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

Validação do sistema de um sinalizador visual como ferramenta de previsão das condições de conforto térmico em ambientes escolares

Validation of a visual signal system as a tool for predicting thermal comfort conditions in school environments

João Henrique Alves da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul | Jardim | Brasil | joao.henrique@ifms.edu.br
Junior Silva Souza
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul | Jardim | Brasil | junior.souza@ifms.edu.br
Júlia Nunes Santana
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul | Jardim | Brasil | julia.santana2@estudante.ifms.edu.br
Paula Carolina Birck Durigon
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul | Jardim | Brasil | paula.durigon@estudante.ifms.edu.br
Renata De Vecchi
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis | Brasil | redevecchi@gmail.com
Martin Gabriel Ordenes Migzier
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis | Brasil | martin.ordenes@ufsc.br

Resumo

Nesta pesquisa são descritos os resultados de um estudo piloto que buscou validar o sistema de um sinalizador visual como ferramenta utilizada para identificar as condições de conforto térmico em ambientes multidomínio em tempo real. Utilizou-se o código de PMV/PPD da NBR 16401-2 para desenvolver um modelo automatizado em Python, que aciona uma lâmpada sinalizadora quando identifica condições fora dos limites de conforto térmico para que os ocupantes possam alterar seu comportamento com as interfaces prediais. A coleta de dados ocorreu em salas de aula de ensino superior, aplicando questionários a cada 20 minutos e

Como citar:
SILVA, et. al. Validação do sistema de um sinalizador visual como ferramenta de previsão das condições de conforto térmico em ambientes escolares. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

registrando os dados ambientais para posterior correlação entre o sistema e os votos dos usuários. Resultados indicaram a ineficácia do Método Analítico, com velocidade do ar acima de 0,2 m/s em todos os casos, resultando em apenas 10% de conforto segundo o método. Em contraste, cerca de 70% dos votos indicaram neutralidade. Conclui-se que a aplicação do método analítico, nas condições de estudo, não se mostrou eficaz frente a realidade de conforto térmico dos usuários.

Palavras-chave: Sinalizador visual. Conforto térmico. Avaliação ambiental multidomínio. Comportamento dos usuários. Edifício escolar.

Abstract

This research describes the results of a pilot study that sought to validate the system of a visual signaling device as a tool used to identify thermal comfort conditions in multidomain environments in real time. The PMV/PPD code from NBR 16401-2 was used to develop an automated model in Python, which activates a signaling light when it identifies conditions outside the thermal comfort limits so that occupants can change their behavior with the building interfaces. Data collection took place in higher education classrooms, applying questionnaires every 20 minutes and recording environmental data for later correlation between the system and user votes. Results indicated the ineffectiveness of the Analytical Method, with air velocity above 0.2 m/s in all cases, resulting in only 10% comfort according to the method. In contrast, about 70% of the votes indicated neutrality. It is concluded that the application of the analytical method, under the study conditions, was not effective in reflecting the users' thermal comfort reality.

Keywords: Visual signaling device. Thermal comfort. Multidomain environmental assessment. User behavior. School buildings.

INTRODUÇÃO

Embora os edifícios sejam inicialmente concebidos buscando satisfazer as condições de conforto dos usuários, indicadores apontam que muitas vezes estes os consideram pouco confortáveis, de acordo com os critérios estabelecidos por regulamentos e avaliações ambientais. A operação dos edifícios frequentemente foge ao controle dos usuários e, quando disponível, funciona de maneira pouco eficaz em relação à eficiência energética e à presença dos demais ocupantes [1]. Para que houvesse maior eficiência, seriam necessárias articulações entre o projeto alinhado às normas de desempenho dos edifícios e a utilização, principalmente no que tange à educação dos usuários na operação dos edifícios.

Pesquisas relacionadas ao conforto ambiental têm contribuído significativamente para compreender os limites do conforto nos espaços internos [2][3][4][5]. No entanto, poucas têm se debruçado sobre as motivações do comportamento dos usuários na operação dos edifícios.

O programa *Energy in Building and Communities* (EBC) da IEA é uma iniciativa global que reúne 26 países para pesquisa e inovação em energia em edifícios e comunidades. O Anexo 66 da IEA EBC, intitulado "*Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings*", foi fundamental na padronização de métodos de pesquisa e simulação do comportamento dos ocupantes [6]. Em resposta às lacunas persistentes, o Anexo 79, "*Occupant-Centric Building Design and Operation*", busca integrar o comportamento

dos ocupantes no projeto e operação de edifícios para melhorar o desempenho energético e o conforto. Apesar dos esforços de tais projetos, ainda há lacunas a serem preenchidas, como compreender a exposição ambiental multidomínio e seu impacto na percepção e comportamento dos ocupantes, além das interações entre ocupantes e interfaces prediais relacionadas aos sistemas de controle ambiental [1].

A exposição ambiental multidomínio refere-se à compreensão de vários estímulos ambientais ao mesmo tempo, como o térmico, acústico, lumínico e de qualidade do ar, além dos impactos de um sobre os outros [7]. Nesse sentido, algumas pesquisas têm se dedicado a avaliar o conforto ambiental de mais de dois parâmetros [8] sem, no entanto, considerar o comportamento dos usuários.

A respeito da influência de uma condição ambiental sobre outra já é considerada em vários estudos. Como exemplo, pode-se citar o aumento da sensação de calor em pessoas expostas ao ruído [9][10] e o aumento da sensação de calor pelo nível de radiação recebida [11]. Além disso, outros impactos psicológicos devem ser considerados, como o cansaço, estresse, redução da capacidade de aprendizado, falta de concentração e até dores de cabeça devido à falta de qualidade ambiental [12][13][14]. Outras pesquisas que examinaram o comportamento dos usuários na operação de janelas, portas, sistemas de refrigeração e aquecimento, iluminação artificial e venezianas [15][16][17][18][19][20] não exploraram estudos multidomínio, que investigam como uma mudança em uma condição ambiental afeta outra. Por exemplo, como fechar ou abrir janelas e as portas para troca do ar interno afeta a temperatura interna que, por sua vez, influencia o uso do sistema de ar-condicionado. Um outro ponto de destaque é tais estudos também não consideram o impacto dessas interações no consumo energético.

São nas avaliações de comportamento que se observam vários métodos utilizados para coleta de dados, que variam entre a aplicação de questionários, uso de sensores, medições de parâmetros ambientais, observações, simulação [7] e, recentemente, o uso de *Internet of Things* (IoT). No entanto, em grande parte dos estudos são observadas fragilidades nas coletas de dados devido à quantidade de variáveis físicas, contextuais, culturais e psicológicas que precisam ser controladas [21]. Além disso, o efeito *Hawthorne*, que influencia o comportamento dos usuários devido à observação, também precisa ser considerado, e buscar alternativas para neutralizar ou considerar essa mudança é relevante [22][23].

Em uma avaliação do comportamento dos usuários sob condições ambientais multidomínio que considere simultaneamente o conforto térmico e a qualidade do ar, com o CO_2 como indicador de ar viciado, a necessidade de sinalizadores visuais se torna crucial. Dado que o CO_2 é um gás inodoro, insípido e incolor, sua detecção pelos usuários é inviável sem auxílio. Portanto, sinalizadores visuais são fundamentais para informar os usuários sobre as condições ambientais. Esses dispositivos podem estimular ações como a abertura de janelas ou a alteração do *setpoint* do ar-condicionado, garantindo um ambiente confortável, níveis seguros de CO_2 e, consequentemente, uma maior produtividade. Além disso, ao incentivar comportamentos que otimizam o uso de recursos, esses sinalizadores podem contribuir para a eficiência energética do edifício.

Neste contexto, desenvolver uma metodologia abrangente que considere todas as variáveis discutida se torna um desafio [21][26]. E, embora o uso de questionários seja amplamente considerado como uma forma confiável de avaliação do conforto térmico, na avaliação do comportamento dos usuários, pode comprometer os resultados das pesquisas devido à interferência dos pesquisadores. Portanto, é crucial explorar outras formas de avaliar as condições de conforto térmico e, principalmente, a depender da tipologia da edificação analisada.

Diante disso, esta pesquisa busca validar o sistema de um sinalizador visual desenvolvido para a avaliação de conforto térmico em ambientes condicionados artificialmente, relacionando o resultado dos questionários com os momentos em que o sinalizador acenderia, presumindo seu uso, de modo a verificar se o conforto ou desconforto relatado pelos usuários corresponde aos momentos indicados pelo sinalizador, comprovando sua eficácia.

MÉTODO

O desenvolvimento dessa pesquisa partiu do questionamento: "*Como validar a eficácia de um sistema de sinalização visual para avaliar o conforto térmico em ambientes condicionados artificialmente, verificando se as respostas de conforto/desconforto térmico dos questionários correspondem às indicações do sinalizador?*". A motivação para o uso do sinalizador visual surge da constatação de que, para correlacionar as condições térmicas com o comportamento dos usuários, os questionários, embora eficazes na avaliação do conforto térmico, não são ideais devido à interferência causada pela presença dos pesquisadores. Dito isso, o sinalizador visual pode influenciar positivamente o comportamento dos usuários e, consequentemente, contribuir para a eficiência energética das edificações.

Na Figura 1 é apresentado o esquema do que se espera utilizar na avaliação do comportamento dos usuários. Nesta etapa da pesquisa propõe-se apenas a verificação do sistema do sinalizador desenvolvido, analisando se é possível de fato representar adequadamente o conforto térmico dos usuários. É demonstrado a localização do confortímetro SENSU, bem como a disposição dos sinalizadores visuais para orientar o comportamento dos usuários.

Figura 1: Esquema dos sinalizadores visuais para avaliação do comportamento dos usuários



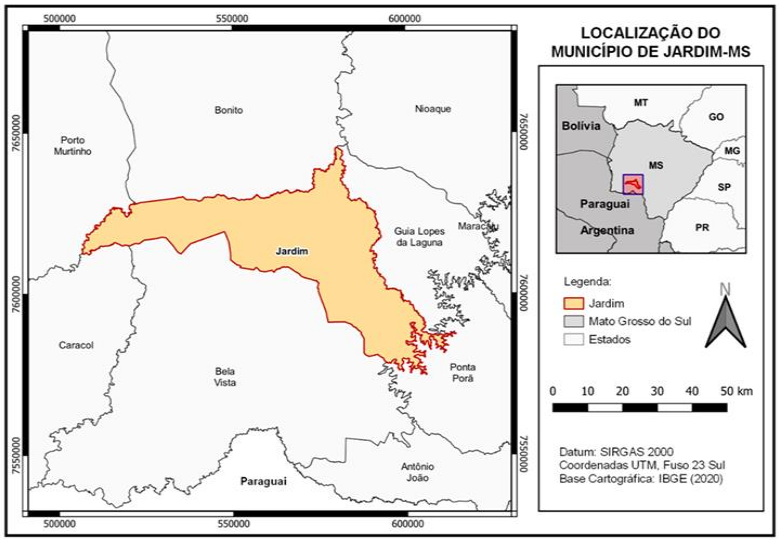
Fonte: produzido pelos autores.

Para conseguir sinalizar faixas de conforto térmico no ambiente, os dados são coletados e encaminhados em tempo real por meio de comunicação Bluetooth para um Arduino configurado com o algoritmo do Método Analítico (PMV/PPD), conforme estabelecido pela NBR 16401-2 [27]. Conforme os dados ambientais são coletados a cada segundo, o algoritmo calcula o PMV/PPD, acionando ou desligando automaticamente os sinalizadores sempre que os resultados extrapolarem os limites de PMV entre -0,5 e +0,5 e PPD acima de 10%. Nesta etapa, como o objetivo é verificar a eficácia do sistema do dispositivo como um instrumento confiável para definir as condições de conforto térmico, os sinalizadores não foram mostrados aos usuários. Os dados foram armazenados em dataloggers para a análise dos momentos "confortáveis/desconfortáveis" com base em questionários curtos, que foram aplicados para entender com mais precisão o conforto térmico dos alunos.

CONTEXTO CLIMÁTICO DA PESQUISA

O município de Jardim situa-se no centro-sul de Mato Grosso do Sul, a uma distância de 230 km da capital, Campo Grande, como mostrado na Figura 2.

Figura 2: Localização de Jardim no mapa

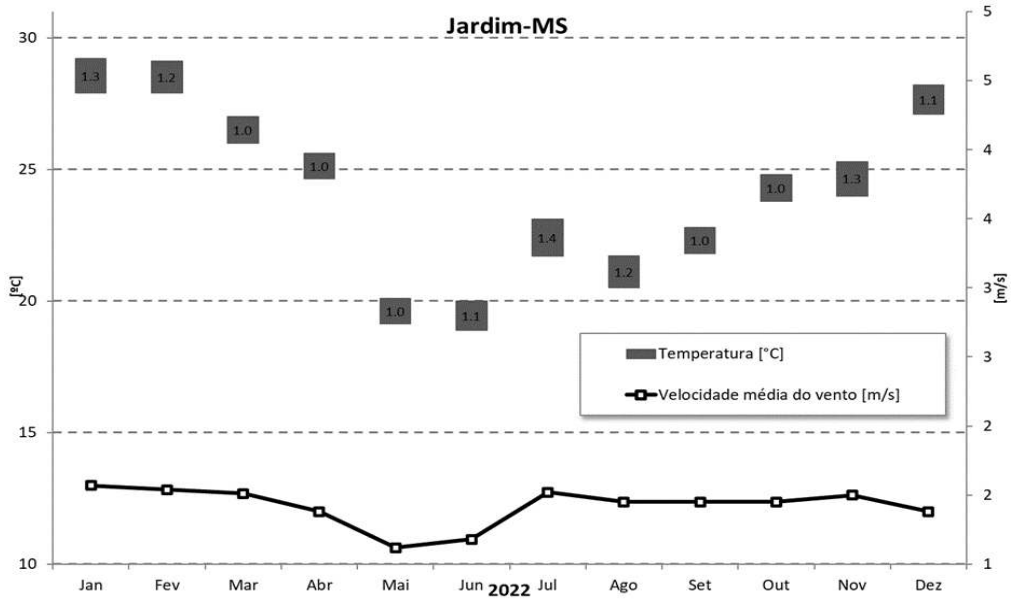


Fonte: elaborado pelos autores.

Com uma altitude de 252,47 metros, Jardim possui coordenadas geográficas de latitude -21,47 e longitude -56,13 [28]. De acordo com a NBR 15220-3, o município encontra-se na Zona Bioclimática 3 [29]. Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, a região apresenta clima tropical de savana (Aw). As temperaturas médias mensais indicam que o mês mais frio tem média acima de 18 °C, enquanto o mais quente supera 22 °C. O município tem uma estação seca, com precipitação inferior a 60 mm, e uma estação chuvosa, com mais de 60 mm. A precipitação média anual é de cerca de 1.500 mm, com a estação seca de maio a setembro e a chuvosa de outubro a abril. A temperatura média anual é de aproximadamente 23 °C, com picos entre setembro e novembro e mínimas entre junho e julho.

A Figura 3 mostra as médias de temperaturas máximas e mínimas do ar e a velocidade do vento em 2022, conforme a estação meteorológica do INMET em Jardim-MS, identificada pelo código A758.

Figura 3: Médias de temperaturas e velocidade do vento em Jardim-MS em 2022



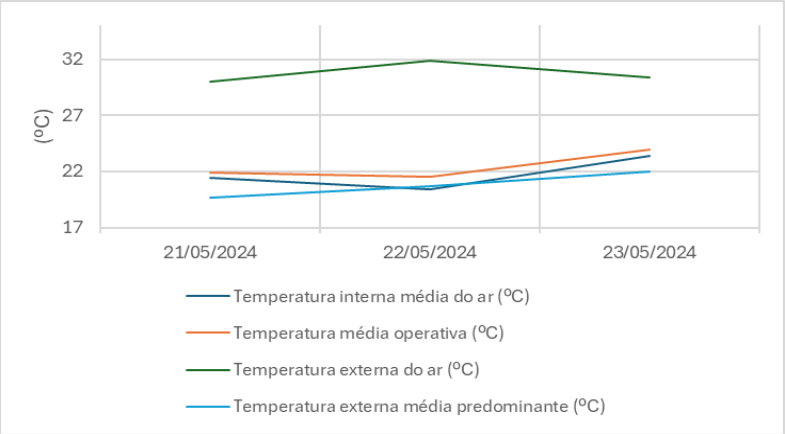
Fonte: Adaptado de (INMET, 2022).

Embora Jardim-MS não tenha registros climáticos oficiais, os dados da estação meteorológica A758 do INMET refletem o clima ao longo de 2022. A amplitude térmica é baixa, atingindo apenas 1,4 °C em julho. Os meses de janeiro, fevereiro e dezembro apresentam as maiores temperaturas, com máximas e mínimas de 29,2 °C e 27,9 °C, 29,1 °C e 27,9 °C, e 28,2 °C e 27,1 °C, respectivamente. Já maio e junho registram as temperaturas mais baixas, com máximas e mínimas de 20,1 °C e 19,1 °C, e 20,0 °C e 18,9 °C. A velocidade do vento varia de 1,38 m/s em abril a 1,57 m/s em janeiro.

Esta pesquisa foi realizada na Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul (UEMS). A coleta de dados foi realizada em três salas de aula, construídas em alvenaria com blocos cerâmicos. Todas as janelas possuem quatro folhas. Nas Salas 1 e 2, há dois aparelhos de ar-condicionado tipo split da marca Elgin, de 12.000 BTU cada. Na Sala 3, há um aparelho de ar-condicionado tipo split da marca Elgin, de 18.000 BTU, sem sistema de renovação de ar. A área das salas 1, 2 e 3 é de 33,28 m^2, 40,00 m^2 e 52,00 m^2, respectivamente. Na Sala 1, havia dois ventiladores de teto que estavam em funcionamento. Em nenhum momento os usuários abriram as janelas, ou seja, a climatização se restringiu aos aparelhos de ar-condicionado, que foram ativados com um *setpoint* de 21 °C. O controle do ar-condicionado ficava à disposição dos docentes, e caso os alunos sugerissem alguma mudança de temperatura, ela poderia ser considerada, o que não ocorreu.

Os dados foram coletados durante o outono, entre os dias 21 e 23 de maio de 2024, no período noturno. A Figura 4 apresenta dados referentes às temperaturas internas e externas.

Figura 4: Variação das temperaturas interna e externa durante a coleta



Fonte: produzido pelos autores.

Houve a participação de 9, 32 e 39 pessoas, respectivamente, totalizando 80 participantes. Neste estudo, foram coletados 584 votos válidos; outros votos foram excluídos devido à falta de informações. Todos os participantes da pesquisa eram alunos de graduação dos cursos de Geografia, Letras e Direito. A faixa etária dos respondentes variou de 17 a 63 anos.

As medições das variáveis pessoais e ambientais seguiram as recomendações sugeridas em norma [27].

Durante a pesquisa de campo, foram coletadas diversas variáveis ambientais internas, incluindo a temperatura do ar (T_{ar}), temperatura de globo (T_g), velocidade do ar em m/s (V_{ar}) e umidade relativa do ar (UR). Todas essas variáveis foram coletadas por meio do confortímetro SENSU, disposto no centro da sala, a uma altura de 1,1 m do piso acabado. A temperatura externa do ar foi coletada pela estação meteorológica A758 do INMET. A coleta de dados ambientais internos foi realizada a cada 1 minuto, enquanto a temperatura externa do ar foi coletada a cada 1 hora. O confortímetro foi ligado 30 minutos antes do início das coletas de dados para garantir a estabilidade das medições. A Tabela 1 apresenta as especificações técnicas do confortímetro SENSU.

Tabela 1: Especificações do confortímetro SENSU

Parâmetro	Faixa	Precisão	Resolução
Temperatura do ar (Ta)	0 a 100 °C	0,20 ºC;	±0,100 °C
Velocidade do ar (Va)	0–3 m/s	±3,00%	±0,010m/s
Temperatura do globo (Tg)	0–60 °C	±0,20 °C	±0,100 °C
Umidade relativa (UR)	5 a 98 %	±3,00%	±0,001

Fonte: produzido pelos autores.

Já as variáveis derivadas, tais como a temperatura radiante média e temperatura operativa, foram calculadas de acordo com as Equações 1 e 2, respectivamente.

Equação 1: Equação para determinar a temperatura radiante média

$$t_r = \sqrt[4]{(t_g + 273)^4 + (2{,}5.10^8).v_a{}^{0,6}.(t_g - t_a)} - 273$$

Fonte: ABNT, 2021.

Equação 2: Equação para determinar a temperatura operativa

$$t_o = A.t_a + (1 - A).t_r$$

onde

t_o é a temperatura operativa, expressa em graus celsius (°C);
A é um coeficiente de ajuste em função da velocidade do ar (Tabela 9);
t_a é a temperatura do ar, expressa em graus celsius (°C);
t_r é a temperatura radiante média, expressa em.graus celsius (°C).

Coeficiente de ajuste em função da velocidade do ar

v_a	< 0,2 m/s	0,2 até 0,6 m/s	0,6 até 1,0 m/s
A	0,5	0,6	0,7

Fonte: ABNT, 2021.

Para relacionar a estimativa de conforto do confortímetro e do código do PMV, foram aplicados questionários estruturados com o intuito de identificar características pessoais e os votos de conforto dos usuários.

Esta pesquisa é um desdobramento de um projeto intitulado "Avaliação do comportamento dos usuários sob exposição ambiental multidomínio". Foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) sob o número de aprovação: 74158323.4.0000.0121.

Dois tipos de questionários estruturados foram aplicados nesse piloto. Ambos foram impressos e entregues aos usuários nos momentos de coleta. A aplicação dos questionários foi subdividida em duas partes. A primeira (Questionário 1), aplicada no início de cada dia de coleta, identificava características pessoais dos usuários, tais como: vestimenta (os usuários assinalavam opções de vestimentas descritas no questionário); idade; altura; peso; atividade; data; e identificação. Esta identificação trata-se de um número fixado na mesa de cada usuário para relacionar com o segundo questionário. Todas as informações foram preenchidas exclusivamente pelos usuários.

A segunda parte (Questionário 2) foi aplicada aproximadamente a cada 20 minutos. Nela, os usuários apresentavam seus votos sobre os seguintes questionamentos:

1. Qual a sua sensação térmica neste momento? As possíveis respostas para essa pergunta foram: com muito calor; com calor; levemente com calor; neutro; levemente com frio; com frio; e com muito frio.
2. Você preferiria estar: mais quente; não mudar; ou mais frio.
3. Para você, este ambiente térmico é: aceitável ou inaceitável.
4. Como você se sente com relação ao movimento do ar neste momento? Inaceitável - Pouco movimento do ar; Inaceitável - Muito movimento do ar; Aceitável - Pouco movimento do ar; Aceitável - Movimento do ar suficiente; Aceitável - Muito movimento do ar.
5. Considerando sua resposta anterior, qual seria sua preferência com relação ao movimento do ar neste momento: maior movimento do ar; não mudar; ou menor movimento do ar.

O Quadro 1 apresenta os dias e horários de coleta de dados.

Quadro 1: Dias e horários de aplicação dos questionários

Sala 1		Sala 2		Sala 3	
Dia	**Horário de coleta**	**Dia**	**Horário de coleta**	**Dia**	**Horário de coleta**
21 de maio de 2024	20h20	22 de maio de 2024	19h15	23 de maio de 2024	19h20
	20h40		19h40		19h40
	21h20		20h00		20h00
	21h40		20h20		20h20
	22h00		20h40		20h40
			21h10		21h15
			21h30		21h35
			21h50		21h55
			22h10		22h15
9 usuários		32 usuários		39 usuários	

Fonte: produzido pelos autores.

De acordo com o Quadro 1, foram aplicadas 23 rodadas de questionários: 5 no dia 21/05/2024 e 18 nos dias 22 e 23/05/2024, sendo 9 em cada dia.

Os índices de conforto térmico PMV (*Predicted Mean Vote*) e PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) foram utilizados nos sinalizadores visuais. Para isso, foi utilizado o Anexo C da [27], que apresenta o código para linguagem em *JavaScript*. Neste experimento, os dados ambientais foram coletados em tempo real. O código, administrado por um Arduino, coletava os dados e enviava corrente elétrica para lâmpadas dispostas na parte superior frontal das salas de aula. Essas lâmpadas indicavam se as condições ambientais estavam fora da expectativa de conforto térmico, acendendo ou apagando automaticamente de acordo com os limites de conforto estabelecidos pelas normas. Neste estudo, as lâmpadas não foram mostradas, mas as condições ambientais, bem como os resultados gerados pelo algoritmo, foram armazenados para serem comparados com as respostas dos questionários.

A avaliação consistiu em comparar a média dos votos de sensação térmica dos usuários, em cada hora de coleta, com o resultado gerado pelo algoritmo a partir dos dados levantados em tempo real. O objetivo era verificar se, nos momentos em que o PMV estivesse fora da faixa de -0,5 a +0,5 (indicando que a lâmpada estaria desligada) ou vice-versa, isso correspondia à média dos votos dos usuários que responderam os questionários.

Foram utilizados os métodos *Coefficient of Variation of the Root Mean Squared Error* (CvRMSE) e o *Normalized Mean Bias Error* (NMBE) para avaliar os dados previstos de PMV e PPD em comparação com os dados coletados por meio de questionários em tempo real. O CvRMSE visa medir a variabilidade dos erros em relação à média dos valores observados, expressando-se em porcentagem. Este método é particularmente útil para avaliar a precisão do modelo de previsão, permitindo identificar a dispersão dos erros em relação aos valores reais observados, o que ajuda a compreender a consistência do modelo em diferentes condições. Já o NMBE tem como objetivo identificar a tendência média dos erros, também expressa em porcentagem. Esse método é fundamental para detectar possíveis vieses no modelo, indicando se há uma subestimação ou superestimação sistemática dos valores previstos em comparação com os valores reais. Esses métodos foram aplicados para relacionar os dados previstos de PMV e PPD com os dados reais obtidos dos questionários. O CvRMSE e o NMBE são calculados a partir das Equações 3 e 4, respectivamente.

Equação 3: Equação para determinar o CvRMSE

$$\mathrm{CvRMSE} = \left(\frac{\mathrm{RMSE}}{\bar{y}}\right) \times 100$$

Onde:

- RMSE é o Root Mean Squared Error
- $\bar{y}$ é a média dos valores observados

Fonte: [30]

Equação 4: Equação para determinar o NMBE

$$\mathrm{NMBE} = \frac{\sum(y_{\mathrm{observado}} - y_{\mathrm{predito}})}{n \times \bar{y}_{\mathrm{observado}}} \times 100$$

Onde:

- $y_{\mathrm{observado}}$ são os valores observados,
- y_{predito} são os valores preditos,
- n é o número de observações,
- $\bar{y}_{\mathrm{observado}}$ é a média dos valores observados.

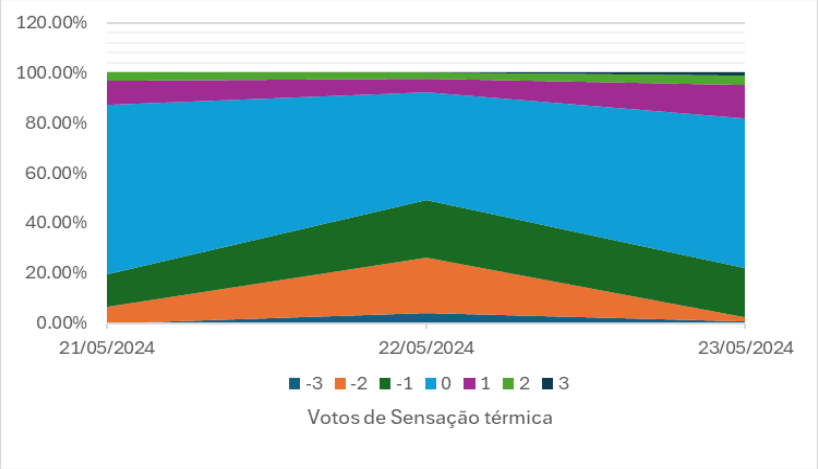
Fonte: [30]

Uma limitação desse método é a adoção de vestimenta e metabolismo médios dos usuários, pois não serão aplicados questionários todos os dias de coleta, estimando-se uma vestimenta e atividade média por estação do ano. Para o metabolismo, acredita-se que não haverá grandes variações, pois a coleta de dados sobre o comportamento dos usuários será realizada em salas de aula, com atividades fixadas em média em 1,1 met.

RESULTADOS

A coleta de dados foi realizada em 3 dias seguidos, ambas, no turno da noite. 80 pessoas participaram da pesquisa, que consistiu em 23 rodadas de aplicação de questionários, gerando 584 votos de conforto térmico válidos.
A Figura 5 apresenta os dados sensação térmica conforme os votos relatados pelos usuários nos questionários e para os 3 dias de coleta de dados.

Figura 5: Votos de sensação térmica dos usuários nos dias de coleta de dados



Fonte: produzido pelos autores.

Nota-se que a neutralidade foi o voto predominante nos três dias de coleta de dados, seguida pelos votos de levemente com frio, levemente com calor, frio e calor.
A Tabela 2 apresenta os dados referentes aos usuários, conforme preenchido por eles no Questionário 1.

Tabela 2: Características pessoais dos respondentes

Dia	Homens (Un)	Mulheres (Un)	Idade (anos) Mínima Média Máxima	Altura (m) Mínima Média Máxima	Peso (Kg) Mínimo Médio Máximo	met Mínima Média Máxima	Clo Mínima Média Máxima
			19,00	1,60	55,00	1,1	0,57
21/05/2024	2	7	24,75	1,66	76,31	1,1	0,59
			32,00	1,78	108,00	1,1	0,61
			18,00	1,47	40,00	1,1	0,57
22/05/2024	7	25	26,19	1,64	65,85	1,1	0,58
			63,00	1,85	90,00	1,1	0,61
			18,00	1,53	52,00	1,1	0,29
23/05/2024	14	25	28,17	1,68	75,15	1,1	0,58
			47,00	1,82	108,00	1,1	0,97

Fonte: produzido pelos autores.

De todos os usuários, 71,25% foram mulheres e 28,75% foram homens. A média de idade dos usuários foi de 26,37 anos. A vestimenta média dos usuários foi de 0,57 clo, sendo a mesma utilizada no experimento com os sinalizadores visuais.

A Tabela 3 apresenta o PMV/PPD previsto no sinalizador visual junto com as respostas de conforto térmico por rodadas de questionários. O objetivo é verificar se existe uma correlação entre os valores previstos e o valor final.

Tabela 3: Relação entre os dados medido, estimados pelo sinalizador e o resultados dos questionários de conforto térmico

Condições ambientais					Estimados / Sinalizador				Média dos dados coletados por horário			
Dia	Horário	To (ºC)	Va (m/s)	UR (%)	Met	Clo	PMV	PPD (%)	Met	CLo	PMV	PPD (%)
21/05/2024	20h20	22,28	0,47	46,80	1,1	0,58	-1,46	49,00	1,1	0,58	0,14	53,13
	20h40	22,24	0,49	45,30	1,1	0,58	-1,71	62,00	1,1	0,57	-0,28	53,40
	21h20	21,60	0,53	43,00	1,1	0,58	-1,99	76,00	1,1	0,59	0,00	64,80
	21h40	21,60	0,50	47,00	1,1	0,58	-1,92	73,00	1,1	0,59	-0,14	59,00
	22h00	21,91	0,51	45,30	1,1	0,58	-1,84	69,00	1,1	0,57	-0,25	58,00
22/05/2024	19h15	21,49	0,50	37,00	1,1	0,58	-2,03	78,00	1,1	0,58	-0,38	81,96
	19h40	21,64	0,48	37,00	1,1	0,58	-1,97	75,00	1,1	0,58	-0,41	79,74
	20h00	21,52	0,43	36,50	1,1	0,58	-1,94	74,00	1,1	0,58	-0,52	79,17
	20h20	21,40	0,43	37,20	1,1	0,58	-1,97	75,00	1,1	0,58	-0,76	76,63
	20h40	22,03	0,47	41,70	1,1	0,58	-1,67	60,00	1,1	0,58	-0,57	68,67
	21h10	22,19	0,23	44,70	1,1	0,58	-1,30	40,00	1,1	0,57	-1,27	42,52
	21h30	20,79	0,28	40,92	1,1	0,58	-1,92	73,00	1,1	0,57	-1,05	74,33
	21h50	20,82	0,33	40,37	1,1	0,58	-1,99	76,00	1,1	0,57	-1,30	80,98
	22h10	21,04	0,29	41,14	1,1	0,58	-1,83	68,00	1,1	0,57	-1,30	71,02
23/05/2024	19h20	22,68	0,54	53,00	1,1	0,58	-1,57	55,00	1,1	0,58	-0,05	60,84
	19h40	23,61	0,30	50,66	1,1	0,58	-0,91	22,00	1,1	0,58	-0,05	29,12
	20h00	24,41	0,34	55,47	1,1	0,58	-0,68	15,00	1,1	0,59	0,51	18,70
	20h20	24,07	0,30	52,30	1,1	0,58	-0,75	17,00	1,1	0,57	0,13	23,38
	20h40	24,40	0,27	48,78	1,1	0,58	-0,62	13,00	1,1	0,58	0,15	17,61
	21h15	23,22	0,34	54,58	1,1	0,58	-1,08	29,00	1,1	0,58	-0,15	36,84
	21h35	24,29	0,26	48,37	1,1	0,58	-0,62	13,00	1,1	0,58	-0,17	18,08
	21h55	24,44	0,28	46,64	1,1	0,58	-0,66	14,00	1,1	0,58	-0,23	17,10
	22h15	23,94	0,31	44,98	1,1	0,58	-0,87	21,00	1,1	0,58	-0,21	27,19

Fonte: produzido pelos autores.

A Tabela 3 revela que o Modelo PMV/PPD não foi o mais apropriado para esta avaliação, devido às condições ambientais estarem fora do padrão estabelecido pela norma [27]. Além deste, outros estudos também identificaram que este modelo não

foi o mais adequado [15][30]. O método mostrou-se adequado apenas para 17,5% dos votos realizados em 23/05/2024. Diante disso, não foi observada correlação entre os resultados de PMV/PPD, alinhados ao escopo da NBR 16401-2, e os votos de conforto térmico dos usuários. Por outro lado, pelo modelo adaptativo, todos os votos indicaram estar dentro da faixa de conforto térmico, de acordo com [26].

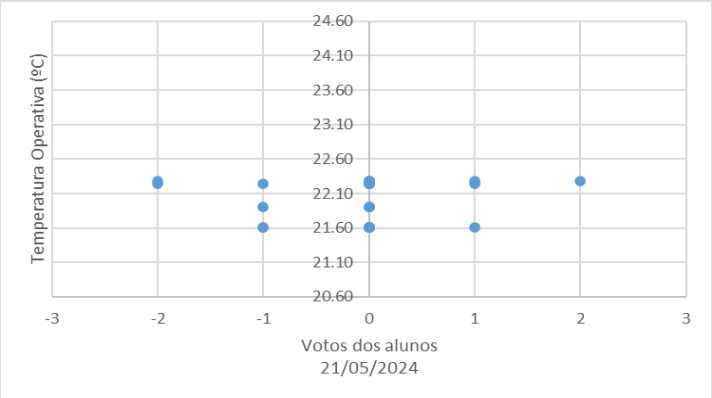
Os resultados da análise entre o valor estimado de PMV e a média das respostas dos questionários aplicados aos usuários indicam uma discrepância significativa. O CvRMSE de -338,36% revela uma variação muito alta em relação à média dos dados observáveis, destacando uma inconsistência entre as estimativas e as respostas reais dos usuários. Além disso, o NMBE de 308,09% indica que o PMV está superestimando de forma consistente as sensações térmicas dos usuários. Esses resultados sugerem a necessidade de recalibrar o modelo de estimativa de PMV para melhorar a precisão e reduzir o viés nas previsões.

Os valores estimados e observáveis de PPD também foram avaliados à luz do CvRMSE e NMBE. Os resultados da análise entre o valor estimado de PPD e a média das respostas dos questionários indicam uma precisão razoável, mas ainda há espaço para melhorias. O RMSE de 6,6393 sugere uma magnitude considerável nos erros entre os valores estimados e observáveis. O CvRMSE de 12,81% indica uma variação moderada em relação à média dos dados observáveis, mostrando que os erros relativos são menos pronunciados em comparação com o PMV. O NMBE de -3,79% sugere que o PPD está ligeiramente subestimando as sensações térmicas dos usuários. Esses resultados indicam que o modelo de estimativa de PPD está relativamente próximo das percepções dos usuários, mas ajustes adicionais podem melhorar ainda mais sua precisão.

No que diz respeito à vestimenta, estimada no sinalizador visual em 0,58 clo, observa-se que as médias entre o estimado e o real foram muito semelhantes, variando entre 0,57 e 0,59 clo.

As Figuras 6, 7 e 8 ilustram a relação entre o voto dos alunos e a temperatura operativa.

Figura 6: Relação dos votos dos alunos com a temperatura operativa do dia 21/05/2024

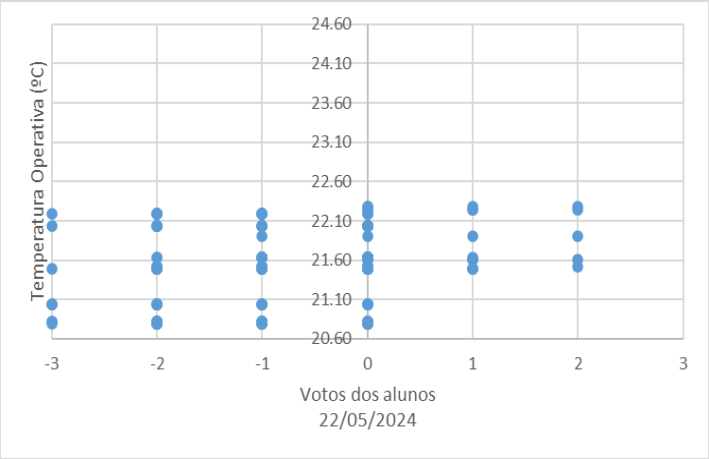


Fonte: Produzido pelos autores.

Em 21/05/2024, os usuários consideraram a variação da temperatura entre 21,6 °C a 22,3 °C como neutra. Levemente frio foi considerado para temperaturas variando de 21,6 °C a 22,2 °C, enquanto frio foi percebido entre 22,2 °C a 22,3 °C. Já a sensação de

levemente quente foi relatada para temperaturas entre 21,6 °C a 22,3 °C, com apenas um voto de quente para a temperatura de 22,0 °C. A temperatura média entre os neutros foi de 21,9 °C.

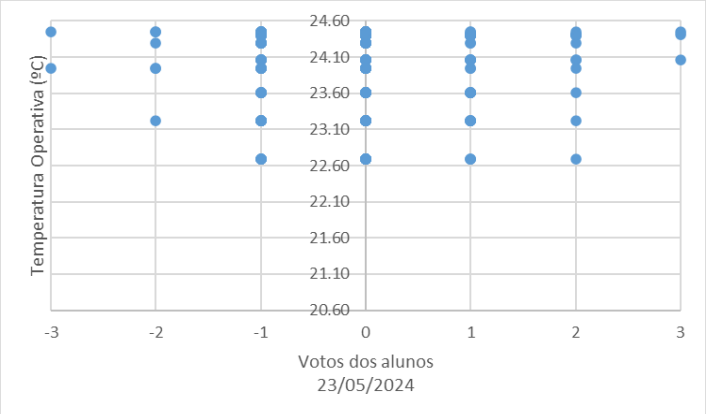
Figura 7: Relação dos votos dos alunos com a temperatura operativa do dia 22/05/2024



Fonte: Produzido pelos autores.

No dia 22/05/2024, os votos dos usuários que indicaram neutralidade estiveram entre 20,8 °C e 22,3 °C, com uma temperatura média de 21,5 °C dentro da faixa de neutralidade. Os votos de levemente frio, frio e muito frio ocorreram em temperaturas entre 20,8 °C e 22,2 °C. Por outro lado, a sensação de levemente quente foi relatada entre 21,5 °C e 22,3 °C, e a de quente de 21,5 °C a 22,3 °C.

Figura 8: Relação dos votos dos alunos com a temperatura operativa do dia 23/05/2024



Fonte: Produzido pelos autores.

No dia 23/05/2024, as temperaturas variaram entre 22,7 °C e 24,4 °C, apresentando as máximas e mínimas dos votos levemente com frio, neutros, levemente com calor, e entre 24,1 °C e 24,4 °C relacionados aos votos de calor. Os votos de frio e muito frio registraram-se entre 23,2 °C e 24,4 °C, e 23,9 °C e 24,4 °C, respectivamente. A média de temperatura nos votos neutros foi de 23,9 °C.

CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi validar o sistema de um sinalizador visual desenvolvido para a avaliação de conforto térmico em ambientes condicionados artificialmente, relacionando o resultado dos questionários com os momentos em que o sinalizador acenderia, presumindo seu uso, de modo a verificar se o conforto ou desconforto relatado pelos usuários corresponde aos momentos indicados pelo sinalizador, comprovando sua eficácia.

Os resultados demonstraram que o Método Analítico não foi adequado para avaliar a real sensação dos ocupantes. Uma das prováveis razões foi a velocidade do ar, que esteve durante todo o experimento acima de 0,20 m/s, mesmo com os ambientes controlados pelo ar-condicionado. Além disso, outras pesquisas já apontaram anteriormente para a inaplicabilidade do modelo em climas quentes, o que se verificou também neste piloto. Por outro lado, a medição demonstrou que todos os votos se enquadraram na zona de conforto térmico especificada pelo Modelo Adaptativo [26], aparentando ser este um método mais adequado para o que se planeja adiante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro às bolsas de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

[1] O'BRIEN, W. *et al*. Introducing IEA EBC Annex 79: Key challenges and opportunities in the field of occupant-centric building design and operation. **Building and Environment**, v. 178, p. 106738, 2020.

[2] TORRES, J. S.; KLEIN, M. B.; MIANA, A. C.; BRANDÃO, R. S. Conforto luminoso em salas de aula: avaliação do desempenho por meio de simulações computacionais. In: Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, 16., 2021. **Anais [...].** [S. l.], 2021. p. 1557–1565.

[3] ZANNIN, P. H. T., VIEIRA, T. J., & SILVEIRA, A. R. R. (2021). Evaluation of the Acoustic Comfort in University Classrooms, Based on the Brazilian Technical Standard NBR 10152—Use of Noise Mapping and Acoustic Barriers to Counter Noise on a University Campus. **Current Urban Studies**, 9, 238-251.

[4] KHOVALYG, Dolaana et al. Critical review of standards for indoor thermal environment and air quality. **Energy and Buildings**, v. 213, p. 109819, 2020.

[5] YAN, Da et al. IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings. **Energy and Buildings**, v. 156, p. 258-270, 2017.

[6] BAVARESCO, M. et al. Multi-domain simulation for the holistic assessment of the indoor environment: A systematic review. Journal of Building Engineering, p. 108612, 2024.

[7] TORRESIN, S. *et al.* Combined effects of environmental factors on human perception and objective performance: A review of experimental laboratory works. **Indoor air**, v. 28, n. 4, p. 525-538, 2018.

[8] FANGER, P. Ole; BREUM, N. O.; JERKING, E. Can colour and noise influence man's thermal comfort?. **Ergonomics**, v. 20, n. 1, p. 11-18, 1977.

[9] YANG, Wonyoung; MOON, Hyeun Jun; KIM, Myung-Jun. Combined effects of short-term noise exposure and hygrothermal conditions on indoor environmental perceptions. **Indoor and Built Environment**, v. 27, n. 8, p. 1119-1133, 2018.

[10] HIRN, Thomas et al. The influence of radiation intensity and wavelength on thermal perception. **Building and Environment**, v. 196, p. 107763, 2021.

[11] MENTESE, Sibel et al. A long-term multi-parametric monitoring study: Indoor air quality (IAQ) and the sources of the pollutants, prevalence of sick building syndrome (SBS) symptoms, and respiratory health indicators. **Atmospheric Pollution Research**, v. 11, n. 12, p. 2270-2281, 2020.

[12] LU, Jackson G. Air pollution: A systematic review of its psychological, economic, and social effects. **Current opinion in psychology**, v. 32, p. 52-65, 2020.

[13] ALMETWALLY, Alsaid Ahmed; BIN-JUMAH, May; ALLAM, Ahmed A. Ambient air pollution and its influence on human health and welfare: an overview. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 24815-24830, 2020.

[14] GHISI, Enedir; BAVARESCO, Mateus; SILVESTRE, Acácio Gomes Corrêa. Avaliação do comportamento de usuários em escritórios compartilhados em Florianópolis: estudo de caso sobre janelas, luminárias e aparelhos de ar-condicionado. **Ambiente Construído**, v. 24, p. e132319, 2023.

[15] JEONG, B.; JEONG, J.; PARK, J. S. Occupant behavior regarding the manual control of windows in residential buildings. **Energy and buildings**, v. 127, p. 206-216, 2016.

[16] FABI, V. et al. Occupants' behaviour in office building: stochastic models for window opening. **In: 8th windsor conference**. 2014.

[17] HONG, T. et al. Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. **Energy and buildings**, v. 116, p. 694-702, 2016.

[18] JONES, R. V. et al. Stochastic behavioural models of occupants' main bedroom window operation for UK residential buildings. **Building and Environment**, v. 118, p. 144-158, 2017.

[19] YUN, G. Y.; KIM, H.; KIM, J. T. Thermal and non-thermal stimuli for the use of windows in offices. **Indoor and Built Environment**, v. 21, n. 1, p. 109-121, 2012.

[20] SCHWEIKER, M. et al. Review of multi-domain approaches to indoor environmental perception and behaviour. **Building and Environment**, v. 176, p. 106804, 2020.

[21] PARSONS, H. M. What Happened at Hawthorne? New evidence suggests the Hawthorne effect resulted from operant reinforcement contingencies. **Science**, v. 183, n. 4128, p. 922-932, 1974.

[22] DIAPER, G. The Hawthorne effect: A fresh examination. **Educational studies**, v. 16, n. 3, p. 261-267, 1990.

[23] ZHANG, Y. et al. Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: A review. **Energy and Buildings,** [S. l.], v. 172, p. 279–294, 2018.

[24] NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. A stochastic approach to thermal comfort-occupant behavior and energy use in buildings/discussion. **ASHRAE transactions**, v. 110, p. 554, 2004.

[25] STAZI, F.; NASPI, F.; D'ORAZIO, M. A literature review on driving factors and contextual events influencing occupants' behaviours in buildings. **Building and Environment**, v. 118, p. 40-66, 2017.

[26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT**. NBR 16.401-2** Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

[27] INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Brasil). Ministério da Agricultura e Pecuária. Tabela de dados das **Estações:** JARDIM(A758). 2022. Disponível em: https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A758. Acesso em: 24 abr. 2024.

[28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15.220-3** Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

[29] CUSTÓDIO, Diego Antônio; GHISI, Enedir; RUPP, Ricardo Forgiarini. Thermal comfort in university classrooms in humid subtropical climate: field study during all seasons. **Building and Environment**, p. 111644, 2024.

[30] JANSEN, Jan L. M.; LAMBERTS, Roberto. **Building Performance Simulation for Design and Operation**. 2. ed. [S.l]: Routledge, 2019. 772 p.