AVALIAÇÃO DE COMPORTAMENTOS ADAPTATIVOS MOTIVADOS POR DESCONFORTO TÉRMICO EM ESCRITÓRIOS: UMA ABORDAGEM PROBABILÍSTICA

Mateus Bavaresco (1); Matheus Soares Geraldi (2); Leticia Dalpaz (3); Enedir Ghisi (4)
(1) Mestre, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, bavarescomateus@gmail.com
(2) Mestre, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, matheus.s.geraldi@gmail.com
(3) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, ledalpaz@gmail.com
(4) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, enedir.ghisi@ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Caixa Postal 476, Florianópolis - SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721-2115

RESUMO
O objetivo deste artigo é avaliar os comportamentos adaptativos de usuários de escritórios em resposta às sensações de desconforto por calor e por frio. Um questionário foi aplicado a funcionários da Universidade Federal de Santa Catarina, que trabalham em ambientes de escritórios, e utilizado como base para as análises. Abordagens probabilísticas foram aplicadas para avaliar as primeiras e segundas ações realizadas por usuários em seus ambientes de trabalho quando estão em desconforto térmico. Essas abordagens englobam o uso de funções uni e bivariadas de densidade de probabilidade, além de um algoritmo de aprendizado de máquina (Rede Bayesiana) para estimar de maneira dinâmica o impacto de variáveis pessoais e contextuais do ambiente de trabalho nas ações dos usuários. Os resultados indicam que as adaptações mais comuns ao desconforto por frio envolvem adaptações pessoais e ajustes em sistemas das edificações que não resultam em consumo energético direto. Apesar de essas opções também serem expressivas quando se consideram as adaptações ao desconforto por calor, o uso de sistemas de climatização também é frequente. Resultados obtidos com as Redes Bayesianas evidenciaram diferenças expressivas nos comportamentos mais prováveis de diferentes perfis de usuários: 93,7% de chance de adaptação pessoal como primeira resposta ao desconforto por calor para um perfil de usuário do gênero feminino e 88,5% de chance de utilização do sistema de climatização como primeira opção para um perfil de usuário do gênero masculino. Conclui-se que a utilização de Redes Bayesianas em estudos dessa área contribui para a obtenção de informações que não eram evidentes inicialmente, por meio de avaliações da interação condicional entre as variáveis.

Palavras-chave: conforto térmico, comportamento de usuário, aprendizagem de máquina, eficiência energética.

ABSTRACT
This article aims to assess the occupants' adaptive behaviours in offices when they feel hot or cold discomfort. A questionnaire was applied to users of office spaces at the Federal University of Santa Catarina and used as a basis for the analyses. Probabilistic approaches were applied to evaluate occupants' first and second actions when they feel thermal discomfort at work. Those approaches include both uni and bivariate probability density function, as well as a machine learning algorithm (Bayesian Network) to dynamically assess how personal and contextual variables in the work environment impact occupants' actions. Results show that the most frequent adaptations to cold discomfort involve personal adaptations and adjustments in building systems that do not directly consume energy. Although these options are also significant when considering adaptations to hot discomfort, air conditioning systems are also frequent in this scenario. Results from the Bayesian Networks showed significant variations in the most likely adaptive behaviours from different occupant profiles: 93.7% chance of personal adaptation as the first response to hot discomfort for a female user profile and 88.5% chance of using the air-conditioning system as the first option for a male user profile. It was concluded that the use of Bayesian Networks in studies of this field allows estimating information that was not initially evident, relying on conditional interaction between variables.

Keywords: thermal comfort, occupant behaviour, machine learning, energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

A construção e operação de edificações são responsáveis por mais de um terço do consumo final de energia no mundo e quase 40% do total de emissões diretas e indiretas de CO_2. Para os usos finais de energia em edifícios, a refrigeração de ambientes, os eletrodomésticos e as tomadas são os que apresentam o crescimento mais significativo (IEA, 2021). Com isso, reduzir o uso de energia em edifícios é uma importante estratégia para minimizar as emissões de gases de efeito estufa e atender à política energética e às metas de eficiência em todo o mundo. Em escritórios, de modo geral, a energia consumida é devida ao uso de equipamentos, como computadores, e à manutenção de níveis aceitáveis de conforto para os usuários, como o uso de sistemas de climatização e iluminação artificial. Nesse contexto, o comportamento dos usuários torna-se muito relevante no desempenho termoenergético das edificações, e sua influência é amplamente discutida na literatura (STAZI; NASPI; D'ORAZIO, 2017). Nessa área, destacam-se os avanços obtidos durante as atividades do grupo de pesquisa Anexo 66 ("*Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings*"). As atividades visaram aprimorar os estudos de comportamento de usuário em relação à coleta de dados, além da criação, avaliação e inserção de modelos de comportamento em simulações computacionais (YAN *et al*., 2017). Conhecer o comportamento dos usuários em edifícios de escritórios é o primeiro passo para entender quais as melhores estratégias a serem adotadas para permitir maior conforto dos usuários associado à redução do consumo energético nesse tipo de edificação. Neste âmbito, dentre os resultados do Anexo 66, destaca-se a elaboração de um questionário que combina diferentes teorias para estudar a interação dos usuários com edificações de escritórios (D'OCA *et al.*, 2017).

A literatura evidencia que variáveis pessoais (como gênero e idade) e variáveis contextuais (como tipologia da edificação e características construtivas) impactam a maneira como os usuários percebem a qualidade do ambiente interno (SCHWEIKER *et al*., 2020). A percepção da qualidade do ambiente interno, por sua vez, está diretamente ligada aos comportamentos adaptativos realizados pelos usuários (BAVARESCO *et al.*, 2021). De acordo com Keyvanfar *et al.* (2014), as adaptações realizadas pelos usuários podem ser tanto pessoais (como ajustar as camadas de roupa) quanto ambientais (como abrir/fechar as janelas). Portanto, além de impactar os níveis de conforto dos ocupantes, diferentes comportamentos adotados pelos usuários podem impactar direta ou indiretamente o consumo energético das edificações (GUNAY; O'BRIEN; BEAUSOLEIL-MORRISON, 2013). Desta forma, é necessário aprofundar a compreensão sobre os comportamentos adaptativos de ocupantes, tanto para facilitar a incorporação de estratégias que melhorem seus níveis de conforto quanto para avaliar a relação entre essas ações e o desempenho energético de edificações. Com isso, o questionário mencionado anteriormente foi utilizado em um estudo de caso com o intuito de ampliar as pesquisas sobre o tema e facilitar a adoção de medidas eficazes na redução do consumo energético em edificações de escritório, com foco para a realidade brasileira.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar os comportamentos adaptativos comumente adotados por ocupantes de escritório quando sentem desconforto térmico (por calor e por frio), empregando abordagens probabilísticas e técnicas de aprendizagem de máquina em dados obtidos com aplicação de questionários.

3. MÉTODO

Este artigo é baseado em um estudo de caso realizado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC – campus Florianópolis), empregando o questionário desenvolvido por D'Oca *et al*. (2017). Foram avaliadas variáveis pessoais e contextuais relacionadas aos participantes e seus ambientes de trabalho, bem como a ordem de ações mais prováveis quando sentem desconforto por calor ou por frio. O método deste artigo está dividido em três partes:

1. Aplicação de um questionário anônimo a funcionários da UFSC que trabalham em escritórios;
2. Caracterização da amostra e avaliação, por meio de curvas de densidade de probabilidade, das ações mais prováveis quando os ocupantes sentem desconforto por calor ou por frio;
3. Construção e validação de uma Rede Bayesiana para avaliar as probabilidades condicionais de diferentes comportamentos adaptativos de acordo com a base de dados obtida.

3.1. Validação e aplicação do instrumento de pesquisa

O questionário utilizado neste estudo foi desenvolvido em inglês, e o primeiro passo foi a tradução para português. Seguindo exigências dos criadores do instrumento, um processo de dupla tradução foi adotado para corrigir possíveis inconsistências. A versão traduzida foi aprovada pelo Comitê de Ética Pesquisa com Seres

Humanos (CEPSH-UFSC), seguindo a Resolução Nacional número 510/2016 Brasil (2016) – parecer consubstanciado número 2.391.007. A versão aprovada foi submetida a 3.356 funcionários da UFSC, dos quais 345 participaram da pesquisa. Após a exclusão de respostas incompletas e daquelas cujos participantes não trabalhavam em ambientes de escritório, 278 respostas foram consideradas válidas. A partir das respostas, avaliaram-se quatro aspectos que foram incluídos nas análises deste estudo. O primeiro representa a ordem das ações realizadas quando o ocupante sente desconforto. Os participantes reportaram a primeira e a segunda ação mais provável quando sentem desconforto por calor e quando sentem desconforto por frio. As ações reportadas foram agrupadas conforme exposto no Quadro 1.

Quadro 1 – Grupos de ações considerados para a análise.

Código	Grupo	Ações
1	Adaptações pessoais	Ajustar camadas de roupa, tomar bebida quente/fria, caminhar
2	Adaptações no ambiente que não resultam em consumo energético direto	Abrir/fechar janelas ou persianas
3	Uso de sistemas pessoais	Ventilador ou dispositivo de resfriamento/aquecimento
4	Uso de sistema de climatização	Resfriamento/aquecimento

O segundo aspecto são as variáveis contextuais: tipo do ambiente de trabalho (“escritório individual”, “escritório compartilhado em ambiente fechado”, “escritório compartilhado em ambiente de planta aberta” ou “baia/cubículo”); o ano de construção do edifício (“antes de 1970”, “de 1970 a 2000”, ou “depois de 2000”); e o tempo que os ocupantes passam no escritório semanalmente (“até 20h”, “de 21 a 30h”, “de 31 a 40h” ou “mais de 40h”). O próximo aspecto considera variáveis pessoais: idade dos respondentes (“de 18 a 28 anos”, “de 29 a 39 anos”, “de 40 a 50 anos” ou “mais de 50 anos”) o gênero com o qual se identificam (“masculino”, “feminino” ou “outro ou prefiro não responder”). O último aspecto está relacionado à percepção da qualidade do ambiente interno: níveis de satisfação com a qualidade ambiental interna e de que maneira esse aspecto influencia na produtividade percebida. As respostas foram obtidas em escala Likert de cinco pontos (variando de 1 para “muito insatisfeito” e “de maneira muito negativa” até 5 para “muito satisfeito” e “de maneira muito positiva”), considerando cada parâmetro avaliado (temperatura interna, qualidade do ar interno, iluminação natural, iluminação artificial e qualidade da acústica). Calculou-se a média (x) dos votos de cada participante, que foi agrupada em três categorias utilizadas nas análises: $x \leq 2{,}5$ corresponde a “insatisfeito” ou “negativamente”; $2{,}5 < x < 3{,}5$ corresponde a “neutro”; e $x \geq 3{,}5$ corresponde a “satisfeito” ou “positivamente”.

3.2. Caracterização da amostra e dos comportamentos adaptativos reportados

A amostra obtida com a aplicação dos questionários foi caracterizada quanto às proporções de cada aspecto avaliado. A partir dessa etapa, os dados referentes às proporções de cada comportamento adaptativo adotado como primeira e segunda ação para minimizar o desconforto por calor e por frio foram utilizados para construir curvas de densidade de probabilidade. Esta avaliação foi realizada com a biblioteca Seaborn versão 0.11.1 (WASKOM, 2020). As curvas de densidade de probabilidade foram calculadas com o Estimador de Densidade Kernel (KDE – *Kernel Density Estimator*), e permitiram avaliar tanto os comportamentos isolados (curvas univariadas) quanto a combinação das primeiras e segundas ações (curvas bivariadas).

3.3. Construção e validação da Rede Bayesiana

3.3.1. Construção da Rede Bayesiana

A Rede Bayesiana é um modelo probabilístico de aprendizado de máquina composta por nós (que representam as variáveis), e arcos direcionados (que representam as relações entre as variáveis e suas condições de probabilidades). Os nós possuem classes que representam os estados das variáveis. As probabilidades condicionais, que são as relações entre os nós, são calculadas por meio do Teorema de Bayes (Equação 1) e com base nos dados amostrais.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:
P(A|B) é a probabilidade *a posteriori* do evento A, condicionado pelo evento B;
P(B|A) é a probabilidade *a posteriori* do evento B que condiciona A;
P(A) é a probabilidade *a priori* do evento A; e
P(B) é a probabilidade *a priori* do evento B.

As probabilidades *a priori* são baseadas a partir da própria distribuição das variáveis e as probabilidades *a posteriori* foram calculadas a partir do condicionamento entre variáveis. Neste estudo, duas Redes Bayesianas foram construídas: uma para predição das primeira e segunda ações dos usuários para adaptação por desconforto por calor, e outra para predição das primeira e segunda ações dos usuários para adaptação por desconforto por frio. O Quadro 2 apresenta as variáveis consideradas para construção das redes e seus estados.

Quadro 2 – Variáveis consideradas nas duas Redes Bayesianas.

Tipo da variável	Variável	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4
Saída	Primeira ação: adaptação por calor/frio*	Adaptação pessoal	Adaptação no ambiente	Uso de sistemas pessoais	Uso de sistema de climatização
	Segunda ação: adaptação por calor/frio*	Adaptação pessoal	Adaptação no ambiente	Uso de sistemas pessoais	Uso de sistema de climatização
Entrada (variáveis contextuais)	Ano de construção	Antes 1970	De 1970 a 2000	Depois 2000	-
	Tipo de ambiente	Individual	Compartilhado fechado	Compartilhado aberto	Baia ou Cubículo
	Tempo que passa no escritório por semana	Até 20h	De 21 a 30h	De 31 a 40h	Mais de 40h
Entrada (antropomórfico)	Idade (anos)	De 18 a 28	De 29 a 39	De 40 a 50	Mais de 50
	Gênero**	Masculino	Feminino	-	-
Entrada (qualidade do ambiente interno -IEQ)	Satisfação com IEQ	Insatisfeito	Neutro	Satisfeito	-
	IEQ afeta a produtividade	Negativamente	Neutro	Positivamente	-

*Uma rede foi construída para adaptação por calor, e outra para adaptação por frio. As demais variáveis são as mesmas.; **A opção "outro ou prefiro não responder", apresentada anteriormente, não foi reportada por nenhum participante.

A estrutura da Rede Bayesiana é o arranjo entre nós e arcos direcionados que determina a relação de condição entre as variáveis. Neste estudo, iniciou-se a construção da rede considerando-se um formato "*Naïve-Bayes*", que é a estrutura mais simples de Rede Bayesiana. Nesta estrutura, todos os nós são independentes e apenas conectados aos nós de saída. Neste caso, os nós considerados como saída são as variáveis "Primeira ação de adaptação por calor/frio" e "Segunda ação de adaptação por calor/frio". As probabilidades são calculadas por meio das frequências de ocorrência de cada item, obtidas no banco de dados com as respostas dos participantes. Após o arranjo dos nós e arcos direcionados, as redes foram treinadas utilizando-se 80% do banco de dados existente. O processo de treinamento da rede é a inserção das probabilidades *a priori* e cálculo das probabilidades *a posteriori* das variáveis, com base nos dados existentes. Após esse processo, a Rede Bayesiana pode ser consultada para determinação da probabilidade dos estados dos nós de saída de um determinado caso desejado. Esta consulta se faz por meio da seleção de estados do caso desejado nos nós de saída. Dessa forma, as probabilidades condicionais dos estados nos nós de saída são atualizadas para informar a probabilidade do caso analisado em escolher a primeira e segunda ação de adaptação.

3.3.2. Validação da Rede Bayesiana

Após o processo de treinamento, a Rede Bayesiana deve ser avaliada em uma etapa de validação. Nesta etapa, os 20% dos dados restantes são utilizados para verificar a acurácia da rede em predizer respostas novas, mas já conhecidas. Ou seja, é feita uma comparação entre os resultados preditos pela Rede Bayesiana e os resultados reais observados na prática. É importante que esta etapa seja feita com dados inéditos para a rede. A comparação é feita por meio de uma matriz de confusão, a qual apresenta nas linhas os resultados reais e nas colunas os resultados preditos pela rede. A razão entre quantidade de resultados preditos erroneamente e a quantidade total de casos utilizados para validação é denominada taxa de erro (E). O complemento da taxa de erro (1 – E) é a acurácia (A), que informa a capacidade da Rede Bayesiana em prever novos casos. Quanto mais próximo de 100%, melhor a acurácia da rede. Neste estudo, duas Redes Bayesianas foram construídas, cada uma com dois nós de saída, resultando em quatro matrizes de confusão, e quatro valores de acurácia.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização da amostra

Na Figura 1 são apresentadas as proporções da amostra em relação às variáveis pessoais (gênero e idade dos participantes), da avaliação da qualidade do ambiente interno (satisfação com as condições internas e influência

das mesmas na produtividade dos participantes), e de variáveis contextuais (tempo que os participantes passam no escritório, tipo do escritório e ano de construção). As maiores variações foram percebidas em relação ao gênero dos participantes (66% feminino e 34% masculino) e ao tipo de escritório (64% trabalham em escritórios compartilhados em ambientes fechados e 36% nas demais tipologias). Todos os aspectos foram incluídos nos modelos criados a fim de caracterizar a influência de cada um deles nas adaptações realizadas pelos usuários. O estoque avaliado foi caracterizado com maiores detalhes, incluindo fotografias das edificações, em Bavaresco *et al.* (2021). A satisfação dos participantes com a qualidade do ambiente interno e sua influência na produtividade percebida apresentou proporções similares. Esse resultado corrobora as conclusões de Chen *et al*. (2020), que afirmaram que a satisfação com a qualidade do ambiente interno está diretamente relacionada à maneira como os ocupantes percebem a influência do ambiente em sua produtividade. As edificações operam em modo misto, permitindo que os usuários escolham entre ajustar as janelas ou os aparelhos de ar-condicionado. Entretanto, diferentes níveis de controle percebido foram reportados: 10% dos participantes reportaram falta de autonomia para controlar os sistemas de ar-condicionado, enquanto 2% reportaram o mesmo sobre as janelas. A maioria dos ambientes avaliados (64%) são compartilhados, assim como os controles dos sistemas analisados. Portanto, a falta de autonomia para controlar os sistemas pode ser resultado de aspectos sociopsicológicos, como discutido em estudos de comportamento de usuário (CHEN *et al.*, 2020). O questionário aplicado não permitia a identificação da posição dos usuários nos ambientes, o que impossibilita a caracterização quanto à distância entre seus postos de trabalho e as janelas ou os demais sistemas. Ressalta-se que não foi realizada caracterização arquitetônica de cada período selecionado na amostra ou a ocorrência de reformas nas edificações. Esses fatores são limitações do método aplicado, uma vez que podem influenciar a maneira como os usuários percebem e se adaptam às condições internas de seus ambientes de trabalho, e merecem atenção em estudos futuros.

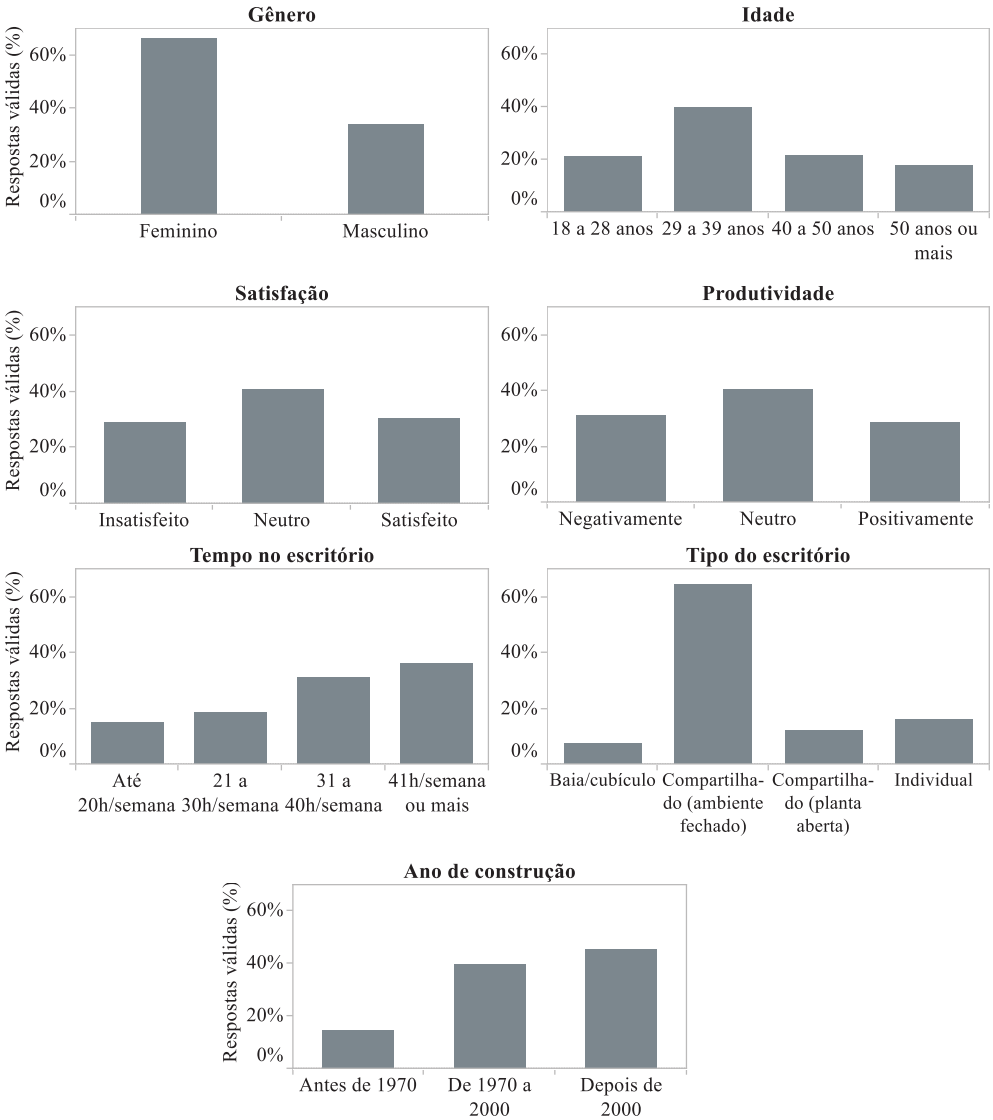

Figura 1 – Caracterização da amostra de acordo com as variáveis pessoais, as opiniões dos respondentes sobre a qualidade do ambiente interno e variáveis contextuais de seus escritórios.

4.2. Ordem das ações reportadas pelos participantes

Como o objetivo principal deste artigo é avaliar os principais comportamentos adaptativos realizados pelos ocupantes, a Figura 2 mostra a primeira e a segunda ações mais prováveis de serem adotadas para restaurar os níveis de conforto térmico. Os gráficos de barras expõem as proporções de cada grupo de ações prováveis: 1) adaptações pessoais; 2) adaptações no ambiente que não resultam em consumo energético direto; 3) uso de sistemas pessoais; e 4) uso de sistema de climatização.

Observou-se variação em relação às ações mais prováveis como respostas a situações de desconforto por calor e por frio. Quando sentem desconforto por calor, os ocupantes tendem a realizar ajustes pessoais ou ambientais que não implicam em consumo energético direto em proporções similares, tanto em relação às primeiras quanto às segundas ações (aproximadamente 40% para as primeiras ações e 35% para as segundas ações). O uso de sistemas pessoais, que foi pouco reportado pelos participantes, foi mais recorrente na segunda adaptação que os ocupantes realizam (12%). Por fim, o uso de sistemas de climatização também foi mais expressivo considerando-se a segunda adaptação realizada pelos ocupantes (20%). Em outras palavras, após tentarem restaurar seus níveis de conforto térmico com adaptações pessoais ou ajustes em janelas e persianas, um quinto dos ocupantes avaliados tende a acionar ou reduzir a temperatura dos aparelhos de ar-condicionado em seus escritórios. Em relação aos comportamentos adaptativos motivados por desconforto por frio, percebeu-se que a maior parte dos ocupantes recorre às adaptações pessoais tanto como primeira quanto como segunda opção (59% e 54% dos participantes, respectivamente). Em seguida, as ações mais prováveis englobam o ajuste de sistemas da edificação que não resultam em consumo energético direto (adaptações reportadas por mais de 30% dos participantes tanto como primeira quanto como segunda opção). Por fim, de maneira menos expressiva, alguns respondentes recorrem a dispositivos pessoais e ao sistema de climatização. Se somadas, essas opções foram reportadas por 5% dos participantes como primeira opção, e por 14% dos participantes como a segunda opção mais provável. Portanto, essas análises iniciais evidenciaram que a maioria dos comportamentos adaptativos motivados por desconforto por frio apresentam baixa influência no consumo energético das edificações. As análises seguintes aplicam abordagens probabilísticas para melhor compreender as adaptações realizadas pelos usuários em resposta a sensações de desconforto térmico.

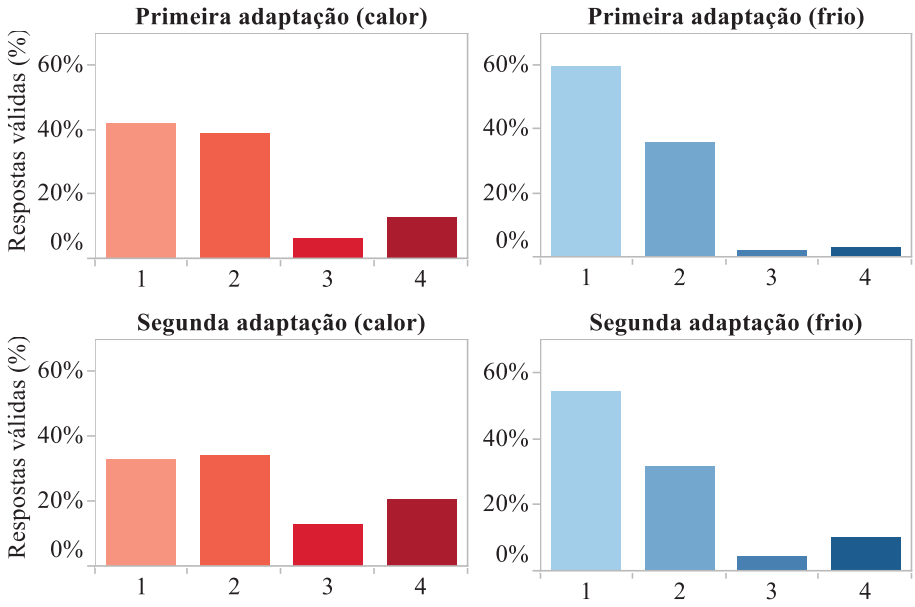

Figura 2 – Proporções das adaptações realizadas pelos ocupantes para restaurar os níveis de conforto térmico quando expostos a sensações de desconforto por calor ou por frio.

Com base nos dados apresentados anteriormente (Figura 2), estimou-se a probabilidade das ações reportadas pelos participantes utilizando o Estimador de Densidade Kernel (KDE – *Kernel Density Estimator*). Os resultados dessa análise são apresentados na Figura 1. Os gráficos marginais estimam as probabilidades de cada adaptação ser adotada como primeira ou segunda resposta à sensação de desconforto por meio do cálculo da densidade univariada. Os gráficos centrais combinam as funções de densidade de probabilidade apresentadas nos gráficos marginais e estabelecem a densidade de probabilidade bivariada. Em outras palavras, os gráficos centrais estimam a probabilidade da combinação das diferentes ações: e.g., realizar ajustes pessoais

como primeira e segunda resposta à sensação de desconforto por frio ou realizar ajustes pessoais como primeira resposta à sensação de desconforto por calor seguida de ajustes no sistema de climatização caso o conforto não seja restaurado.

Esta análise evidenciou que as adaptações realizadas em resposta a desconforto por calor são mais diversas e complexas do que as adaptações motivadas por desconforto por frio. De maneira geral, o mais provável é que nesse cenário os ocupantes adotem adaptações pessoais como primeira opção e adaptações no ambiente como segunda alternativa. Entretanto, combinações envolvendo o uso do sistema de climatização tanto como primeira quanto como segunda opções também se destacam na estimativa da densidade de probabilidade. Esse cenário é evidente nas situações em que os ocupantes já adotaram adaptações pessoais ou no ambiente como primeira opção; ou também como primeira opção seguida de adaptações pessoais caso o nível de conforto térmico não seja restaurado. Em relação às adaptações motivadas por desconforto por frio, as principais combinações se referem à adoção de adaptações pessoais e adaptações no ambiente que não resultam em consumo energético direto. Além disso, a probabilidade de os ocupantes optarem por adaptações pessoais tanto na primeira quanto na segunda tentativa de restaurar o conforto térmico também se destaca nesse cenário. Por fim, de maneira menos expressiva, também é destacada a adoção de adaptações pessoais como primeira ação seguida pelo uso de sistemas de climatização. Os resultados obtidos com o algoritmo para estimar as probabilidades das ações ressaltaram a pouca adesão ao uso de sistemas pessoais para restaurar os níveis de conforto térmico nos escritórios avaliados. Entretanto, especialmente em relação à sensação de desconforto por calor, o uso de sistemas pessoais (como ventiladores de mesa) já se mostrou viável em avaliações de campo realizadas em Florianópolis (ANDRÉ; VECCHI; LAMBERTS, 2020). É importante que mais usuários tenham acesso a sistemas como esses a fim de ajustar o microclima de suas estações de trabalho de acordo com suas preferências.

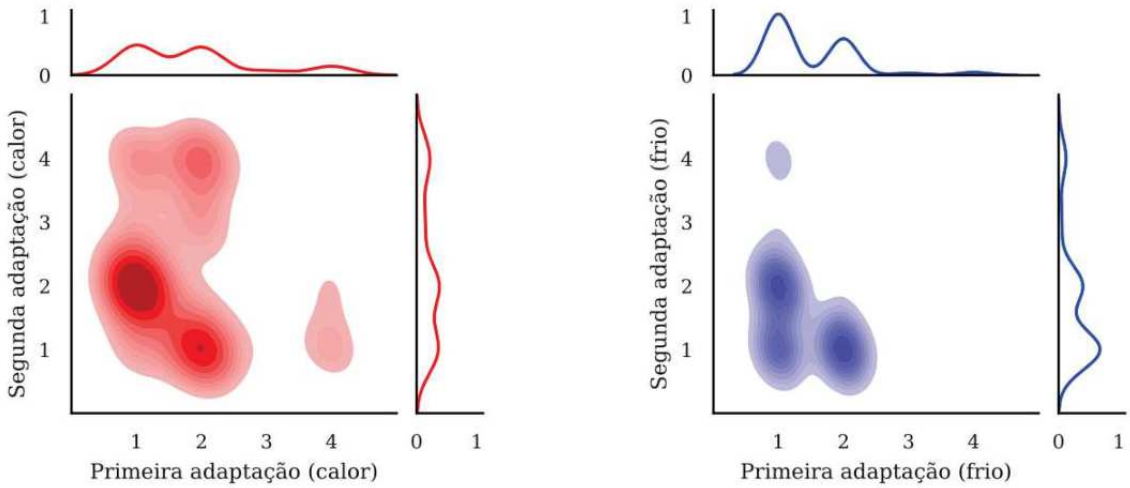

Figura 1 – Curvas de densidade de probabilidade das primeiras e segundas ações realizadas pelos ocupantes em resposta a desconforto térmico por calor e por frio. (Onde: 1 = Adaptações pessoais; 2 = Adaptações no ambiente sem consumo energético direto; 3 = Uso de sistemas pessoais; 4 = Uso de sistema de climatização)

4.3. Rede Bayesiana

A partir dos resultados obtidos com as curvas de densidade de probabilidade, análises mais aprofundadas foram necessárias para estimar a influência de fatores pessoais e contextuais nas respostas dos ocupantes às sensações de desconforto térmico. Desta forma, a Figura 2 mostra as Redes Bayesianas criadas para predizer as primeiras e segundas ações de adaptação realizadas quando os ocupantes sentem desconforto térmico. A validação das Redes criadas permitiu confirmar que as acurácias alcançadas são satisfatórias: 77,3% e 61,1% para prever as primeiras e segundas adaptações motivadas por desconforto por calor; e 71,1% e 62,4% para prever as primeiras e segundas adaptações em resposta ao desconforto por frio. Ressalta-se que o programa computacional utilizado para a criação das Redes Bayesianas não permite o uso de acentuação ou caracteres especiais como nome dos estados de cada variável, e a separação dos algarismos decimais é realizada com ponto ao invés de vírgula. Portanto, as imagens geradas seguem essa padronização.

Os resultados da Figura 2 mostram a classificação geral da amostra avaliada, confirmando que as probabilidades de os usuários adotarem adaptações pessoais em resposta ao desconforto por frio são maiores em relação aos cenários de desconforto por calor. Além disso, é provável que a maioria das primeiras e das

segundas adaptações por desconforto por frio não resultem em consumo energético direto, uma vez que as chances de os usuários adotarem apenas adaptações pessoais e/ou ajustes em janelas e persianas são elevadas (94,1% para primeira adaptação e 85,7% para segunda adaptação). As adaptações em relação ao desconforto por calor, por sua vez, são mais diversas. As chances de as primeiras adaptações por desconforto por calor não resultarem em consumo energético direto são elevadas (80,2% considerando-se adaptações pessoais e ajustes de janelas/persianas). Entretanto, esse valor é reduzido para 66,3% considerando-se a segunda adaptação realizada. O uso de sistemas de climatização também é mais recorrente como resposta ao desconforto por calor do que ao desconforto por frio. Considerando-se a combinação das chances dessa alternativa nas duas ações possíveis, tem-se 33,8% de chance de uso em resposta a desconforto por frio e 13,1% de chance em resposta a desconforto por frio.

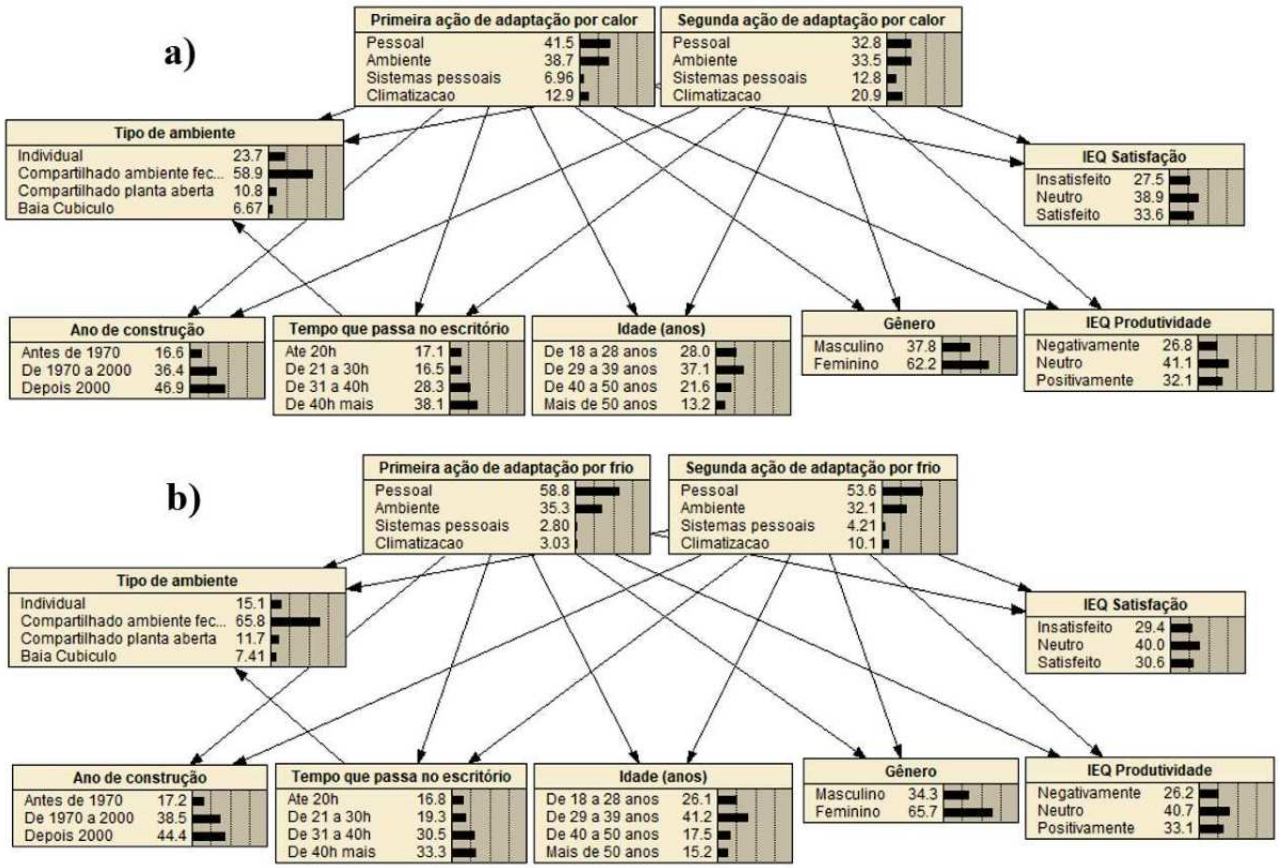

Figura 2 – Redes Bayesianas para predição da primeira e segunda ação de adaptação em resposta a desconforto por: a) calor e b) frio.

Além da classificação geral dos casos, mostrando as probabilidades iniciais, as Redes Bayesianas permitem avaliar como a combinação de todos os fatores impacta na variável resposta. Em outras palavras, o algoritmo empregado permite estimar como perfis de usuários que estavam ou não incluídos na base de dados original tendem a realizar adaptações quando sentem desconforto térmico em seus ambientes de trabalho. Por ser interativa, a Rede Bayesiana criada permite fixar todas as variáveis pessoais e contextuais e estimar as prováveis adaptações realizadas nos ambientes. Há evidências na literatura de que o gênero dos ocupantes influencia suas preferências em relação ao ambiente térmico (MAYKOT; RUPP; GHISI, 2018). Em relação aos dados obtidos neste estudo, têm-se maiores proporções de respostas de ocupantes do gênero feminino e daqueles que trabalham em escritórios compartilhados. As Redes Bayesianas proporcionam análises detalhadas sobre o impacto de cada aspecto nas variáveis preditas, uma vez que os cálculos de probabilidades condicionais tratam especificamente cada tópico avaliado. Portanto, essa abordagem também é viável para minimizar limitações de bases de dados em relação à variabilidade das respostas obtidas, desde que a base seja suficiente para construir redes com acurácias satisfatórias.

Portanto, com as Redes Bayesianas apresentadas anteriormente, foram testados cenários específicos para compreender as adaptações adotadas pelos usuários. Em relação ao desconforto por calor, variações expressivas foram observadas para grupos de usuários do gênero masculino e do gênero feminino, e a Figura 3 mostra dois cenários testados. Na parte superior (que representa ocupantes do gênero masculino, com mais de 50 anos, com opiniões negativas em relação à qualidade do ambiente interno, que trabalham em ambientes compartilhados de planta aberta em edificações construídas entre 1970 e 2000, e passam mais de 40h/semana

no escritório), percebe-se que as adaptações pessoais são pouco prováveis tanto como primeira quanto como segunda ação. Nesse cenário, a primeira ação mais provável (88,5% de chance de ocorrência) é o acionamento do sistema de climatização. As segundas ações mais prováveis englobam o uso de sistemas pessoais ou o ajuste de janelas e persianas (47,5% e 46,4% de chance, respectivamente). De maneira oposta, a parte inferir (que representa ocupantes do gênero feminino, com mais de 50 anos, com opiniões neutras em relação à qualidade do ambiente interno, que trabalham em baias ou cubículos em edificações construídas entre 1970 e 2000, e passam mais de 40h/semana no escritório) evidencia que os sistemas de climatização são pouco acionados como opção para restaurar os níveis de conforto térmico. Nesse cenário, a primeira ação mais provável é a adaptação pessoal (93,7% de chance), e a segunda ação mais provável é o ajuste do ambiente (94,8% de chance). Apesar de os casos testados representarem combinações restritivas por englobarem todos os aspectos incluídos na construção da rede, ressalta-se que os parâmetros também podem ser avaliados isoladamente. Ou seja, a partir da criação da rede, escolhas pontuais podem ser realizadas a fim de compreender sua influência na variável resposta. Portanto, essa é uma alternativa viável para extrapolar o conhecimento obtido com a aplicação de questionários ou realização de monitoramentos em campo. Além disso, o caráter probabilístico conferido pelo método facilita a compreensão da relação entre conforto térmico e comportamento de usuário em escritórios. Estudos futuros podem se beneficiar desses resultados para aprimorar modelos de simulações computacionais em relação à inclusão de comportamentos de usuários nos cálculos de desempenho térmico e consumo energético das edificações.

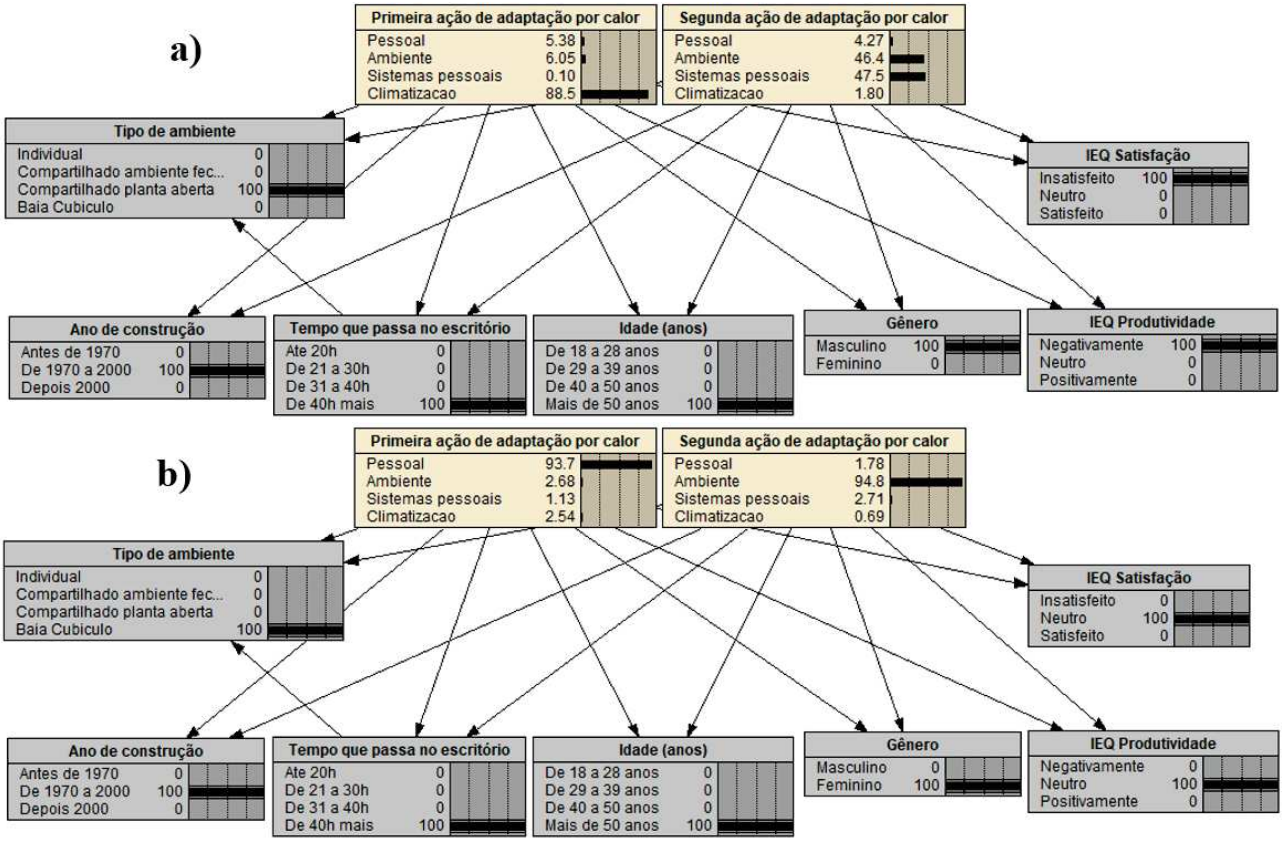

Figura 3 – Redes Bayesianas para predição da primeira e segunda ação de adaptação em resposta a desconforto por calor em diferentes contextos realizadas por usuários do gênero: a) masculino e b) feminino.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou, por meio de uma abordagem probabilística, os comportamentos adaptativos comumente adotados quando os usuários estão em desconforto por calor ou por frio em seus ambientes de trabalho. Concluiu-se que tanto variáveis pessoais quanto contextuais impactam a maneira como os ocupantes respondem às sensações de desconforto térmico. De maneira geral, as primeiras e segundas ações mais comuns englobam adaptações pessoais (ajustar camadas de roupa, tomar bebida quente/fria, caminhar) e ajustes no ambiente que não resultam em consumo energético direto (abrir/fechar janelas ou persianas).

Entretanto, a partir de análises mais aprofundadas empregando algoritmos de aprendizagem de máquina (Rede Bayesiana), confirmou-se que diferentes perfis de usuários podem recorrer a alternativas como o uso de

sistema de climatização assim que estiverem em desconforto térmico. Combinando-se variáveis pessoais (como gênero, idade e opiniões sobre a qualidade do ambiente interno) e variáveis contextuais (como tipo do ambiente, ano de construção do edifício e tempo que o usuário passa semanalmente no escritório), divergências expressivas nos comportamentos adaptativos foram observadas. Desta forma, o uso de aprendizagem de máquina permite extrair informações complexas em bancos de dados de avaliações de conforto térmico – como resultados de aplicações de questionários ou avaliações em campo. Além disso, compreender a relação entre a qualidade do ambiente interno em escritórios, neste caso o ambiente térmico, e o comportamento dos usuários também é importante para avaliações de eficiência energética. A dimensão humana do consumo energético não deve ser negligenciada nestas avaliações – especialmente em simulações computacionais. A relação entre conforto térmico e ações consequentemente realizadas pelos usuários pode ser incluída futuramente em simulações computacionais a fim de reduzir as incertezas em relação aos níveis de desempenho termoenergético estimados por meio de simulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRÉ, M.; VECCHI, R. DE; LAMBERTS, R. Feasibility of using personal fans for increasing thermal comfort in mixed-mode shared work spaces in Brazil: a field study. Windsor 2020. **Anais...**, 2020.

BAVARESCO, M.V.; GHISI, E.; D'OCA, S.; PISELLO, A.L. Triggering occupant behaviour for energy sustainability: Exploring subjective and comfort-related drivers in Brazilian offices. **Energy Research and Social Science**, v. 74, 101959, 2021. Elsevier Ltd.

BRASIL. **Ministério da Saúde. Resolução nº 510/2016**. 2016.

CHEN, C.-F.; YILMAZ, S.; PISELLO, A. L. *et al.* The impacts of building characteristics, social psychological and cultural factors on indoor environment quality productivity belief. **Building and Environment**, v. 185, p. 107189, 2020. Elsevier Ltd.

D'OCA, S.; CHEN, C. F.; HONG, T.; BELAFI, Z. Synthesizing building physics with social psychology: An interdisciplinary framework for context and occupant behavior in office buildings. **Energy Research and Social Science**, v. 34, p. 240–251, 2017. Elsevier Ltd.

GUNAY, H.B.; O'BRIEN, W.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I. A critical review of observation studies, modeling, and simulation of adaptive occupant behaviors in offices. **Building and Environment**, v. 70, p. 31-47, 2013. Elsevier Ltd.

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). Buildings: a source of enormous untapped efficiency potential. A source of enormous untapped efficiency potential. Disponível em: https://www.iea.org/topics/buildings. Acesso em: 23 mar. 2021.

KEYVANFAR, A.; SHAFAGHAT, A.; ABD MAJID, M.Z. *et al.* User satisfaction adaptive behaviors for assessing energy efficient building indoor cooling and lighting environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 277-295, 2014. Elsevier Ltd.

MAYKOT, J. K.; RUPP, R. F.; GHISI, E. A field study about gender and thermal comfort temperatures in office buildings. **Energy and Buildings**, v. 178, p. 254–264, 2018. Elsevier Ltd.

SCHWEIKER, M.; AMPATZI, E.; ANDARGIE, M. S.; *et al*. Review of multi-domain approaches to indoor environmental perception and behaviour. **Building and Environment**, v. 176, 106804, 2020. Elsevier Ltd.

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. Elsevier Ltd.

WASKOM, M. seaborn: statistical data visualization. **The Journal of Open Source Software**, v. 60, p. 1-4, 2021.

YAN, D.; HONG, T.; DONG, B.; *et al*. IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings. **Energy and Buildings**, v. 156, p. 258–270, 2017. Elsevier B.V.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa. Além disso, os autores agradecem aos voluntários que aceitaram participar desta pesquisa e completaram o questionário enviado.