejado);
- maximiza a eficiência de seus ocupantes (com foco no benefício dos usuários, ou seja, atender as condições desejadas dos ocupantes no ambiente interno);
- permite a gestão eficaz de recursos com custos de vida mínimos (focando sobre o benefício do meio ambiente, ou seja, através do mínimo impacto ambiental maximizando o impacto econômico).

A automação tem como premissa, maximizar os potenciais do projeto, ou seja, o projeto deve ter estas capacidades. Os profissionais de engenharia e arquitetura não se tornam isentos de responsabilidade frente ao desempenho do edifício automatizado.

Porém, a automação é uma resposta a uma determinada situação. Até que esta seja elaborada faz-se necessário obter as informações, processá-las e então atuar. Dependendo destas etapas pode-se ter automações extremamente simples ou extremamente complexas.

O termostato do ar-condicionado é um sensor que permite comparar a temperatura do ambiente com a temperatura desejada e em função disso acionar ou desligar o equipamento.

Outros sistemas são bem mais complexos, pois dependem de uma série de variáveis e da combinação das mesmas antes de tomar uma decisão. Esta tomada de decisão às vezes é mais difícil, devido até mesmo à impossibilidade de previsão de combinação de variáveis, que exige um processamento que simula a inteligência e a capacidade de aprendizado humana. São os campos da Inteligência Artificial (IA).

Um bom sistema de automação passa despercebido, mas o usuário costuma ficar bastante descontente quando a automação não o atende ou restringe sua liberdade. Por este motivo, pesquisas passaram a ser desenvolvidas no sentido de os

sistemas de automação se adaptarem às necessidades particulares dos usuários, aprendendo com as intervenções destes, através de redes neurais, por exemplo. No modelo desenvolvido por Mahdavi e Pröglhöf (2008) para gerenciar a ventilação natural, o usuário é informado das decisões do sistema para atender às condições de conforto e salubridade do ar interno. Os exemplos de interação entre usuário e automação podem servir de aprendizado nas duas direções.

Esta possibilidade de aprendizado do sistema e de educação do usuário seria uma forma interessante de proporcionar conforto e bem-estar com uma otimização energética do edifício.

A automação também tem como princípio reduzir a influência do usuário, aproximando o desempenho energético da edificação real ao que foi projetado em simulações com um usuário ideal. Dessa forma, busca-se manter os mesmos níveis de eficiência do edifício simulado.

A implementação de soluções de edifícios inteligentes pode reduzir até 30% do consumo de água e até 40% do uso de energia e economizar de 10% a 30% nos custos de manutenção geral do edifício (APANACIENE, 2020)

### 2.5.1 Qualidade do ar interno

Uma questão importante de ser analisada é a Síndrome do Edifício Doente (SED). Esse termo surgiu da década de 70, através de relatos de usuários de edifícios comerciais ou institucionais, alegando problemas de saúde associados a permanência em ambientes fechados (SILVA, 2017).

A Organização Mundial da Saúde (OMS), definiu a SED ou do inglês *Sick Building Syndrome* (SBS), em 1982 como um problema de saúde pública, sendo caracterizado como "um conjunto de doenças causadas ou estimuladas pela poluição do ar em espaços fechados". Em decorrência de um ambiente fechado e condicionado artificialmente de maneira centralizada, sem a autonomia dos ocupantes, o ambiente acaba ocasionando desconforto aos usuários, assim como problemas de saúde.

Os sintomas ocasionados pela SED podem depender da sensibilidade das condições de cada indivíduo, sendo mais comum a irritação da mucosa, dor de cabeça, fadiga e dificuldade de concentração (SILVA, 2017) (FILIPE, 2001)

Em 1983, a OMS classificou os sintomas em 5 grupos (FILIPE, 2001):

1. Sensação de irritação nos olhos, nariz e garganta — dor, sensação de secura e ardor, irritação, rouquidão, problemas de voz;
2. Sintomas neurológicos e de saúde em geral — dores de cabeça, fadiga mental, preguiça, diminuição da capacidade de concentração, letargia, perda de memória, vertigens, intoxicação, náuseas e vômitos, cansaço;
3. Irritação cutânea — dor, sensação de prurido, vermelhidão e secura da pele;
4. Reações de hipersensibilidade não específicas — corrimento nasal e lacrimejamento, sintomas de asma em pessoas previamente não asmáticas, ruídos respiratórios;
5. Sintomas do olfato e do gosto — alterações sensitivas desses dois sentidos, percepções desagradáveis olfatórias ou gustativas.

Na maioria das edificações, as preocupações com o conforto térmico dos usuários se limitam à instalação de condicionadores artificiais. Para se manter as condições de conforto de maneira eficiente, as aberturas para o exterior são vedadas, ocasionando assim, a dificuldade de renovação do ar interno. De acordo com as evidências da importância da qualidade do ar para saúde humana, nota-se a importância da renovação de ar, assim como a manutenção dos sistemas de filtragem dos equipamentos de condicionamento térmico. Na pesquisa desenvolvida pelo National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) identificaram alguns fatores relacionados a qualidade do ar interior, e o fator mais associado a essa causa é a ventilação inadequada, aparecendo como a causa mais comum, em torno de 52% (AMBU, S. *et al.*, 2008).

Uma das maneiras mais comuns de avaliar a qualidade do ar interno se dá através da medição de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) do ambiente. Níveis elevados de  $\text{CO}_2$  podem indicar que a ventilação não está adequada e que há uma acumulação de poluentes no ar.

Além de não proporcionar uma qualidade de vida para os ocupantes em um ambiente saudável, esse efeito afeta diretamente a produtividade dos usuários. A renovação de ar da edificação é relevante para manter a qualidade do ar interno, promovendo assim o bem-estar, saúde e produtividade dos usuários.

Um dos fatores que mais contribuem para a qualidade do ambiente interno é o nível de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), esse é considerado o maior poluente em locais fechados, que acontece pela respiração do ocupante daquele espaço (SILVA *et al.*, 2014). De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) (2003) em lugares confinados com climatização artificial o máximo de  $\text{CO}_2$  permitido na sala é de 1000ppm equivalente a 0,1% da composição do ar. Acima desse valor o  $\text{CO}_2$  prejudica

o usuário, causando dor de cabeça, sonolência e desconforto, dessa forma diminuindo a concentração e o desempenho desse usuário (SILVA *et al.*, 2014).

Portanto, a concentração de CO<sub>2</sub> na pesquisa é de extrema importância, pois além de interferir no conforto e desempenho do ocupante, alteram também as condições do ambiente. Para que haja uma renovação de ar e assim manter os níveis de CO<sub>2</sub>, a NBR 16401, parte 3, exige a renovação do ar com a utilização de ar condicionado.

Entretanto, a entrada constante de ar externo em um ambiente pode afetar o controle climático, uma vez que as temperaturas internas e externas geralmente diferem. Por essa razão, é essencial regular a renovação do ar para evitar a perda ou ganho indesejado de calor no edifício.

Uma das alternativas para proporcionar a renovação de ar, sem comprometer o desempenho energético, quando as estratégias passivas não forem convenientes é a utilização de um sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor, usualmente chamada de MVHR (Mechanical Heat Recovery Ventilation). O trocador de calor ar-ar consiste em um equipamento que captura o ar viciado do ambiente interno e, antes que este seja descartado ao exterior, troca calor com o ar externo que está ingressando no ambiente, através de uma unidade na qual não há mistura entre as massas de ar. Nessa unidade, o ar viciado é aquecido ou resfriado pelo ar fresco que é capturado do exterior, através de um processo de troca de calor. Em seguida, o ar fresco e pré-condicionado pelo trocador de calor, é redistribuído para o ambiente interno, garantindo uma boa qualidade do ar, além de promover uma diminuição do consumo de energia para manter o ambiente em uma temperatura de conforto (PACHECO, 2013).

Além disso, conforme RASOULI *et al.* (2013), o trocador de calor ar-ar é recomendado para ambientes quentes e úmidos para desumidificar o ar interno. Segundo CARVALHO e Cunha (2019), a configuração básica do MVHR sensível e latente contribui para a renovação do ar interno assim como melhora o conforto térmico do edifício localizado nessas condições, o que justifica o uso do trocador de calor no projeto.

## 2.6 Ventiladores de teto

Uma estratégia básica de reestabelecer o conforto dos usuários em um ambiente interno em climas quente e úmido se dá com a utilização da movimentação do ar através do uso de ventiladores. Na pesquisa realizada por Raftery *et al.* (2019), foram testados 78 ventiladores para avaliação de suas velocidades. Os fatores analisados foram: o tamanho, diâmetro do ventilador, tipo, velocidade, direção (para cima ou para baixo), altura de instalação das lâminas em relação ao teto. Através dessa análise foi possível concluir que os elementos de maior influência para a eficiência da ventilação foram a velocidade do ar, o diâmetro e a direção do ar. A distância de montagem do ventilador em relação ao teto, também é uma medida relevante para sua eficiência, o equipamento deve ser instalado a uma distância menor ou igual a 0,2 vezes o diâmetro do ventilador.

A Figura 11 demonstra as zonas de fluxo de ar criadas por um ventilador de teto na direção de vento para baixo (Figura 11 a) e ascendente (Figura 11 b). Observa-se uma distribuição de ar mais uniforme quando o ventilador está direcionado para o teto. Embora as velocidades do ar sejam mais baixas do que no teste com vento descendente, dependendo do modelo de ventilador escolhido, é possível obter uma velocidade média ponderada para ocupantes sentados semelhante àquela obtida com a instalação inversa. Isso indica a viabilidade de alcançar condições de conforto utilizando o ventilador no modo ascendente.

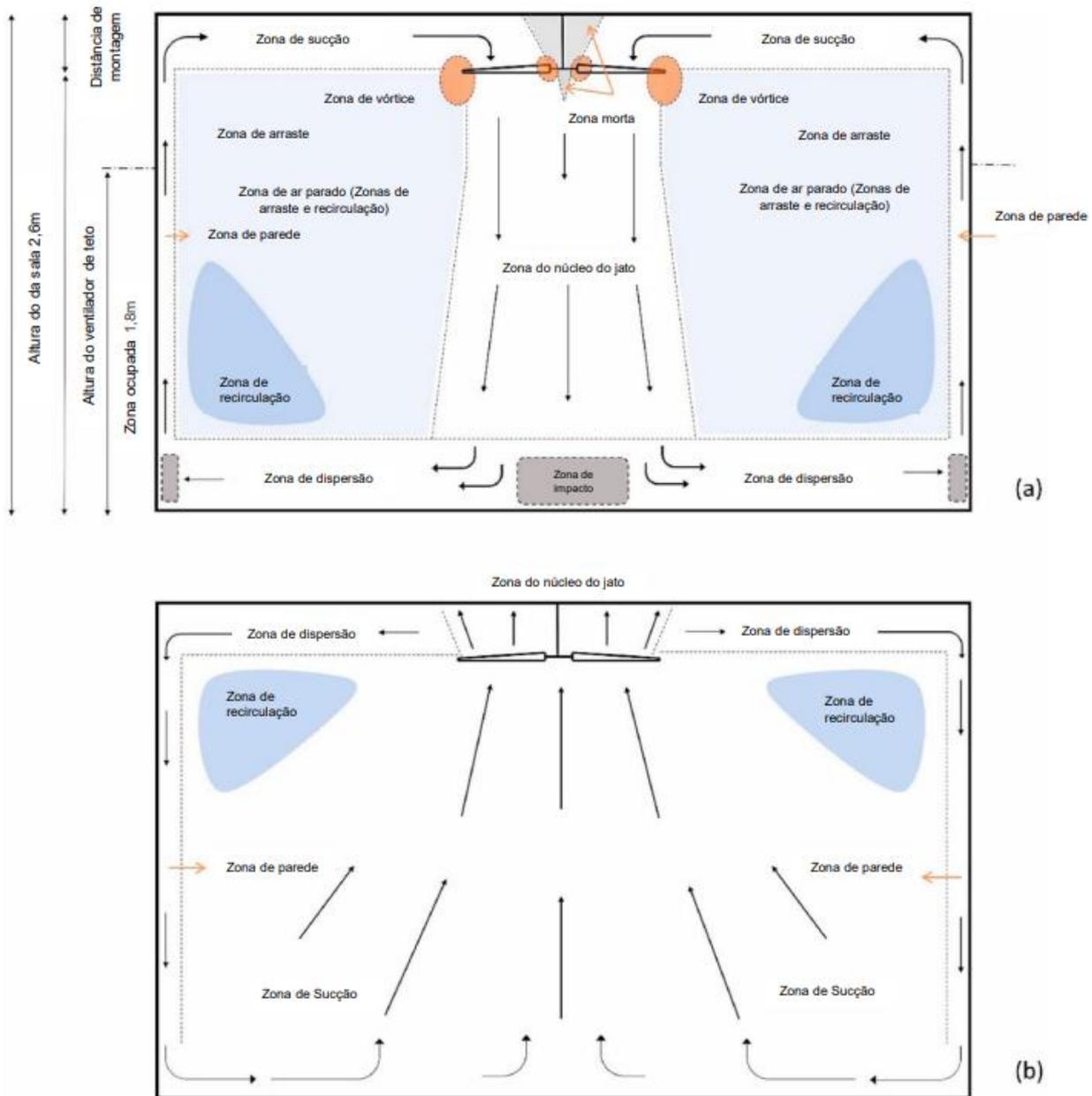


Figura 11 Diagramas esquemáticos das zonas de fluxo de ar geradas por um ventilador de teto com sopro para baixo (a) e sopro para cima (b). Fonte: Omrani *et al.* (2021)

A Figura 12 mostra a velocidade do ar com a movimentação do ar causada por um ventilador de teto no fluxo descendente, com diâmetro de 1,20, de três pás e 290 RPM. Nota-se que há uma grande diferenciação da distribuição da velocidade do ar e a velocidade do ar perto das paredes e teto é muito baixa, mas quando chega novamente ao encontro do ventilador, sua velocidade torna a desenvolver uma velocidade alta.

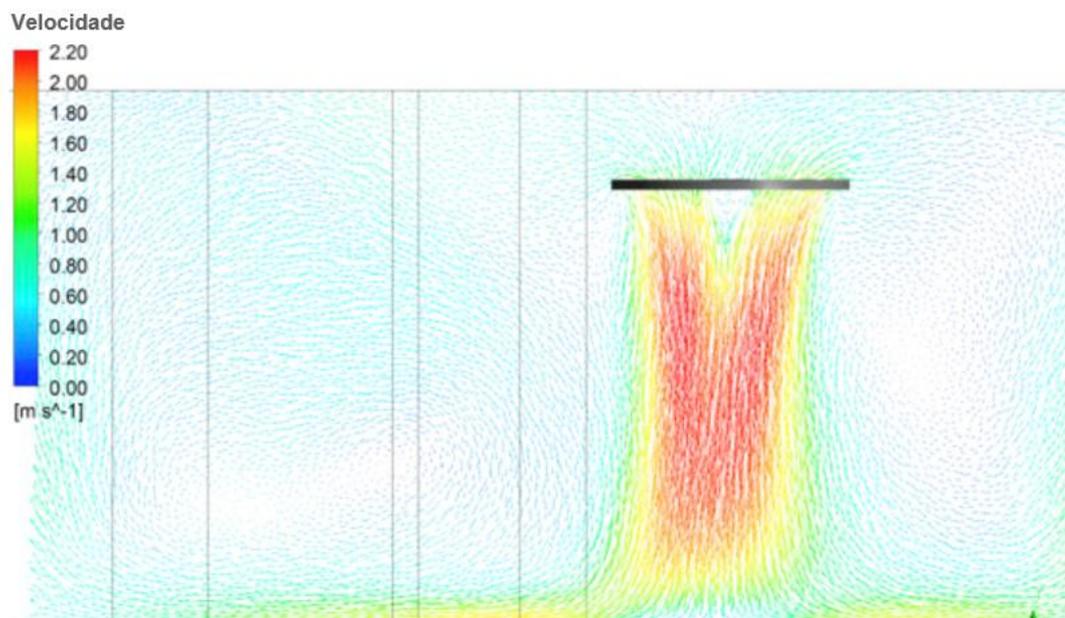


Figura 12 Fluxo de ar gerado pelo ventilador de teto. Fonte: Babich *et al.* (2017)

Um componente importante na vazão do ar pelos ventiladores de teto, se refere a inclinação adequada das pás, de acordo com estudos, a angulação que proporciona melhor movimentação é de  $6^\circ$  (AFAG *et al.* 2014) (LENIN *et al.*, 2021).

O número de pás tem efeitos significativos na escolha do ventilador, Adeeb *et al.* (2015) avaliou o efeito do número de pás no desempenho do ventilador de teto de 1,14m de diâmetro, comparando o número de pás em relação ao fluxo de ar e, conseqüentemente, à potência. Em referência ao trabalho, é possível identificar a diferenciação de acordo com o número de pás de um ventilador. Na Figura 14 consegue-se notar que o ventilador de três pás tem uma taxa de fluxo de massa maior que de duas pás, mas em relação ao de seis pás, a relação do incremento da taxa diminui, ou seja, a diferença significativa acontece de duas pás para três.

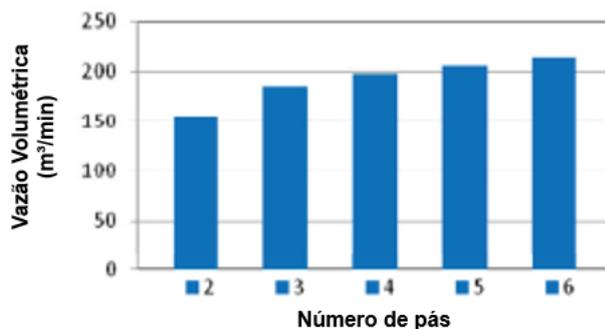


Figura 13 Taxa de fluxo volumétrico. Fonte: Adeeb *et al.* (2015)

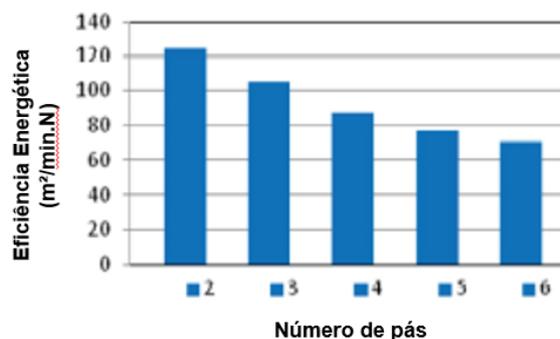


Figura 14 Eficiência energética. Fonte: Adeeb *et al.* (2015)

Em questão de eficiência energética, nota-se (Figura 13) que o ventilador de teto de duas pás possui o melhor desempenho em comparação com as demais, isso ocorre pela relação entre a vazão volumétrica e o torque do ventilador. Dito isso, o ventilador com menor número de pás é em suma mais eficiente pois o valor de torque é menor (ADEEB *et al.*,2015). Nesta relação entre eficiência e volume de ar, o ventilador com três pás tende à melhor relação custo/benefício.

### 3 Método

O presente estudo tem como objetivo geral verificar a influência da utilização da velocidade do ar com o uso de ventiladores de teto na economia de energia em uma edificação automatizada, através da simulação computacional. E para tanto se faz necessário definir as metodologias a serem empregadas para análise do conforto dos usuários, considerando as formas passivas de conforto e de condicionamento artificial; determinar as velocidades dos ventiladores de teto utilizados no projeto de acordo com o conforto dos ocupantes e com as normas estabelecidas; definir o *setpoint* do ar condicionado quando este estiver em uso simultâneo com os

ventiladores de teto e verificar o impacto dos ventiladores de teto no conforto térmico dos usuários e no consumo de energia.

### 3.1 Etapas da pesquisa

Para o desenvolvimento do estudo proposto, foi desenvolvido um fluxograma para melhor compreensão das etapas deste trabalho, conforme a Figura 15.

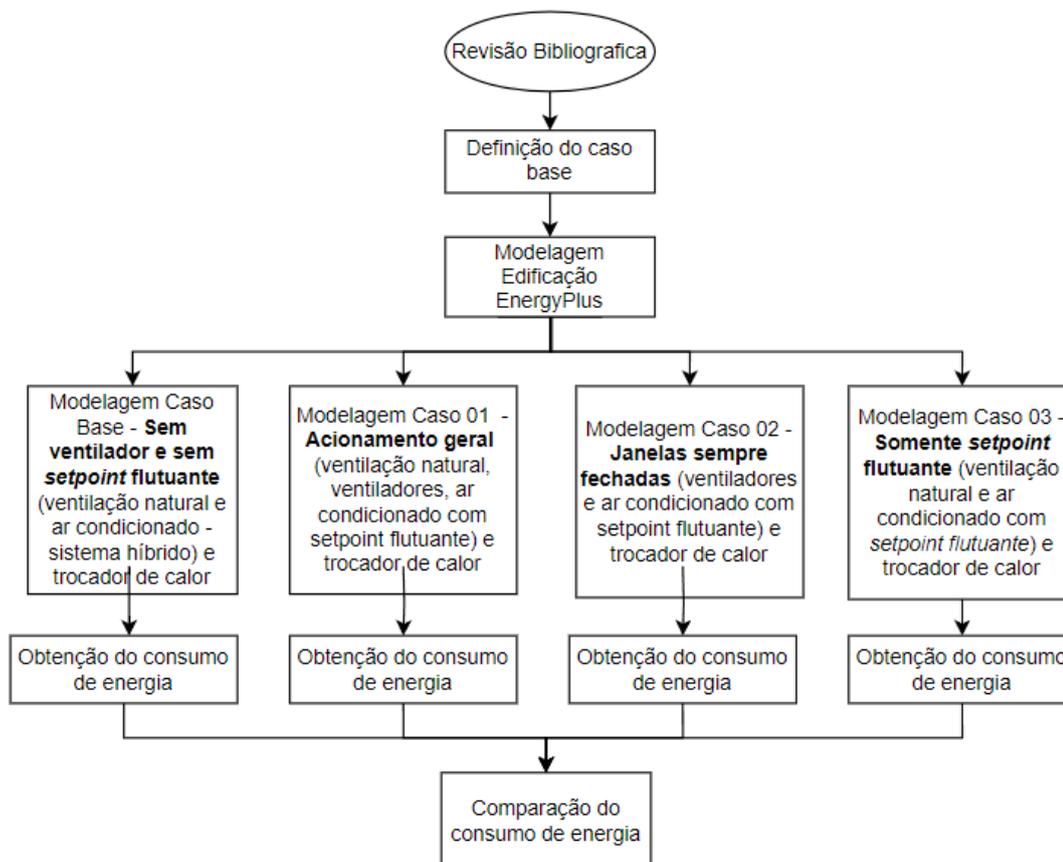


Figura 15 Fluxograma geral da pesquisa. Fonte: Autora (2024)

Conforme objetivo geral deste trabalho, busca-se identificar os benefícios da utilização do ventilador de teto no conforto e na economia de energia, a qual resulta de um menor uso do condicionamento artificial de ar no verão e a utilização de um maior *setpoint* do ar-condicionado, quando este for necessário. Para alcançar este objetivo foram realizadas diferentes simulações e comparados seus consumos de energia, com o Caso Base.

O **Caso Base** não possui ventiladores de teto nem a possibilidade de **setpoint flutuante do ar-condicionado**. A simulação do **Caso 01** tem como foco principal utilizar os **ventiladores de teto**, assim como o **setpoint flutuante** de acordo

com PMV, ou seja, priorizando o conforto dos ocupantes. A simulação do **Caso 02** foi considerado o prédio com **ventiladores de teto e setpoint flutuante, porém com as janelas sempre fechadas**. Essa condição tem como justificativa a questão do ruído externo, para casos em que esse fator atrapalhe as atividades internas dos ambientes de permanência prolongada e também para verificar a utilização do ar-condicionado para resfriamento junto com a utilização do ventilador de teto diante do acúmulo de calor gerado na ausência de ventilação natural, inclusive sem ocupação. O Caso 03 foi modelado para identificarmos o consumo de energia **sem a utilização do ventilador**, mas com o uso do ar-condicionado com o *setpoint* flutuante.

### 3.2 Definição das condições de conforto e velocidades do ar

Conforme já apresentado no item 2.2.1, Tabela 7 os limites aceitos para a velocidade do ar apresentam uma grande variabilidade em função, principalmente, do clima e tipo de uso do ambiente. Há uma grande parcela desses estudos que definem o conforto dos usuários em ambientes quente e úmidos com a preferência da alta velocidade do ar, com isso, o nosso estudo opta por simular alguns desses limites levando em conta as condições de conforto e a potencial economia de energia.

Tomando como referência a ASHRAE (2020), adota-se o método do Conforto Adaptativo para avaliar a condição de funcionamento quando o prédio está naturalmente ventilado e o PMV para avaliar quando o prédio está com as janelas fechadas, ou seja, os usuários tendem a se desconectar das condições externas. O impacto no consumo de energia pode ser medido através das situações que serão avaliadas conforme representadas na Figura 15.

Tomando como limite de velocidade 1,2 m/s conforme o método adaptativo referente a ASHRAE (2020) e considerando 90% de satisfeitos, os testes serão realizados a partir dessas premissas e serão testados com PMVs de mais ou menos 0,2, 0,5, 0,7 e 1,0 para uma análise ampla indo de um maior nível de exigência para um nível menor. Quando utilizado o PMV para velocidades maiores de 0,20m/s, os resultados do PMV retornam do algoritmo com ajustes do método SET (PMV ajustado). Este método é utilizado para contabilizar o efeito de resfriamento de velocidades do ar superiores ao máximo permitido pela zona de conforto analítico.

O PMV ajustado ( $PMV_{adj}$ ) para um ambiente com velocidade média do ar elevada (acima de 0,20m/s) é calculado conforme o **Apêndice D – Procedimento para avaliar o efeito de resfriamento de elevada velocidade usando o SET**, da ANSI/ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2017).

### 3.3 Definição do caso base

Esta pesquisa está associada com a construção do prédio NZEB\_UFPEL, que será construído na cidade de Pelotas/RS (Zona Bioclimática 2) e traz na sua gênese a adaptação ao clima local, conceitos de automação e gestão inteligente de dispositivos de ventiladores, trocadores de calor, condicionadores de ar e abertura de janelas através de sensores capazes de calcular a percepção de conforto dos usuários.

Esse projeto foi selecionado através do edital de chamada pública Procel Edifica – NZEB Brasil lançado pelo Procel/ Eletrobras, para seleção de projetos NZEB. Na definição do edital, NZEB foi definido como edificação de alta eficiência energética com geração distribuída associada, de fonte renovável, que alcança um balanço anual energético próximo a zero (ELETROBRAS, 2019).

Essa proposta selecionada pelo edital, testado e avaliado por meio de simulação computacional, foi capaz de produzir mais energia do que sua demanda. Além disso, traz a proposta de uso de Inteligência Artificial (IA) para fazer a gestão energética da edificação, através da automação de sistemas de aberturas, sombreamento, ventilação natural, ar-condicionado e iluminação artificial (UFPEL, 2020). O principal objetivo da automação é garantir no edifício construído o mesmo desempenho obtido por simulação em um cenário de usuário ideal.

Cabe destacar que a simulação submetida ao Edital não levou em consideração o uso de trocador de calor e tampouco o uso dos ventiladores de teto, seu efeito para o conforto dos usuários e o aumento do *set-point* do ar-condicionado, que é o que propomos nessa pesquisa.

O projeto está localizado próximo à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFPel, junto a vários Campus da Universidade (Figura 16). Ele possui uma metragem quadrada de 580,68m<sup>2</sup>, sendo distribuídos em três pavimentos. O pavimento térreo

possui uma sala de aula e uma recepção, juntamente com banheiros. No segundo pavimento se encontra um Ateliê e o laboratório do LINSE e o último pavimento é constituído de dois Ateliês.



Figura 16 Implantação. Fonte: autora sobre imagem do Google Maps (2024)



Figura 17 Fachada do projeto. Fonte: Proplan UFPel (2024)

Pelotas se encontra na Zona Bioclimática 2, zona esta onde se encontra também a cidade de Camaquã, localidade utilizada para as simulações já existentes do prédio em questão. A utilização da localidade de Camaquã se justifica por não haver o arquivo climático da cidade de Pelotas referenciado nas bases de dados do LABEEE (LABEEE, 2023). Por estar inserida em um clima de maior sazonalidade do país, marcado por invernos com temperaturas abaixo dos 10°C e verões quentes e úmidos com temperaturas acima de 30°C, as estratégias construtivas propostas por este projeto buscam redução das perdas e aumento dos ganhos de calor no inverno e a redução dos ganhos e o aumento das perdas de calor no verão.

Para isso, foi necessária a devida orientação solar, buscando a máxima penetração do sol no inverno e proteção solar no verão, oferecida pelos brises (componentes de sombreamento). Ventilação cruzada, obtida pela implantação de aberturas com alturas diferentes em faces opostas, ao mesmo tempo que no inverno proporcionam elevada estanqueidade. Componentes de paredes, coberturas e aberturas com baixa transmitância térmica possibilitando manter o calor no inverno e, quando necessária refrigeração, mantendo o ambiente refrigerado sem perdas para o exterior e nem ganhos da temperatura externa.

A partir dessa análise o prédio teve como fundamento central manter as condições internas de conforto por meios naturais na maior parte do tempo.

Sabe-se de antemão que um prédio extremamente eficiente demandará menos do sistema de condicionamento de ar. Além disso, a sazonalidade característica da ZB2 faz com que apenas uma fração do tempo exija refrigeração artificial, o que deve minimizar os efeitos do uso do ventilador de teto nos resultados.

Entretanto, trata-se de uma aplicação prática que deverá ser monitorada após a construção e a metodologia a ser desenvolvida para realizar estes experimentos se constituem a principal contribuição científica deste trabalho, que poderá ser aplicado em outros tantos e diversos projetos e climas.

### **3.4 Ventiladores de teto: Dimensionamento**

Para estabelecer a quantidade e disposição dos ventiladores foi utilizado o aplicativo desenvolvido por Raftery *et al.* (2019), produto de uma ampla pesquisa realizada em laboratório. O aplicativo tem como intuito fornecer a abrangência da

velocidade do ar dos ventiladores de teto e demonstrar o local de maior e menor velocidade do vento.

O teste foi feito na sala, com dimensões de 7,65mx11,00m, e o aplicativo demonstra a distribuição de quatro ventiladores de teto com diâmetro de 1,22m, definindo uma célula onde a velocidade varia de 1,88m/s a 0,54m/s, sendo a maior velocidade ocorrendo na zona abaixo do ventilador e a menor nas bordas da célula.

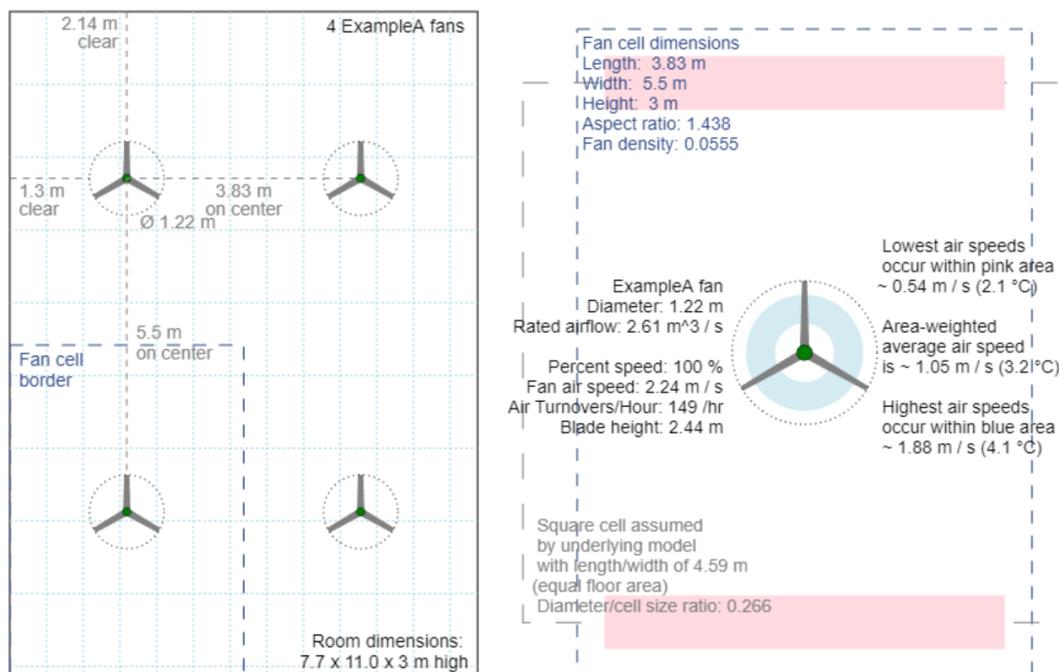


Figura 18 Estudo da distribuição de ventiladores de teto. Fonte: <https://centerforthebuiltenvironment.github.io/fan-tool/> acesso em 02/03/2023

Do gráfico acima, pode-se inferir que há uma considerável diferença de velocidade e, para que não ocorra esse desconforto pelos usuários, foram dispostos mais equipamentos na sala. Para calcular a velocidade predominante na sala, foi utilizada uma equação desenvolvida por Raftery *et al.* (2019), que possibilita descobrir a velocidade predominante na célula na altura dos ocupantes sentados. Para estabelecer essa velocidade é necessário definir o diâmetro do ventilador, altura de fixação do mesmo e dimensões da célula que ele estará inserido.

$$SO_{avg} = 0,99 \times \frac{D}{R} - 0,06 \times \frac{H}{D} + 0,11 \times \frac{D}{1,7} + 0,024 + 0,250 \quad [\text{Eq.04}]$$

$$SF_{rated} = \frac{4 \times Q}{\pi \times D^2} \quad [\text{Eq.05}]$$

Onde:

$SO_{avg}$  é a média ponderada da área;

$SF_{rated}$  velocidade do ar do ventilador (m/s);

$H$  é a altura de instalação do ventilador (m);

$D$  é o diâmetro do ventilador (m);

$R$  é o tamanho da célula que está inserido o ventilador (m)

A velocidade média ponderada do ar estimada para um ocupante sentado é a multiplicação desses dois valores encontrados.

Através de pesquisas realizadas nos principais sites de compra, foi possível constatar que os modelos vendidos no Brasil possuem, em média, diâmetro de 0,90m a 1,20m.

O critério para definição do equipamento foi a relação entre consumo e vazão, ou seja, apresentar um baixo consumo com uma alta vazão. Em busca de dados de potência e especificação de ventiladores, foi encontrada uma tabela do INMETRO com especificação das vazões de ventiladores e consumo. Com o uso dessas informações, foi possível escolher o equipamento mais eficiente, ou seja, com a melhor relação entre vazão média do ar e consumo.

Há dois ventiladores na melhor eficiência na velocidade alta, o ventilador ARNO VX10 e ALISEU OCTOPUS (Tabela 8). O ventilador OCTOPUS foi descartado por se tratar de um equipamento de alto custo. É importante destacar que o consumo disponibilizado pela tabela é medido nas testagens reais, e essa medida é bem menor que a disponibilizada pela especificação dos equipamentos.

**Tabela 8 Relação dos ventiladores de teto mais eficiente**

INMETRO INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - VENTILADORES DE TETO										Velocidade Alta			Velocidade Média			Velocidade Baixa					
[1] A Eficiência Energética (E) de ventiladores é a razão entre a vazão média de ar produzido (m <sup>3</sup> /s) e a potência elétrica (W). [2] Consumo de Energia mediante o uso do equipamento por 1 hora por dia por mês. Atualizada em 13/03/2023 v.1 <b>ATENÇÃO:</b> [3] Esta tabela não substitui a lista de produtos registrados no Inmetro, publicada na página <a href="https://registro.inmetro.gov.br/registro">https://registro.inmetro.gov.br/registro</a> , porém a eficiência dos produtos aqui especificados segue constantes de responsabilidade do fornecedor. [4] Para solicitação de alterações na Tabela, o fornecedor deve utilizar o canal <a href="mailto:atendimento@inmetro.gov.br">atendimento@inmetro.gov.br</a> , utilizando como título "Solicitação de Alteração na Tabela de Ventiladores de Teto - (NOME DA EMPRESA) - BIA/AT". [5] Para consultar os modelos contemplados com o Selo PROCEL de Economia de Energia, acesse a página eletrônica do PROCEL: <a href="http://www.procel.com.br">www.procel.com.br</a>										▶ Mais Eficiente			▶ Menos Eficiente								
										0,019	< E <sub>1</sub>	0,022	< E <sub>2</sub>	0,020	< E <sub>3</sub>	0,019	< E <sub>4</sub>	0,022	< E <sub>5</sub>	0,018	< E <sub>6</sub>
										0,017	< E <sub>1</sub>	0,019	0,020	< E <sub>2</sub>	0,020	0,018	< E <sub>4</sub>	0,020	0,018	< E <sub>6</sub>	0,018
										0,015	< E <sub>1</sub>	0,017	0,018	< E <sub>2</sub>	0,020	0,016	< E <sub>4</sub>	0,018	0,013	< E <sub>6</sub>	0,015
0,014	< E <sub>1</sub>	0,016	0,016	< E <sub>2</sub>	0,018	0,013	< E <sub>4</sub>	0,016	0,011	< E <sub>6</sub>	0,013										
0	< E <sub>1</sub>	0,014	< E <sub>2</sub>	0,016	< E <sub>3</sub>	0,016	< E <sub>4</sub>	0,016	< E <sub>5</sub>	0,016	0,013										
FORNECEDOR	MARCA	NOME DO MODELO	Nº DE REGIST.	TENSÃO	DIÂMETRO (ø)	Nº DE PIS	MATERIAL DA	TIPO DE CONTROLE DE VELOCIDADE	QUANTIDADE DE VELOCIDADES	VAZÃO MÉDIA DE AR (m³/s)			EFICIÊNCIA (m³/s/W)			CONSUMO DE ENERGIA (W/hora)			FAIXA DE CLASSIFICAÇÃO		
										AL	MÉ	BA	AL	MÉ	BA	AL	MÉ	BAI	AL	MÉ	BAI
Aliseu Tecnologia	Aliseu	Octopus	010193022	220	92,0	8	Plástico	Outro	6	2,82	2,59	1,48	0,052	0,059	0,208	162	0,79	0,21	A	A	A
SEB do Brasil	ARNO	VX10, VX12, VX21	052280022	220	110,0	3	Plástico	Outro	6	2,17	1,90	1,43	0,063	0,108	0,223	0,79	0,55	0,19	A	A	A

Fonte: INMETRO (2023)

A potência do ventilador foi obtida através da eficiência disponibilizada pela Tabela 8 do INMETRO. Como esse valor refere-se a razão entre a vazão média de ar produzido (m<sup>3</sup>/s) e a potência (W), sendo assim, se obteve a potência do equipamento para cada velocidade do ventilador ARNO VX10.

A partir dessas informações, calculou-se a velocidade do ar na altura dos ocupantes e conforme o tamanho da célula contidas nas salas do Anexo FAUrb (Tabela 9). O tamanho da célula em metros (m) inserida na tabela se refere a variável "R" da

equação 04, ao qual está calculada o SO e SF para obter a velocidade média da sala na altura dos ocupantes sentados.

**Tabela 9 Cálculo da velocidade média das células**

Marca dos Ventiladores - Modelo	Características ventiladores				Cálculo				
	Potência (W)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Diâmetro (m)	Quantidade de pás	Célula (m)	Altura de instalação (m)	SO	SF	SO x SF (m/s)
Arno VX10	26,33	2,17	1,1	3 pás	2,75	2,75	0,59	2,28	1,35
	26,33	2,17	1,1	3 pás	3	2,75	0,56	2,28	1,28
	26,33	2,17	1,1	3 pás	3,65	2,75	0,49	2,28	1,13
Arno VX10	18,33	1,98	1,1	3 pás	2,75	2,75	0,59	2,08	1,23
	18,33	1,98	1,1	3 pás	3	2,75	0,56	2,08	1,16
	18,33	1,98	1,1	3 pás	3,65	2,75	0,49	2,08	1,03
Arno VX10	6,33	1,43	1,1	3 pás	2,75	2,75	0,59	1,51	0,89
	6,33	1,43	1,1	3 pás	3	2,75	0,56	1,51	0,84
	6,33	1,43	1,1	3 pás	3,65	2,75	0,49	1,51	0,74

Fonte: Autora (2023)

Com a análise do ventilador de teto escolhido e utilizando a equação de Raftery *et al.* (2019), foi possível verificar a velocidade do ar nos ocupantes de acordo com a célula inserida. Considerando uma célula de 2,75m e a altura de instalação afastado 0,31m do teto (menor que 0,2 vezes o diâmetro afastado do teto) a velocidade predominante nesse espaço na altura dos ocupantes sentados é de 1,35m/s com potência de 26,33W. Para uma velocidade média, alcançou-se 1,23m/s com potência de 18,33W e para uma velocidade de 0,89m/s com potência de 6,33W. A potência e vazão consideradas nesses cálculos, se obteve através da planilha desenvolvida pelo INMETRO.

Portanto, a velocidade do ar alcançou um máximo de 1,35m/s, atendendo ao espectro desejado de variações de velocidade do ar. Esse valor se justifica por se tratar de um modelo convencional de ventilador de teto, onde obteve-se esse valor máximo, inclusive foi a máxima velocidade do ar medido na pesquisa De Vecchi *et al.* (2013) realizado em salas de aula, como já enfatizado.

A partir da caracterização do ventilador, foi possível estabelecer a posição e a quantidade desses equipamentos nos ambientes a serem analisados. Os locais a serem analisados nessa pesquisa são aqueles em que os usuários ocupam a maior parte do tempo, ou seja, ambientes de permanência prolongada, locais que consomem maior parte da energia para se manter em conforto. Na Figura 19, 20 e 21 mostra-se os ambientes do Anexo FAUrb que serão analisados juntamente com a

localização dos ventiladores de teto. A Figura 22 mostra em corte as relações de altura e pé-direito.

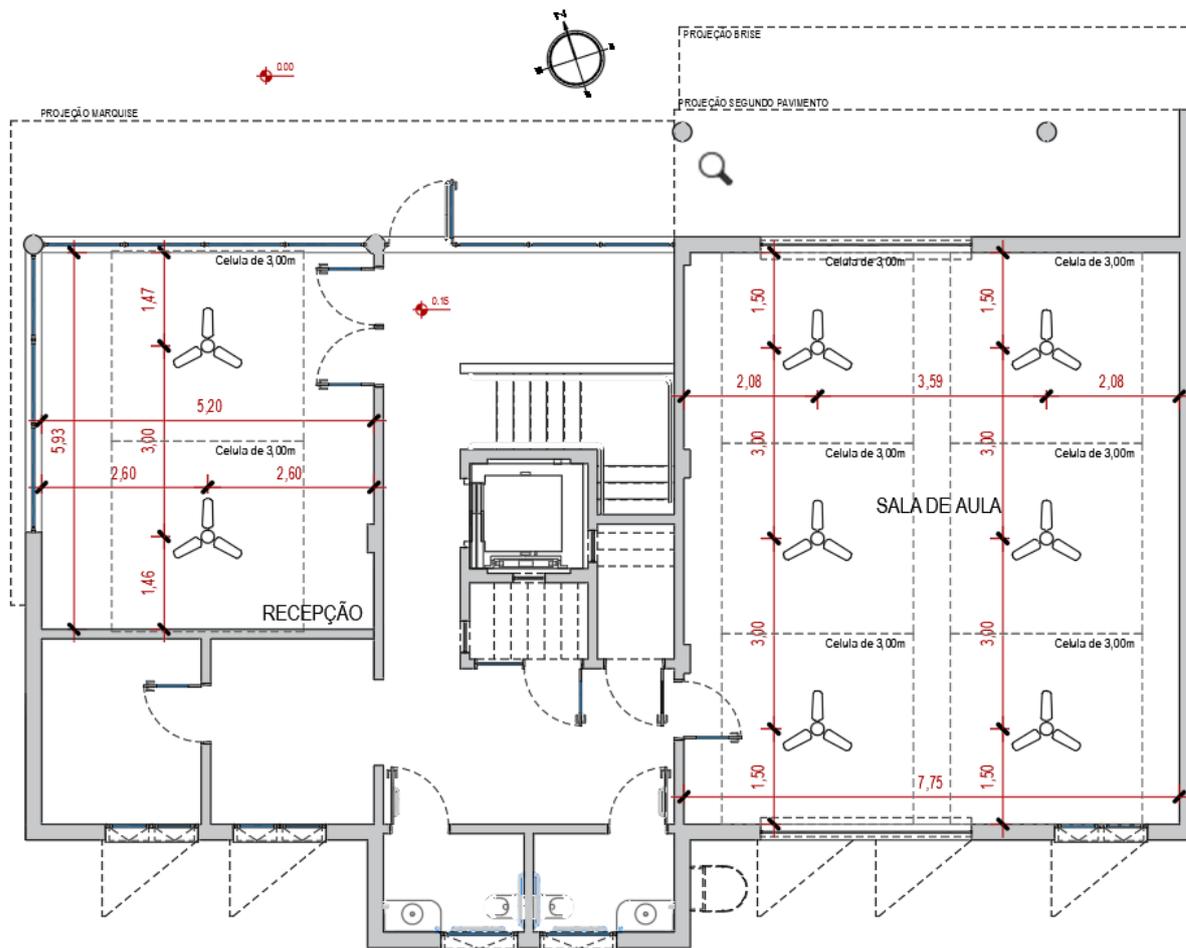


Figura 19 Planta baixa do pavimento térreo. Fonte: Autora (2023)

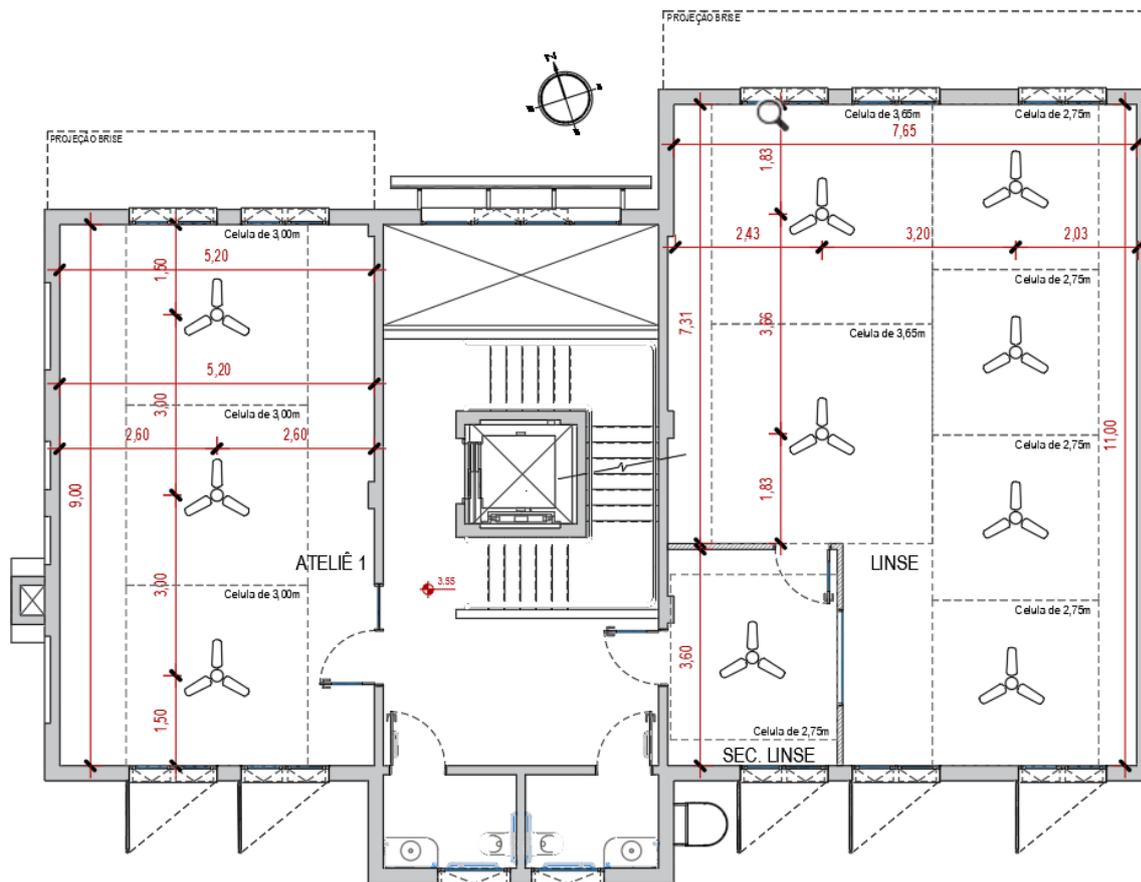


Figura 20 Planta baixa do segundo pavimento. Fonte: Autora (2023)

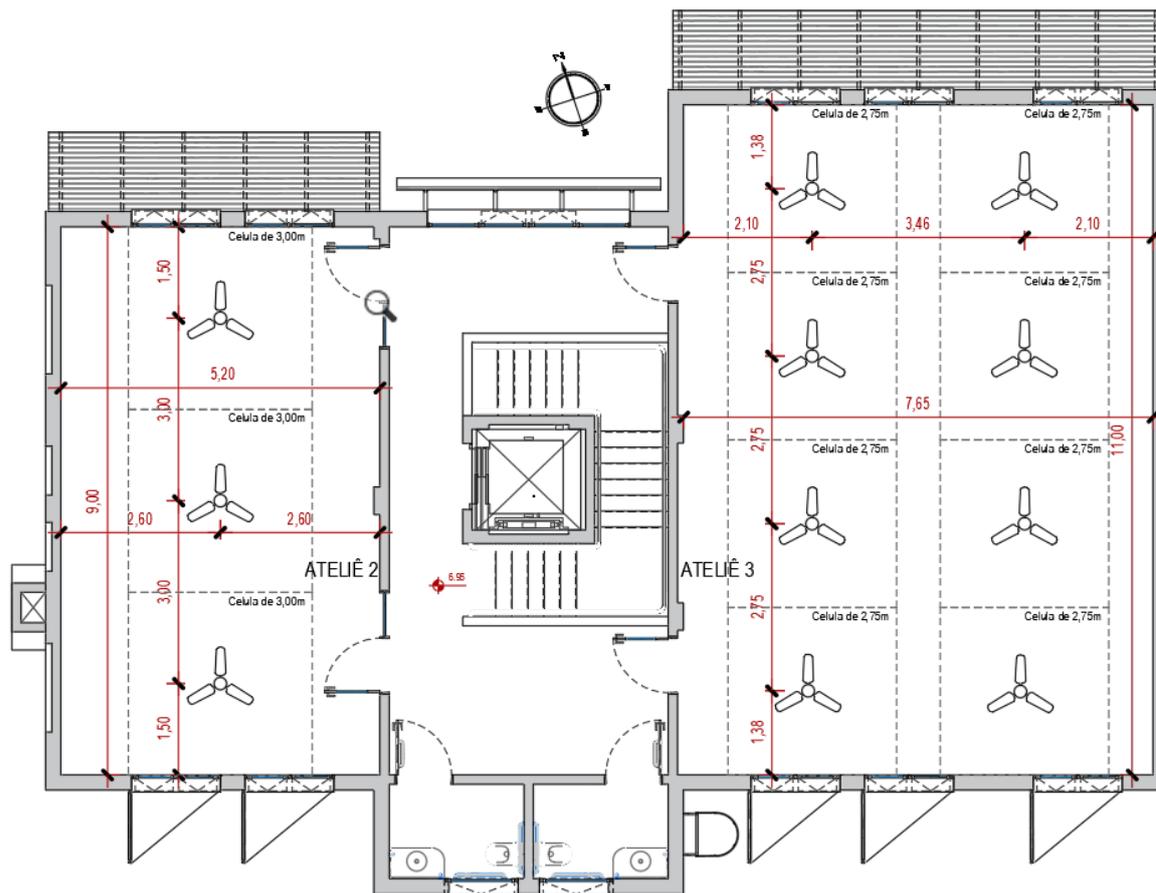


Figura 21 Planta baixa do terceiro pavimento. Fonte: Autora (2023)



Figura 22 Corte longitudinal do prédio. Fonte: Autora (2023)

### 3.5 Modelagem no EnergyPlus

Para a simulação do prédio em questão, será utilizado o software *EnergyPlus*, sendo modelado a volumetria no programa *SketchUp* 2017 associado ao Plugin *Euclid* versão 9.4.3 (Figura 23).

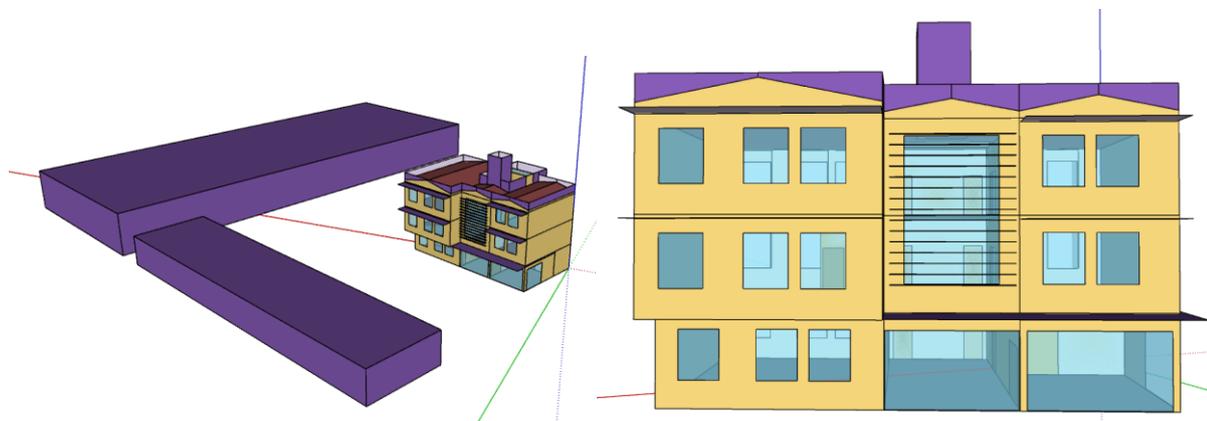


Figura 23 Modelagem do prédio no plugin Euclid. Fonte: Autora (2024)

Após a definição do modelo 3D com as características das superfícies e da zona térmica, o modelo foi exportado para o *EnergyPlus* 9.4.0. Nesse momento estabelecemos também os valores de agenda e características dos materiais empregados na edificação (Tabela 10).

Tabela 10: Características dos materiais utilizados na simulação

Elemento	Composição	espessura (cm)	condutividade $\lambda$ (W/m°C)	densidade $\rho$ (kg/m³)	calor específico $c$ (kJ/kgK)	Absortância Térmica	Absortância Solar	Absortância Visível	Transmitância térmica $W(m^2 \cdot ^\circ C)$	
parede externa	argamassa interna	2,00	1,15	2000	1,00	0,90	0,20	0,20	0,74	
	tijolo furado	9,00	0,90	1400	0,92	0,90	0,80	0,80		
	lã de rocha	3,00	0,05	50	0,75					
	tijolo furado	9,00	0,90	1400	0,92	0,90	0,80	0,80		
	argamassa externa	2,00	1,15	2000	1,00	0,90	0,30	0,30		
parede interna	argamassa interna	2,00	1,15	2000	1,00	0,90	0,20	0,20	2,50	
	tijolo furado	9,00	0,90	1400	0,92	0,90	0,80	0,80		
	argamassa interna	2,00	1,15	2000	1,00	0,90	0,20	0,20		
Cobertura	Laje maciça	10,00	1,75	2400	0,50	0,90	0,20	0,20	0,70	
	lã de rocha	5,00	0,05	50	0,75					
	câmara de ar	40,00	Resistência térmica (m²K/W) 0,14							
	telha alumínio	0,50	230	2700	0,88	0,20	0,20	0,20		
Laje interna	Piso cerâmico	0,50	1,05	2000	0,92	0,90	0,20	0,20	3,50	
	argamassa	2,00	1,15	2000	1,00	0,90	0,20	0,20		
	Laje maciça	10,00	1,75	2400	0,50	0,90	0,20	0,20		
Porta	Madeira	3,00	0,15	500	2,30	0,90	0,20	0,20	2,70	

Fonte: Autora de acordo com NBR 15220 (2003)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Valores originais do projeto calculados pela NBR 15220-2 (2005), enquanto esta era vigente

A edificação será construída com fechamento de paredes duplas de tijolos furados assentados à cutelo (9cm de espessura), rebocadas das duas faces com espessura de 2cm e com lã de rocha de 3cm entre elas, essa composição tem como transmitância final de  $0,74W(m^2.K)$ . No EnergyPlus, a parede será modelada como uma parede equivalente homogênea que apresenta as mesmas propriedades de resistência térmica e capacidade térmica, conforme Ordenes *et al.* (2003).

O projeto de cobertura do “Anexo FAUrb” tem como fechamento em laje de concreto armado, lã de rocha com 5cm de espessura logo acima da laje, seguida de uma câmara de ar média de 40cm e fechada com telha de alumínio de 5mm, constituindo assim uma transmitância de  $0,70W(m^2.K)$ .

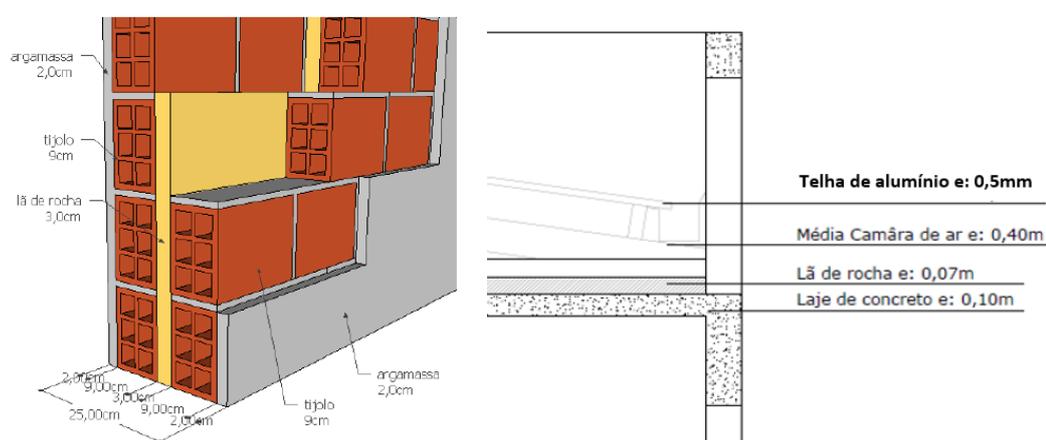


Figura 24 – Composição dos materiais empregados na edificação

As janelas utilizadas no projeto são de vidro duplo e com caixilhos de boa qualidade para proporcionar uma adequada vedação da edificação. Os vidros empregados nas esquadrias do projeto são constituídos de vidro laminado 3mm mais 3mm, câmara de ar de 9mm e vidro temperado de 5mm. Na cobertura, onde se tem uma iluminação zenital, o vidro a ser utilizado é o vidro laminado incolor 4+4 mm, totalizando 8 mm (Tabela 11).

Tabela 11: Características dos materiais utilizados na simulação

		Transmitância à radiação solar	Refletância à radiação solar na face 1	Refletância à radiação solar na face 2	Transmitância à radiação solar no espectro visível	Refletância à radiação visível na face 1	Refletância à radiação visível na face 2	Emissividade em ondas longas na face 1	Emissividade em ondas longas na face 2	Condutividade de (W/mK)
vidro cobertura	vidro laminado 8mm	0,11	0,24	0,31	0,13	0,28	0,38	0,84	0,84	1
vidros externos	vidro laminado 6mm	0,27	0,2	0,305	0,401	0,229	0,111	0,837	0,12	1
	vidro temperado 5mm	0,295	0,331	0,5	0,666	0,124	0,111	0,837	0,037	1

Fonte: [https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/catalogo-propriedades-vidros-comercializados-brasil-13032015\\_v2.pdf](https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/catalogo-propriedades-vidros-comercializados-brasil-13032015_v2.pdf)

Através das Tabelas 12 e 13, é possível identificar as principais diferenciações entre as simulações consideradas no modelo base e as simulações que serão realizadas para a pesquisa. Na Tabela 13 a parte destacada em amarelo serão as modificações realizadas da simulação levando em consideração o conforto dos usuários pelo método adaptativo ou analítico.

Tabela 12: Características da simulação base

Parâmetros		Variáveis	Referência
Funcionamento das aberturas sem ocupação		abertas para ventilação natural	quando a temperatura externa está na faixa do conforto adaptativo
Funcionamento das aberturas		abertas para ventilação natural	Conforto Adaptativo
Temperatura de SetPoint		heating 22°C e cooling 24°C	NBR 16401
Padrão de uso	Ocupação	Das 8-12h e das 13:30-17:30h e das 19-22h	ocupado 100% dos dias úteis excluindo feriados e finais de semana
	Equipamentos		
	Iluminação		
Elementos Construtivos	Piso	Cerâmico 5mm	INI-C 2022
	Alvenaria Externa	argamassa+tijolo furado+lã de rocha+tijolo furado+argamassa	
	Alvenaria Interna	argamassa+tijolo furado+argamassa	
	Vidro	6mm+9mm (ar)+5mm	
	Cobertura	laje em concreto+lã de rocha+câmara de ar+telha alumínio	
Contato do piso com o solo		há contato do térreo com o solo - configurado pelo GroundDomain:Slab	
Entorno		a volumetria do entorno foi considerada na simulação	
Densidade	Ocupação	de acordo com o layout estabelecido em projeto	
		130W	NBR 16401
	Carga de equipamento	clo -dinâmico	ASHRAE 2020
		15 W/m <sup>2</sup>	INI-C 2022
Carga de iluminação		de acordo com projeto de iluminação	
Renovação de ar		0,0075 m <sup>3</sup> /s/pessoa	Resolução-RE nº 9
Ventiladores de teto		não foi considerado	
Sistema de ar condicionado	Eficiência do sistema		COP 3,24 W/W
	Capacidade de atendimento		100% horas de funcionamento
Trocador de calor		utilizado quando o CO2 está acima do limite	

Fonte: Autora (2023)

Tabela 13: Características da simulação da pesquisa

Parâmetros		Variáveis	Referência
Funcionamento das aberturas sem ocupação		abertas para ventilação natural	quando a temperatura externa está na faixa do conforto adaptativo
Funcionamento das aberturas		abertas para ventilação natural	Conforto Adaptativo
Temperatura de SetPoint		estabelecido conforme PMV	
Padrão de uso	Ocupação	Das 8-12h e das 13:30-17:30h e das 19-22h	ocupado 100% dos dias úteis excluindo feriados e finais de semana
	Equipamentos		
	Iluminação		
Elementos Construtivos	Piso	Cerâmico 5mm	INI-C 2022
	Alvenaria Externa	argamassa+tijolo furado+lã de rocha+tijolo furado+argamassa	
	Alvenaria Interna	argamassa+tijolo furado+argamassa	
	Vidro	6mm+9mm (ar)+5mm	
	Cobertura	laje em concreto+lã de rocha+câmara de ar+telha alumínio	
Contato do piso com o solo		há contato do térreo com o solo - configurado pelo GroundDomain:Slab	
Entorno		a volumetria do entorno foi considerada na simulação	
Densidade	Ocupação	de acordo com o layout estabelecido em projeto	
		130W	NBR 16401
		clo -dinâmico	ASHRAE 2020
	Carga de equipamento	15 W/m <sup>2</sup>	INI-C 2022
	Carga de iluminação	de acordo com projeto de iluminação	
Renovação de ar		0,0075 m <sup>3</sup> /s/pessoa	Resolução-RE nº 9
Ventiladores de teto		utilizado o seu efeito nas simulações	
Sistema de ar condicionado		Eficiência do sistema	COP 3,24 W/W
		Capacidade de atendimento	100% horas de funcionamento
Trocador de calor		utilizado quando o CO2 está acima do limite	

Fonte: Autora (2023)

### 3.5.1 Padrão de ocupação, equipamentos e iluminação artificial

O edifício em questão será utilizado como parte da Universidade Federal de Pelotas, e a ocupação será para utilização de salas de aula e uma sala será para o laboratório do Linse. Os horários definidos na simulação foram de acordo com os horários das aulas, ou seja, nos períodos diurnos das 8h às 12h e das 13:30 às 17:30h e no período noturnos das 19h às 22h30, com ocupação de 100% nos períodos definidos. Para os finais de semana e feriados, os ambientes foram considerados desocupados, não foram consideradas férias, ou seja, no período avaliado de verão (dezembro a março) o prédio foi simulado ocupado normalmente.

A quantidade de pessoas estabelecida em cada sala será de acordo com o *layout* estabelecido em projeto, conforme tabela a seguir:

Tabela 14: Quantidade de pessoas por sala

Pavimento	Zona Térmica	Ocupação
primeiro pavimento	Recepção	13
	Sala de Aula	29
segundo pavimento	Ateliê 1	23
	Sec. LINSE	1
	LINSE	12
terceiro pavimento	Ateliê 2	21
	Ateliê 3	29

Fonte: autor (2024)

As luminárias que serão empregadas no prédio, serão com corpo, refletor e aletas fabricadas em chapa de aço tratada e pintada em epóxi branco, de sobrepor. Refletor facetado em alumínio anodizado brilhante com intuito de diminuir o ofuscamento dos usuários, incluso duas lâmpadas LED tubular dimerizáveis 18 W.

Para definição da iluminação artificial no *EnergyPlus*, foi considerado o projeto desenvolvido para iluminação e então considerado a potência instalada para cada ambiente, conforme tabela a seguir.

Tabela 15: Iluminação

Ambiente	W/m <sup>2</sup>
Recepção	6,44
Circulação térreo	6,63
Sala de Aula	8,31
Ateliê 1	9,23
Circulação Segundo Pavimento	5,22
Secretaria Linse	8,06
Linse	7,76
Ateliê 2	9,23
Circulação Terceiro Pavimento	6,88
Ateliê 3	8,5

Fonte: autor (2024)

A fração radiante foi definida como 0,72 e para a fração visível 0,18, essas características define luminárias de sobrepor (DESIGNBUILDER, 2023).

Para a densidade de potência de equipamentos, estabeleceu-se 15,0 W/m<sup>2</sup>, de acordo com a INI-C para edificações educacionais como uma condição de referência, essa definição se justifica por não ter como sabermos realmente a quantidade de equipamentos que serão utilizados nas salas de aula, por isso, adota-se uma referência.

### **3.5.2 Configuração da temperatura do solo - GroundDomain:Slab**

O objeto GroundDomain:Slab é uma ferramenta importante para a modelagem adequada da transferência de calor entre o solo e o piso em edifícios. Ao considerar adequadamente as propriedades termofísicas do solo e as características do elemento construtivo em contato com o solo, a modelagem energética do edifício pode ser mais precisa e levar a resultados mais confiáveis.

Essa ferramenta é útil para modelar adequadamente a transferência de calor entre o solo e a laje do piso do edifício, o que pode afetar significativamente o desempenho energético. Nesse contexto, como a edificação proposta será simulada de maneira global, essas trocas de temperatura serão necessárias para que a simulação tenha um resultado o mais próximo da realidade.

Para a modelagem do objeto GroundDomain:Slab, é necessário especificar as propriedades termofísicas do solo, bem como as características da laje do piso, incluindo sua condutividade térmica, espessura e resistência térmica superficial.

É possível acoplar várias superfícies horizontais pertencentes a diferentes zonas térmicas em um único domínio de solo para simulação de superfícies em contato com o solo. Para atingir a convergência das temperaturas no domínio, são utilizadas iterações. O modelo estabelecido define uma superfície de área equivalente que representa todas as superfícies horizontais acopladas ao domínio do solo. Para o cálculo de balanço de calor da superfície, o programa faz uma iteração com o solo e assim, fornece temperaturas atualizadas para o objeto OtherSideConditionsModel (MAZZAFERRO, MELO e LAMBERTS, 2015).

Para a modelagem desse objeto é necessário fornecer valores de referência do solo de acordo com o local onde está inserido o projeto. O município de Pelotas, situa-se sobre a Planície Costeira do Rio Grande do Sul, rodeada pela Laguna dos Patos e

o Canal São Gonçalo e apresenta características de solos arenosos (CECCONELLO *et al.*, 2019), conforme valores mencionados abaixo.

Tabela 16: Valores de referência para o solo

Solo Arenoso (40% de vazios)	
Valor de referência para a densidade do solo	1600 - 2000 Kg/m <sup>3</sup>
Valor de referência para o calor específico do solo	800 - 1480 J/Kg.K

Fonte: Adaptado de Costa e Chvatal (2017)

### 3.5.3 Uso da velocidade do ar no EnergyPlus

No *EnergyPlus* não é possível inserir um ventilador de teto, propriamente dito, mas sim, inserir a velocidade desejada no campo *people* e no campo *ElectricEquipment*, simular o consumo de energia do equipamento.

### 3.5.4 Campo *people*

A determinação da velocidade do ar no *EnergyPlus*, que é importante nessa pesquisa para estabelecer o nível de conforto dos usuários, será realizada através do campo “*people*”. Esse campo é utilizado para modelar o efeito dos ocupantes nas condições do espaço, assim como relatar o nível de conforto dos mesmos utilizando os parâmetros de Fanger ou ASHRAE Standard 55 (DOE, 2021).

No campo “*Work Efficiency Schedule Name*” onde é determinado a eficiência do uso de energia dentro do corpo, quando é assumido o valor 0, significa que toda energia produzida pelo corpo é convertida em calor. Já valores maiores que zero, acarretará uma redução do calor e conseqüentemente um valor de PMV abaixo do esperado (DOE, 2021). A pesquisa de Esteves *et al.* (2019) comparou o conforto dos usuários através de simulação computacional pelo *EnergyPlus* e com valores obtidos experimentalmente no local, concluindo então que os resultados eram semelhantes entre si. O autor concluiu que é seguro estabelecer um valor de 0 na eficiência do trabalho, pois quase não houve atividade mecânica e quase toda a energia metabólica foi liberada na forma de calor.

No quesito variável humana a vestimenta utilizada por uma pessoa tem um impacto substancial no conforto térmico dos usuários. O ajuste da roupa é um ajuste que afeta diretamente o balanço térmico. Esse isolamento é expresso em uma unidade denominada “clo” (do inglês clothing) sendo 1 clo equivalente a uma resistência térmica de  $0,155 \text{ m}^2\text{C/W}$ .

Para a definição do clo, há três opções no programa: (1) método dinâmico de isolamento do vestuário da ASHRAE 55, (2) cronograma de isolamento das roupas e ainda (3) cronograma do método de cálculo.

O cronograma de isolamento de roupas se configura criando uma agenda na qual determina o clo desejado para cada época do ano. Para a utilização do cronograma do método de cálculo cria-se uma agenda e determinar o método mais adequado a ser utilizado de acordo com cada época do ano, possibilitando o uso do método dinâmico assim como a criação de uma agenda de acordo com o clo estipulado.

Para esta pesquisa, será utilizado o método dinâmico de isolamento do vestuário desenvolvido por Schiavon e Lee (2013). Este método considera que o isolamento das roupas varia em função da temperatura do ar externo às 6 da manhã, conforme ilustrado na Figura 25. Em estudo realizado por Bagheri-Esfeh e Dehghan (2022), cujo objetivo foi a otimização do ponto de ajuste de temperatura dos termostatos levando em conta o consumo de energia e o conforto térmico dos ocupantes, este método dinâmico também foi utilizado.

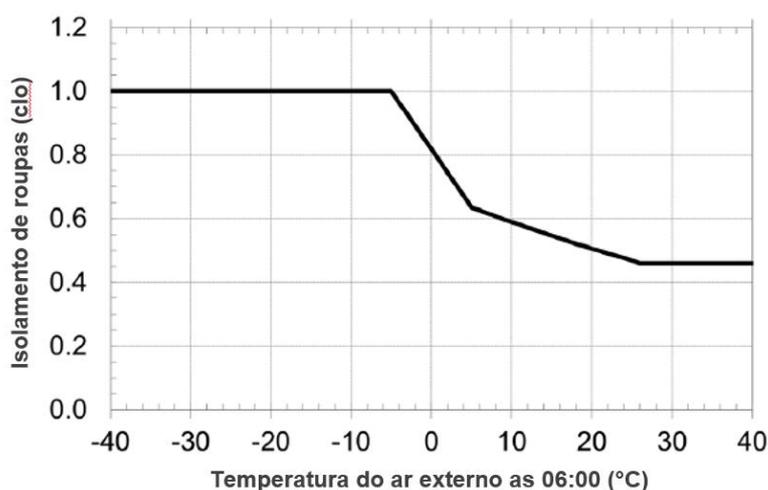


Figura 25 – Isolamento representativo do vestuário em função da temperatura do ar externo às 06h00. Fonte: ASHRAE (2017)

A utilização por esse método se justifica pelo fato dos demais métodos junto a API não funcionar. Nos testes com o cronograma de isolamento de roupas, o algoritmo não conseguiu ler a *schedules* definida no EnergyPlus, considerava o valor sempre 0.

Através da utilização do *clo* dinâmico, é possível identificar (Figura 26) que ele atribui *clos* abaixo do estabelecido em norma, conforme Figura abaixo:

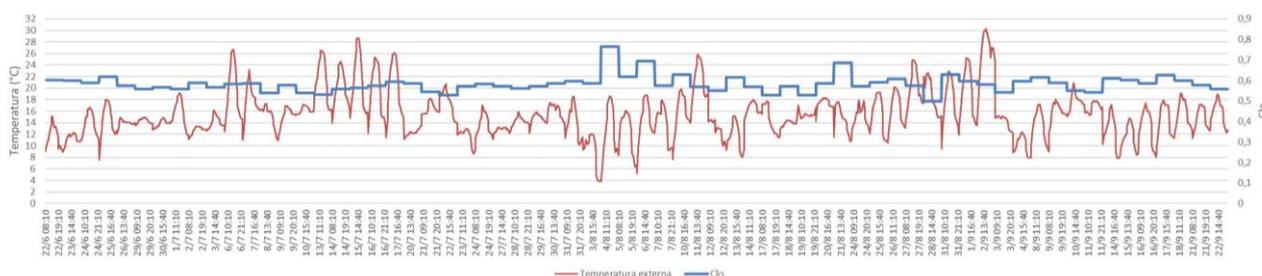


Figura 26 – Funcionamento do *clo* dinâmico em relação a temperatura externa para o inverno. Fonte: autora (2024)

Observa-se que o dia mais frio desse período de inverno foi o dia 3/8, quando a temperatura externa atinge cerca de 6°C, é estabelecido um índice de *clo* de 0,58. Esse *clo* foi definido conforme a temperatura externa as 6h da manhã que estava 10,7°C, mas que teve sua menor temperatura as 21 horas em 3,9°C. Assim, pode-se notar que há uma variedade de temperatura ao longo de um dia, ao qual não condiz com estabelecer o *clo* as 6h da manhã e manter ele ao longo de todo um dia.

Conforme evidenciado na Figura 25, só é possível estabelecer 1 *clo* quando a temperatura externa atinge -5°C às 6 horas da manhã, esse valor de resistência de roupa equivale a vestimentas como calças, camiseta, camisa de manga comprida e suéter de manga comprida (roupa típica de inverno).

O vestuário dos ocupantes desempenha um papel crucial na redução do consumo de energia durante o inverno, pois influencia diretamente a necessidade de ajustes na temperatura do ar para garantir conforto térmico (CHAI *et al.*, 2022). Conforme especificado pela ASHRAE 55 (2020), um aumento de 0,1 *clo* pode resultar em uma redução de aproximadamente 0,8°C na temperatura operativa.

O ajuste do vestuário é uma estratégia importante para alcançar conforto térmico nos edifícios de escritórios (Newsham, 1997). Por exemplo, a adição de um suéter fino de manga pode permitir uma redução de aproximadamente 1,5°C na temperatura operativa para atividades com uma taxa metabólica de 1,2 met (atividade sedentária) (SCHIAVON E LEE, 2013).

Em relação a taxa metabólica, esse foi estabelecida em 130W, de acordo com a NBR 16401-1, para pessoas com atividade leve, esse valor transformado para met, equivale a 1,15. Para esse resultado, a área corporal equivale a 1,8m<sup>2</sup> e 1 met é igual a 58,1 W/m<sup>2</sup> (ASHRAE, 2020).

Outro parâmetro a ser atribuído no campo *people*, é a velocidade do ar no ambiente, e para estabelecer essa velocidade, foi criada uma *schedule:constant* on/off, onde esse valor é estabelecido conforme desejado pelo método adaptativo ou pelo método analítico do PMV, sendo realizadas iterações pelo algoritmo para definir a velocidade necessária em cada caso.

### **3.5.5 Campo *ElectricEquipment***

Em termos de consumo de energia na opção "*ElectricEquipment*" é possível definir a potência por equipamento e para que o programa possa identificar o momento em que o ventilador será usado e assim calcular o consumo de energia, é necessário configurar agendas de acordo com o seu uso (DOE, 2020). Como nessa pesquisa o ventilador não tem um funcionamento constante, é através da programação que acionamos o equipamento em termos de funcionamento e consumo.

A entrada elétrica para o equipamento, aparece como calor que contribui para as cargas da zona. No *EnergyPlus* esse calor é dividido em três frações: Latente, Radiante e Perdida.

A Fração Latente é um número decimal entre 0,0 e 1,0 utilizado para caracterizar a quantidade de calor latente cedido pelos equipamentos elétricos de uma zona. Essa energia afeta o equilíbrio de umidade dentro da zona. A Fração Radiante é um número decimal entre 0,0 e 1,0 usado para caracterizar a quantidade de calor radiante de onda longa que está sendo emitido pelo equipamento elétrico em uma zona e a Fração Perdida é um número decimal entre 0,0 e 1,0 usado para caracterizar a quantidade de calor "perdido" que está sendo liberado pelo equipamento elétrico. O número especificado neste campo será multiplicado pela energia total consumida pelos equipamentos elétricos para obter a quantidade de calor que é "perdida" e não impacta os balanços de energia da zona. Isso pode corresponder à energia elétrica convertida em trabalho mecânico ou calor liberado para a atmosfera (DOE, 2020).

Sendo considerada na simulação um valor de 0,25 da fração radiante e 0,75 da fração perdida.

Para calcular o consumo de energia dos ventiladores de teto em cada sala, foi selecionado um ventilador com potência de 26,33 W, operando na velocidade mais alta de 1,20 m/s, conforme especificado na Tabela 09, com referência à Tabela 08 do INMETRO. Cada sala possui um número específico de ventiladores, e o consumo total foi calculado multiplicando a quantidade de ventiladores pela potência de cada um.

Através do algoritmo desenvolvido (Figura 29 a 36), foi possível contabilizar o consumo de energia somente quando os ventiladores estão ligados. Dessa forma, o cálculo do consumo energético reflete com mais precisão o uso dos ventiladores.

### **3.5.6 Modelagem do trocador de calor**

O projeto do prédio em questão foi projetado para ter trocador de calor nos ambientes de permanência prolongada com objetivo de garantir a qualidade do ar por meio de trocas de ar com ar externo, com o benefício desse ar ser pré-aquecido ou pré-refrigerado quando necessário. Esse sistema tem como característica transferir energia térmica entre dois fluidos, sem que estes entrem em contato direto, visando o aquecimento ou resfriamento, reduzindo assim a carga de trabalho do sistema de ar-condicionado resultando em menor consumo de energia.

Para modelar esse equipamento juntamente com um ar-condicionado PTHP no EnergyPlus, foi necessário a modelagem de HVACTemplate:System:DedicatedOutdoorAir, sendo um sistema de ar externo dedicado de volume constante que pode atender múltiplas zonas. Fornece 100% de ar externo quando o sistema está disponível e pressupõe que um volume igual de ar de retorno esteja disponível para recuperação de calor. Nesse sistema é possível configurar um recuperador de calor ar-ar entre o fluxo de ar de alívio e o fluxo de entrada de ar externo, com as seguintes informações:

Tabela 17: Valores de referência para o trocador de calor

Parâmetros	Definição
Tipo de recuperador de calor ar - ar	sensível
Eficácia sensível do recuperador de calor	0,65
Tipo de trocador de calor com recuperação de calor	Placa

Fonte: Sicflux (2024)

O controle do trocador de calor será ajustado com base nos níveis de CO<sub>2</sub> presentes no ar interno. Essa medida é justificada pela necessidade de manter a qualidade do ar em conformidade com os padrões estabelecidos pela ANVISA, que preconiza níveis de CO<sub>2</sub> abaixo de 1000 ppm. Quando a concentração de CO<sub>2</sub> atingir ou ultrapassar 900 ppm, indicando a necessidade de intervenção para garantir que o nível permaneça abaixo de 1000 ppm, o trocador de calor será ativado. Para que o trocador de calor possa atuar nas salas, criou-se uma `schedule:constant on/off`, onde essa ligará ou desligará o equipamento conforme a necessidade de cada ambiente.

Para modelar níveis de concentração de contaminantes como parte da simulação, é necessário inserir o objeto `ZoneAirContaminantBalance`. Esse campo é necessário para ter como métrica o nível de dióxido de carbono na sala e assim definir a qualidade do ar. Para estabelecer o nível de CO<sub>2</sub> internamente, tem-se que criar uma agenda com o nível de contaminante externo, onde foi estabelecido 421 ppm, de acordo com Global Monitoring Laboratory - GML (2024).

Para acompanhar os níveis CO<sub>2</sub> internamente, é necessário criar a saída `ZoneAirCarbonDioxideConcentration` para que o algoritmo ligue ou desligue a agenda criada quando os níveis de CO<sub>2</sub> estiverem fora do limite estabelecido.

### 3.5.7 Modelagem do sistema de condicionamento artificial

Para a configuração do ar-condicionado no *EnergyPlus*, será utilizado os campos `HVACTemplate:Thermostat` e `HVACTemplate:Zone:PThp`. Esses campos

serão preenchidos para que a programação interfira no funcionamento sempre que necessário, ou seja, para configuração nos *setpoints* de *cooling* e *heating*. Inicialmente serão estabelecidos os valores da NBR 16401(2008), porém, como essa pesquisa tem como premissa o uso da refrigeração apenas quando os ventiladores tenham atingido a velocidade máxima definida, sem restabelecer as condições do Conforto Adaptativo, o valor do *setpoint* será em função do PMV e da velocidade do ar dos ventiladores, na condição anterior.

No Software, os campos HVACTemplate:Thermostat e HVACTemplate:Zone:PTHP serão utilizados para configurar o ar-condicionado, projetado como sendo do tipo Split. Esses campos serão preenchidos de forma que a programação possa ajustar o funcionamento do sistema sempre que necessário e, ainda assim, o *setpoint* será ajustado conforme o cálculo do PMV para estabelecer conforto.

De acordo com o projeto do Anexo-FAURB, foram dimensionados os SPLITS necessários para cada ambiente conforme a Tabela 18. Esses aparelhos possuem um Coeficiente de Desempenho (COP) de 3,24, conforme mencionado na Tabela 12 e 13.

Tabela 18: Ar-condicionados estabelecidos para o prédio e as devidas vazões

Zona Térmica	Conjunto de SPLITs (BTU/h)	Total (BTU/h)	Vazão (m³/s)
Recepção 1° Pav.	2x18.000	36.000	0,596
Sala Aula 1° Pav.	18.000+24000	42.000	0,586
Ateliê 1 2° Pav.	2x18.000	36.000	0,596
LINSE 2° Pav.	2x18.000+12.000	48.000	0,786
Sec LINSE 2° Pav.	9.000	9.000	0,180
Ateliê 2 3° Pav.	2x18.000	36.000	0,596
Ateliê 3 3° Pav.	3x18.000	54.000	0,894

Fonte: autora (2024)

Para simular um sistema de condicionamento artificial no EnergyPlus, é necessário fornecer os dias típico de projeto de inverno e verão estabelecidos no arquivo climático utilizado, esses parâmetros estão de acordo com a Tabela 19.

Tabela 19: Dias típicos de projeto inverno e verão

Parâmetros	Inverno	Verão
Mês	7	1
Dia do mês	21	21
Dia de projeto	quarta-feira	quarta-feira
Temperatura máxima de Bulbo Seco (°C)	3,1	28,6
Varição diária da temperatura de Bulbo Seco (°C)	10,2	10,2
Tipo de Condição de Umidade	bulbo úmido	bulbo úmido
Bulbo Úmido na Temperatura Máxima de Bulbo Seco	3,1	21
Pressão Barométrica (Pa)	84930	84930
Velocidade do Vento (m/s)	0,5	3,9
Direção do Vento	90	0
Indicador de Modelo Solar	ASHRAEClearSky	ASHRAEClearSky
Clareza do céu	0	1

Fonte: autora (2024)

A renovação do ar é fundamental para garantir um ambiente interno saudável, confortável e seguro. A circulação de ar fresco também melhora o desempenho cognitivo, ao mesmo tempo em que elimina odores desagradáveis e previne o crescimento de mofo. Assim, a renovação do ar não só promove a qualidade do ambiente, mas também protege a saúde e o conforto das pessoas que o habitam.

A taxa de renovação do ar interior foi estabelecida conforme a Norma RES-9 (resolução nº 9 de 16/01/2003) da ANVISA, que determina a necessidade de garantir uma taxa mínima de 27 m<sup>3</sup>/h/pessoa em ambientes climatizados. No entanto, como o EnergyPlus utiliza outra unidade de medida (m<sup>3</sup>/s/pessoa), foi necessário converter esse valor. Portanto, o valor utilizado foi de 0,0075 m<sup>3</sup>/s/pessoa. Nesse sentido, para cada ambiente será determinado uma vazão de ar conforme a quantidade de pessoas, segundo a Tabela 20.

Tabela 20: Vazões calculadas para os ambientes do Anexo FAUrb

Zona Térmica	Pessoas	Renovação - RE nº 9 Anvisa (m³/h)	Renovação - RE nº 9 Anvisa (m³/s)
Recepção 1º Pav.	13	351	0,0975
Sala Aula 1º Pav.	29	783	0,2175
Ateliê 1 2º Pav.	23	621	0,1725
LINSE 2º Pav.	12	324	0,0900
Sec LINSE 2º Pav.	1	27	0,0075
Ateliê 2 3º Pav.	21	567	0,1575
Ateliê 3 3º Pav.	29	783	0,2175

Fonte: autora (2024)

### 3.5.8 Configuração da ventilação natural

Para a simulação da ventilação natural, será usado o campo `AirflowNetwork`, que define parâmetros básicos de execução para cálculos de fluxo de ar e ainda calcula os coeficientes de pressão do vento para edifícios retangulares. Essa configuração é constituída pelo `AFN:SimulationControl`, `AFN:Multizone:Zone`, `AFN:Multizone:Surfase` e `AFN:Multizone:Component:SimpleOpening`.

Se justifica a utilização dessa configuração, pois, através dela é possível controlá-la pela programação, ou seja, pelos parâmetros de conforto, assim como gerenciar a abertura ou fechamento da janela.

No `AFN:SimulationControl` foi definido então que será `MultiZoneWithDistribution`, ou seja, os cálculos de fluxo de ar entre as zonas são realizados durante todos os intervalos de tempo da simulação, incluindo os impactos do sistema de distribuição de ar quando um ventilador do sistema HVAC está operando.

Já o objeto `AirflowNetwork:MultiZone:Zone` especifica o controle de ventilação que se aplica a todas as janelas e portas externas e internas que podem ser abertas na zona térmica correspondente e como será o modo de abertura desses elementos, conforme a figura abaixo.

Na simulação proposta, o cronograma de disponibilidade de ventilação foi definido como *constant*, de modo que a programação consiga estabelecer o controle

da abertura. Ou seja, quando o cronograma de disponibilidade de ventilação permitir a ventilação, todas as janelas que podem ser abertas da zona estarão abertas.

O objeto `AirflowNetwork:MultiZone:Surface` especifica as propriedades de uma “ligação” de superfície através da qual o ar flui. Esta ligação está sempre associada a uma superfície do edifício (parede, telhado, piso ou teto) ou subsuperfície (porta, porta de vidro ou janela) com ambas as faces expostas ao ar. Neste objeto, indica-se a superfície de transferência de calor, como no caso das aberturas utilizadas na pesquisa, e faz referência a um objeto no `AFN:Multizone:Component:SimpleOpening` que fornece as características de fluxo de ar dessa abertura (DOE, 2020)

Para a configuração do `AFN:Multizone:Component:SimpleOpening`, foram utilizados os parâmetros descritos na tabela abaixo, considerando aberturas com vedação, similares as que serão utilizadas no prédio em questão.

Tabela 21: Valores de referência para a infiltração

Parâmetros	Portas	Janelas
Coefficiente de fluxo de massa de ar quando a abertura está fechada (Kg/s.m)	0,00187	0,00054
Expoente do fluxo de massa de ar quando a abertura está fechada	0,66	0,66
Diferença Mínima de Densidade para Fluxo Bidirecional (kg/m <sup>3</sup> )	0,0001	0,0001
Coefficiente de descarga	0,60	0,60

Fonte: Adaptado de Aynsley (1999) e Melo et al (2008)

### 3.5.9 Configuração do incremento da temperatura operativa segundo o conforto adaptativo da ASHRAE (2020)

A ASHRAE (2020) estabelece um incremento da temperatura operativa de acordo com a velocidade do ar, conforme Tabela 05. Através desses valores desenvolvidos pela norma foi possível obter a curva de tendência e assim estabelecer velocidades relacionadas para qualquer temperatura operativa, não apenas para as que foram disponibilizadas. Para que fosse possível obter os valores entre os intervalos estabelecidos e assim, estabelecer a temperatura de incremento, foi necessário criar gráficos com linhas de tendência para descobrir a velocidade e a temperatura de incremento ideal. Essas fórmulas foram inseridas na programação,

que de forma iterativa é possível descobrir a velocidade necessária para cada temperatura de incremento, conforme figuras abaixo.

A Figura 27, na qual tem como resultado uma curva de tendencia polinomial da velocidade, tem como objetivo descobrir a velocidade necessária em função da temperatura operativa, resultando na Equação 06.

$$v = 0,055 \cdot T_o^2 - 2,331 \cdot T_o + 23,935 \quad [\text{Eq.06}]$$

Onde:

v é velocidade (m/s)

To = temperatura operativa °C

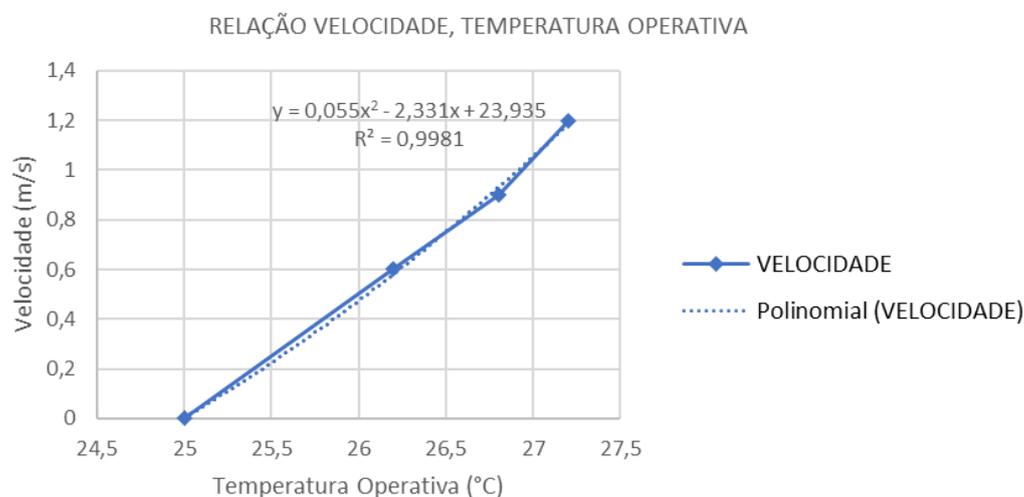


Figura 27 – Gráfico da relação velocidade e temperatura operativa, segundo a ASHRAE (2020).  
Fonte: autora (2024)

A Figura 28, na qual tem como resultado uma curva de tendencia polinomial da temperatura tem como objetivo obter a temperatura operativa limite relacionada com a velocidade estabelecida, resultando na Equação 07.

$$T_o = 0,3535 \cdot v^2 + 2,2758 \cdot v + 24,995 \quad [\text{Eq.07}]$$

Onde:

To = temperatura operativa °C

v é velocidade (m/s)

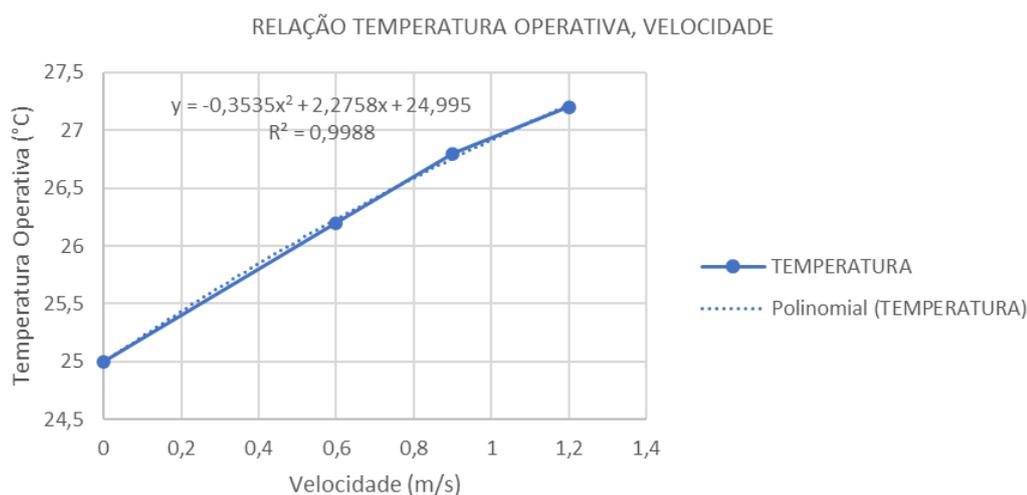


Figura 28 – Gráfico da relação temperatura operativa e velocidade do ar, segundo a ASHRAE (2020). Fonte: autora (2024)

### 3.5.10 Configuração da programação em Python

O intuito da programação é utilizarmos ao máximo as condições passivas do prédio, sempre considerando o conforto dos usuários. Ou seja, a prioridade de funcionamento é a utilização da ventilação natural, em seguida a utilização de ventiladores no caso de desconforto por calor e o próximo passo, ligar o ar-condicionado e determinar o *setpoint* necessário para o conforto.

No momento que a ventilação natural não for suficiente, os ventiladores entram em funcionamento, sendo a velocidade estabelecida de forma iterativa para estabelecer conforto através do método adaptativo ou analítico.

Quando a velocidade do ar não é suficiente para manter o conforto dos ocupantes, o ar-condicionado é acionado numa temperatura de *setpoint* estabelecido pela iteração, ou seja, a temperatura máxima para que o PMV esteja o mais próximo possível do limite de conforto estabelecido, mantendo a velocidade máxima do ar estabelecida pelos ventiladores.

Para que os cálculos possam ser efetuados de maneira iterativa, será utilizada uma biblioteca na linguagem de programação Python chamada Eppy, desenvolvida em 2011 por Santosh Philip (PHILIP; TANJUATCO, 2011). Essa ferramenta se faz necessária quando diferentes características do edifício precisam ser alteradas para a aplicação de interesse (LEITZKE *et al.* 2020). Além da utilização do Eppy, será utilizada a biblioteca *pythermalcomfort* desenvolvida por Tartarini e Schiavon (2020).

Essa biblioteca Python permite ao usuário calcular os índices de conforto térmico mais comuns de acordo com os principais padrões de conforto térmico, como por exemplo, o PMV e modelos adaptativos.

Dessa forma, a simulação irá iterar os cálculos de conforto utilizando o método PMV e Conforto Adaptativo para determinar a velocidade dos ventiladores de teto e estabelecer o *setpoint* do ar-condicionado quando necessário.

O fluxograma apresentado na Figura 29 ilustra o funcionamento da simulação do Caso Base, situação em que não há o funcionamento dos ventiladores de teto e o *setpoint* do ar-condicionado é estabelecido em 22°C e 24°C. O processo começa com a verificação da presença de pessoas na sala. Se a sala estiver ocupada, verifica-se se a temperatura externa ( $T_e$ ) está abaixo da temperatura máxima adaptativa ( $t_{maxAdp}$ ) e se a diferença entre a temperatura interna ( $T_i$ ) e a externa é maior ou igual à margem de abertura de janela ( $\Delta t$ ) e ainda o ar-condicionado desligado. Se essas condições forem atendidas, a verificação continua.

Se a temperatura operativa ( $T_o$ ) estiver entre a temperatura máxima adaptativa ( $t_{maxAdp}$ ) e a temperatura mínima adaptativa ( $t_{minAdp}$ ), a janela será aberta para manter a qualidade do ar e tirar proveito da temperatura de conforto. Caso contrário, se a temperatura operativa estiver fora desses limites, a janela será fechada. Até esse momento, o sistema está operando conforme o conforto adaptativo, pois a janela estará aberta, quando o sistema verifica a necessidade de fechamento da janela, o funcionamento continua conforme o PMV, pois com o fechamento da janela, os usuários perdem a relação com o clima externo.

Se após verificar que a janela é fechada e o PMV estiver fora dos limites de conforto, o ar-condicionado será ligado. Após o acionamento desse equipamento, o sistema incrementa o contador de tempo do ar-condicionado ligado, esse contador foi adicionado para evitar que o ar-condicionado permanecesse ligado enquanto as condições externas fossem favoráveis para funcionamento de forma passiva. Foi 10min, sendo assim, a verificação ocorre após duas horas pós ligar o ar-condicionado. Foram feitos vários testes em relação ao contador e para números abaixo de 12, havia muito desconforto nos ambientes, pois o sistema fazia todas as verificações novamente, constatava o desconforto e voltava a ligar o ar-condicionado.

Em seguida, o sistema verifica se o nível de  $CO_2$  é maior ou igual ao limite estabelecido e se a janela está fechada. Se ambos os critérios forem atendidos, o

trocador de calor será ativado para garantir a circulação de ar e a qualidade do ar interno. Caso contrário, o trocador de calor será (mantido) desligado.

Finalmente, o sistema realiza a atualização das schedules. Se no primeiro passo, for constatada que não há pessoas na sala, verifica-se se a temperatura operativa estiver abaixo do limite mínimo adaptativo ( $T_{minAdp}$ ), a janela será bloqueada para evitar perda de calor em situações de frio. Se as condições forem favoráveis, a janela será aberta ou desbloqueada para permitir a ventilação natural enquanto estiver desocupada, com intuito da sala estar o mais próximo do conforto quando for ocupada e evitar o uso de condicionamento artificial.

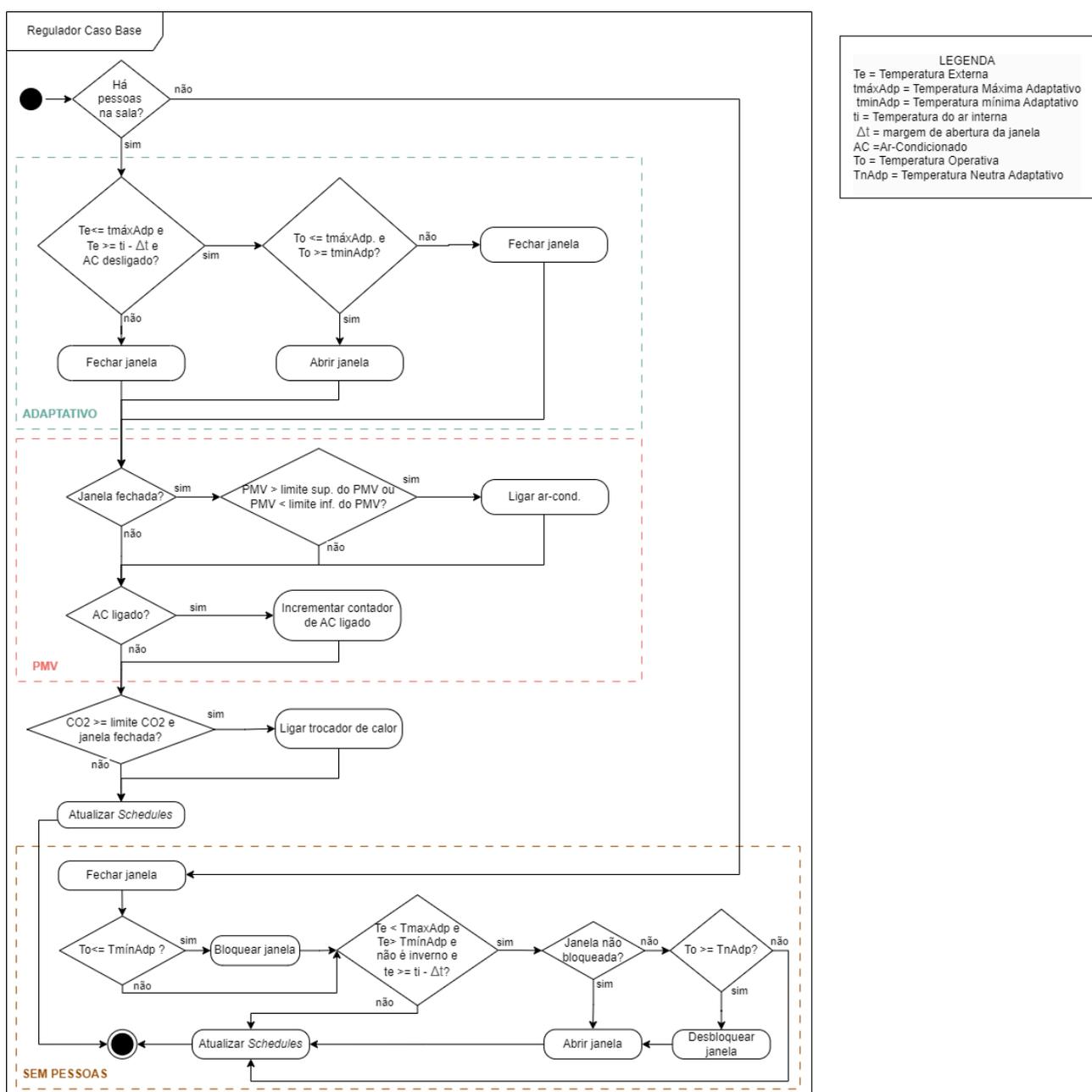


Figura 29 – Fluxograma Caso Base. Fonte: autora (2024)

O fluxograma da Figura 30 apresenta o funcionamento do algoritmo da simulação do Caso 01, esse tem como característica o funcionamento dos ventiladores de teto de forma a estabelecer a velocidade conforme as condições de conforto, assim como estabelecer o *setpoint* do ar-condicionado. O processo começa com a verificação da presença de pessoas na sala. Caso haja pessoas presentes, o próximo passo é verificar as condições de temperatura externa ( $T_e$ ) e interna ( $T_i$ ), comparando-as com os limites máximos e mínimos adaptativos ( $t_{maxAdp}$  e  $t_{minAdp}$ ). Se a temperatura externa estiver abaixo da temperatura máxima do conforto adaptativo ( $t_{máxAdp}$ ) e temperatura externa estiver maior ou igual a temperatura interna menos  $3^\circ\text{C}$  ar-condicionado estiver desligado, o próximo passo é a verificação da temperatura operativa ( $T_o$ ) comparando-as com os limites máximos e mínimos adaptativos. Se a temperatura operativa for inferior ou igual ao limite máximo adaptativo e maior ou igual ao limite mínimo adaptativo, a janela será aberta e o ventilador será (mantido) desligado. Se a temperatura operativa estiver entre  $25^\circ\text{C}$  e  $27.2^\circ\text{C}$ , o sistema calculará a velocidade do ventilador usando o método adaptativo (equação 06) e a temperatura limite pela equação 07. Caso contrário, a janela será fechada. Este controle adaptativo se refere a operação do sistema de forma a manter a janela aberta.

A próxima seção do fluxograma, marcada como PMV, tem como atributo o fechamento da janela, ou seja, sem contato com o clima externo, nesse momento ele descreve o cálculo do índice de conforto PMV para ajustar a velocidade do ventilador e, se necessário, ligar o ar-condicionado. Se a janela estiver fechada e o ar-condicionado desligado, o sistema calcula a velocidade do ventilador usando o PMV. Se o ar-condicionado estiver ligado, o sistema calcula a temperatura ideal com o PMV e incrementa o contador de tempo do ar-condicionado ligado.

Após esses processos, o sistema verifica os níveis de  $\text{CO}_2$  e se a janela está fechada. Se o nível de  $\text{CO}_2$  for maior ou igual ao limite estabelecido e a janela estiver fechada, o trocador de calor será ativado para garantir a qualidade do ar. O sistema atualiza as schedules com as devidas configurações.

Quando não há pessoas, o sistema fecha a janela e verifica se a temperatura operativa está abaixo do limite mínimo adaptativo. Se sim, ele bloqueia a janela, verifica se a temperatura externa está dentro dos limites do conforto adaptativo, se não é inverno e ainda se a temperatura externa estiver maior que a temperatura

interna menos a diferença de temperatura para abertura de janela. Se isso tudo for verdadeiro e a janela estiver desbloqueada, a janela vai ser aberta. Caso a janela não esteja bloqueada, a verificação continua em relação a temperatura neutra do conforto adaptativo, se a temperatura operativa for maior, desbloqueia a janela e abre, essa etapa foi necessária para evitar que a janela abrisse e fechasse a cada *timestep*.

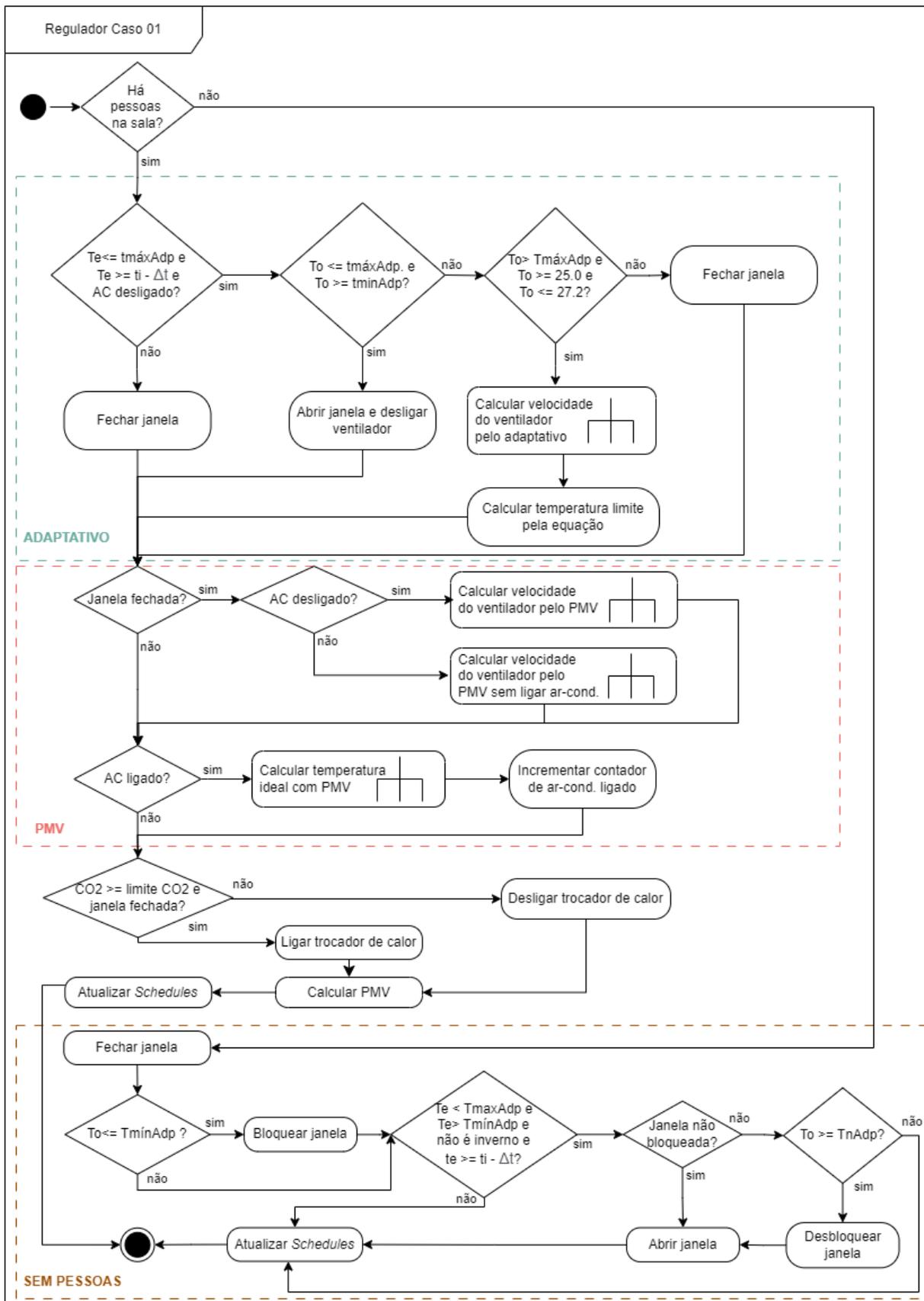


Figura 30 – Fluxograma Caso 01. Fonte: autora (2024)

No fluxograma da Figura 30, 35 e 36, há sub-rotinas a serem realizadas para complementar o funcionamento do sistema de forma completa, a Figura 31 é uma sub-rotina necessária para calcular a velocidade do ventilador de teto pelo Conforto Adaptativo. Inicialmente, uma ação é tomada para abrir a janela permitindo o início do processo de cálculo da velocidade pela equação de regressão da Figura 27. Este cálculo determina a próxima etapa do processo, que é avaliar se a velocidade calculada excede a velocidade máxima permitida.

Se a velocidade calculada for superior à velocidade máxima, o processo ajusta a velocidade para o valor máximo permitido, garantindo que o ventilador não opere acima do limite. Após este ajuste, a janela é fechada, concluindo o processo. Caso a velocidade calculada não exceda a velocidade máxima, o processo segue diretamente para o final.

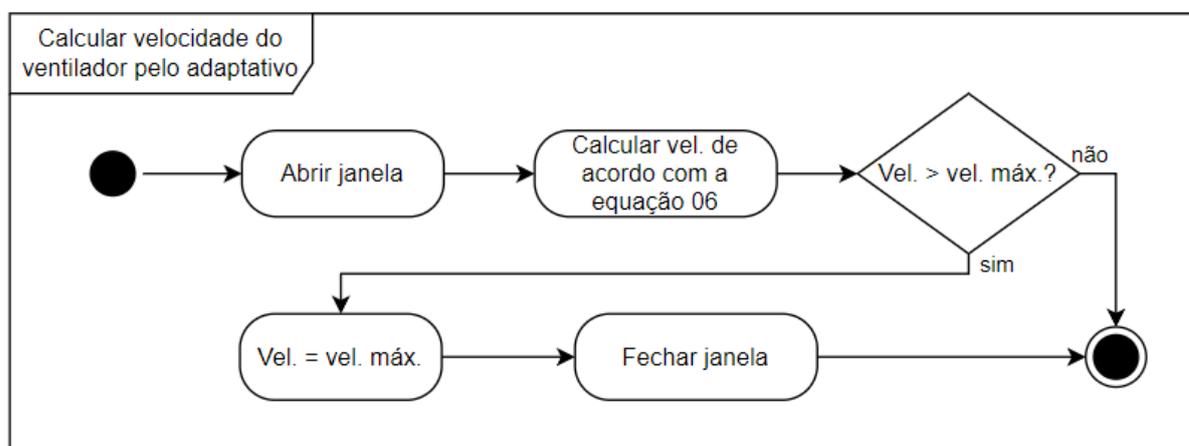


Figura 31 – Fluxograma da sub-rotina – Cálculo da velocidade do ventilador pelo Conforto Adaptativo Fonte: autora (2024)

O fluxograma da Figura 32 descreve o processo de verificação da velocidade do ventilador utilizando o índice PMV para as condições atuais e com isso toma-se uma decisão referente a velocidade necessária para o conforto. A partir desse ponto, o processo segue duas possíveis rotas dependendo se o PMV está acima do limite superior ou abaixo do limite inferior.

Se o PMV estiver acima do limite superior, a velocidade do ventilador é incrementada. Caso a nova velocidade exceda o valor máximo permitido, ela é ajustada para a velocidade máxima, e o ar-condicionado é ligado. Se o PMV estiver abaixo do limite inferior, a velocidade do ventilador é decrementada. Se a nova velocidade resultar em um valor negativo, ela é ajustada para zero, e o ar-condicionado é ligado. Caso contrário, o processo retorna ao cálculo do PMV para as

condições atuais, garantindo um *ciclo* contínuo de ajustes até que o PMV esteja dentro dos limites desejados. O processo termina quando todas as condições são atendidas.

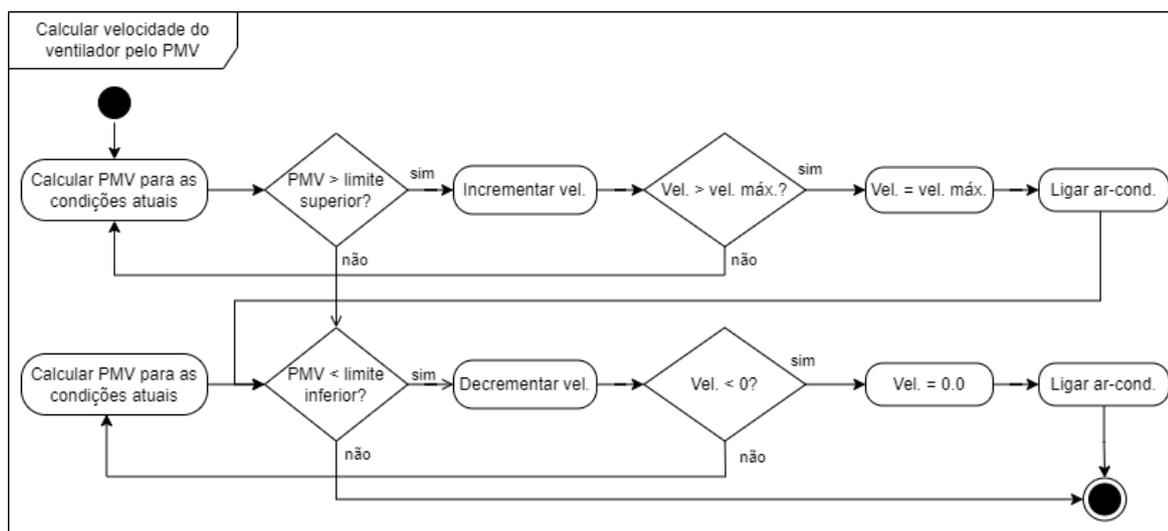


Figura 32 – Fluxograma da sub-rotina – Cálculo velocidade do ventilador pelo PMV. Fonte: autora (2024)

A Figura 33 ilustra o processo de cálculo da velocidade do ventilador utilizando o índice PMV sem a necessidade de ligar o ar-condicionado. O processo inicia com o cálculo do PMV para as condições atuais. A partir desse ponto, há uma verificação se o PMV for superior ao limite. Caso a resposta seja positiva, a velocidade do ventilador é incrementada. Se a nova velocidade ultrapassar a velocidade máxima permitida, ela é ajustada para a velocidade máxima.

Se o PMV não ultrapassar o limite superior, uma nova verificação é realizada para determinar se o PMV está abaixo do limite inferior. Se sim, a velocidade do ventilador é decrementada. Se a nova velocidade resultar em uma velocidade negativa, ela é ajustada para zero. Independentemente do ajuste realizado, o processo retorna ao cálculo do PMV para as condições atuais, formando um ciclo contínuo de ajustes.

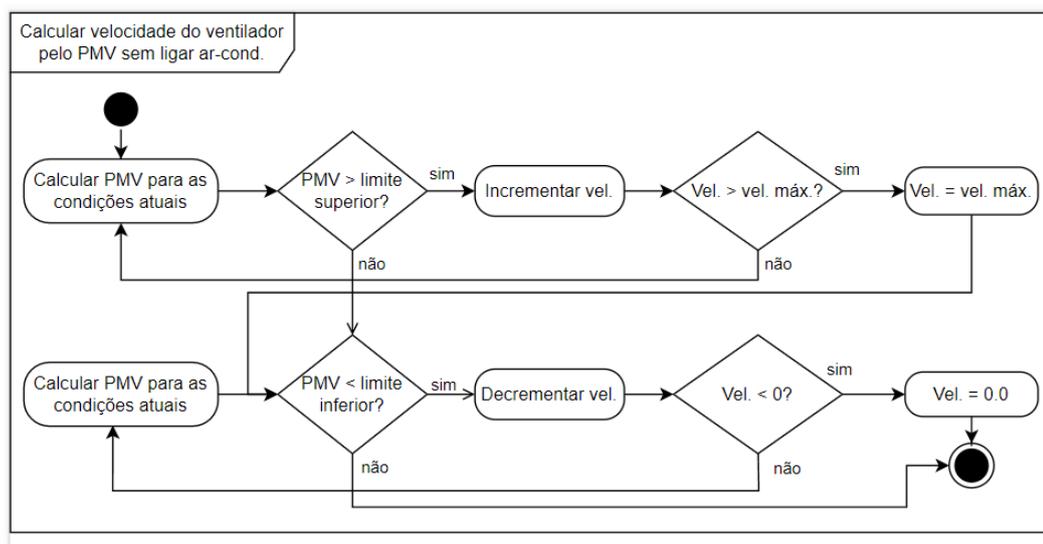


Figura 33 – Fluxograma da sub-rotina – Cálculo velocidade do ventilador pelo PMV sem ar-condicionado Fonte: autora (2024)

A sub-rotina apresentada na Figura 34 ilustra o processo de cálculo da temperatura ideal utilizando o índice PMV com objetivo de ajustar a temperatura de resfriamento e aquecimento para manter o conforto térmico no ambiente.

O processo inicia com o cálculo do PMV com a temperatura de *setpoint* de refrigeração atualmente determinada. Se o PMV for maior que o limite superior estabelecido, a temperatura de *setpoint* de refrigeração será diminuída em 1°C. Em seguida, verifica-se se a nova temperatura de resfriamento é igual à temperatura mínima de operação do ar-condicionado. Se for, o sistema encerra o processo; caso contrário, o ciclo de verificação do PMV e ajuste da temperatura continua.

Se o PMV calculado inicialmente não estiver acima do limite superior, o sistema passa a calcular o PMV com a temperatura de aquecimento. Se o PMV for menor ou igual ao limite inferior estabelecido, a temperatura de aquecimento será aumentada em 1°C. Em seguida, verifica-se se a nova temperatura de aquecimento é igual à temperatura máxima de operação do ar-condicionado. Se for, o sistema encerra o processo; caso contrário, o ciclo de verificação do PMV e ajuste da temperatura continua.

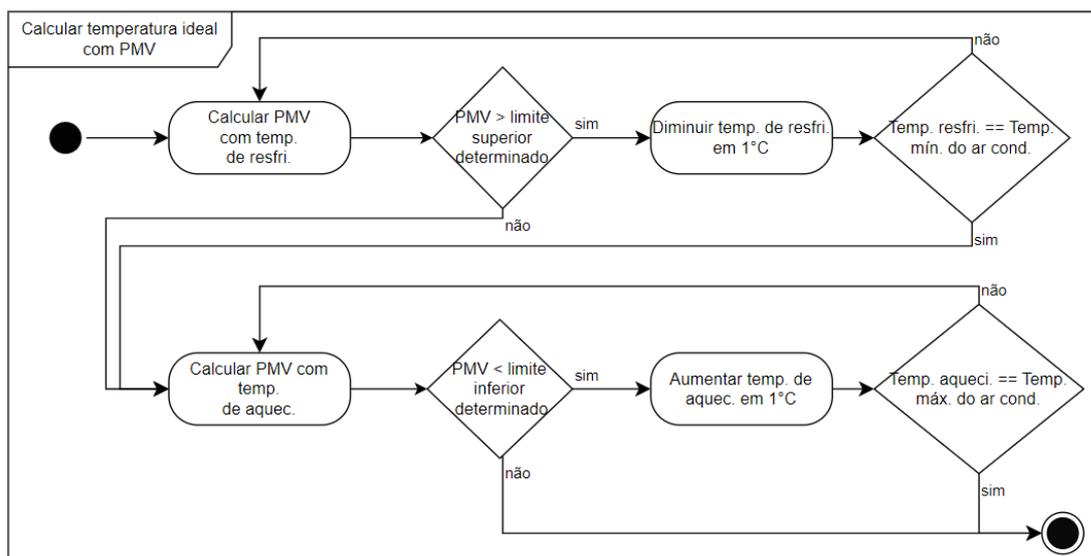


Figura 34 – Fluxograma da sub-rotina – Cálculo Temperatura Ideal com PMV. Fonte: autora (2024)

O fluxograma apresentado na Figura 35 ilustra o funcionamento da simulação do Caso 02, no qual tem como característica as janelas mantidas fechadas, o acionamento do ventilador, assim como estabelecer a temperatura ideal do ar-condicionado. A lógica começa com a verificação da presença de pessoas na sala. Se não houver ninguém presente, o sistema encerra o processo. Caso contrário, verifica-se se o ar-condicionado (AC) está desligado. Se o AC estiver desligado, o sistema calcula a velocidade do ventilador utilizando o índice de conforto térmico PMV.

Se o ar-condicionado não estiver desligado, o sistema prossegue para calcular a velocidade do ventilador pelo PMV sem ativar o ar-condicionado. A próxima etapa do fluxograma verifica se o ar-condicionado está ligado. Se estiver, o sistema calcula a temperatura ideal utilizando o PMV e incrementa o contador de ar-condicionado ligado, registrando o uso do equipamento.

Na próxima etapa, o sistema verifica se o nível de  $\text{CO}_2$  está acima do limite estabelecido e se a janela está fechada. Se ambos os critérios forem atendidos, o sistema ativa o trocador de calor para garantir a circulação de ar e o controle de qualidade do ar interno. Caso contrário, o trocador de calor é desligado.

Finalmente, o sistema calcula o PMV e atualiza as *schedules*. Esse ciclo garante que o sistema esteja constantemente ajustando e otimizando suas operações para manter o ambiente confortável e eficiente energeticamente.

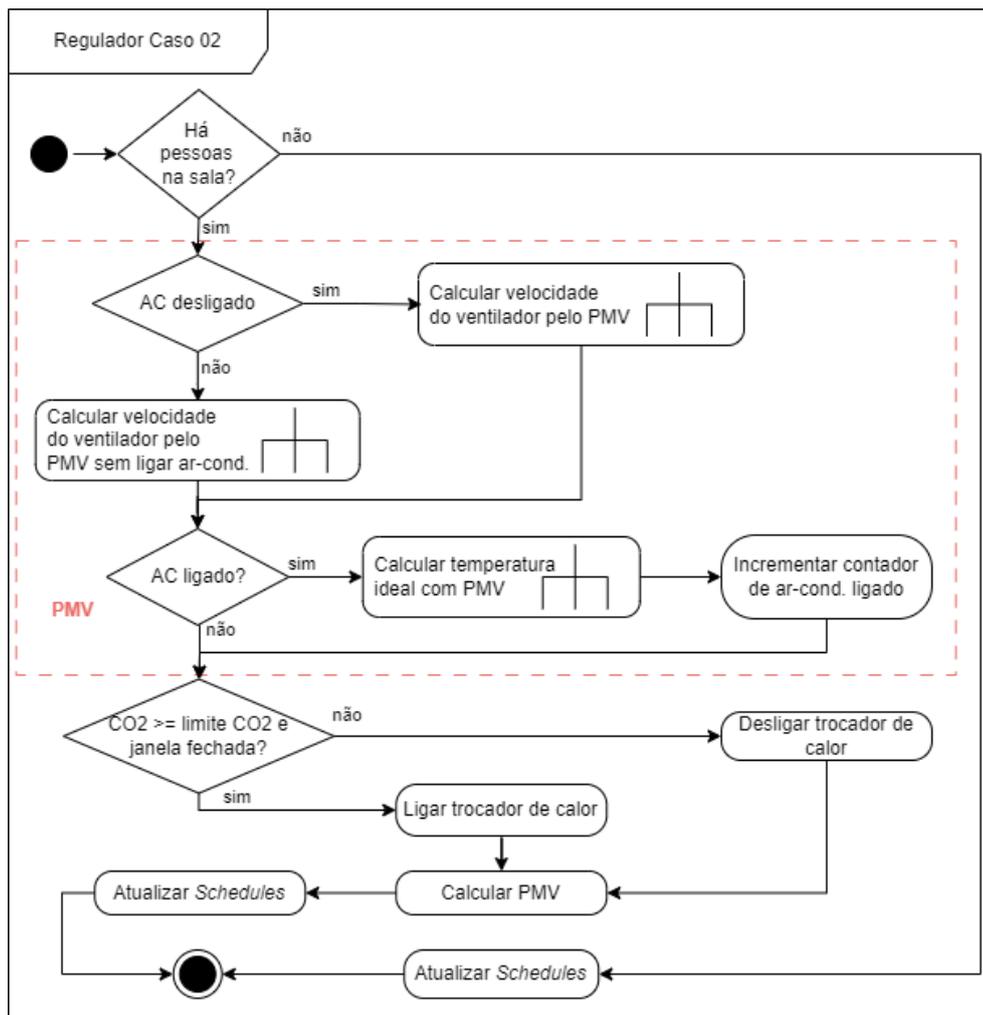


Figura 35 – Fluxograma da simulação Caso 02. Fonte: autora (2024)

O fluxograma da Figura 36 demonstra o funcionamento da simulação do Caso 03, que tem como característica não utilizar o ventilador, mas apresentar o *setpoint* flutuante do ar-condicionado. O processo inicia com a verificação da presença de pessoas na sala. Se houver pessoas, o próximo passo é verificar as condições de temperatura externa ( $T_e$ ) e operativa ( $T_o$ ), comparando-as com os limites máximos e mínimos adaptativos ( $t_{maxAdp}$  e  $t_{minAdp}$ ). Se as temperaturas estiverem fora dos limites e o ar-condicionado estiver desligado, a janela será fechada. Se as condições estiverem dentro dos limites, a janela será aberta.

A seguir, o sistema calcula o índice PMV para avaliar o conforto térmico. Se a janela estiver fechada e o PMV estiver fora dos limites de conforto, o ar-condicionado será ligado.

Em seguida, o sistema verifica se o ar-condicionado está ligado. Se estiver, o sistema calcula a temperatura ideal utilizando o PMV e incrementa o contador de

tempo do ar-condicionado ligado, registrando o uso do equipamento. Se o ar-condicionado não estiver ligado, o sistema verifica se o nível de CO<sub>2</sub> está acima do limite e se a janela está fechada. Se ambos os critérios forem atendidos, o trocador de calor será ativado para garantir a circulação de ar e a qualidade do ar interno. Caso contrário, o trocador de calor será desligado. Na última parte do processo, o sistema realiza uma série de ações cíclicas para otimizar seu funcionamento. Isso inclui a atualização das schedules e o cálculo do PMV.

Se na primeira verificação, constar que não há pessoas, ele verifica se a temperatura operativa estiver abaixo do limite mínimo adaptativo (T<sub>minAdp</sub>), a janela será bloqueada para evitar entrada de frio no caso do inverno. Se as condições forem favoráveis, a janela será aberta ou desbloqueada para permitir a ventilação natural.

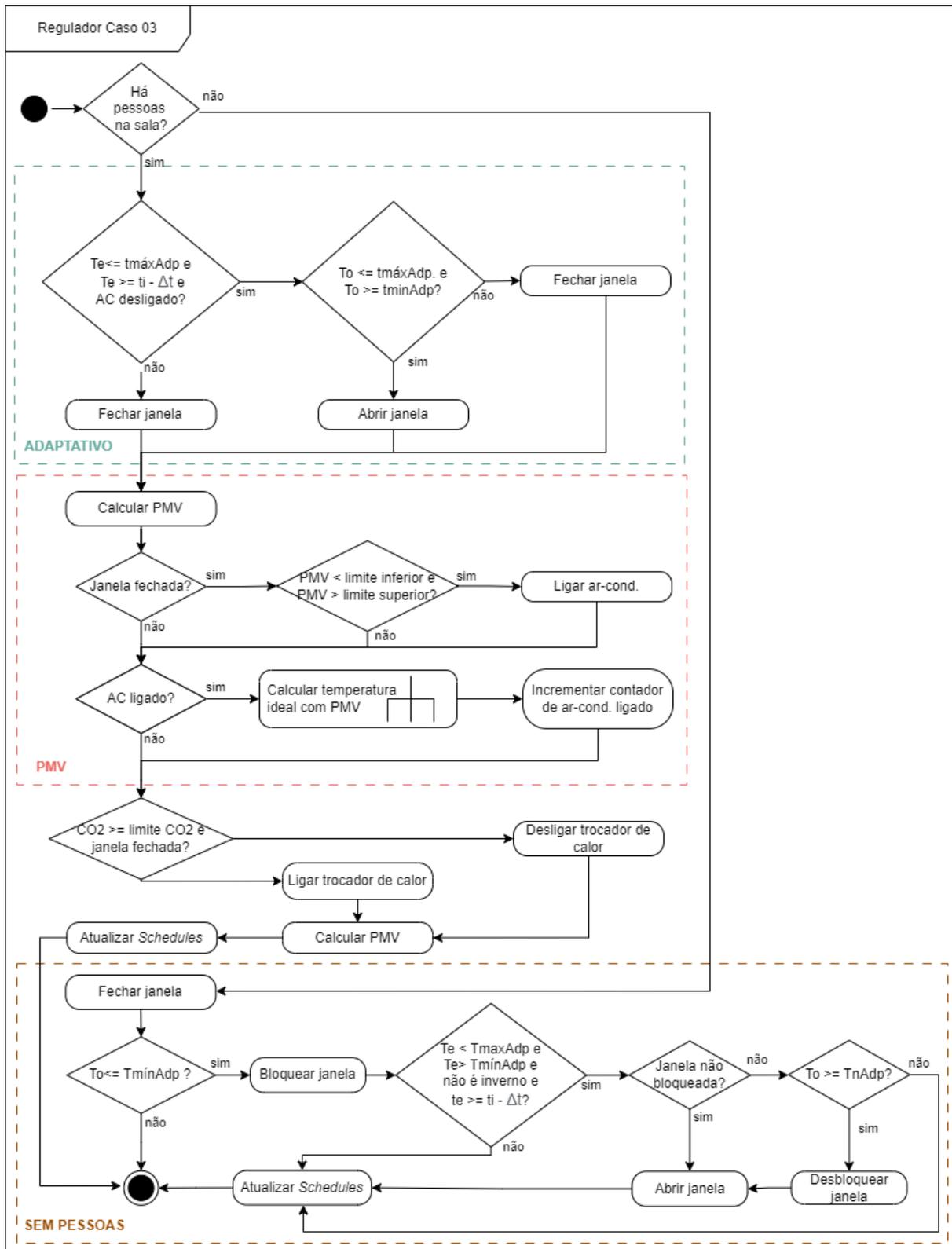


Figura 36 – Fluxograma da simulação Caso 03. Fonte: autora (2024)

## 4 Resultados

Para realizar a avaliação do prédio e gerenciar estratégias como ventilação, abertura de janelas, operação do ar-condicionado, ajuste da temperatura, e acionamento do trocador de calor, foi crucial realizar um algoritmo. O resultado desse esforço foi o desenvolvimento de um aplicativo que leva em conta todas as variáveis relevantes. A interface desse aplicativo é apresentada na imagem a seguir:

Simulações Personalizadas com EnergyPlus e Python

Arquivo IDF:

Diretório de saída:

Arquivo EPW:

Caminho do EnergyPlus:

PMV Min:  PMV Max:  Velocidade Max:  Margem Adaptativo:

Temperatura AC Min:  Temperatura AC Max:  Met:  Wme:

Banda de conforto:  Limite CO2:  Variação da vel. ventilação:  Margem temp. abertura janela:

Salas:

Módulo:

Figura 37 – Interface aplicativo. Fonte: autora (2024)

Para a simulação em geral, foi definido que o conforto adaptativo será utilizado quando o ambiente estiver com a janela aberta, pois as pessoas continuam com a conectividade do meio externo, já o conforto analítico é utilizado quando a janela está fechada, ou seja, apenas o ventilador pode estar funcionando ou juntamente com o ar-condicionado. Pelo conforto adaptativo temos um intervalo de temperatura que nos demonstra a aceitabilidade das pessoas, nesse método, a ventilação só pode ser

utilizada quando a temperatura operativa ultrapassar 25°C, a partir deste momento é possível expandir o limite da temperatura do através do uso da velocidade do ar.

Quando a temperatura operativa está fora da zona de conforto pelo método adaptativo, ou seja, fora da zona de conforto, a janela é fechada e passa-se a utilizar as métricas do PMV, onde tem-se como prioridade manter os usuários em conforto e, quando há desconforto por calor, a primeira alternativa é o funcionamento do ventilador que, quando atingida a velocidade máxima estabelecida de 1,2m/s e o PMV não estiver na banda de conforto, resulta por acionar o ar condicionado na temperatura ideal para que o PMV atinja os limites estabelecidos.

Para demonstrar os resultados obtidos, inicialmente serão apresentados os resultados anuais da simulação para o Caso Base e o Caso 01, com o objetivo de expor o funcionamento do algoritmo em diferentes situações. Porém, como o ventilador só tem efeito para o calor, a avaliação do desempenho será apresentada para o período de verão. O período selecionado de verão abrange do início do solstício de verão até o equinócio do outono (23/12 a 23/03) e o período selecionado de inverno se inicia no solstício de inverno até o equinócio de primavera (22/06 a 22/09). Os finais de semana foram considerados desocupados na simulação.

Para a análise mais detalhada buscou-se analisar intervalos com menor temperatura no inverno e com maior temperatura e maior amplitude térmica no verão.

No caso de verão, no dia 03 de fevereiro a temperatura caiu drasticamente e no dia 05 de fevereiro já estava bastante alta. Desta forma, esses extremos puderam ser analisados nos gráficos do período de 30/01 a 05/02.

Para o período de inverno, o dia com menor temperatura apresentada, foi o dia 03/08, cuja análise se expande aos dias que antecedem e sucede esse dia.

Todas as simulações foram realizadas para os valores de PMV 0,2, 0,5, 0,7 e 1,0, mas os gráficos apresentam-se apenas para o PMV de 0,5, pois para esse valor de PMV, o uso da refrigeração já foi quase nulo no Caso 01.

Todas as zonas térmicas foram simuladas; entretanto, as análises demonstradas serão referentes ao Ateliê 1, localizado em um pavimento intermediário do prédio. Embora o pavimento da cobertura seja mais suscetível ao aquecimento, a escolha pelo Ateliê 1 se deve ao interesse em demonstrar a demanda por esse equipamento em uma sala considerada amena.

## 4.1 Caso base

Destaca-se que no Caso Base não há o uso dos ventiladores de teto. Nessa simulação do Caso Base, o ar-condicionado possui *setpoint* fixo estabelecido em 22 °C e 24 °C, as janelas abrem e fecham conforme o conforto dos usuários e o trocador de calor funciona conforme a concentração de CO<sub>2</sub>. A Figura 38 demonstra a temperatura externa e a temperatura operativa interna do Ateliê 01 no decorrer de todo o ano, assim como as temperaturas máximas e mínimas do conforto adaptativo considerando 90% dos ocupantes satisfeitos.

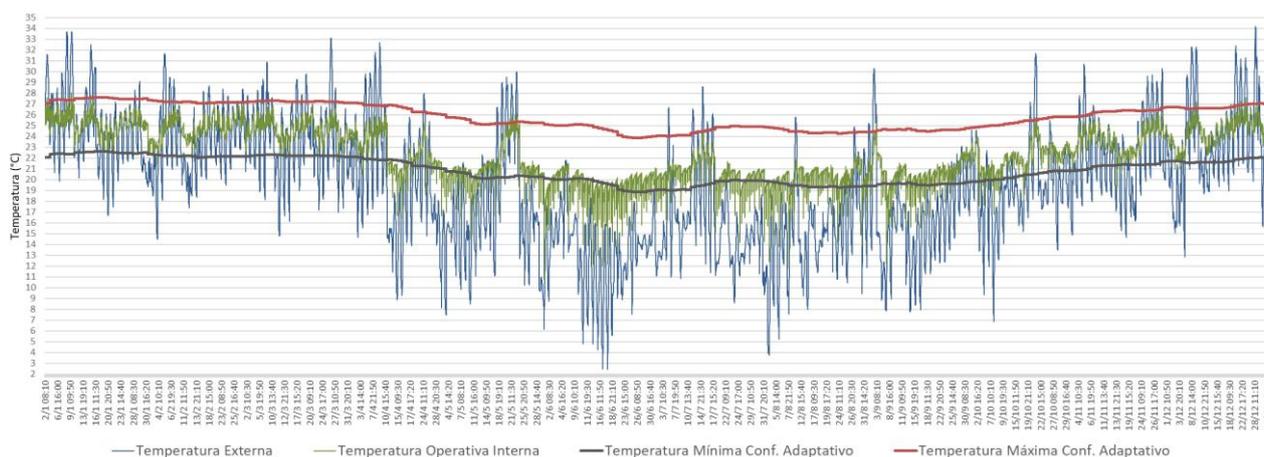


Figura 38 – Simulação caso Base com PMV 0,5 ano completo. Fonte: autora (2024)

No inverno nota-se uma maior oscilação das temperaturas, esse fato se justifica pelo motivo da temperatura do *setpoint* ser fixa em 22 °C e com isso a sala se mantém numa temperatura mais baixa quando não há pessoas.

A simulação desse caso teve como resumo de funcionamento a Tabela 22, demonstrando o funcionamento do edifício para o ano inteiro, onde se obteve um desconforto médio de 36,13% em todo o ano para o desconforto por frio e de 0,41% de desconforto para o calor e se usou uma média de ar-condicionado de 47,54% do tempo ocupado por pessoas, tendo como porcentagem de aquecimento 39,27% e resfriamento 8,27%.

Tabela 22: Resultados da simulação do Caso base com PMV 0,5 para o ano inteiro

Ambiente	Horas ocupadas									Horas desocupadas	
	Ar-condicionado			Janela aberta	Janela fechada e Ar-cond. desligado	Trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto			Janela aberta
	Aquecimento	Resfriamento	Total					Frio	Calor		
Sala de aula	41,62%	6,89%	48,51%	37,56%	9,79%	5,91%	1.088,76	38,85%	0,27%	15,80%	
Ateliê 1	37,49%	9,45%	46,94%	35,00%	12,55%	21,05%	1.097,83	35,16%	0,45%	15,51%	
Ateliê 2	38,70%	9,55%	48,25%	35,00%	11,97%	5,70%	1.041,44	36,56%	0,59%	15,84%	
Ateliê 3	37,90%	9,48%	47,38%	36,36%	12,00%	13,96%	1.049,40	33,42%	0,55%	15,93%	
Recepção	44,68%	8,32%	53,00%	35,81%	7,15%	0,41%	1.008,27	39,82%	0,53%	15,61%	
Sec. Linse	46,62%	5,44%	52,06%	37,22%	8,17%	0,00%	783,93	40,12%	0,21%	15,71%	
Linse	27,91%	8,75%	36,66%	35,94%	15,29%	50,68%	1.047,78	28,98%	0,25%	15,66%	
Média	39,27%	8,27%	47,54%	36,13%	10,99%	13,96%	1.016,77	36,13%	0,41%	15,72%	

Fonte: autora (2024)

Analisando a tabela, pode-se observar que o CO<sub>2</sub> ultrapassou os 1000ppm estipulado por norma, isso acontece pois como o trocador de calor é acionado apenas quando ultrapassa os 900ppm, leva-se um tempo até que haja uma troca de ar e os níveis fiquem abaixo dos 1000ppm. Observa-se também que o Linse está com 50,68% do tempo de ocupação com o trocador de calor ligado, esse fato é justificado pelo motivo do trocador ser dimensionado pelo número de pessoas e como o ambiente é amplo, mas com um número baixo de pessoas, o trocador precisa funcionar mais tempo para que os níveis sejam estabelecidos.

O consumo relacionado ao ano todo para a Tabela 22 é de 40.649,91 kWh e tem como discriminação os valores da Tabela 23, observa-se por essa tabela o consumo de condicionamento artificial para aquecimento e refrigeração, consumo para iluminação, equipamentos, *fans* e recuperador de calor.

Tabela 23: Resultados consumo para todo o ano da simulação do Caso base

ANO TODO	Aquecimento (kWh)	Refrigeração (kWh)	Iluminação (kWh)	Equipamentos		Fans (AC e RC) (kWh)	Recuperador de calor (kWh)	Total (kWh)
				Fixos (kWh)	Ventilador (kWh)			
Caso Base	7.005,21	2.384,13	11.449,80	16.479,86	-	3.104,69	226,22	40.649,91

Fonte: autora (2024)

O consumo demonstrado pelo recuperador de calor refere-se ao conjunto de ventilador, sensores e atuadores que o próprio EnergyPlus estabelece de maneira interna, utilizando como uma potência fixa de 250W.

A Tabela 24 demonstra o consumo do prédio apenas para o período de verão, nessa tabela há o consumo de todos os equipamentos para o período e o consumo apenas do condicionamento. Como o consumo de iluminação e equipamentos fixos são sempre constantes em todas as simulações, nos próximos casos será

demonstrado apenas o consumo do condicionamento para que possa ser realizada a análise do consumo apenas do condicionamento.

Tabela 24: Resultados consumo para o período de verão da simulação do Caso base

VERÃO	Ar-condicionado		Iluminação (kWh)	Equipamentos		Fans (AC e RC) (kWh)	Recuperador de calor (kWh)	Total (kWh)
	Aquecimento (kWh)	Refrigeração (kWh)		Fixos (kWh)	Ventilador (kWh)			
Caso Base (total verão)	7,62	1.391,84	2.828,24	4.070,72		381,88	57,46	8.737,76
Caso Base (condicionamento)	7,62	1.391,84				381,88	57,46	1.838,80

Fonte: autora (2024)

Analisando a Tabela 24, observa-se o quanto o prédio analisado é eficiente para as condições de verão, pois o sistema de iluminação e equipamentos tem maior consumo que o próprio ar-condicionado. Nota-se que nesse caso o consumo de refrigeração para esse período é 1.391,84 kWh, sendo aproximadamente 50% do consumo de iluminação, sendo que a iluminação empregada no edifício já é eficiente. Nota-se que no consumo aparece também os *fans*, esse consumo não se refere aos ventiladores de teto e sim aos insufladores de ar contidos no ar-condicionado e trocador de calor.

Diante de tal desempenho para o verão, chama a atenção o elevado percentual de acionamento do aquecimento artificial e os altos níveis de desconforto durante o inverno, apresentados na Tabela 22.

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito do ventilador de teto na economia de energia e no conforto dos usuários. Embora o verão seja o período mais significativo para essa pesquisa, também analisaremos as condições de contorno adotadas na simulação e o desempenho do algoritmo no inverno.

A Figura 39 demonstra a simulação para o período de inverno (22 de junho a 22 de setembro). No gráfico, percebe-se que o PMV está, em sua maioria, fora da faixa de mais ou menos 0,5. Nesse período, o conforto ficou em 24% e desconforto de 76% das horas ocupadas. Esse desconforto ocorre em consequência do *clo* dinâmico e do *setpoint* fixo, nessa simulação não há a adequação da temperatura do ar-condicionado em função do conforto dos usuários.

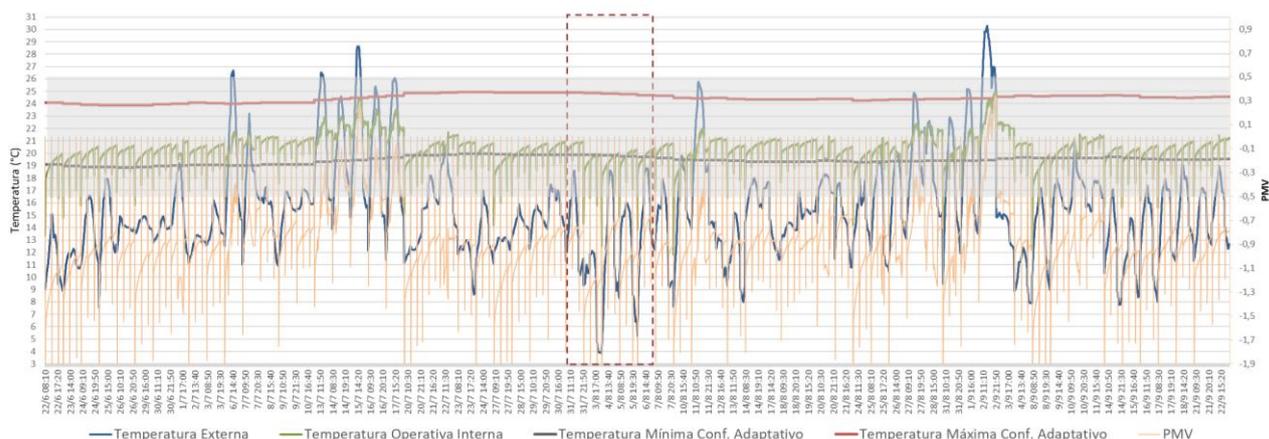


Figura 39 – Simulação Caso Base com PMV 0,5 no período do inverno. Fonte: autora (2024)

A Figura 40 demonstra o funcionamento do *c/o* dinâmico no período de inverno. Através desse gráfico pode-se notar que o *c/o* se mantém abaixo de 0,8 em todo o período, com uma média de 0,58. O dia em que o *c/o* chegou em 0,76 no dia 04/08, a temperatura externa as 8 da manhã, horário em que as pessoas estavam chegando na sala, era de 3,8 °C. A temperatura máxima desse dia se deu as 15:10 com 18,55 °C às 15:10 e finalizando o dia as 22 horas com 8,3 °C.

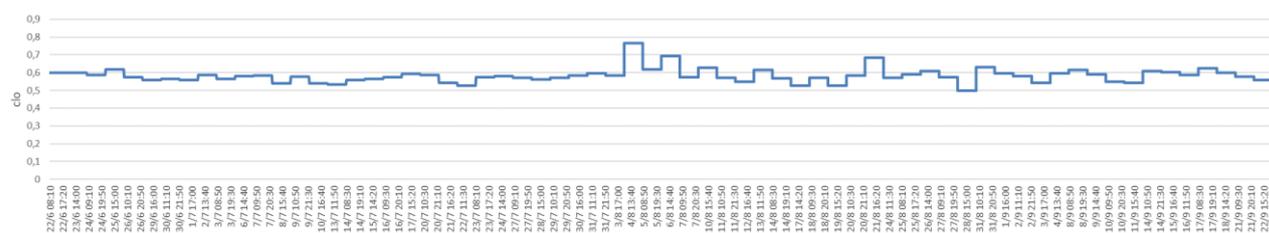


Figura 40 – *C/o* dinâmico no período de inverno. Fonte: autora (2024)

Através dessa análise do *c/o*, podemos identificar o desconforto causado no período de inverno, pois, como o *setpoint* foi fixado em 22 °C, estabelecido conforme a NBR 16401, onde, nessa mesma norma, se estabelece o *c/o* de 0,9 para esse período, as pessoas estão com *c/o* incompatível com a temperatura e, consequentemente, desconfortáveis pelo frio.

A Figura 41 é a ampliação dos dias especificados de inverno do Caso Base. Nesse gráfico pode-se identificar que o ar-condicionado se manteve ligado sempre em que a sala esteve ocupada e a temperatura operativa média das horas ocupadas nesses dias ficou em 19,6°C, já a temperatura média do ar nesses dias foi de 21,7°C. Os extremos negativos no PMV correspondem ao início de cada dia, já que o gráfico demonstra somente as horas ocupadas.

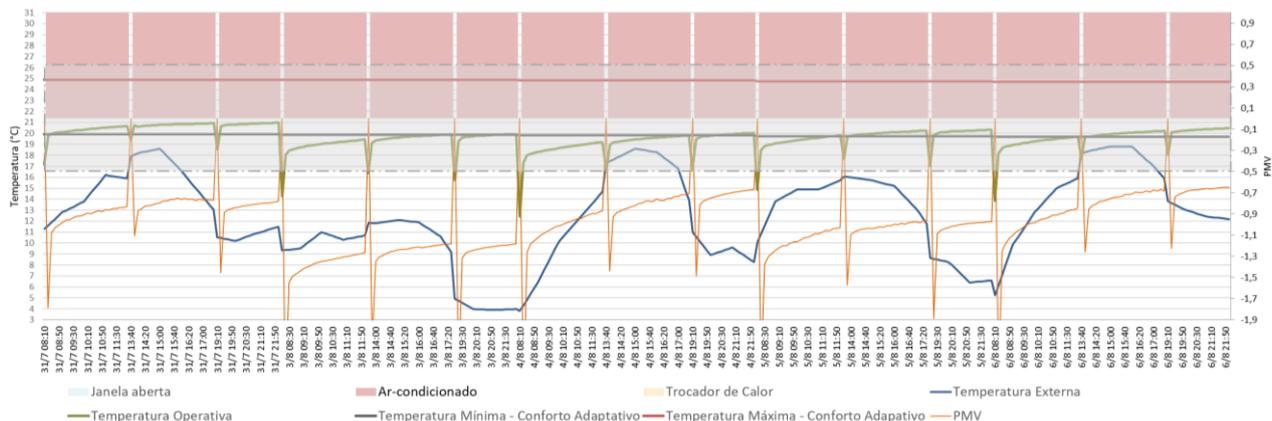


Figura 41 – Simulação caso Base com PMV 0,5 nos dias de inverno. Fonte: autora (2024)

A partir destas análises pode-se concluir que o *clo* dinâmico não representa adequadamente o comportamento dos usuários frente à realidade de inverno no sul do país, pois um *clo* médio de 0,58 é praticamente a vestimenta adotada no verão.

Como definido anteriormente, o uso de ventiladores de teto só se justifica para o período de verão e dias quentes ao longo do ano. Desta forma, a ênfase das análises recai sobre o desempenho dos ventiladores de teto durante o período de verão, sem registrar qualquer prejuízo às análises e resultados decorrente do efeito do *clo* dinâmico no período de inverno.

Para o período de verão demonstrado na Figura 42, pode-se observar que a temperatura interna se manteve dentro da faixa de conforto pelo método adaptativo quando a janela estava aberta e pelo PMV nota-se que há vários momentos em que está fora da faixa de 0,5. Contudo, a estatística de conforto da sala se manteve 99% do tempo ocupado em conforto, nos momentos em que esteve fora de conforto pelo PMV, foram momentos em que a sala estava no início de expediente e no próximo *timestep* se tomou a ação de ligar o ar-condicionado, e então são esses picos em que o PMV se encontra fora da faixa.

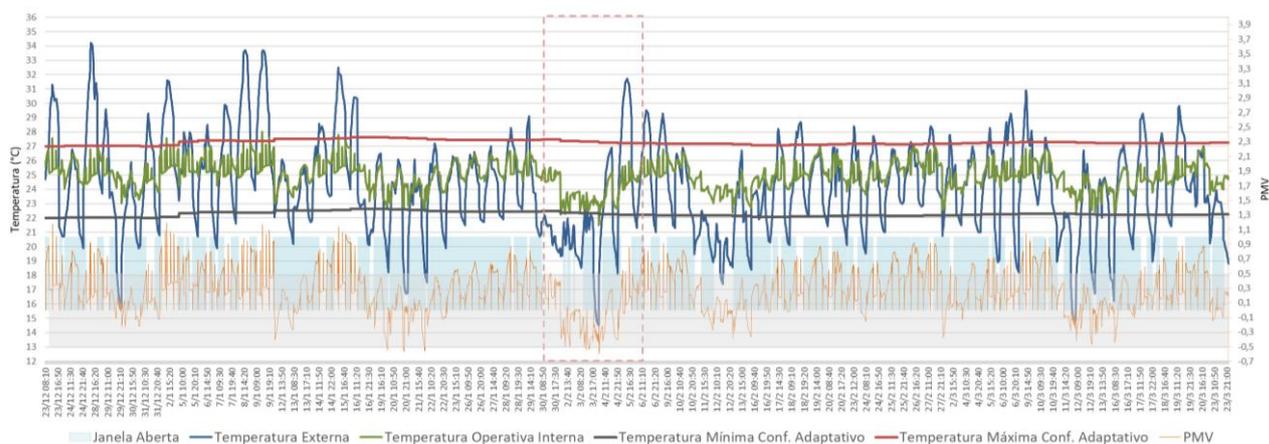


Figura 42 – Simulação Caso Base com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024)

Para representar o acionamento do ar-condicionado nesse período, foi criada a Figura 43. Nesse gráfico se observa os momentos em que o equipamento é acionado para manter o conforto dos usuários. O consumo de refrigeração para esse período foi 1.391,84 kWh, conforme apresentado na Tabela 24.

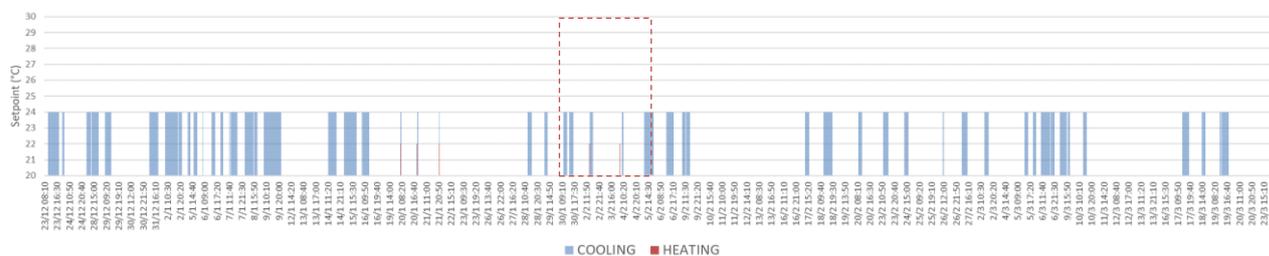


Figura 43 – Acionamento Ar-Condicionado Caso Base com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024)

Quando o gráfico é ampliado para os dias de verão (30/01 a 05/02), nota-se, na Figura 44, que o ar-condicionado é acionado 7 vezes na temperatura estipulada de 24 °C. Nos momentos em que a janela está fechada, ou seja, não está aberta (cor branca ou com trocador de calor ligado) o PMV se encontra dentro da faixa de 0,5. Já nos momentos em que a janela está aberta, a temperatura interna se encontra dentro da faixa mínima e máxima do conforto adaptativo.

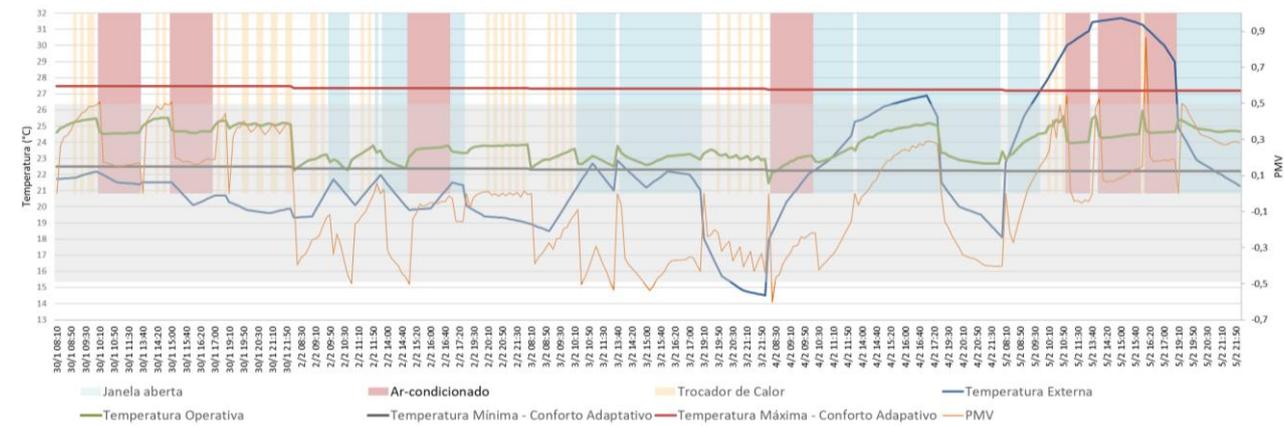


Figura 44 – Simulação caso Base com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024)

A partir da análise do Caso Base, pode-se verificar que a edificação, mesmo sem ventiladores de teto, possui elevado desempenho energético para o período de verão.

## 4.2 Simulação Caso 01

Nessa simulação, o algoritmo funcionou de forma completa, ou seja, abertura de janelas, funcionamento dos ventiladores, trocador de calor e temperatura flutuante de *setpoint* do ar-condicionado.

A Figura 45 demonstra a temperatura externa e a temperatura operativa interna do Ateliê 01 no decorrer de todo o ano da simulação do Caso 01, assim como as temperaturas máximas e mínimas do conforto adaptativo considerando 90% dos ocupantes satisfeitos.

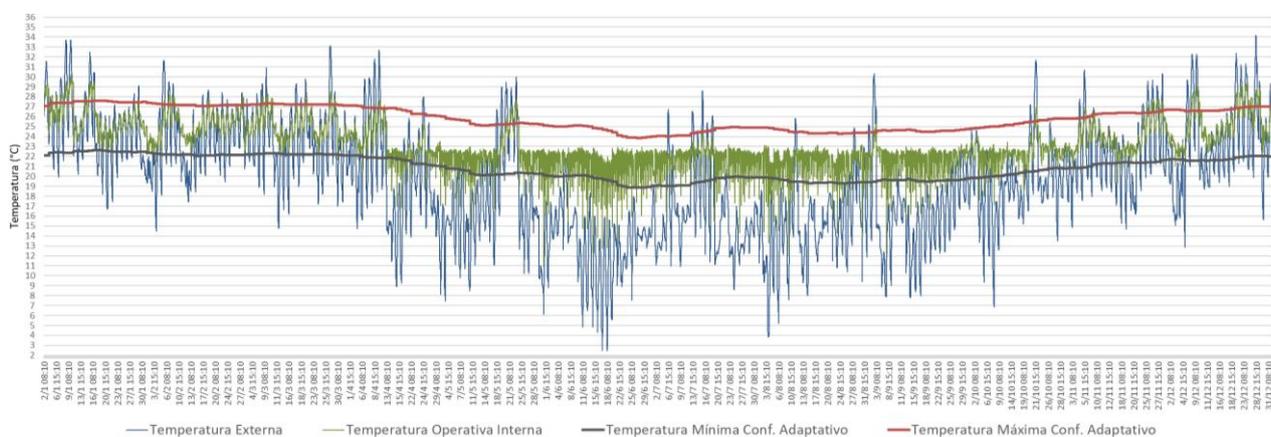


Figura 45 – Simulação Caso 01 com PMV 0,5 ano completo. Fonte: autora (2024)

Através do resumo da Tabela 25, valores referentes ao ano inteiro, observa-se que o ar-condicionado para resfriamento é utilizado para o prédio todo apenas 0,66% das horas ocupadas enquanto o ventilador foi acionado 9,07% do tempo, sendo que a maioria do tempo de funcionamento do ventilador está relacionado com a janela fechada e o ar-condicionado desligado. O nível de desconforto para o frio também caiu para 3,89%. Esse percentual de desconforto não foi possível diminuir, pois tem origem no intervalo de tempo em que se observa o desconforto e então é tomada uma atitude. Esses momentos geralmente ocorrem em início de atividades, quando as pessoas estão entrando nas salas.

O desconforto para o calor nas horas ocupadas é praticamente nulo, isso decorre da adoção do ventilador com velocidade dimerizada e do *setpoint* flutuante do ar-condicionado. Com relação ao inverno, ao contrário do que ocorria no Caso Base, quando o *setpoint* do ar-condicionado era fixo e gerava desconforto por frio aos usuários, o *setpoint* flutuante do ar-condicionado compensa o comportamento, um tanto equivocado, do *c/o* dinâmico mantendo as condições de conforto durante o inverno, mesmo com valor de *c/o* na ordem de 0,58, como comentado anteriormente. Logicamente, esta compensação resulta em maior consumo de energia para aquecimento, mas que não representa a realidade de comportamento dos usuários durante o inverno, nem afeta os objetivos deste trabalho.

Tabela 25: Resultados simulação Caso 01 com PMV 0,5 para o ano inteiro

Ambiente	Horas ocupadas												Horas desocupadas		
	Ar-condicionado			Ventilador				Janela aberta	Janela fechada, ventilador e ar-cond desligado	Trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto		Janela aberta	
	Aquecimento	Resfriamento	Total	Janela aberta e ventilador ligado	Ventilador ligado, ar desligado e janela fechada	Ventilador e ar-cond. ligado	Ventilador ligado					Frio			Calor
Sala de aula	40,57%	0,00%	40,57%	0,02%	6,79%	0,00%	6,81%	40,00%	11,16%	5,85%	1.075,58	4,10%	0,00%	16,74%	
Ateliê 1	37,61%	0,51%	38,11%	0,16%	9,63%	0,51%	10,37%	35,94%	14,25%	17,09%	1.080,33	3,60%	0,00%	15,19%	
Ateliê 2	38,51%	1,36%	39,88%	0,14%	9,77%	1,36%	11,36%	34,99%	13,76%	6,47%	1.032,05	3,83%	0,02%	15,11%	
Ateliê 3	36,84%	1,33%	38,17%	0,13%	9,79%	1,33%	11,35%	36,22%	13,73%	12,15%	1.035,58	3,53%	0,01%	14,79%	
Recepção	42,47%	0,39%	42,86%	0,05%	7,33%	0,39%	7,94%	38,08%	8,98%	0,95%	1.056,50	4,90%	0,00%	16,56%	
Sec. Linse	42,13%	0,00%	42,13%	0,08%	6,24%	0,00%	6,32%	40,54%	9,72%	0,00%	813,70	5,03%	0,00%	16,27%	
Linse	32,07%	1,03%	33,10%	0,13%	8,20%	1,03%	9,36%	37,94%	17,40%	47,13%	1.040,93	2,22%	0,00%	15,60%	
Média	38,60%	0,66%	39,26%	0,10%	8,25%	0,66%	9,07%	37,67%	12,72%	12,80%	1.019,24	3,89%	0,00%	15,75%	

Fonte: autora (2024)

O consumo anual total, conforme detalhado na Tabela 26, foi de 43.243,55 kWh, 2.593,64 kWh a mais do que o Caso Base.

Tabela 26: Consumo detalhado da simulação Caso 01 com PMV 0,5 para o ano inteiro

ANO TODO	Aquecimento (kWh)	Refrigeração (kWh)	Iluminação (kWh)	Equipamentos		Fans (AC e RC) (kWh)	Recuperador de calor (kWh)	Total (kWh)
				Fixos (kWh)	Ventilador (kWh)			
Caso 01	11.980,07	73,80	11.449,80	16.479,86	189,94	2.879,93	190,15	43.243,55

Fonte: autora (2024)

Para o período de inverno, nota-se que a temperatura operativa se mantém numa média de 22 °C, a temperatura do ar numa média de 25 °C e que há vários momentos em que PMV encontra-se fora do limite (Figura 46), porém a média se encontra em -0,5.

Essa oscilação do PMV ocorre pelo fato de que o algoritmo só toma atitudes após a verificação do desconforto, por exemplo: no momento em que os usuários ocupam a sala há a verificação dos índices de conforto, nesse instante verifica-se a insatisfação dos mesmos e no próximo *timestep* (10 minutos) é tomada uma atitude que, nesse caso, é ligar o ar-condicionado. A partir do momento em que o ar-condicionado é ligado, há um tempo para que o ambiente se encontre na temperatura ideal de conforto e isso faz com que haja esses picos de desconforto. Nesse período há conforto de 92% do tempo em que há ocupação, sendo apenas 8% de desconforto.

Quando o ar-condicionado é acionado, a temperatura média mantida para garantir o conforto foi de 25°C. Este valor é justificado pelo *clo* dinâmico, que apresenta valores abaixo dos estipulados por norma, conforme mostrado na Figura 39.

Embora essa temperatura média seja 1 °C além da faixa especificada pela NBR 16401, a gestão do *setpoint* flutuante, que considera a sensação térmica dos usuários, demonstra um grande potencial para manter o conforto dentro da faixa determinada, mesmo que o *clo* esteja fora do habitual. Essa abordagem de gestão do *setpoint* flutuante proporciona um alto desempenho energético, ajustando a temperatura com base na percepção térmica real dos usuários, o que pode levar a uma eficiência maior no uso do ar-condicionado, mantendo o conforto térmico de forma eficaz.

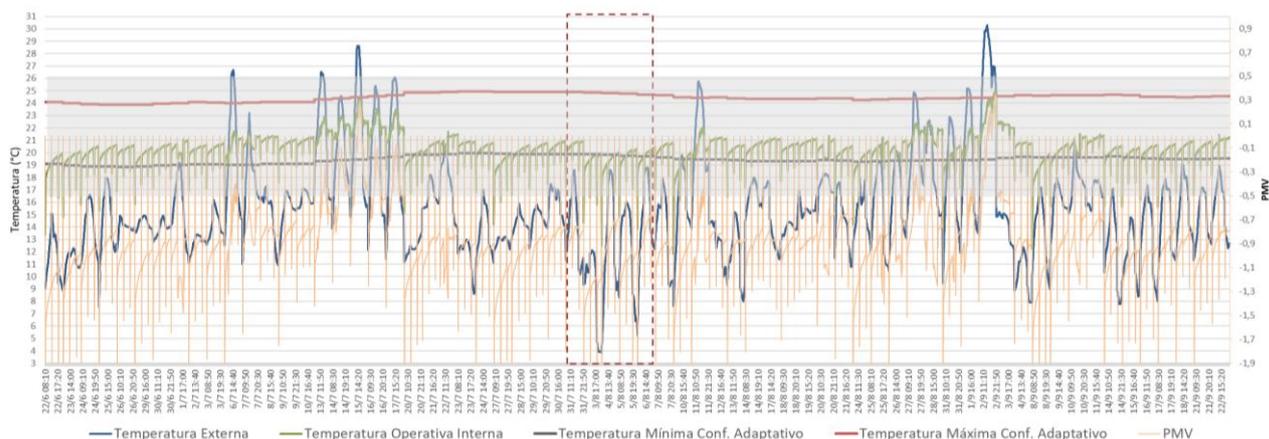


Figura 46 – Simulação Caso 01 com PMV 0,5 no período de inverno. Fonte: autora (2024)

Quando o gráfico da Figura 46 é ampliado nos dias mencionados, é possível observar (Figura 47), que os extremos de desconforto têm uma recorrência, pois são os momentos em que os usuários estão entrando na sala ou os momentos em que se passa as duas horas após o ligamento do ar-condicionado, há a verificação das condições internas e externas para possível desligamento do ar-condicionado.

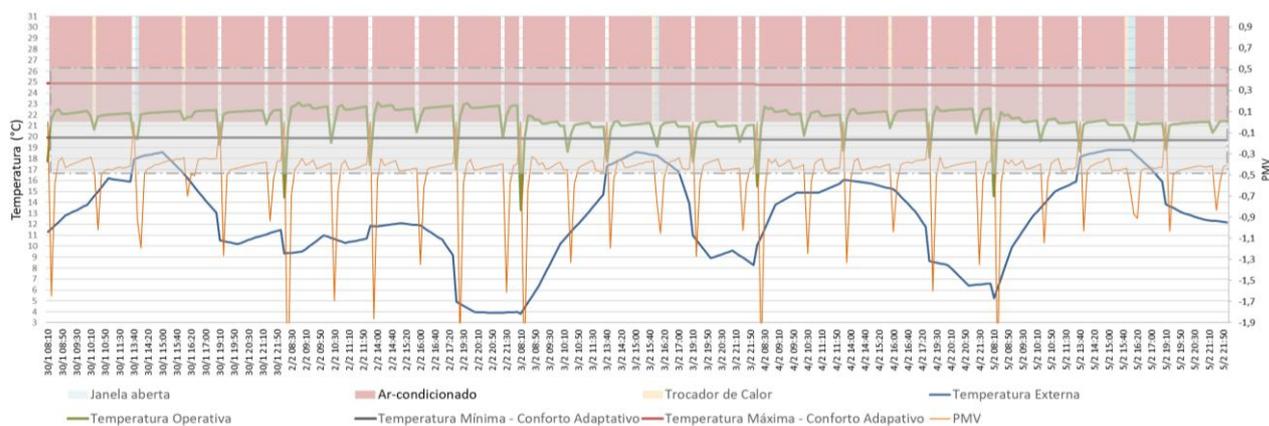


Figura 47 – Simulação Caso 01 com PMV 0,5 nos dias de inverno. Fonte: autora (2024)

Ao analisar a Figura 47, nota-se que houve momentos em que a janela foi aberta. Esses momentos acontecem, pois, a temperatura interna e a externa estavam com uma diferença menor que 3°C. Nos momentos em que o PMV apresenta extremo de frio, são horários em que os ocupantes estão entrando na sala (8:00, 14:00 e 19:00), após período desocupada. Ou seja, com a sala desocupada tudo é desligado e o PMV cai. A partir do ingresso dos usuários, o algoritmo verificou as condições da sala e após esse instante, tomou uma atitude, que nesse caso, foi ligar o ar-condicionado para aquecer. O gráfico da Figura 47 mostra apenas as horas ocupadas.

As análises referentes ao período de inverno, através das Figuras 46 e 47, serviram apenas para demonstrar o potencial do *setpoint* flutuante no ajuste das

condições de conforto em função da sensação térmica do usuário, sob diversas condições. Embora o enfoque deste trabalho seja no uso de ventiladores, o desenvolvimento de um algoritmo que mensure a sensação térmica e possibilite o ajuste automático do *setpoint*, também é um resultado a ser apreciado, tanto no verão quanto no inverno.

No entanto, considerando que os ventiladores de teto são utilizados principalmente durante os períodos mais quentes, o consumo durante o verão será detalhado separadamente na Tabela 27.

A decisão de focar no consumo de ventiladores e condicionamento durante o verão visa fornecer uma compreensão mais clara da variação de cada simulação efetuada. Além disso, como o consumo de iluminação e equipamentos fixos permanece constante ao longo do ano, esses valores foram excluídos da análise específica de verão para enfatizar o impacto do uso de ventiladores e sistemas de climatização.

Tabela 27: Consumo para o período de verão da simulação do Caso 01

VERÃO	Ar-condicionado		Ventilador (kWh)	Fans (AC e RC) (kWh)	Recuperador de calor (kWh)	Total (kWh)
	Aquecimento (kWh)	Refrigeração (kWh)				
Caso 01	11,62	53,65	100,34	514,07	45,07	724,75

Fonte: autora (2024)

Comparando o consumo do ar-condicionado para refrigeração do Caso 01 apresentado na Tabela 27, com o Caso Base apresentado na Tabela 24, nota-se que o consumo do condicionamento para refrigeração nesse caso é aproximadamente 4% do consumo do Caso Base, ou seja uma redução de 96%. Nessa simulação há o consumo dos ventiladores de teto que acrescentam, mas quando se soma os consumos desse caso em comparação com o anterior, é possível obter uma redução de 60,6% no mesmo período.

No gráfico da Figura 48, demonstrado a seguir, com o período de verão, é possível observar que a temperatura interna fica entre a mínima e máxima do conforto adaptativo quando está sendo gerido pelo conforto adaptativo, ou seja, quando a janela está aberta, até em momentos em que a temperatura externa está fora do limite de conforto. Há momentos em que a temperatura operativa está alta, como nos dias 8 e 9 de janeiro, mas que o conforto é estabelecido através do acionamento dos ventiladores (Figura 49) e o PMV está dentro da faixa estabelecida. No gráfico da

Figura 48, podemos observar a influência do ventilador no comportamento da temperatura operativa, no qual o uso do ventilador amplia a temperatura de conforto.

É interessante notar que o conforto dos ocupantes pode variar dependendo do método utilizado, há momentos em que está confortável por um método de conforto e não está por outro. Um dado relevante é o uso da amplitude térmica no método adaptativo. Observou-se que, em apenas 0,10% do tempo, foi possível utilizar o ventilador com as janelas abertas simultaneamente. Isso ocorreu porque a amplitude não foi suficiente para manter o conforto térmico, já que a temperatura externa variava mais do que a amplitude permitida além da amplitude com o uso da ventilação ser, muitas vezes, menor que a temperatura máxima do adaptativo. Na simulação, esse cenário resultou no fechamento das janelas e no acionamento do ventilador, proporcionando conforto segundo o índice PMV, que considera uma gama mais ampla de variáveis para avaliar o bem-estar dos ocupantes.

Um exemplo claro dessa situação ocorreu no dia 15/1. Nas primeiras horas do dia, a simulação indicou que as janelas estavam abertas e o ambiente estava dentro da faixa de conforto segundo o método adaptativo. No entanto, para manter o conforto de forma mais eficiente, as janelas foram fechadas e os ventiladores acionados, garantindo que, segundo o PMV, os ocupantes permanecessem em conforto.

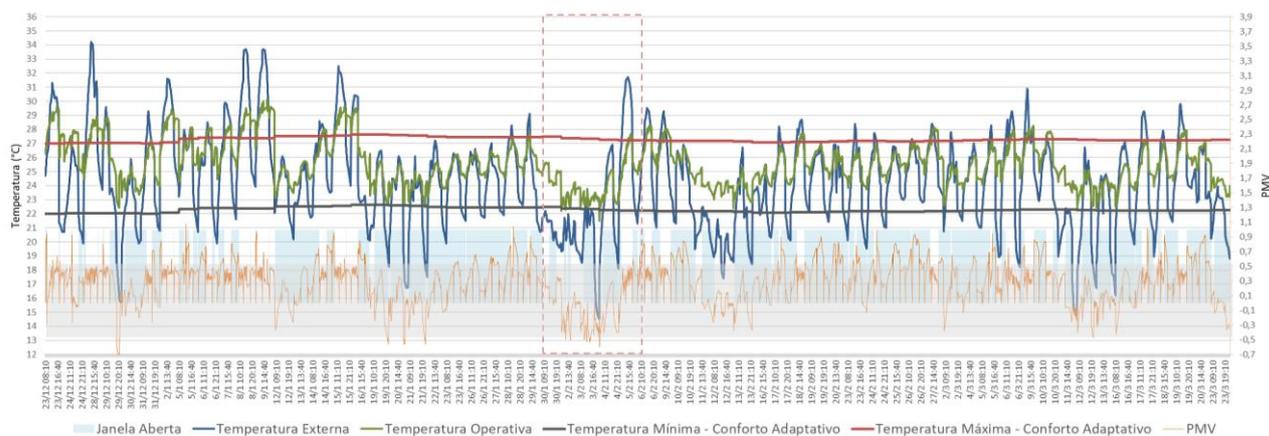


Figura 48 – Simulação Caso 01 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024)

O ar-condicionado só é acionado quando o conforto adaptativo não for suficiente, mesmo com o ventilador tendo atingido a velocidade máxima estabelecida e, ainda assim, o PMV estiver fora do limite. Então o ar-condicionado é acionado na temperatura testada, levando em consideração as variáveis de conforto do PMV. Quando se compara a Figura 49, demonstrando o funcionamento dos ventiladores,

com a Figura 50, acionamento do ar-condicionado, é possível observar que nem sempre que o ventilador chegou aos 1,2m/s o condicionamento artificial foi acionado, isso porque o uso dos ventiladores de teto já foi suficiente para manter o conforto dentro da faixa de 0,5.

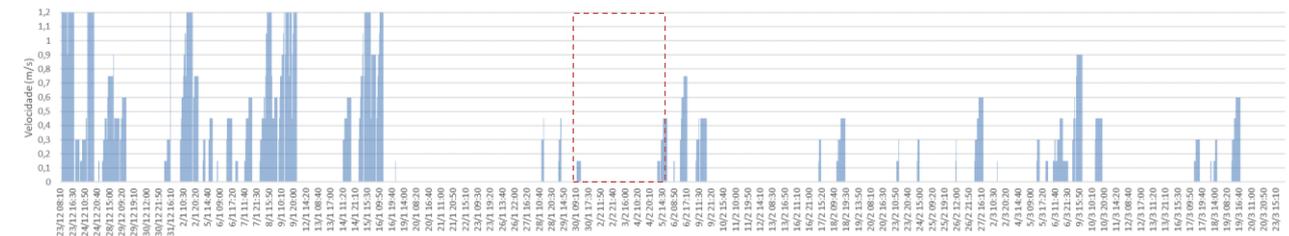


Figura 49 – Ventiladores de teto Caso 01 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024)

Através da Figura 50, nota-se que quando o ar-condicionado foi acionado para resfriamento, a temperatura estabelecida para manter o conforto foi 30°C e com o uso do ventilador em 1,2m/s (Figura 49).

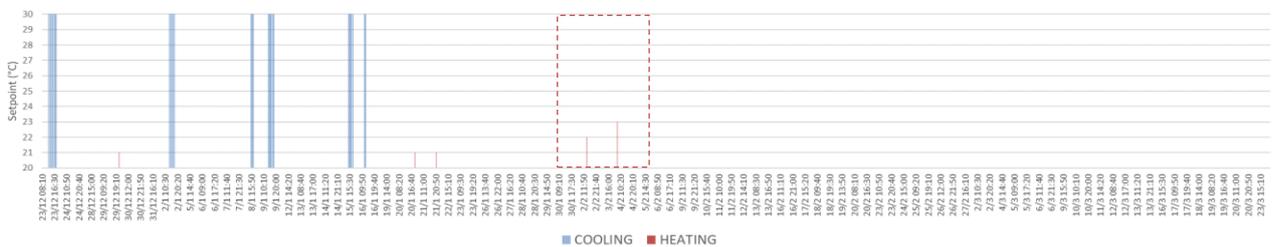


Figura 50 – Acionamento Ar-Condicionado Caso 01 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024)

Quando ampliamos o gráfico para os dias estipulados de verão, Figura 51, é possível observar quando a janela não está aberta, o trocador está em funcionamento para manter o CO<sub>2</sub> abaixo do limite e quando o ar-condicionado está em funcionamento.

É possível notar que o algoritmo consegue manter a temperatura interna na faixa de conforto mesmo a temperatura externa estando fora dos limites de conforto, ou seja, dentro do limite do conforto adaptativo e com o PMV dentro do limite estabelecido.

Consegue-se observar também que a sala se mantém em conforto de forma passiva, ou seja, apenas com as janelas abertas e também com a janela fechada, mas sem o funcionamento do ar-condicionado.

No dia 05 de fevereiro, onde a temperatura externa atingiu quase 32 °C, é possível observar que apenas o uso dos ventiladores de teto foi suficiente para manter os usuários em conforto, sem a necessidade de ligar o ar-condicionado.

Nota-se que o ar-condicionado ligou apenas em dois momentos nesses dias e quando foi acionado, foi para aquecimento. No dia 02/02 foi acionado a 22 °C e no dia 04/02, em 23 °C. Foi necessário esse acionamento, pois nota-se que esses dias a temperatura operativa atingiu o limite inferior do conforto adaptativo e o PMV estava perto do limite de -0,5.

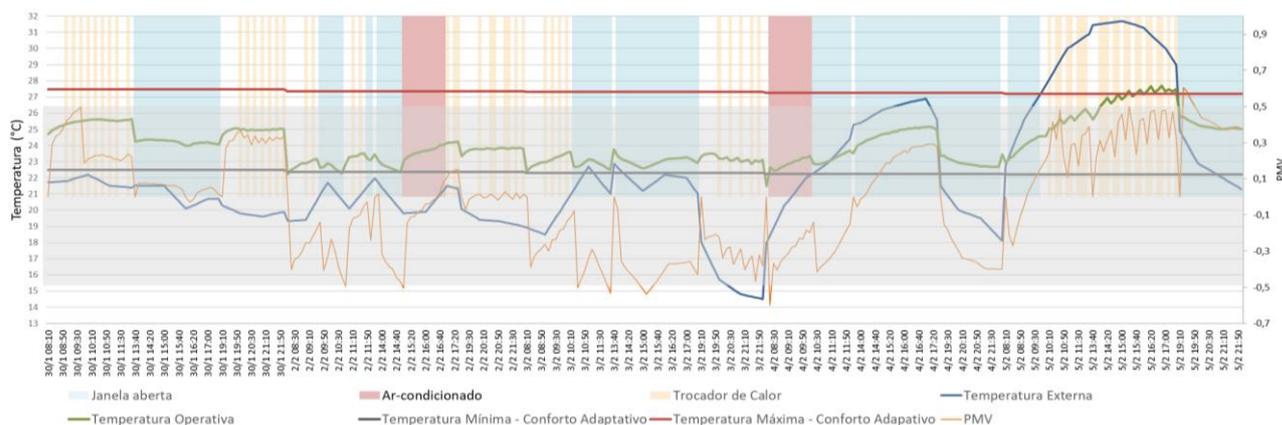


Figura 51 – Simulação Caso 01 com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024)

Quando demonstrado o funcionamento dos ventiladores nesse período (Figura 52), nota-se uma velocidade máxima de 0,45m/s, sendo que todos esses momentos foram com as janelas fechadas e sem ligar o ar-condicionado.

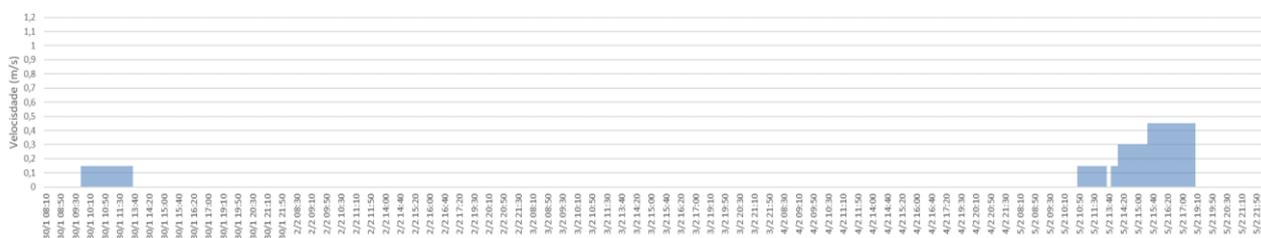


Figura 52 – Ventiladores de teto da simulação Caso 01 com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024)

Analisando os resultados da simulação do Caso 01, pode-se concluir que o uso de ventiladores de teto com velocidade variável, praticamente excluiu a necessidade de ar-condicionado para refrigeração, mantendo as condições de conforto tanto pelo Conforto Adaptativo, quando janelas abertas, quanto pelo PMV, quando janelas fechadas.

### 4.3 Simulação Caso 02 – Janela Fechada

A simulação com a janela fechada segue a mesma configuração do Caso 01, com a única diferença de que, neste cenário, a janela permanece constantemente fechada. Essa escolha reflete uma situação em que o fechamento seria necessário devido à presença de ruídos externos, considerando que a edificação está localizada próxima a vias movimentadas. Esta configuração busca exigir um pouco mais da edificação NZEB, dos sistemas de ar-condicionado, ventiladores de teto e trocadores de calor.

Tabela 28: Resultados simulação Caso 02 com PMV 0,5 para o ano inteiro

Ambiente	Horas ocupadas										
	Ar-condicionado			Ventilador			Janela fechada, ventilador e ar-cond desligado	trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto	
	Aquecimento	Resfriamento	Total	Ventilador e ar-cond. ligado	Ventilador ligado, ar desligado e janela fechada	Ventilador ligado				Frio	Calor
Sala de aula	44,15%	0,22%	44,37%	0,22%	22,59%	22,88%	31,03%	18,12%	1.074,39	4,13%	0,00%
Ateliê 1	39,54%	0,97%	40,52%	0,97%	28,81%	29,91%	28,44%	35,83%	1.069,89	3,50%	0,00%
Ateliê 2	39,86%	1,91%	41,77%	1,91%	29,31%	31,34%	27,44%	15,72%	1.052,78	3,69%	0,02%
Ateliê 3	38,43%	2,28%	40,71%	2,28%	30,75%	33,18%	26,20%	27,73%	1.058,45	3,35%	0,03%
Recepção	46,23%	0,53%	46,76%	0,51%	20,98%	21,60%	30,89%	1,40%	1.037,38	4,71%	0,02%
Sec. Linse	49,35%	0,00%	49,35%	0,00%	17,42%	17,42%	32,25%	0,01%	901,40	5,26%	0,00%
Linse	29,41%	3,72%	33,13%	3,72%	33,64%	37,39%	28,44%	94,05%	1.053,96	2,00%	0,00%
Média	41,00%	1,38%	42,37%	1,37%	26,22%	27,67%	29,24%	27,55%	1.035,46	3,81%	0,01%

Fonte: autora (2024)

Através desse resumo notamos que o ventilador é utilizado em maior tempo que a simulação do Caso 01 e o acionamento do ar-condicionado dobrou, mas que praticamente não foi utilizado. Nota-se também que no Linse, o trocador de calor funciona praticamente todo o tempo em que está sendo ocupado, pois o ambiente é amplo, porém com baixa densidade de pessoas. Como o trocador é dimensionado em função da quantidade de pessoas, este trocador possui baixa vazão, o que torna essa renovação de ar mais demorada em um ambiente amplo. Nota-se que nessa simulação houve um acréscimo na utilização de condicionamento para aquecimento de 2,4%, esse aumento se justifica, pois há momentos em que foi necessário aquecer o ambiente, pois o PMV estava fora da faixa, já que nessa opção apenas o PMV foi contabilizado, enquanto que no Caso 01, a janela estava aberta e pelo método adaptativo as pessoas estavam em conforto.

Tabela 29: Consumo detalhado da simulação Caso 02 com PMV 0,5 para o ano inteiro

ANO TODO	Aquecimento (kWh)	Refrigeração (kWh)	Iluminação (kWh)	Equipamentos		Fans (AC e RC) (kWh)	Recuperador de calor (kWh)	Total (kWh)
				Fixos (kWh)	Ventilador (kWh)			
Caso 02	11.923,04	151,51	11.449,80	16.479,86	601,49	5.954,71	190,94	46.751,35

Fonte: autora (2024)

Nesta configuração, o consumo anual foi de 46.751,35 kWh conforme detalhado na Tabela 29 e para o período de verão foi consumido um total de 2.275,15 kWh (Tabela 30) para condicionamento. Isso significa um aumento de aproximadamente 313% em relação ao Caso 01, esse acréscimo tem um maior peso pelo fato de que o *fans* teve um maior consumo, pelo motivo do trocador de calor ficar o dobro de tempo ligado em comparação com o Caso 01, pois há a necessidade da renovação de ar para manter o conforto diante do CO<sub>2</sub>.

Tabela 30: Resultados consumo para o período de verão da simulação do Caso 02

VERÃO	Ar-condicionado		Ventilador (kWh)	Fans (AC e RC) (kWh)	Recuperador de calor (kWh)	Total (kWh)
	Aquecimento (kWh)	Refrigeração (kWh)				
Caso 02	5,44	105,16	373,43	1.750,97	40,15	2.275,15

Fonte: autora (2024)

No período de verão, a temperatura interna se mantém mais alta, pois o prédio não perde calor para o exterior, ficando sempre armazenado, já que as janelas não são abertas, inclusive quando não há pessoas (Figura 53).

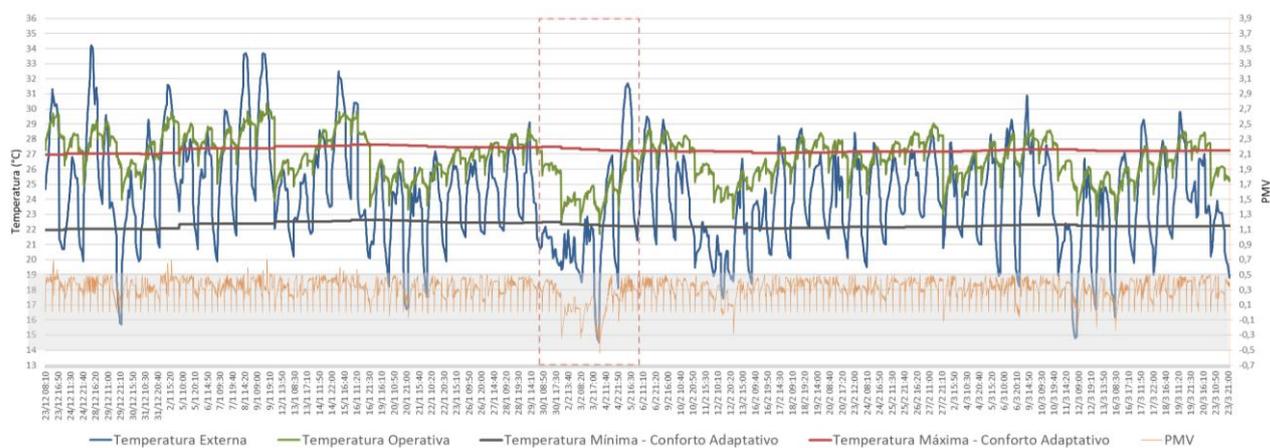


Figura 53 – Simulação Caso 02 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024)

Nessa opção, é possível tirar proveito do ventilador de teto para manter o conforto, inclusive nos dias com temperaturas amenas o ventilador é acionado numa velocidade mais baixa, como pode ser observado na Figura 54.

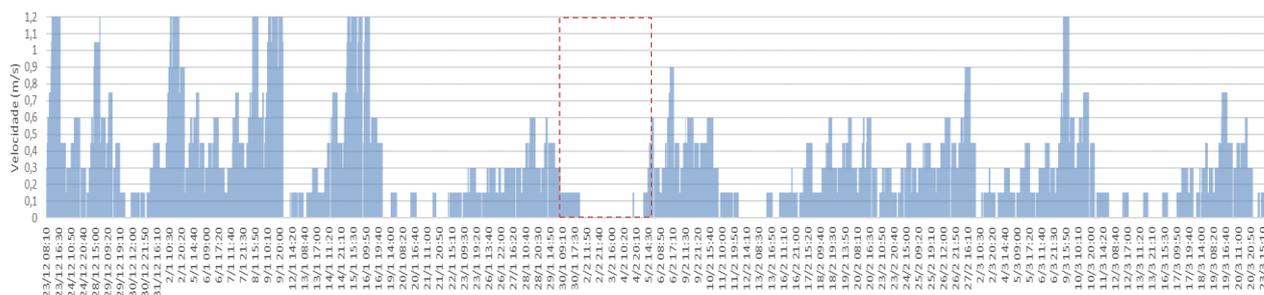


Figura 54 – Ventiladores de teto na simulação Caso 02 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024)

A Figura 55 demonstra o acionamento do ar-condicionado para essa simulação. Nota-se que o ar-condicionado é acionado na maioria das vezes em 30 °C e algumas vezes em 29 °C. Quando comparado com o gráfico da Figura 53, observa-se que o PMV se manteve dentro do conforto térmico.

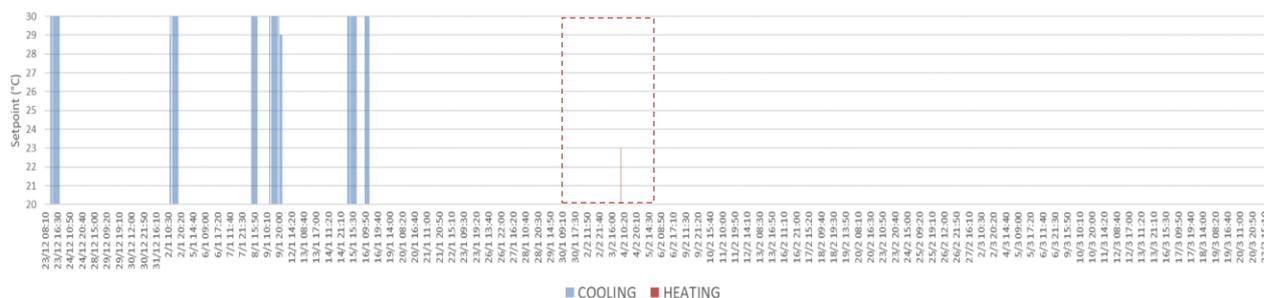


Figura 55 – Acionamento do Ar-condicionado na simulação Caso 02 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024)

Quando a análise é realizada para os dias específicos de verão (Figura 56), nota-se que o ar-condicionado é acionado no dia 4/2, apenas para aquecimento, na temperatura de 23 °C. Pelo fato de as aberturas estarem sempre fechadas, a temperatura interna oscila menos e conseguimos utilizar ainda mais o benefício do ventilador de teto.

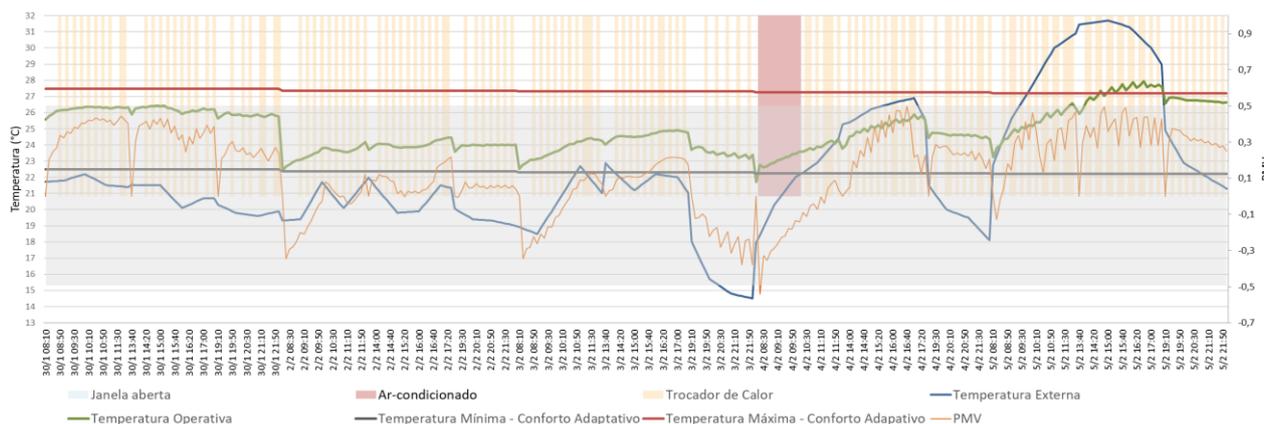


Figura 56 – Simulação Caso 02 com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024)

A Figura 57 demonstra o funcionamento dos ventiladores de teto para os dias de verão analisados.

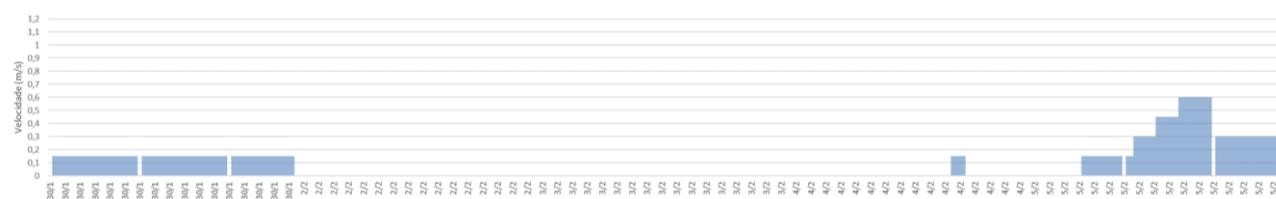


Figura 57 – Ventiladores de teto na simulação Caso 02 com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024)

A simulação do Caso 02 demonstra a efetividade do uso dos ventiladores de teto para manter as condições de conforto, mesmo em condições extremas de ausência da ventilação natural. Mesmo nestas condições o ar-condicionado praticamente não foi utilizado para fins de refrigeração durante o verão, cabendo o consumo de energia principalmente ao uso de trocadores de calor para manter as condições de salubridade do ambiente. Porém, cabe ressaltar que esta edificação foi projetada para ter elevado desempenho passivo, dispondo de dispositivos de sombreamento, adequadamente projetados, vidros duplos, cores claras e isolamento térmico de paredes e coberturas. Esta simulação aponta que, mesmo com as janelas fechadas por uma questão de conforto acústico, não será necessário condicionar artificialmente durante o verão.

#### 4.4 Simulação Caso 03 - Sem ventilador

Essa simulação utiliza o *setpoint* conforme o conforto dos usuários, mas não há o efeito do ventilador de teto, de modo a isolar a influência do ventilador dos casos anteriores.

Pode-se observar através da análise da Tabela 31 que a utilização do ar-condicionado para resfriamento é utilizado 8,03% do tempo em que as pessoas estão na sala, um valor bem mais alto do que o utilizado com o Caso 01, em que o ar condicionado é utilizado apenas 0,66% do tempo para refrigeração.

Tabela 31: Resultados simulação Caso 03 com PMV 0,5 para o ano inteiro

Ambiente	Horas ocupadas									Horas desocupadas
	Ar-condicionado			Janela aberta	Janela fechada, ventilador e ar-cond desligado	trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto		
	Aquecimento	Resfriamento	Total					Frio	Calor	
Sala de aula	40,61%	6,78%	47,40%	39,22%	11,73%	5,31%	1.089,41	4,11%	0,34%	16,22%
Ateliê 1	37,61%	9,13%	46,74%	36,40%	14,79%	16,87%	1.079,38	3,60%	0,52%	15,85%
Ateliê 2	38,54%	9,31%	47,86%	36,28%	14,36%	4,92%	1.064,33	3,82%	0,62%	16,15%
Ateliê 3	36,85%	9,35%	46,20%	37,62%	14,18%	10,36%	1.027,49	3,53%	0,61%	16,20%
Recepção	42,51%	7,81%	50,32%	37,41%	9,47%	0,57%	1.055,78	4,88%	0,57%	16,02%
Sec. Linse	42,25%	5,55%	47,80%	40,55%	10,19%	0,00%	746,13	5,04%	0,28%	16,15%
Linse	32,12%	8,29%	40,41%	37,95%	18,16%	47,11%	1.037,21	2,22%	0,34%	15,99%
Média	38,64%	8,03%	46,68%	37,92%	13,27%	12,17%	1.014,25	3,89%	0,47%	16,08%

Fonte: autora (2024)

Tabela 32: Consumo detalhado da simulação Caso 03 com PMV 0,5 para o ano inteiro

ANO TODO	Aquecimento (kWh)	Refrigeração (kWh)	Iluminação (kWh)	Equipamentos		Fans (AC e RC) (kWh)	Recuperador de calor (kWh)	Total (kWh)
				Fixos (kWh)	Ventilador (kWh)			
Caso 03	11.985,81	1.897,64	11.449,80	16.479,86	-	2.778,91	241,36	44.833,38

Fonte: autora (2024)

O consumo referente ao ano inteiro para essa simulação foi de 44.833,38 kWh, mas para o consumo apenas do verão obteve-se um total de 8.550,15 kWh (Tabela 33). Esse consumo é 10% menor que o Caso Base, onde o *setpoint* do ar-condicionado é fixo. Isso demonstra a importância do *setpoint* flutuante de condicionamento artificial em função do conforto dos ocupantes.

Tabela 33: Resultados consumo para o período de verão da simulação do Caso 03

VERÃO	Ar-condicionado		Ventilador (kWh)	Fans (AC e RC) (kWh)	Recuperador de calor (kWh)	Total (kWh)
	Aquecimento (kWh)	Refrigeração (kWh)				
Caso 03	12,28	1.153,75		415,28	69,88	1.651,19

Fonte: autora (2024)

A Figura 58, que apresenta a simulação para o período de verão do Caso 03, revela uma diferença notável em relação ao Caso 01 referente a linha da temperatura operativa. É possível observar que essa linha no Caso 03 é mais baixa em comparação com o Caso 01, ao qual utiliza o ventilador de teto. Isso evidencia a amplitude da temperatura de conforto através da movimentação do ar, mantendo, ao mesmo tempo, o conforto térmico.

No gráfico da Figura 58 é possível observar o quanto o PMV é mais sensível à velocidade do ar do que o Conforto Adaptativo. Na ausência de movimentação de ar, frequentemente o PMV esteve acima do limite de 0,5, enquanto a temperatura operativa se manteve todo o período dentro dos limites do Conforto Adaptativo.

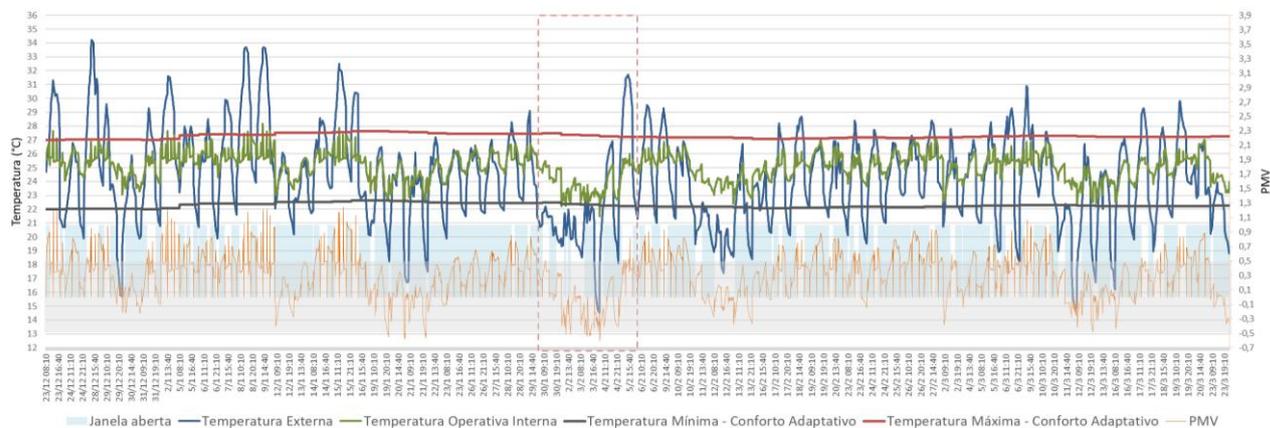


Figura 58 – Simulação Caso 03 com PMV 0,5 no período de verão. Fonte: autora (2024)

Quando o gráfico é ampliado para os dias mencionados (Figura 59) constata-se um maior acionamento do ar-condicionado para manter os usuários em conforto, sem o uso do ventilador de teto.

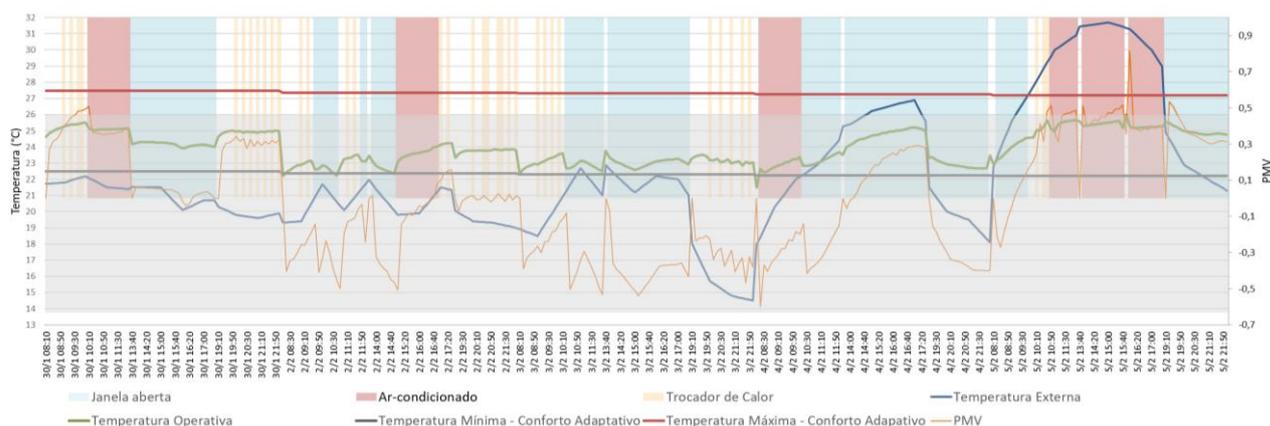


Figura 59 – Simulação Caso 03 com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024)

Quando comparada a Figura 60 com a Figura 44, referente ao Caso 01. Nota-se que houve o mesmo acionamento para aquecimento nesse período em decorrência de dias frios, mas o diferencial ao analisar esses gráficos se dá no acionamento do ar-condicionado para resfriamento (cooling), no qual nessa simulação ele é acionado no dia 30/1 e no dia 5/2, enquanto no Caso 01, apenas o ventilador de teto é acionado para manter o conforto.

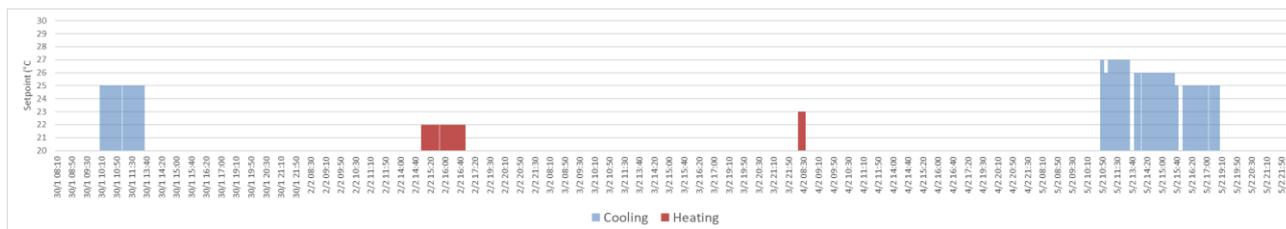


Figura 60 – Acionamento do ar-condicionado do Caso 03 com PMV 0,5 nos dias de verão. Fonte: autora (2024)

Outra observação importante refere-se à temperatura de *setpoint* no qual o ar-condicionado foi acionado. Enquanto nos casos com ventilador de teto, este era acionado a uma temperatura de 30°C, sem os ventiladores, ele foi acionado frequentemente a uma temperatura de 25°C de *setpoint*. Isso se reflete em maior necessidade de refrigeração e maior consumo de energia para manter as condições de conforto dos usuários.

## 5 Compilado de consumo das simulações para o verão

Buscando delimitar a análise em função dos objetivos propostos pelo trabalho, a seguir será apresentada uma compilação dos resultados obtidos com relação ao conforto e consumo de energia com climatização durante o verão simulados nos casos analisados.

A Tabela 34 apresenta os consumos de energia e os percentuais de desconforto no período de verão referente a cada um dos casos.

Tabela 34: Resultados consumo para o período de verão das simulações

VERÃO	Ar-condicionado		Ventilador (kWh)	Fans (AC e RC) (kWh)	Recuperador de calor (kWh)	Total (kWh)	Desconforto
	Aquecimento (kWh)	Refrigeração (kWh)					
Caso Base	7,62	1.391,84		381,88	57,46	1.838,80	1%
Caso 01	11,62	53,65	100,34	514,07	45,07	724,75	0%
Caso 02	5,44	105,16	373,43	1.750,97	40,15	2.275,15	0%
Caso 03	12,28	1.153,75		415,28	69,88	1.651,19	1%

Fonte: autora (2024)

A tabela apresentada mostra o consumo de energia em kWh para diferentes cenários simulados de uso de ar-condicionado e ventilação durante o verão. No Caso Base, o *setpoint* do ar-condicionado é fixo e as janelas podem ser abertas e não há uso de ventiladores, resultando em um consumo total de 1.838,80 kWh e um índice de desconforto de 1%. No Caso 01, onde o *setpoint* é variável e há uso de ventilador, o consumo total é reduzido para 724,75 kWh, com desconforto de 0%. Um ponto notável neste cenário é a drástica redução no consumo de Refrigeração, que cai para 53,65 kWh, devido ao auxílio do ventilador. No Caso 02, apesar do *setpoint* variável e do uso de ventilador, as janelas permanecem fechadas, resultando em um aumento no consumo de energia devido ao acúmulo de CO<sub>2</sub> na sala. O Caso 03 apresenta um consumo total de 1.651,19 kWh com *setpoint* variável e sem o uso de ventiladores, com um leve desconforto de 1%.

A diferença no consumo de refrigeração entre os casos é particularmente importante. Nos Caso 01 e Caso 02, o uso do ventilador permite uma redução expressiva no consumo de ar-condicionado para resfriamento, mostrando que o uso de ventiladores reduz a necessidade de resfriamento contínuo sem aumento do desconforto. Já no Caso 02 o consumo de energia na coluna Fans (AC e RC) é elevado devido ao fechamento permanente das janelas, que leva a um acúmulo de CO<sub>2</sub> e demanda maior uso dos sistemas de renovação de ar, que na simulação foram dimensionados de forma automática pelo *EnergyPlus*. Comparando todos os casos, observa-se que a estratégia de *setpoint* variável aliada ao uso de ventiladores e abertura de janelas, como visto no Caso 01, proporciona o melhor equilíbrio entre conforto e economia de energia.

A Figura 60 é um resumo da energia consumida no período de verão das simulações realizadas.

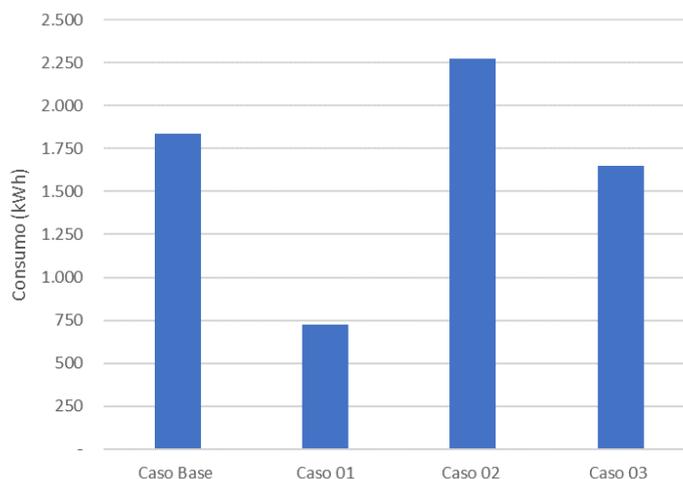


Figura 61 – Gráfico de resumos de energia para cada simulação no período do verão. Fonte: autora (2024)

Torna-se evidente que o consumo de energia é mais elevado na simulação do Caso 02, onde se mantêm as janelas fechadas o tempo inteiro, inclusive sem pessoas. O segundo caso com maior consumo de energia é o Caso Base, no qual não utiliza os ventiladores de teto e mantém o *setpoint* fixo do ar-condicionado. Por outro lado, a simulação mais eficiente em termos de consumo de energia durante o verão é aquela que engloba tanto o uso dos ventiladores como a otimização do ar-condicionado através do uso do *setpoint* conforme o conforto dos usuários, a simulação do Caso 01, consome 39,41% de energia em relação ao Caso Base, ou seja, uma economia de 60,59% da edificação da NZEB, que, originalmente, já uma edificação muito eficiente.

## 6 Conclusão

O presente estudo teve como objetivo geral investigar o impacto da utilização da velocidade do ar por meio de ventiladores de teto na eficiência energética de uma edificação automatizada, por meio de simulações computacionais. Para isso, aplicamos algoritmos em Python em uma simulação no *EnergyPlus* para automatizar estratégias de forma eficiente. Definimos a metodologia de conforto para os momentos em que a janela está aberta, ou seja, há o contato dos ocupantes com o meio externo e assim o conforto adaptativo é o indicado, já quando a janela está fechada, o método analítico se comporta melhor.

A adoção de Conforto Adaptativo para as condições de janelas abertas e do PMV para janelas fechadas se demonstrou adequada e o comportamento de cada um dos métodos diante da velocidade do ar apresentou aspectos interessantes que até então não foram identificados nas bibliografias consultadas.

O Conforto Adaptativo que adota uma expansão do limite de conforto em função da velocidade do ar, se mostrou bem menos sensível ao ventilador de teto do que o método do PMV. Não raro o algoritmo mantendo as janelas abertas atingiu a velocidade máxima sem obter conforto pelo método do Conforto Adaptativo. Ao fechar as janelas, o PMV registrava conforto apenas com o ventilador acionado. Esta questão é bastante importante para ser confrontada em campo com a edificação em uso e, muito provavelmente, será ajustada pela percepção do usuário.

Apesar de alguns estudos demonstrarem aceitação de velocidades acima de 1,20 m/s, o limite de velocidade dos ventiladores de teto foi estabelecido em 1,20 m/s, considerada máxima pelo padrão de conforto adaptativo da ASHRAE (2020) e representar um valor representativo das pesquisas mencionadas neste estudo.

Para a velocidade máxima de 1,20 m/s, conforme as simulações realizadas, constatamos que, durante o verão, o *setpoint* do ar-condicionado, quando utilizado em conjunto com os ventiladores de teto, tem uma média de 30°C. Um valor bem acima do especificado pela NBR 16.401, no entanto, mantendo as condições de conforto com maior eficiência energética.

Os resultados revelam que, no período de verão, a utilização dos ventiladores de teto proporciona benefícios significativos, melhorando a sensação térmica por meio da circulação de ar e resultando em uma redução no consumo de energia elétrica em comparação com a simulação que não faz uso dos ventiladores de teto e mantém o *setpoint* do ar-condicionado fixo nos padrões das NBR 16.401.

A adoção do *clo* dinâmico apresentou severas limitações para o período de inverno, já que estabeleceu valor muito baixo para o *clo*, incompatível com a realidade, gerando muitas horas de desconforto por frio, no Caso Base (*setpoint* fixo), e elevado consumo com aquecimento no Caso 01 (*setpoint* variável). Em função disso, a comparação anual de consumos ficou prejudicada.

Por outro lado, o *clo* dinâmico se mostrou adequado ao período de verão que é justamente o período de relevância de utilização dos ventiladores de teto e sua influência no consumo de refrigeração.

Nestas condições, o uso de ventiladores de teto comprovou seu potencial de redução de consumo de energia com refrigeração, tanto no que refere a percepção térmica de conforto propiciada pela movimentação de ar, que descarta ou retarda o uso do condicionamento artificial, quanto na sua associação com o ar-condicionado para estabelecer um *setpoint* variável em função desta percepção térmica.

O Caso 01, cuja configuração contava com os ventiladores de teto e o *setpoint* variável, praticamente excluiu a necessidade de refrigeração (redução de mais de 96% no consumo do ar-condicionado) e uma economia total de mais de 60% em relação ao Caso Base, sem ventilador de teto e com *setpoint* fixo.

Cabe salientar que o Caso Base é uma edificação NZEB que já possui elevado desempenho térmico e que ainda poderá ter seu desempenho de verão incrementado pelo uso de ventiladores de teto.

Até mesmo para a condição de janelas permanentemente fechadas (Caso 02), com uso de ventiladores de teto e *setpoint* variável, foi obtido redução de 92% do consumo do ar-condicionado para refrigeração em relação ao Caso Base. Entretanto,

a manutenção das janelas fechadas exigiu funcionamento contínuo do trocador de calor, o que acabou por aumentar o consumo total em relação ao Caso Base.

O efeito do *setpoint* variável na redução do consumo de energia foi avaliado no Caso 03, sem ventiladores de teto. O *setpoint* variável, sem a movimentação de ar dos ventiladores, gerou muito pouca economia em relação ao Caso Base cerca de 17% no consumo de refrigeração e 10% no consumo total. Em relação ao Caso 01, o Caso 03 apresentou um aumento de 2150% no consumo do ar-condicionado e 228% no consumo total. Isso demonstra que o *setpoint* variável isoladamente tem pouca relevância na economia de energia, cabendo ao uso dos ventiladores de teto, associados com o *setpoint* variável, o grande potencial de economia de energia obtido no Caso 01.

A escolha da edificação NZEB a ser construída na ZB2, caracterizada por invernos frios e verões quentes e úmidos não comprometeu os resultados e a identificação do potencial uso dos ventiladores de teto com sistemas de ar-condicionado. Primeiro, porque a economia obtida no período de verão demonstra corretamente o potencial de economia que este trabalho se propôs a avaliar. Segundo que, apesar de ser uma edificação originalmente muito eficiente, pode-se considerar que a economia, embora significativa, é bastante conservadora, podendo ser ainda maior em edificações não eficientes que demandam muito mais dos sistemas de ar-condicionado.

Os resultados deste trabalho comprovam que o uso associado de ventiladores de teto e sistemas de condicionamento artificial podem gerar muita economia de energia, mesmo em uma edificação não automatizada, na qual caberia ao usuário a função de abrir e fechar janelas, aumentar ou reduzir a velocidade do ventilador e ajustar o *setpoint* apropriado do ar-condicionado.

Além disso, como resultado deste trabalho há de se destacar o desenvolvimento do algoritmo responsável por gerenciar o funcionamento da edificação e executar todas as simulações computacionais. O algoritmo obtido se mostrou bastante apropriado aos objetivos do trabalho, sendo uma ferramenta que ainda será utilizada em muitas outras simulações e situações que não puderam ser contempladas neste trabalho. O algoritmo desenvolvido faz parte de um projeto maior, que engloba o desenvolvimento de sensores de baixo custo, para avaliar a sensação térmica dos usuários e o desenvolvimento e treinamento de Inteligência Artificial para

a gestão de conforto e eficiência energética por aprendizagem de máquina, de modo a viabilizar a utilização deste estudo como política pública de conservação de energia.

Pode-se concluir, por fim, que a metodologia adotada neste trabalho foi adequada e proporcionou alcançar todos os objetivos inicialmente propostos.

## 7 Limitações da pesquisa

Uma das limitações da pesquisa foi a impossibilidade de estabelecer o *clo* fixo para as estações. Quando se estipulava os *clos* de 0,5 para o verão e 0,9 para o inverno de acordo com a NBR 16401 na parte 2 (ABNT, 2008), o algoritmo não conseguia identificar, por isso foram realizadas as simulações com o *clo* dinâmico.

Outra limitação da pesquisa refere-se à edificação escolhida como Caso Base. Como comentado, esta edificação foi projetada para obter alto desempenho energético, tendo conseguido balanço positivo de energia, ou seja, produzir mais energia do que consome ao longo do ano. Logicamente, uma edificação com tal desempenho naturalmente demanda muito pouco do sistema de climatização artificial, o que pode subestimar o efeito do uso dos ventiladores de teto e do *setpoint* flutuante na economia de energia. Porém, esta edificação foi escolhida em função desta vir a adotar este sistema de gestão energético quando for construída.

Apesar da edificação escolhida ser bastante eficiente, foi possível comprovar uma redução de 92% do consumo do sistema de ar-condicionado para refrigeração. Não sabe-se ao certo, mas pode-se supor que, para uma edificação não eficiente, esta redução de consumo seria ainda mais significativa.

Outra limitação, decorrente da anterior, refere-se à Zona Bioclimática 2, adotada neste estudo. Apesar da ZB2 ter verões quentes e úmidos que normalmente demandam refrigeração artificial, esta demanda ocorre apenas em cerca de três meses ao ano. A aplicação desta metodologia em um clima predominantemente

quente e úmido durante todo o ano, certamente teria maior impacto no consumo anual da edificação, o quê não pode ser verificado neste trabalho.

Outra limitação do trabalho refere-se a não ter sido avaliado o impacto de se limitar a velocidade máxima abaixo de 1,20m/s. Inicialmente previu-se a análise para velocidades de 0,80m/s e 1,00m/s, porém, em função da quantidade de simulações e análises de resultados, o trabalho seria demasiadamente extenso. Entretanto, a interface desenvolvida para o algoritmo permite realizar facilmente todas as simulações para diferentes limites de velocidade do ar. Apesar de a revisão bibliográfica apontar que a velocidade de 1,20m/s é bem aceita pelos usuários, a limitação de velocidade pode se dar em função do nível de ruído dos ventiladores, refletindo no desempenho destes em atender às premissas de conforto e, conseqüentemente, no consumo de energia para refrigeração. Quando concluída a construção desta edificação e instalados os ventiladores de teto, será realizado teste para verificar o nível de ruído dos ventiladores e adotada a velocidade limite adequada ao uso das salas. Estas simulações, sob estes limites de velocidade do ar, serão utilizadas como treinamento da IA para gerenciar o consumo de energia em uso da edificação, com a perspectiva de adoção de sensores de ruídos internos e externos para adequada gestão dos dispositivos automatizados.

## 8 Sugestões para trabalhos futuros

Como proposta de continuidade do presente estudo é sugerido:

- Testar o algoritmo em prédio não eficiente;
- Expandir a pesquisa em diferentes contextos climáticos;
- Testar com o *c/o* fixo nas estações de inverno e verão;
- Avaliar o impacto de se estabelecer limite máximo de velocidade abaixo de 1,20m/s.

## 9 Referências

ADEEB, Ehsan; MAQSOOD, Adnan; MUSHTAQ, Ammar. Effect of Number of Blades on Performance of Ceiling Fans. **MATEC Web of Conferences**, vol 28, 2015. DOI: 10.1051/matecconf/20152802002.

ASHRAE. Standard 55: thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE: Atlanta, 2017.

ATAÍDE, E. S. **Avaliação de desempenho térmico de edifício estruturado em aço: o caso sede da Prefeitura Municipal de Mariana**, MG. 2008. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

AMBU, Stephen; CHU, Wan-Loy; MAK, Joon-Wah; WONG, Shew-Fung; CHAN, Li-Li; Wong, Siew-Tung. Environmental health and building related illnesses. **International electronic Journal of Science, Medicine and Education**, vol 2, 2008. 10.56026/imu.2.Suppl1.S11.

APANAVICIENE, Rasa; VANAGAS, Andrius; FOKAIDES, Paris A. Smart Building Integration into a Smart City (SBISC): Development of a New Evaluation Framework. **Energies**, v. 13, n. 9, p. 2190, 2020. DOI: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/9/2190>.

ARAÚJO, M.L.T.; SCALCO, V.A. Desempenho térmico de creches padronizadas do programa proinfância em diferentes cidades alagoanas. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401-2: instalações de ar-condicionado: sistemas entrais e unitários: parte 2: parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2008.

AYNSLEY, R. M. Unresolved Issues in Natural Ventilation for Thermal Comfort. International one day forum on natural and hybrid ventilation. **Technical Paper**, Sydney, v. 1, 1999.

BABICH, Francesco; COOK, Malcolm; LOVEDAY, Dennis; RAWAL, Rajan; SHUKLA, Yash. Transient three-dimensional CFD modelling of ceiling fans. **Building and Environment**, Volume 123, Pages 37-49, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.039>.

BAGHERI-ESFEH, Hamed; DEGHAN, Mohammad Reza. Multi-objective optimization of setpoint temperature of thermostats in residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 261, p. 111955, 2022. ISSN 0378-7788. Disponível em: .

BAMDAD, Keivan; MATOUR, Soha; IZADYAR, Nima; OMRANI, Sara. Impact of climate change on energy saving potentials of natural ventilation and ceiling fans in mixed-mode buildings. **Building and Environment**, v. 209, 2022. DOI: [10.1016/j.buildenv.2021.108662](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108662).

BERARDI, Umberto. A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 123, p. 230-241, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.014>.

BUONOCORE, Carolina; DE VECCHI, Renata; SCALCO, Veridiana; LAMBERTS, Roberto. Influence of relative air humidity and movement on human thermal perception in classrooms in a hot and humid climate. **Building and Environment**, v. 146, 2018. DOI: .

CARVALHO, Amanda Rosa de; CUNHA, Eduardo Grala da. Estudo piloto da aplicação de sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor sensível e latente em um edifício comercial. **XXV Encontro de Pós Graduação – ENPOS**. 2019.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R.; LAMBERTS, R. Combined Thermal Acceptability and Air Movement Assessments in a Hot Humid Climate. **Building and Environment**, v. 46, p. 379-385, 2011. DOI:[10.1016/j.buildenv.2010.07.032](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.032)

CECCONELLO, S. T.; CASTRO, A. S.; LEANDRO, D. Análise hierárquica de processos como suporte ao mapeamento das áreas suscetíveis à inundação no município de Pelotas/RS. **Encontro de Pós-Graduação – ENPOS**. 2019.

Centro brasileira de informação de eficiência energética – PROCELINFO. Avaliação do mercado de eficiência energética do brasil pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso - ano base 2005. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BAF68EE34-2C16-4191-B005-B9A8582F5990%7D&Team=%C2%B6ms=itemID=%7B221EE2DD-1CDA-4F3D-9281-5FB51E5931B8%7D>. Acesso em 20 de março de 2023.

CHAI, Jiale; KANG, Zhanxiao; YAN, Yishu; LOU, Lun; ZHOU, Yiying; FAN, Jintu. Thermoregulatory clothing with temperature-adaptive multimodal body heat regulation. *Cell Reports Physical Science*, v. 3, n. 7, p. 100958, 2022. ISSN 2666-3864. DOI: .

CHOW, T.T.; FONG, K.F.; GIVONI, B.; LIN, Zhang; CHAN, A.L.S. Thermal sensation of Hong Kong people with increased air speed, temperature and humidity in air-conditioned environment. *Building and Environment*, v. 45, n. 10, p. 2177-2183, 2010. ISSN 0360-1323. DOI: .

COOK, M.; SHUKLA, Y.; RAWAL, R.; ANGELOPOULOS, C.; CARUGGI DE FARIA, L.; LOVEDAY, D.; SPENTZOU, Eftychia. Integrating low energy cooling and ventilation strategies in Indian residences. **Buildings and Cities**, vol 3, 2022. DOI: <http://doi.org/10.5334/bc.197>

CHEN, W.; LIU, S.; GAO, Y.; ZHANG, H.; ARENS, E.; ZHAO, L.; LIU, J. Experimental and numerical investigations of indoor air movement distribution with an office ceiling fan. **Building and Environment**, vol 130, p. 14-26, 2018.

COSTA, V. A. C. DA; CHVATAL, K. M. S. Manual do PréProcessador Slab. Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU/USP-SC). São Carlos, 2017.

DE DEAR, Richard; BRAGER, Gail. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**. v. 34, p. 549-561, 2002. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00005-1.

DESIGNBUILDER. Versão 7.2.0.032. Disponível em . Acesso em 16 de fevereiro de 2024.

DE VECCHI, R.; CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R. O efeito da utilização de ventiladores de teto no conforto térmico em salas de aulas com condicionamento híbrido em um local de clima quente e úmido. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 189-202, 2013.

DOE. V9.0 Input/output reference: The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output. US Department of Energy, [S.l.], 2019.

DOE. V9.3 Input/output reference: The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output. US Department of Energy, [S.l.], 2021.

ESTEVES, D.; SILVA, J; RODRIGUES, N.; MARTINS, L.; TEIXEIRA, J.; TEIXEIRA, S. Simulation of PMV and PPD Thermal Comfort Using EnergyPlus. **Computational Science and Its Applications**, vol 11624, 2019. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-24311-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24311-1_4).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético Nacional 2022**: relatório final. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf> Acesso em 20 de março de 2023.

FILIPPE, Cláudio Kuster. Os edifícios e a saúde humana: breves notas sobre alguns problemas de saúde relacionados com edifícios. **Revista portuguesa de saúde pública**. v 19, 2001.

Global Monitoring Laboratory (GML). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>. Acesso em: 25 de março de 2024.

GOMIS, Laia Ledo; FIORENTINI, Massimo; DALY, Daniel. Potential and practical management of hybrid ventilation in buildings. **Energy and Buildings**, v. 231, p. 110597, 2021. DOI: .

GRYGIEREK, K.; FERDYN-GRYGIEREK, J. Design of Ventilation Systems in a Single-Family House in Terms of Heating Demand and Indoor Environment Quality. **Energies**, v. 15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15228456>.

HAX, Douglas Roschildt; LEITZKE, Rodrigo Karini; SILVA, Antonio César Silveira Baptista da; CUNHA, Eduardo Grala da. Influence of user behavior on energy consumption in a university building versus automation costs. **Energy and Buildings**, v. 256, 2022, p. 111730. DOI: .

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas, RTQ-C**. Eletrobrás, 2013.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **The Future of Cooling**. Paris, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>. Acesso em: 05 maio. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARD. ISO 7730: moderate thermal environments: determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the conditions of Thermal Comfort. Geneva, 2005.

KIM, Jungsoo; DE DEAR, Richard. Is mixed-mode ventilation a comfortable low-energy solution? A literature review. **Building and Environment**, v. 205, 2021. ISSN 0360-1323. Disponível em: .

LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. 2023. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/pt-br/downloads/arquivos-climaticos>. Acesso em 03 de janeiro de 2023

LAMBERTS, Roberto; CÂNDIDO, Christhina; DE VECCHI, Renata. **Base brasileira de conforto térmico**. 2014. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/projetos/base-brasileira-de-dados-em-conforto-termico>. Acesso em 20 de março de 2023.

LAMBERTS, Roberto; DE VECCHI, Renata; DE ANDRÉ, Maíra Afonso. **Revisão da NBR 16.401 2: Conforto Térmico**. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/pt-br/node/808>. Acesso em 21 de março de 2023.

LAMBERTS, Roberto; MELO, Ana Paula; MARINOSKI, Deivis Luis; KRELLING, Amanda Fraga; TEIXEIRA, Cristiano André; ELI, Letícia Gabriela; MENDES, Lorrany da Silva; OLINGER, Marcelo Salles; MACHADO, Rayner Maurício e Silva; VEIGA,

Rodolfo; QUEVEDO, Tiago de Castro. **Desempenho de edificações habitacionais: uma análise crítica da NBR 15575**. Florianópolis: LabEEE, 2020. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020>. Acesso em: em 06 de maio de 2022.

LEE, K.H.; SCHIAVON, S. Influence of Three Dynamic Predictive Clothing Insulation Models on Building Energy Use, HVAC Sizing and Thermal Comfort. **Energies**, v. 7, p 1917-1934, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/en7041917>

LENIN, N. C.; PADMANABAN, S.; BHASKAR, M. S.; MITOLO, M.; HOSSAIN, E. Ceiling Fan Drives—Past, Present and Future. **IEEE Access**, vol. 9, p. 44888-44904, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3052899.

LEITZKE, R. K.; CUNHA, E. G.; SCHRAMM, F. K.; CORREA, C. M. B.; FERRUGEM, A. P. A aplicação para parametrização das propriedades de configuração do EnergyPlus. **Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído**, Porto Alegre, 2020. DOI: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/732/424>.

LIPCZYNSKA, Aleksandra; SCHIAVON, Stefano; GRAHAM, Lindsay T. Thermal comfort and self-reported productivity in an office with ceiling fans in the tropics. *Building and Environment*, v. 135, p. 202-212, 2018.

MAZZAFERRO, Leonardo; MELO, Ana Paula, LAMBERTS, Roberto. Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto ground domain no programa EnergyPlus. Florianópolis, 2015.

MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto; VERSAGE, Rogério; SORGATO, Márcio. **Manual de Simulação Computacional de Edifícios Naturalmente Ventilados no Programa EnergyPlus**. Florianópolis, 2008.

MENEZES, A. C.; CRIPPS, A.; BOUCLAGHEM, D.; BUSWELL, R. Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap. **Applied Energy**, vol. 97, p. 355-364, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.075>.

MILLER, Dana; RAFTERY, Paul; NAKAJIMA, Mia; SALO, Sonja; GRAHAM, Lindsay T; PEFFER, Therese; DELGADO, Marta; ZHANG, Hui; BRAGER, Gail; DOUGLASS-JAIMES, David; PALIAGA, Gwelen; COHN, Sebastian; GREENE, Mitch; BROOKS, Andy. Cooling energy savings and occupant feedback in a two year retrofit evaluation of 99 automated ceiling fans staged with air conditioning. **Energy and Buildings**. Volume 251, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111319>.

NEWSHAM, Guy R. Clothing as a thermal comfort moderator and the effect on energy consumption. **Energy Building**, v 26, p. 283-291, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00009-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00009-1).

NICOL, J. F. Adaptive Thermal Comfort Standards in the Hot-Humid Tropics. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 7, p. 628-637, 2004. DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.01.016.

OLIVEIRA, Candi Citadini de; GHISI, EneDir. RUPP, Ricardo Forgiarini Adequação climática e uso racional de água em edificações: influência de variáveis ambientais e

antropométricas sobre o conforto térmico e a qualidade do ar em edificações de escritórios em Florianópolis/SC. **Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UFSC** - Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Civil, 2020. DOI: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/212290>.

OMRANI, Sara; MATOUR, Soha; BAMDAD, Keivan; IZADYAR, Nima. Ceiling fans as ventilation assisting devices in buildings: A critical review. **Building and Environment**, Volume 201, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108010>.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia Utilizada na Elaboração da Biblioteca de Materiais e Componentes Construtivos Brasileiros para Simulações no Visualdoe-3.1**. Relatório Interno – Departamento de Engenharia Civil, UFSC. Florianópolis, 2003.

PACHECO, M.T.G. **Ventilação natural e climatização artificial: crítica ao modelo superisolado para residência de energia zero em Belém e Curitiba**. 2013. 292f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

PHILIP, S.; TANJUATCO, L. Eppy: scripting language for E+. EnergyPlus (version 0.46). Disponível em: <https://pypi.python.org/pypi/eppy/0.4>, [S.l.], v.6, 2011.

PBE-EDIFICA. Programa Brasileiro de Etiquetagem - Edificações. Disponível em: <https://www.pbeedifica.com.br/nova-ini>. Acesso em: 04 jan. 2023.

RAFTERY, P., J. FIZER, W. CHEN, Y. HE, H. ZHANG, E. ARENS, S. SCHIAVON, G. PALIAGA. Ceiling fans: Predicting indoor air speeds based on full scale laboratory measurements. **Building and Environment**, vol. 155, p. 210-223, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.040>.

RASOULI, M.; SIMONSON, C.; BESANT R.W. Applicability and optimum control strategy of energy recovery ventilators in different climatic conditions. **Energy and Buildings**, Canadá, v.42, p. 1376-1385, 2010.

RIJAL, Hom B.; HUMPHREYS, Michael; NICOL, Fergus. Adaptive Thermal Comfort in Japanese Houses during the Summer Season: Behavioral Adaptation and the Effect of Humidity. **Buildings**, v. 5, n. 3, 2015, p. 1037-1054. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings5031037>.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Avaliação de modelos preditivos de conforto térmico em escritórios no clima subtropical brasileiro. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 91-107, 2019. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000200310>.

SANTOS, A. C. dos; LIMA, J. V. de S.; FARIA, J. R. G. de; FONTES, M. S. G. de C. USO DO ENERGYPLUS EM PESQUISAS BRASILEIRAS. **Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído**, v. 17. p. 555–568, 2018. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1384>. Acesso em: 24 abr. 2023.

SCHIAVON, Stefano; MELIKOV, Arsen Krikor. Introduction of a Cooling Fan Efficiency Index. **HVAC&R Research**, vol. 15:6, p. 1121-1144, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10789669.2009.10390882>.

SCHIAVON, Stefano; LEE, Kwang Ho. Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures. **Building and Environment**, vol. 59, p. 250-260, 2013. DOI: .

SICFLUX, 2024. Recuperador de calor. Araquari, SC. Disponível em: <https://sicflux.com.br/produto/crs-355-2/>. Acesso em 20 de janeiro de 2024.

SILVA, B. L. da; ODISI, F.; NORILER, D.; REINEHR, E. L. Estudo da distribuição e evolução da concentração de dióxido de carbono em uma sala de aula. **Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. São Paulo, 2014. Anais...São Paulo, 2014.

SILVA, Ângela Encarnação Sousa. Síndrome do Edifício Doente. Trabalho final de mestrado integrado em medicina. Faculdade de Medicina de Lisboa. 2017.

TARTARINI, F.; SCHIAVON, S. pythermalcomfort: A Python package for thermal comfort research. **SoftwareX**, v. 12, p. 100578, 2020. ISSN 2352-7110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100578>.

TUCK, Ng Wai et al. Effectiveness of free running passive cooling strategies for indoor thermal environments: Example from a two-storey corner terrace house in Malaysia. **Building and Environment**, v. 160, p. 106214, 2019.

YANG, W.; ZHANG, G. Thermal comfort in naturally ventilated and air-conditioned buildings in humid subtropical climate zone in China. **International Journal of Biometeorology**, v. 52, p. 385-398, 2008. DOI: 10.1007/s00484-007-0133-4.

UNEP-SBCI. Join the Global Platform for Sustainable Buildings. **United Nations Environment Programme, Sustainable Buildings and Climate Initiative, 2012**.

VELLEI, Marika; HERRERA, Manuel; FOSAS, Daniel; NATARAJAN, Sukumar. The influence of relative humidity on adaptive thermal comfort. **Building and Environment**, v. 124, 2017, p. 171-185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.005>.

XAVIER, Antonio Augusto de Paula. Predição de conforto térmico em ambientes internos com atividades sedentárias – Teoria física aliada a estudos de campo. Florianópolis, 2000. 251 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina.

ZHAI, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, H; PASUT, W.; ARENS, E.; MENG, Q. Human comfort and perceived air quality in warm and humid environments with ceiling fans. **Building and Environment**, v. 90, 2015. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.04.003.

ZHONG, H.; GUO, M.; WANG, Y.; WANG, Z. Quantify the magnitude and energy impact of overcooling in a sub-tropical campus building. **Building and Environment**, v. 231, 2023. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110033.

## Anexos

Nesse capítulo será demonstrado as tabelas das simulações realizadas para os PMVs de 0,2, 0,7 e 1,0 para o ano inteiro.

Tabela 35: Resultados simulação Caso base com PMV 0,2

Ambiente	Horas ocupadas								Horas desocupadas
	Ar-condicionado			Janela aberta	Trocador de calor ligado	Janela fechada e Ar-cond. desligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto	Janela aberta
	Aquecimento	Resfriamento	Total						
Sala de aula	41,77%	10,14%	51,91%	36,65%	6,07%	5,77%	1070,87	46,00%	15,73%
Ateliê 1	37,70%	13,23%	50,93%	34,06%	21,95%	6,24%	1090,96	43,98%	15,43%
Ateliê 2	38,92%	13,09%	52,01%	33,66%	6,31%	6,45%	1041,23	45,39%	15,75%
Ateliê 3	38,14%	13,09%	51,23%	35,02%	14,84%	6,34%	1040,16	43,53%	15,85%
Recepção	44,92%	10,11%	55,03%	35,39%	0,46%	4,24%	1049,71	48,11%	15,58%
Sec. Linse	46,79%	8,49%	55,28%	36,34%	0,00%	4,71%	786,49	48,96%	15,62%
Linse	27,85%	15,03%	42,88%	34,74%	52,07%	7,09%	1047,78	40,90%	15,63%
Média	39,44%	11,88%	51,32%	35,12%	14,53%	5,83%	1.018,17	45,27%	15,66%
Consumo total de 41.174,74 kWh									

Tabela 36: resultados simulação Caso Base com PMV 0,7

Ambiente	Horas ocupadas								Horas desocupadas
	Ar-condicionado			Janela aberta	Janela fechada e Ar-cond. desligado	Trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto	Janela aberta
	Aquecimento	Resfriamento	Total						
Sala de aula	40,55%	5,03%	45,58%	38,24%	13,56%	6,04%	1053,83	24,87%	15,89%
Ateliê 1	36,55%	7,02%	43,57%	36,15%	17,37%	20,34%	1091,72	19,97%	15,62%
Ateliê 2	37,75%	7,94%	45,69%	35,89%	15,94%	5,40%	1041,45	22,76%	15,93%
Ateliê 3	36,72%	8,03%	44,75%	36,99%	15,85%	13,68%	1031,52	17,20%	16,01%
Recepção	43,98%	7,15%	51,13%	36,48%	9,91%	0,48%	1031,99	26,95%	15,71%
Sec. Linse	45,24%	2,90%	48,14%	38,58%	12,11%	0,00%	811,92	23,60%	15,81%
Linse	27,21%	6,34%	33,55%	36,82%	21,38%	49,43%	1047,75	12,90%	15,75%
Média	38,28%	6,35%	44,63%	37,02%	15,16%	13,63%	1.015,74	21,18%	15,82%
Consumo total de 40.249,84 kWh									

Tabela 37: Resultados simulação Caso base com PMV 1,0

Ambiente	Horas ocupadas								Horas desocupadas
	Ar-condicionado			Janela aberta	Janela fechada e Ar-cond. desligado	Trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto	Janela aberta
	Aquecimento	Resfriamento	Total						
Sala de aula	35,92%	1,93%	37,84%	39,60%	21,40%	6,37%	1063,11	4,26%	16,08%
Ateliê 1	30,94%	4,50%	35,44%	36,28%	27,30%	20,74%	1093,58	4,45%	15,69%
Ateliê 2	32,60%	5,84%	38,44%	35,84%	24,89%	6,03%	1052,91	5,49%	15,95%
Ateliê 3	30,86%	5,80%	36,66%	36,96%	25,59%	14,34%	1024,71	4,38%	15,96%
Recepção	40,11%	4,42%	44,53%	38,55%	16,34%	0,66%	1034,95	5,43%	15,91%
Sec. Linse	40,40%	0,64%	41,04%	39,77%	19,07%	0,00%	844,69	5,60%	16,00%
Linse	21,52%	3,76%	25,28%	37,87%	34,27%	48,50%	1051,91	2,50%	15,88%
Média	33,19%	3,84%	37,03%	37,84%	24,12%	13,81%	1.023,69	4,59%	15,92%
Consumo total de 39.421,43 kWh									

Tabela 38: Resultados simulação Caso 01 com PMV 0,2

Ambiente	Horas ocupadas											Horas desocupadas	
	Ar-condicionado			Ventilador				Janela aberta	Janela fechada, ventilador e ar-cond. desligado	Trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto	Janela aberta
	Aquecimento	Resfriamento	Total	Janela aberta e ventilador ligado	Ventilador ligado, ar desligado e janela fechada	Ventilador e ar-cond. ligado	Ventilador ligado						
Sala de aula	42,80%	0,85%	43,65%	0,01%	7,58%	0,62%	8,33%	40,14%	7,56%	5,35%	1084,75	4,95%	17,07%
Ateliê 1	42,67%	2,67%	45,34%	0,17%	10,00%	2,09%	12,45%	35,28%	8,11%	15,07%	1064,49	4,40%	15,59%
Ateliê 2	43,26%	3,65%	46,92%	0,14%	8,81%	3,27%	12,42%	35,05%	8,22%	6,10%	1082,02	4,87%	15,78%
Ateliê 3	41,46%	3,68%	45,14%	0,13%	9,08%	3,19%	12,67%	36,22%	8,41%	10,47%	1039,46	4,28%	15,75%
Recepção	45,34%	2,07%	47,41%	0,05%	7,38%	1,48%	9,16%	38,17%	6,50%	1,09%	1039,17	6,01%	16,87%
Sec. Linse	43,62%	0,19%	43,81%	0,13%	7,79%	0,09%	8,06%	41,33%	6,84%	0,00%	849,00	6,13%	16,71%
Linse	38,21%	3,23%	41,44%	0,14%	9,88%	2,59%	12,86%	36,80%	9,85%	47,30%	1056,71	2,94%	15,93%
Média	42,48%	2,34%	44,82%	0,11%	8,65%	1,90%	10,85%	37,57%	7,93%	12,20%	1.030,80	4,80%	16,24%
Consumo total de 46699,06 kWh													

Tabela 39: Resultados simulação Caso 02 com PMV 0,7

Ambiente	Horas ocupadas											Horas desocupadas	
	Ar-condicionado			Ventilador				Janela aberta	Janela fechada, ventilador e ar-cond. desligado	Trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto	Janela aberta
	Aquecimento	Resfriamento	Total	Janela aberta e ventilador ligado	Ventilador ligado, ar desligado e janela fechada	Ventilador e ar-cond. ligado	Ventilador ligado						
Sala de aula	38,48%	0,00%	38,48%	0,02%	5,32%	0,00%	5,34%	39,67%	14,69%	6,37%	1078,30	3,64%	16,63%
Ateliê 1	34,96%	0,19%	35,15%	0,16%	8,48%	0,19%	8,84%	35,97%	18,67%	18,80%	1095,14	3,05%	15,04%
Ateliê 2	36,18%	0,60%	36,78%	0,13%	9,67%	0,60%	10,40%	34,69%	17,56%	6,76%	1024,92	3,35%	14,88%
Ateliê 3	34,87%	0,59%	35,45%	0,13%	9,89%	0,59%	10,61%	35,72%	17,19%	13,63%	1037,59	3,02%	14,58%
Recepção	40,95%	0,00%	40,95%	0,05%	7,02%	0,00%	7,07%	38,04%	11,08%	0,81%	1001,11	4,29%	16,45%
Sec. Linse	41,32%	0,00%	41,32%	0,08%	4,45%	0,00%	4,53%	40,25%	12,75%	0,00%	855,86	4,47%	16,13%
Linse	27,60%	0,39%	27,99%	0,13%	7,30%	0,39%	7,81%	37,62%	22,97%	47,91%	1052,94	1,84%	15,44%
Média	36,34%	0,25%	36,59%	0,10%	7,45%	0,25%	7,80%	37,42%	16,42%	13,47%	1.020,84	3,38%	15,59%
Consumo total de 41.090,09 kWh													

Tabela 40: Resultados simulação Caso 02 com PMV 1,0

Ambiente	Horas ocupadas												Horas desocupadas	
	Ar-condicionado			Ventilador				Janela aberta	Janela fechada, ventilador e ar-cond desligado	Trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto		Janela aberta
	Aquecimento	Resfriamento	Total	Janela aberta e ventilador ligado	Ventilador ligado, ar desligado e janela fechada	Ventilador e ar-cond. ligado	Ventilador ligado							
Sala de aula	34,26%	0,00%	34,26%	0,02%	3,13%	0,00%	3,14%	39,56%	20,61%	7,64%	1065,65	2,96%	16,52%	
Ateliê 1	28,91%	0,00%	28,91%	0,14%	6,23%	0,00%	6,37%	35,36%	26,71%	21,57%	1087,25	2,38%	14,99%	
Ateliê 2	30,95%	0,07%	31,03%	0,13%	8,09%	0,07%	8,29%	34,35%	24,26%	7,82%	1015,83	2,65%	14,82%	
Ateliê 3	28,44%	0,07%	28,51%	0,13%	8,19%	0,07%	8,40%	35,55%	24,43%	16,27%	1043,43	2,37%	14,58%	
Recepção	37,12%	0,00%	37,12%	0,05%	4,88%	0,00%	4,93%	38,66%	16,41%	0,92%	1027,74	3,51%	16,37%	
Sec. Linse	39,12%	0,00%	39,12%	0,07%	2,31%	0,00%	2,38%	39,15%	18,28%	0,00%	878,15	3,79%	15,86%	
Linse	18,53%	0,00%	18,53%	0,13%	5,48%	0,00%	5,61%	37,17%	33,44%	48,93%	1065,60	1,29%	15,20%	
Média	31,05%	0,02%	31,07%	0,10%	5,47%	0,02%	5,59%	37,12%	23,45%	14,74%	1.026,23	2,71%	15,48%	
Consumo total de 38.396,15 kWh														

Tabela 41: Resultados simulação Caso 02 com PMV 0,2

Ambiente	Horas ocupadas									
	Ar-condicionado			Ventilador			Janela fechada, ventilador e ar-cond desligado	trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto
	Aquecimento	Resfriamento	Total	Ventilador e ar-cond. ligado	Ventilador ligado, ar desligado e janela fechada	Ventilador ligado				
Sala de aula	49,89%	1,56%	51,45%	1,13%	31,87%	33,17%	15,09%	16,27%	1058,23	5,20%
Ateliê 1	45,60%	4,09%	49,69%	3,52%	34,47%	38,49%	13,75%	32,87%	1089,36	4,42%
Ateliê 2	45,74%	5,67%	51,41%	5,34%	33,13%	38,96%	13,97%	14,65%	1060,33	4,87%
Ateliê 3	43,75%	6,62%	50,37%	6,17%	33,73%	40,29%	14,32%	25,41%	1031,95	4,38%
Recepção	52,22%	2,81%	55,03%	1,97%	28,27%	30,67%	15,50%	1,65%	1028,11	6,05%
Sec. Linse	55,23%	0,71%	55,94%	0,52%	26,98%	27,54%	16,44%	0,01%	898,85	6,72%
Linse	36,51%	11,43%	47,94%	10,64%	34,49%	45,15%	15,00%	94,06%	1062,77	2,76%
Média	46,99%	4,70%	51,69%	4,18%	31,85%	36,32%	14,87%	26,42%	1.032,80	4,92%
Consumo total de 50.274,87 kWh										

Tabela 42: Resultados simulação Caso 02 com PMV 0,7

Ambiente	Horas ocupadas									
	Ar-condicionado			Ventilador			Janela fechada, ventilador e ar-cond desligado	trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto
	Aquecimento	Resfriamento	Total	Ventilador e ar-cond. ligado	Ventilador ligado, ar desligado e janela fechada	Ventilador ligado				
Sala de aula	40,34%	0,00%	40,34%	0,00%	15,93%	15,93%	42,19%	19,50%	1067,89	3,45%
Ateliê 1	35,69%	0,39%	36,09%	0,39%	22,73%	23,13%	39,32%	37,92%	1061,12	2,94%
Ateliê 2	36,48%	0,91%	37,39%	0,91%	24,15%	25,06%	37,41%	16,54%	1067,52	3,17%
Ateliê 3	34,95%	1,18%	36,13%	1,18%	27,31%	28,51%	34,70%	29,34%	1056,83	2,86%
Recepção	42,41%	0,19%	42,60%	0,19%	15,66%	15,86%	40,37%	1,49%	1045,20	3,94%
Sec. Linse	45,45%	0,00%	45,45%	0,00%	12,30%	12,30%	41,11%	0,02%	903,85	4,50%
Linse	25,41%	1,24%	26,65%	1,24%	32,43%	33,67%	37,35%	94,04%	1055,25	1,65%
Média	37,25%	0,56%	37,81%	0,56%	21,50%	22,06%	38,92%	28,41%	1.036,81	3,22%
Consumo total de 44.304,27 kWh										

Tabela 43: Resultados simulação Caso 02 com PMV 1,0

Ambiente	Horas ocupadas									
	Ar-condicionado			Ventilador			Janela fechada, ventilador e ar-cond desligado	trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto
	Aquecimento	Resfriamento	Total	Ventilador e ar-cond. ligado	Ventilador ligado, ar desligado e janela fechada	Ventilador ligado				
Sala de aula	33,60%	0,00%	33,60%	0,00%	6,95%	6,95%	57,71%	21,62%	1071,05	2,72%
Ateliê 1	28,57%	0,00%	28,57%	0,00%	13,74%	13,74%	55,84%	40,75%	1083,02	2,28%
Ateliê 2	30,09%	0,14%	30,23%	0,14%	15,82%	15,97%	52,78%	18,16%	1018,88	2,47%
Ateliê 3	27,53%	0,36%	27,88%	0,36%	17,64%	17,99%	52,25%	32,05%	1051,20	2,18%
Recepção	36,16%	0,00%	36,16%	0,00%	8,61%	8,61%	53,94%	1,56%	1064,05	3,14%
Sec. Linse	39,97%	0,00%	39,97%	0,00%	4,96%	4,96%	54,42%	0,02%	918,80	3,61%
Linse	17,71%	0,33%	18,04%	0,33%	23,19%	23,51%	54,44%	94,06%	1076,96	1,15%
Média	30,52%	0,12%	30,64%	0,12%	12,99%	13,10%	54,48%	29,75%	1.040,57	2,51%
Consumo total de 41.511,18 kWh										

Tabela 44: Resultados simulação Caso 03 com PMV 0,2

Ambiente	Horas ocupadas								Horas desocupadas	
	Ar-condicionado			Janela aberta	Janela fechada, ventilador e ar-cond desligado	trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto	Janela aberta	
	Aquecimento	Resfriamento	Total							
Sala de aula	43,00%	8,93%	51,93%	38,98%	7,96%	3,60%	1.074,69	5,61%	16,20%	
Ateliê 1	42,65%	12,25%	54,90%	35,20%	8,53%	14,32%	1.084,67	5,16%	16,01%	
Ateliê 2	43,22%	11,69%	54,91%	35,48%	8,62%	3,47%	1.055,10	5,62%	16,20%	
Ateliê 3	41,52%	12,08%	53,60%	36,65%	8,64%	7,94%	1.043,55	5,06%	16,26%	
Recepção	45,46%	9,68%	55,14%	37,44%	6,93%	0,33%	1.010,46	6,72%	16,00%	
Sec. Linse	43,73%	7,90%	51,64%	40,90%	7,23%	0,00%	728,05	6,74%	16,15%	
Linse	38,31%	13,03%	51,34%	36,10%	10,32%	47,59%	1.050,52	3,62%	16,02%	
Média	42,56%	10,79%	53,35%	37,25%	8,32%	11,04%	1.006,72	5,50%	16,12%	
Consumo total de 49.068,73 kWh										

Tabela 45: Resultados simulação Caso 03 com PMV 0,7

Ambiente	Horas ocupadas								Horas desocupadas	
	Ar-condicionado			Janela aberta	Janela fechada, ventilador e ar-cond desligado	trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto	Janela aberta	
	Aquecimento	Resfriamento	Total							
Sala de aula	38,55%	5,13%	43,68%	39,22%	15,24%	6,27%	1073,03	3,78%	16,24%	
Ateliê 1	34,94%	7,30%	42,24%	36,57%	19,40%	18,98%	1110,62	3,37%	15,76%	
Ateliê 2	36,17%	8,20%	44,37%	36,29%	17,93%	5,86%	1071,27	3,80%	16,11%	
Ateliê 3	34,86%	8,25%	43,11%	37,46%	17,62%	12,54%	1068,19	3,47%	16,16%	
Recepção	40,96%	6,75%	47,71%	37,48%	11,65%	0,91%	1018,35	4,65%	16,04%	
Sec. Linse	41,38%	3,58%	44,96%	40,28%	13,48%	0,00%	773,37	4,61%	16,15%	
Linse	27,66%	6,89%	34,55%	37,38%	23,89%	48,12%	1052,94	2,04%	15,89%	
Média	36,36%	6,59%	42,95%	37,81%	17,03%	13,24%	1.023,97	3,67%	16,05%	
Consumo total de 42.396,36 kWh										

Tabela 46: Resultados simulação Caso 03 com PMV 1,0

Ambiente	Horas ocupadas								Horas desocupadas
	Ar-condicionado			Janela aberta	Janela fechada, ventilador e ar-cond desligado	trocador de calor ligado	CO <sub>2</sub> máximo	Desconforto	Janela aberta
	Aquecimento	Resfriamento	Total						
Sala de aula	38,55%	5,13%	43,68%	39,22%	15,24%	6,27%	1073,03	3,78%	16,24%
Ateliê 1	34,94%	7,30%	42,24%	36,57%	19,40%	18,98%	1110,62	3,37%	15,76%
Ateliê 2	36,17%	8,20%	44,37%	36,29%	17,93%	5,86%	1071,27	3,80%	16,11%
Ateliê 3	34,86%	8,25%	43,11%	37,46%	17,62%	12,54%	1068,19	3,47%	16,16%
Recepção	40,96%	6,75%	47,71%	37,48%	11,65%	0,91%	1018,35	4,65%	16,04%
Sec. Linse	41,38%	3,58%	44,96%	40,28%	13,48%	0,00%	773,37	4,61%	16,15%
Linse	27,66%	6,89%	34,55%	37,38%	23,89%	48,12%	1052,94	2,04%	15,89%
Média	36,36%	6,59%	42,95%	37,81%	17,03%	13,24%	1.023,97	3,67%	16,05%
Consumo total de 42.396,36 kWh									

A seguir apresenta-se o compilado de energia consumida para cada caso, assim como o nível de desconforto.

Tabela 47: Compilado energia e desconforto para o ano todo com PMV 0,2

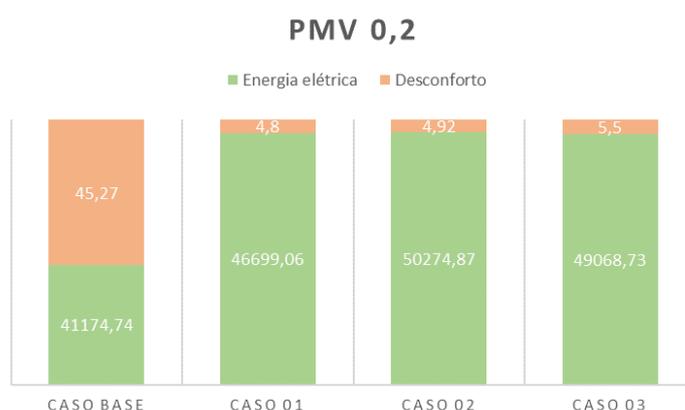


Tabela 48: Compilado energia e desconforto para o ano todo com PMV 0,7

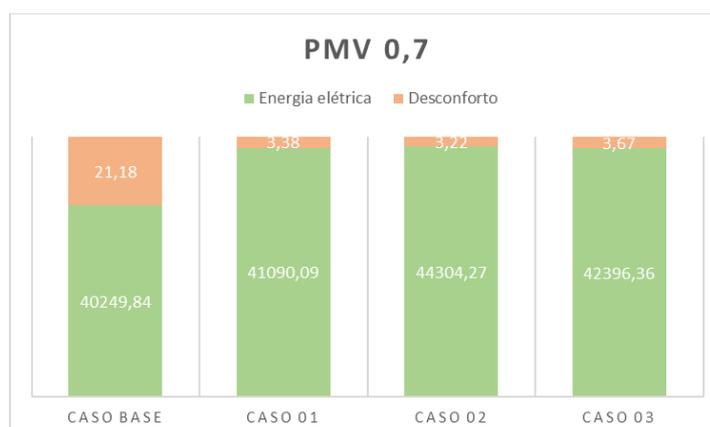


Tabela 49: Compilado energia e desconforto para o ano todo com PMV 1,0

