



ENTAC 2024

XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024



Estudo da potencialidade do uso da velocidade do ar na economia de energia em um edifício automatizado

Study of the potential of using air speed to save energy in a automat building

Monica Wilges

Universidade Federal de Pelotas | Pelotas | Brasil | monicawilges@hotmail.com

Gabriel Leite Bessa

Universidade Federal de Pelotas | Pelotas | Brasil | gabriel.lb@inf.ufpel.edu.br

Antonio Cesar Silveira Baptista da Silva

Universidade Federal de Pelotas | Pelotas | Brasil | antoniocesar.sbs@gmail.com

Anderson Priebe Ferrugem

Universidade Federal de Pelotas | Pelotas | Brasil | ferrugem@inf.ufpel.edu.br

Resumo

A necessidade de resfriamento de ambientes torna-se cada vez mais urgente em meio ao cenário de aquecimento global. No entanto, a maneira como esse resfriamento é abordado requer estudo aprofundado. O território brasileiro, em sua maioria, caracteriza-se por um clima quente e úmido e uma abordagem eficaz para melhorar a sensação térmica nesses locais é a adoção de estratégias simples de resfriamento baseadas na movimentação do ar, através do uso de ventiladores e da promoção da ventilação natural. Nesse sentido, a pesquisa tem como objetivo verificar a influência da utilização da velocidade do ar com o uso de ventiladores de teto na economia de energia em uma edificação eficiente de operação de modo misto por meio de simulação computacional. Utilizando o software EnergyPlus 9.4 em conjunto com a versão 0.2 da API utilizando a linguagem Python. Essa abordagem permite o gerenciamento das aberturas das janelas em condições favoráveis, além de controlar a ventilação e definir o ponto de ajuste do ar-condicionado conforme o conforto dos usuários. Essa gestão eficiente não só resulta em economia de energia, mas também prioriza o conforto dos ocupantes.

Palavras-chave: Conforto térmico. Ventilação natural. Ventiladores de teto. PMV. EnergyPlus.

Abstract

The need to cool environments becomes increasingly urgent amid the global warming scenario. However, how this cooling is approached requires in-depth study. The Brazilian territory, for the most part, is characterized by a hot and humid climate and an effective approach to improving the thermal sensation in these places is the adoption of simple cooling strategies based on air movement, through the use of fans and the promotion of natural ventilation. In this sense, the research aims to verify the influence of using air speed with the use of ceiling fans on energy savings in a mixed-mode operating classroom through computer simulation. Using the EnergyPlus 9.4 software in conjunction with version 0.2 of the API using the Python language. This approach allows the management of window openings in favorable conditions, in addition



to controlling ventilation and defining the air conditioning setpoint according to user comfort. This efficient management not only results in energy savings, but also prioritizes occupant comfort.

Keywords: Thermal comfort. Natural ventilation. Ceiling fans. PMV. EnergyPlus.

INTRODUÇÃO

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), 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 [1].

Um dos fatores exacerbadores desse cenário é o uso extensivo de condicionadores de ar, que, de acordo com a Agência Internacional de Energia, 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 CO₂, com estimativas indicando um triplo aumento no uso de condicionadores até 2050 [2].

Para mitigar o aquecimento global, uma das alternativas é melhorar o desempenho energético das edificações [3]. 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 [4].

Para que o conforto térmico dos usuários seja totalmente alcançado, e ainda seja ampliada a utilização da ventilação natural, a operação de modo misto pode ser aplicada juntamente com a ventilação mecânica, ventiladores e à extensão das temperaturas de set point de resfriamento. Desse modo, o sistema de refrigeração só seria ativado quando as condições térmicas internas fossem desconfortáveis [5][6]. Pesquisas demonstraram que a ventilação de modo misto 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 [7].

No Brasil, onde o clima prevalece quente e úmido, uma das alternativas de conforto é o uso da velocidade do ar. Essa estratégia aliada a uma maior movimentação do ar 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 [8][9][10]

Ventiladores de teto são dispositivos econômicos e energeticamente eficientes, comumente usados em edifícios em climas tropicais e subtropicais [11]. 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 [12].

Nesse mesmo sentido, a pesquisa realizada em salas de aula em Alagoas, resultou no conforto dos ocupantes com temperatura operacional de 30°C e uma velocidade do ar de 0,90m/s [8].

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 [13].

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.

METODOLOGIA

DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO E VELOCIDADES DO AR

Conforme a tabela apresentada a seguir, 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 quentes 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.

Tabela 1 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 (2024)

A relação entre o nível de conforto desejado, a velocidade do ar aceitável e o consumo de energia definem os testes que serão elaborados neste trabalho.

Tomando como referência a ASHRAE [14], 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 não está de janelas abertas, ou seja, os usuários tendem a se desconectar das condições externas.

DEFINIÇÃO DO CASO BASE

Como parte do desenvolvimento da pesquisa, a escolha do prédio de estudo se centrou em selecionar um edifício projetado de acordo com as características do local, maximizando o conforto dos usuários e minimizando o uso de energia elétrica.

Encontramos esses critérios no prédio “Anexo da FAUrb”, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas cujo projeto foi selecionado através do edital de chamada pública Procel Edifica – NZEB Brasil lançado pelo Procel/ Eletrobras, para seleção de projetos NZEB.

O projeto está localizado próximo à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFPel, junto a vários Campus da Universidade (Figura 1). Ele possui uma metragem quadrada de 580,68m², sendo distribuídos em três pavimentos.

Figura 1: Localização do prédio e imagem do prédio



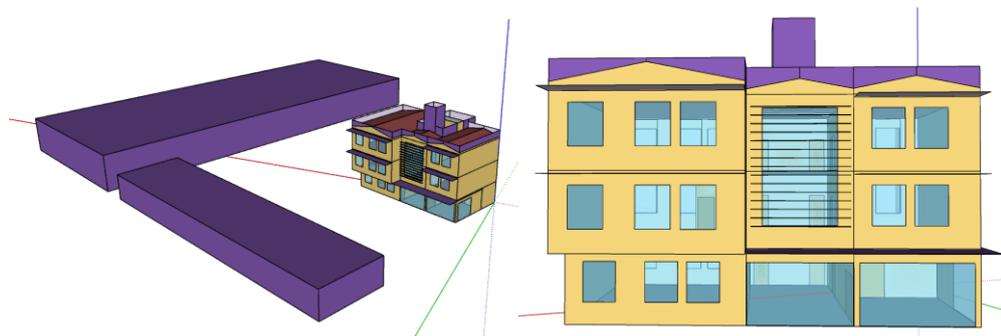
Fonte: Autora (2024)

Por estar inserida em um clima de maior sazonalidade do país, as estratégias construtivas propostas por este projeto buscam a 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 em faces opostas, ao mesmo tempo que no inverno proporcionam elevada estanqueidade.

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 02).

Figura 2: 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 2).

Tabela 2 Características dos materiais utilizados na simulação

Elemento	Composição	espessura (cm)	condutividade λ (W/m°C)	densidade ρ (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 [15][3][5]

As janelas utilizadas no projeto serão de vidro duplo e utilizarão caixilhos de boa qualidade para proporcionar uma adequada vedação da edificação. Os vidros empregados nas esquadrias do projeto serão 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.

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 de aulas são nos períodos diurnos e noturnos, das 8h às 12h e das 13:30 às 17:30h e à noite das 19h às 22h00, com ocupação de 100% nos períodos definidos. Para os finais de semana e feriados, os ambientes foram considerados desocupados.

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

Para a densidade de potência de equipamentos, estabeleceu-se 15,0 W/m², de acordo com a INI-C para edificações educacionais como uma condição de referência.

USO DA VELOCIDADE DO AR – CAMPO PEOPLE

A determinação da velocidade do ar no *EnergyPlus* 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 [16].

No quesito variável humana a vestimenta utilizada por uma pessoa tem um impacto substancial no conforto térmico dos usuários. Para essa pesquisa, o método dinâmico de isolamento do vestuário desenvolvido por Schiavon e Lee [17] será utilizado, ou seja, o isolamento da roupa varia em função da temperatura do ar externo às 6 da manhã [14]. A taxa metabólica estabelecida foi de 130w, de acordo com a NBR 16401 [18], para pessoas com atividade leve.

Para estabelecer a velocidade utilizada, foi criada uma agenda constante, onde esse valor é estabelecido conforme o conforto dos usuários, através de iterações pelo algoritmo criado.

MODELAGEM DO TROCADOR DE CALOR

O projeto do prédio em questão foi projetado para ter trocador de calor nos ambientes com objetivo de garantir a qualidade do ar por meio de trocas de ar com ar externo, com o benefício desse ar ser aquecido ou refrigerado quando necessário.

Para modelar esse equipamento juntamente com um ar-condicionado PTHP no *EnergyPlus*, foi necessário a modelagem de *HVACTemplate:System:DedicatedOutdoorAir* - é um sistema de ar externo dedicado de volume constante que pode atender múltiplas zonas. 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.

MODELAGEM DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO ARTIFICIAL

Para a configuração do ar-condicionado no *EnergyPlus*, serão utilizados 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 [18], 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.

CONFIGURAÇÃO DA VENTILAÇÃO NATURAL

Para a simulação da ventilação natural, será usado o campo *AirflowNetwork*, ele 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:Surface* e *AFN:Multizone:Component:SimpleOpening*.

CONFIGURAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO EM PYTHON

O intuito do algoritmo 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, acionamento do ar-condicionado e determinação do *setpoint* necessário para o conforto.

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, assim conseguimos incrementar a temperatura do ar através do uso do vento.

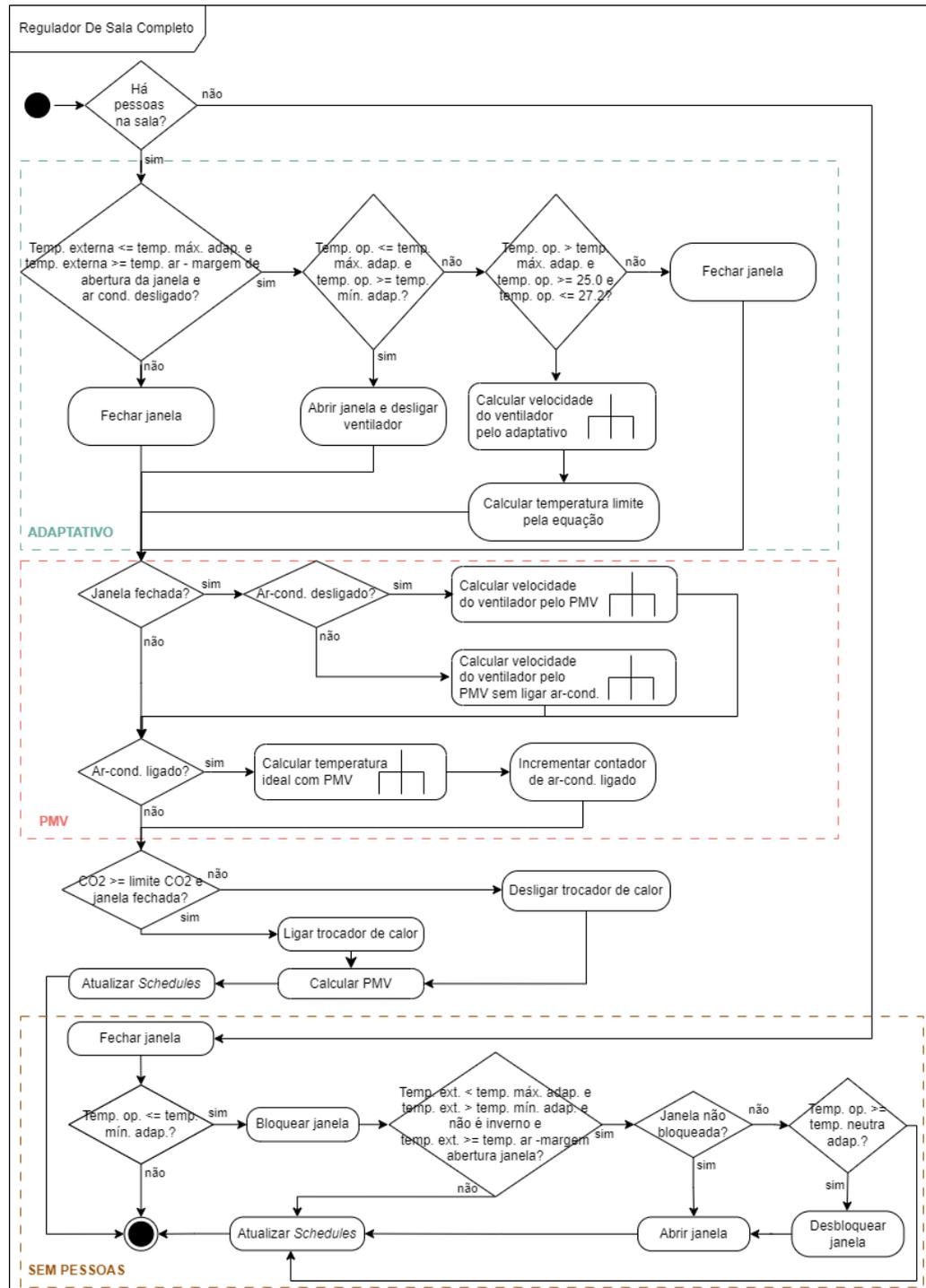
Quando a temperatura operativa está fora da zona de conforto pelo método adaptativo, ou seja, fora da zona de conforto, a janela é fechada e passa-se a utilizar as métricas do PMV, onde temos como prioridade manter os usuários em conforto e quando há o desconforto por calor, a primeira alternativa é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

Para que os cálculos possam ser efetuados de maneira iterativa, será utilizada a API do *EnergyPlus* para Python juntamente com as bibliotecas *eppy* [19], para alterar os parâmetros de configuração do arquivo IDF [10], e *pythermalcomfort* [20], para realizar os cálculos dos 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 realizar 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.

Para elucidar o algoritmo de forma completa realizada nesta pesquisa, o fluxograma abaixo demonstra o funcionamento.

Figura 3: Fluxograma do Algoritmo Completo



Fonte: autora (2024)

RESULTADOS

Para elucidar os resultados obtidos, foram excluídos do ano simulado os períodos de verão e inverno. A análise destes períodos permitiu identificar os dias com maior amplitude térmica, para examinar os efeitos da simulação durante esses intervalos. No verão, o dia 03 de fevereiro foi marcado por uma queda drástica na temperatura, seguido por um aumento significativo no dia 05 de fevereiro, representando extremos

que foram minuciosamente examinados. Para destacar esses eventos, os gráficos foram ampliados para o intervalo de 30/01 a 05/02.

No período de inverno, o dia de menor temperatura registrada foi 03/08, sendo que os resultados desse dia, juntamente com os dias anteriores e posteriores, foram ampliados para uma análise mais detalhada. As análises serão específicas para o Ateliê 1, localizado no segundo pavimento, e para o PMV 0,5.

1.1 Simulação completa

Neste capítulo, apresentaremos os resultados das análises abrangentes do edifício, conforme delineado na figura 3. Uma síntese da simulação revela que o ar-condicionado de resfriamento é acionado em todo o edifício apenas 0,66% do tempo em que há ocupação, enquanto o ventilador opera durante 9,07% do tempo. É importante notar que a maior parte do tempo de funcionamento do ventilador ocorre quando as janelas estão fechadas e o ar-condicionado está desligado.

Tabela 4 Resultados simulação completa com PMV 0,5

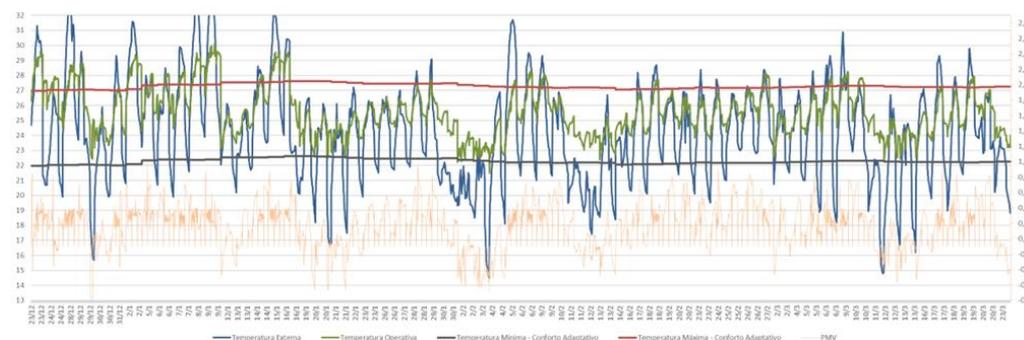
Ambiente	Ar-condicionado ligado	Aquecimento	Resfriamento	Ventilador ligado	Ventilador e ar-cond. ligado	Ventilador ligado, ar desligado e janela fechada	Janela aberta	Janela aberta e ventilador ligado	trocador de calor ligado	Janela fechada, ventilador e ar-cond desligado	Desconf. ortó	Janela aberta sem pessoas	CO2 máximo
SALA_AULA	40,57%	40,57%	0,00%	6,81%	0,00%	6,79%	40,00%	0,02%	5,85%	11,16%	4,10%	16,74%	1075,58
ATELUE1	38,11%	37,61%	0,51%	10,37%	0,51%	9,63%	35,94%	0,16%	17,09%	14,25%	3,60%	15,19%	1080,33
ATELUE2	39,88%	38,51%	1,36%	11,36%	1,36%	9,77%	34,99%	0,14%	6,47%	13,76%	3,85%	15,11%	1032,05
ATELUE3	38,17%	36,84%	1,33%	11,35%	1,33%	9,79%	36,22%	0,13%	12,15%	13,73%	3,54%	14,79%	1035,58
RECEPCAO	42,86%	42,47%	0,39%	7,94%	0,39%	7,33%	38,08%	0,05%	0,95%	8,98%	4,90%	16,56%	1056,50
SEC_UNSE	42,13%	42,13%	0,00%	6,32%	0,00%	6,24%	40,54%	0,08%	0,00%	9,72%	5,03%	16,27%	813,70
LINSE	33,10%	32,07%	1,03%	9,36%	1,03%	8,20%	37,94%	0,13%	47,13%	17,40%	2,22%	15,60%	1040,93
MÉDIA	39,26%	38,60%	0,66%	9,07%	0,66%	8,25%	37,67%	0,10%	12,80%	12,72%	3,89%	15,75%	1.019,24

Consumo total de 43145,96 kWh

Fonte: autora (2024)

No gráfico abaixo, que representa o período de verão, observa-se que a temperatura interna geralmente se mantém dentro dos limites de conforto adaptativo, mesmo quando a temperatura externa excede esses limites. Nos momentos em que a temperatura interna ultrapassa esses limites, como evidenciado no gráfico subsequente que mostra o funcionamento do ventilador durante esse período, fica claro que o ventilador é ativado para manter o conforto dos usuários.

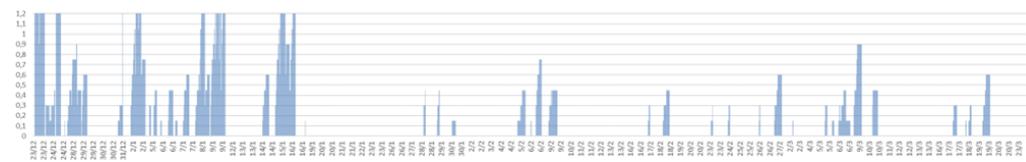
Figura 4: Simulação completa com PMV 0,5 no período de verão.



Fonte: autora (2024)

Nessa simulação, nos momentos em que o ar-condicionado foi acionado, a temperatura para acionamento foi estabelecida em 30 °C e uso concomitante do ventilador em 1,2m/s.

Figura 5: Ventiladores de teto na simulação completa com PMV 0,5 no período de verão



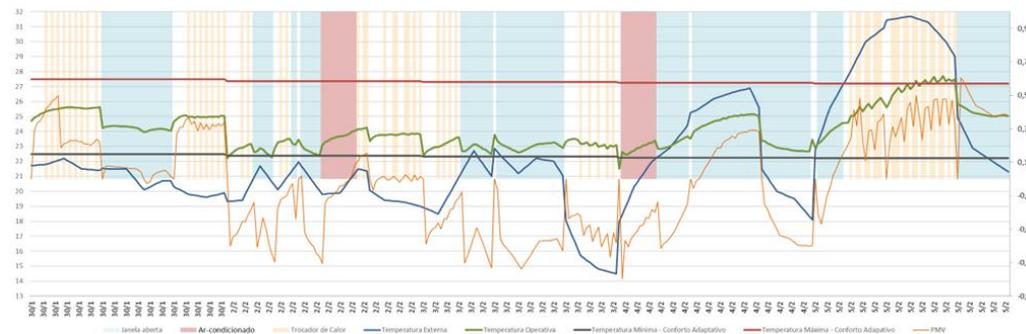
Fonte: autora (2024)

No gráfico a seguir, é evidente quando a janela está aberta, o trocador em funcionamento para manter o CO2 abaixo do limite e quando o ar-condicionado está operando. Notavelmente, o algoritmo consegue manter a temperatura interna da sala agradável, mesmo quando a temperatura externa excede os limites de conforto, mantendo-a dentro dos limites do conforto adaptativo e com o PMV dentro do limite estabelecido.

Além disso, observa-se que em alguns momentos, conseguimos manter a sala em conforto de forma passiva, apenas com as janelas abertas, e também com a janela fechada, mas sem o funcionamento do ar-condicionado.

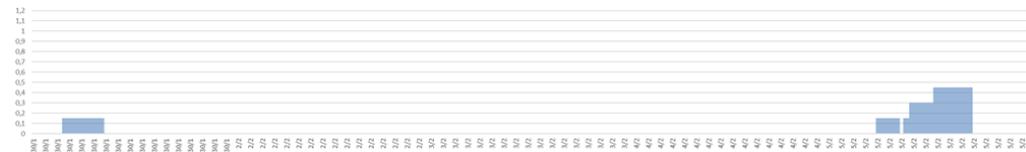
No dia 05 de fevereiro, quando a temperatura externa atingiu quase 32°C, fica claro que apenas o uso dos ventiladores de teto foi suficiente para manter os usuários em conforto.

Figura 6: Simulação completa com PMV 0,5 nos dias de verão



Fonte: autora (2024)

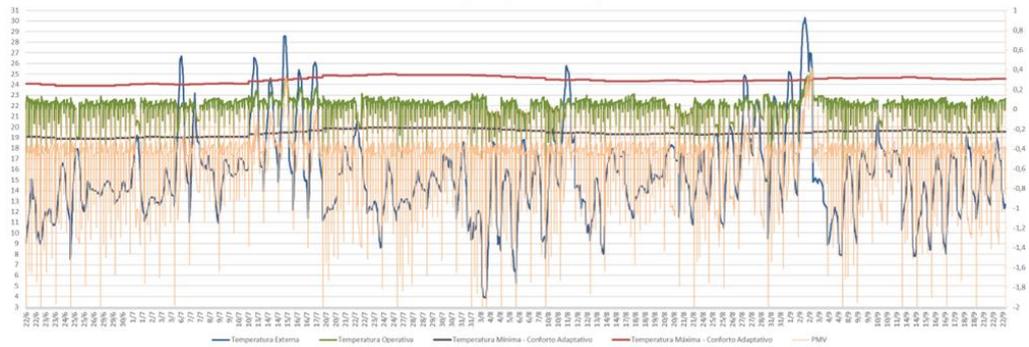
Figura 7: Ventiladores de teto na simulação completa com PMV 0,5 nos dias de verão.



Fonte: autora (2024)

Para o período de inverno, notamos que a temperatura operativa se encontra entre a máxima e a mínima do conforto adaptativo mesmo a temperatura externa estando fora do limite. Já o PMV oscila bastante pelo motivo da simulação ocorrer no tempo presente, ou seja, nas primeiras horas de funcionamento, o aquecimento demora para chegar na temperatura ideal, isso faz com que haja esses picos de desconforto, mas que na maioria do tempo, o PMV encontra-se na faixa estipulada. Quando o ar-condicionado é acionado, a temperatura para manter o conforto teve como média 25 °C.

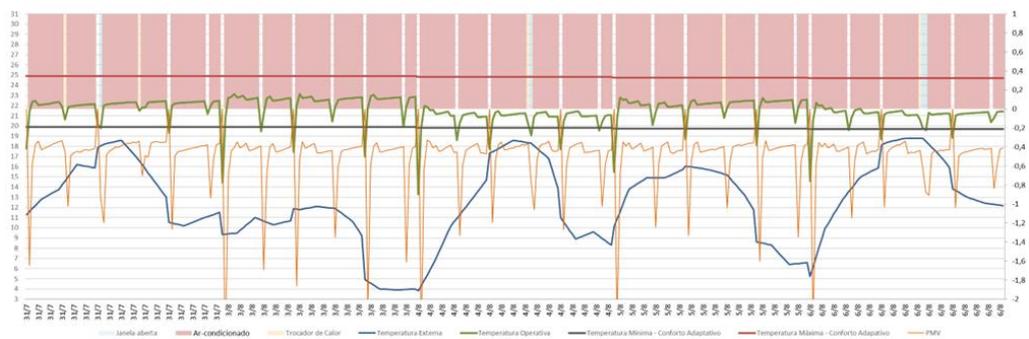
Figura 8: Simulação completa com PMV 0,5 no período de inverno.



Fonte: autora (2024)

Quando o gráfico é ampliado nos dias mencionados, é possível observar que os picos de desconforto têm uma recorrência, isso se justifica, pois, a simulação não trabalha com a previsão, ou seja, é necessário captar os dados a partir da entrada das pessoas e assim tomar uma atitude, como o acionamento do ar-condicionado na temperatura ideal de conforto.

Figura 9: Simulação completa com PMV 0,5 nos dias de inverno.



Fonte: autora (2024)

1.4 Setpoint fixo e sem ventilador

Nessa simulação temos o funcionamento do prédio sem os ventiladores de teto e com o setpoint do ar-condicionado fixo estabelecido em 22 °C e 24 °C, conforme ABNT 16041.

Através do resumo abaixo, nota-se que o acionamento do ar-condicionado em relação a simulação completa é maior, assim como o nível de desconforto causado pelo setpoint fixo.

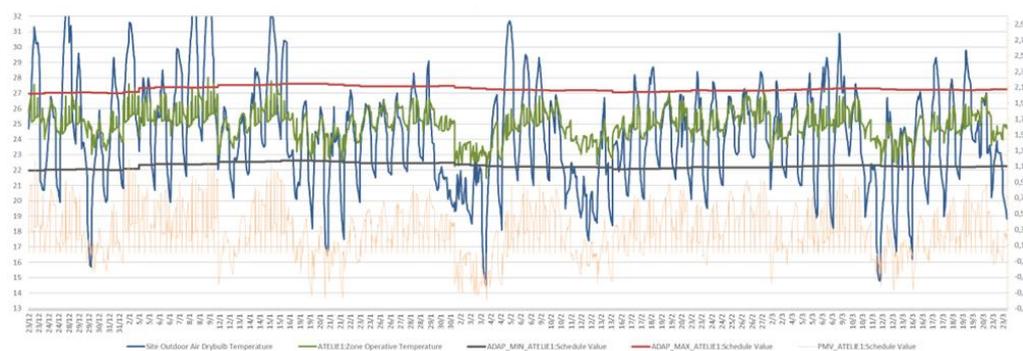
Tabela 5 Resultados simulação com *setpoint* fixo e sem ventilador com PMV 0,5

Ambiente	Ar-condicionado ligado	Aquecimento	Resfriamento	Janela aberta	trocador de calor ligado	Janela fechada, ventilador e ar-cond desligado	Desconforto	Janela aberta sem pessoas	CO2 máximo
SALA_AULA	48,51%	41,62%	6,89%	37,56%	5,91%	9,79%	39,12%	15,80%	1088,76
ATELIE1	46,94%	37,49%	9,45%	35,00%	21,05%	12,55%	35,61%	15,51%	1097,83
ATELIE2	48,25%	38,70%	9,55%	35,00%	5,70%	11,97%	37,15%	15,84%	1041,44
ATELIE3	47,38%	37,90%	9,48%	36,36%	13,96%	12,00%	33,97%	15,93%	1049,40
RECEPCAO	53,00%	44,68%	8,32%	35,81%	0,41%	7,15%	40,35%	15,61%	1008,27
SEC_LINSE	52,06%	46,62%	5,44%	37,22%	0,00%	8,17%	40,33%	15,71%	783,93
LINSE	36,66%	27,91%	8,75%	35,94%	50,68%	15,29%	29,23%	15,66%	1047,78
MÉDIA	47,54%	39,27%	8,27%	36,13%	13,96%	10,99%	36,54%	15,72%	1.016,77
Consumo total de 40.649,90 kWh									

Fonte: autora (2024)

A diferença nesse período dessa simulação com a completa, se demonstra na temperatura operativa que não oscila muito, pois como não tem o efeito do ventilador e o ar-condicionado se mantém no mesmo *setpoint*, há menos oscilação da temperatura.

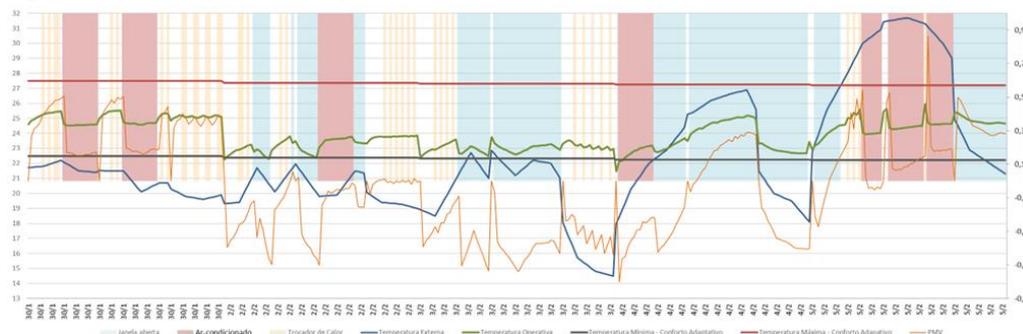
Figura 10: Simulação com *setpoint* fixo e sem ventilador com PMV 0,5 no período de verão.



Fonte: autora (2024)

Quando o gráfico é ampliado, nota-se um acionamento maior do ar-condicionado comparado com a simulação completa.

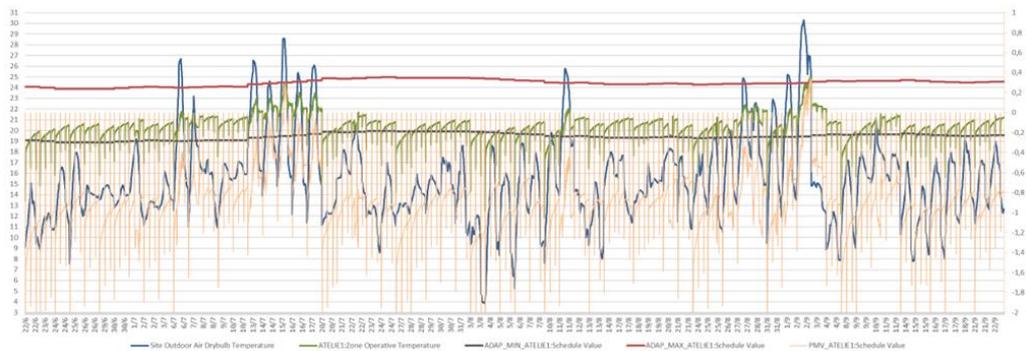
Figura 11: Simulação com *setpoint* fixo e sem ventilador com PMV 0,5 nos dias de verão.



Fonte: autora (2024)

Já para o período de inverno é notório o desconforto causado pelo *setpoint* fixo.

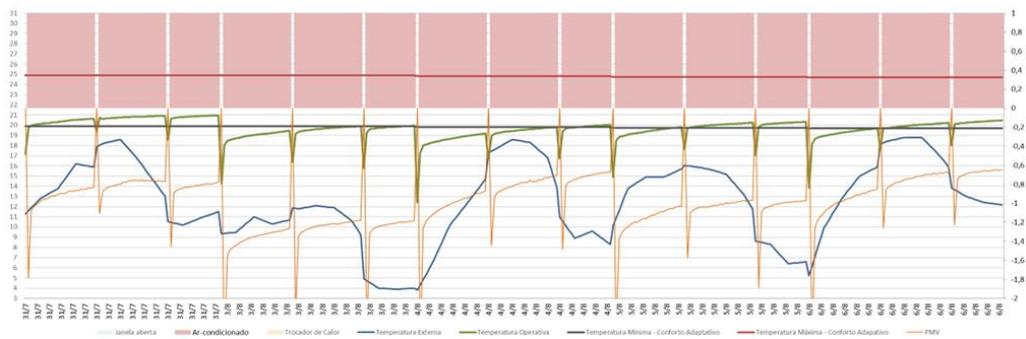
Figura 12: Simulação com setpoint fixo e sem ventilador com PMV 0,5 no período do inverno.



Fonte: autora (2024)

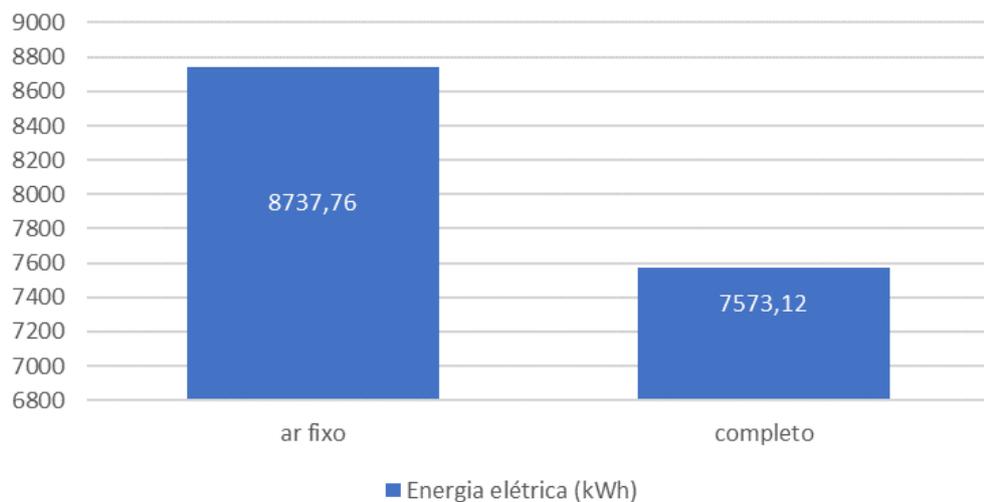
O desconforto se dá em sua maior parte na parte do inverno, pois a temperatura estabelecida em norma não é suficiente para o conforto dos usuários.

Figura 13: Simulação com setpoint fixo e sem ventilador com PMV 0,5 nos dias de inverno.



Fonte: autora (2024)

Figura 14: Compilado energia e desconforto no período do verão



Fonte: autora (2024)

Ao analisar especificamente o período de verão, torna-se evidente que o consumo de energia é mais elevado quando a simulação mantém o setpoint fixo do ar-condicionado sem o uso dos ventiladores de teto. 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. Em comparação com a simulação que mantém o ar fixo, a simulação completa resulta em uma redução no consumo de energia de 13%.

CONCLUSÃO

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, enquanto no inverno é de 25 °C.

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. Esta utilização do modo misto de condicionamento térmico acaba por reduzir a utilização do sistema de ar-condicionado, diminuindo o consumo de energia elétrica em 13%.

Ao analisar o desempenho ao longo de todo o ano, observamos que a simulação sem o uso de ventiladores de teto e com *setpoint* fixo de temperatura consome menos energia devido à menor diferença entre a temperatura interna e externa. Entretanto, essa abordagem resulta no aumento dos níveis de desconforto, já que a temperatura selecionada não leva em consideração as condições internas do ambiente.

REFERÊNCIAS

- [1] BERARDI, Umberto. A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 123, p. 230-241, 2017. ISSN 0921-3449. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.014>.
- [2] 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.
- [3] HOOFF, T. van; BLOCKEN, B.; HENSEN, J.L.M.; TIMMERMANS, H.J.P. On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings. *Building and Environment*, v. 82, p. 300-316, 2014. ISSN 0360-1323. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.027>.
- [4] 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: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.024>.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- [6] MORELLO, Alessandro. Avaliação do comportamento térmico do protótipo habitacional Alvorada. 2005.
- [7] KIM, Jungsoo; DE DEAR, Richard. Is mixed-mode ventilation a comfortable low-energy solution? A literature review. **Building and Environment**, v. 205, p. 108215, 2021.
- [8] 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

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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>.
- [12] 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.
- [13] 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>.
- [14] ASHRAE. Standard 55: thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE: Atlanta, 2020.
- [15] MORELLO, Alessandro. Avaliação do comportamento térmico do protótipo habitacional Alvorada. 2005.
- [16] DOE. V9.3 Input/output reference: The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output. US Department of Energy, [S.l.], 2021.
- [17] 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: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.024>.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401-2: instalações de ar-condicionado: sistemas centrais e unitários: parte 2: parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2008.
- [19] 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.
- [20] ANDRE, Maira et al. Achieving mid-rise NZEB offices in Brazilian urban centres: A control strategy with desk fans and extension of set point temperature. **Energy and Buildings**, v. 259, p. 111911, 2022.