ADEQUABILIDADE DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO PROPOSTOS NA REVISÃO DA NBR 16.401-2 A PARTIR DE DADOS DA BASE BRASILEIRA DE CONFORTO TÉRMICO

Maíra André (1); Carolina Buonocore (2); Luiza de Castro (3); Greici Ramos (4); Renata De Vecchi (5); Roberto Lamberts (6)

(1) Mestre, Arquiteta e Urbanista, maira.andre@gmail.com, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
(2) Mestre, Arquiteta e Urbanista, carolina_buonocore@yahoo.com.br, LabEEE, UFSC.
(3) Arquiteta e Urbanista, luizatdecastro@gmail.com, LabEEE, UFSC.
(4) Doutora, Arquiteta e Urbanista greici.ramos@posgrad.ufsc.br, LabEEE, UFSC.
(5) Doutora, Arquiteta e Urbanista, LabEEE, UFSC.
(6) PhD, Engenheiro Civil, UFSC, LabEEE.

RESUMO

Atualmente, a avaliação de conforto térmico no Brasil está vinculada à Norma Regulamentadora NR17, publicada em 1990 que se refere a ambientes de trabalho, e à NBR 16.401-2, atualizada pela última vez em 2008 e cujo escopo se refere a ambientes condicionados artificialmente. Recentemente, a parte 2 da NBR 16.401 foi revisada, e a nova versão aprovada pelo comitê CB 055 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O documento proposto está alinhado com as últimas revisões incluídas na ASHRAE Standard 55, e em breve deve ser disponibilizado para consulta pública. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a adequabilidade dos métodos para a avaliação de conforto térmico descritos na proposta da NBR 16.401-2, utilizando os dados provenientes da Base Brasileira de Conforto Térmico. Tais dados, levantados em edificações condicionadas artificialmente (AC), ventiladas naturalmente (NV) e que operam de forma mista (MM), foram aplicados e analisados em função da zona de conforto térmico do método analítico e do método para ambientes ventilados naturalmente controlados pelos usuários. Os resultados analisados validam a proposta de revisão da NBR 16.401-2, destacando a importância que esta atualização normativa representa para o contexto brasileiro frente à versão atual. No entanto, sugerem de forma secundária que novas revisões podem ser necessárias para adaptar os métodos propostos à realidade cultural brasileira e à expectativa térmica gerada pelas edificações frequentemente encontradas no país.

Palavras-chave: conforto térmico, norma brasileira, base brasileira de conforto térmico, estudos de campo

ABSTRACT

Currently, thermal comfort evaluation in Brazil is associated to both Regulatory Standard NR17 (published in 1990), which refers to working environments, and NBR 16.401-2, last updated in 2008, which covers artificially conditioned environments. Recently, the second part of NBR 16.401 was reviewed, and the new version approved by the CB 055 committee of Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). The proposed document is aligned with the last version of ASHRAE Standard 55 and should be available for public review soon. In this context, the present study aims to evaluate the adequacy of thermal comfort methods described at new NBR 16.401-2 proposal, using data from Brazilian Thermal Comfort Database. Data from air-conditioned (AC), naturally ventilated (NV) and mixed-mode operated buildings (MM) was analyzed regarding the thermal comfort zone from both Analytical Comfort Zone method and the method applicable for Occupant-Controlled Naturally Conditioned Spaces. The results validate NBR 16.401-2 proposed review, highlighting the importance of the standard's update for Brazilian context, in comparison to the current version. However, results also suggest that new reviews might be needed in order to adapt the proposed methods to both Brazilian cultural context and thermal expectations observed in buildings usually found across the country.

Keywords: thermal comfort, Brazilian standard, Brazilian thermal comfort database, field studies

1. INTRODUÇÃO

A avaliação do conforto térmico, assim como de outros aspectos da qualidade do ambiente interno, pode ser citada como exemplo da complexidade envolvida na avaliação global dos ambientes ocupados, dada a sua subjetividade e uma vez que são identificadas entre os usuários grandes variações fisiológicas, psicológicas e contextuais (DE DEAR; BRAGER; COOPER, 1997; SCHWEIKER *et al.*, 2018).

Atualmente, consta na literatura internacional um volume significativo de dados obtidos em pesquisas de campo, que constituem a ASHRAE *Global Thermal Comfort Database II* (FÖLDVÁRY LIČINA et al., 2018). O repositório de informações provenientes de pesquisas realizadas em diferentes países torna possível avaliar hipóteses teóricas testando-as com dados experimentais, a fim de embasar estatisticamente a definição das condições que ofereçam ambientes termicamente confortáveis a uma parcela mínima de usuários, ainda que estas não sejam idênticas para todos. O Brasil é, atualmente, o quinto país com mais experimentos registrados e, a nível nacional, a Base Brasileira de Dados de Conforto Térmico (ANDRÉ et al., 2019) conta com aproximadamente 10.000 votos de usuários de edificações reais, provenientes de quatro estados brasileiros e três contextos climáticos diferentes.

A comparação entre os dados nacionais e internacionais permite investigar similaridades ou diferenças na preferência pelas condições térmicas em países com características climáticas semelhantes, porém culturalmente distintos, a fim de enriquecer a compreensão sobre o conforto térmico dos usuários. Por meio dessa comparação foi possível identificar, por exemplo, que habitantes brasileiros de regiões de clima úmido subtropical (Cfa) tendem a se sentir mais insatisfeitos termicamente por sensação de calor, enquanto a amostra global para regiões com o mesmo clima tende à maior insatisfação por sensações térmicas de frio (BUONOCORE et al., 2020). Identificar e validar essas variações contribui significativamente para o aprimoramento das normas locais que, de alguma forma, focam na manutenção das condições térmicas de espaços internos, seja adequando, adicionando ou flexibilizando requisitos de acordo com o contexto avaliado.

No Brasil, pode-se citar a norma brasileira NBR 16.401 - Instalações de ar-condicionado, Parte 2: Parâmetros de conforto térmico (2008) como um dos documentos que especificam os requisitos de conforto térmico para ambientes internos. O método vigente, por alinhar-se à versão de 2005 do ASHRAE *Handbook - Fundamentals* (2005), que se baseia nos estudos de Fanger (1970), é aplicável exclusivamente aos ambientes que operam a partir de sistemas de condicionamento artificial durante todo o ano. Além de desatualizada em relação ao cenário internacional, esta versão da norma é bastante limitada se considerado o contexto local das edificações brasileiras, que em muitos casos operam a partir da combinação entre condicionamento artificial e uso da ventilação natural. Destaca-se, ainda, que a norma vigente apresenta intervalos de conforto com pouca variação e muito restritos em relação à velocidade do ar, indo na contramão dos resultados verificados em campo no Brasil que indicam a alta aceitabilidade e, inclusive, a preferência dos ocupantes pelas altas velocidades do ar (ANDRÉ; DE VECCHI; LAMBERTS, 2020; CANDIDO et al., 2010; DE VECCHI; CÂNDIDO; LAMBERTS, 2014). Assim, a nova versão da parte 2 desta norma permite que o movimento do ar e o conforto sejam explorados de novas maneiras, incluindo as inovações que atualmente vêm sendo incentivadas em conjunto com o uso dos sistemas de condicionamento artificiais, como a integração entre a velocidade do ar e as temperaturas de *setpoints* mais elevadas, além da abordagem de modo misto, que permite uma gama mais ampla de oportunidades de adaptação para os ocupantes (HOYT; ARENS; ZHANG, 2015; PARKINSON; DE DEAR; BRAGER, 2020).

Os métodos de avaliação de conforto térmico incluídos na nova revisão da parte 2 da NBR 16.401 baseiam-se na ASHRAE Standard 55 de 2017 (ANSI, 2017), que é a principal referência mundial para a avaliação de conforto térmico em função da alta frequência de revisões já publicadas, que abrangem os resultados das pesquisas mais atuais da área. Recentemente, o texto da proposta de revisão da NBR 16.401-2 (ABNT, 2021) foi aprovado pelo comitê CB-055 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, e segue para as próximas etapas até a publicação. A proposta de revisão inclui, entre outros requisitos, métodos de avaliação para ambientes que operam com ar condicionado (AC), ambientes sem sistema de climatização artificial, e que utilizam apenas a ventilação natural (VN) por meio de janelas operáveis, e ambientes que permitem a utilização de ambas as estratégias, denominado modo misto de operação (MM). Além dos novos métodos de avaliação de conforto para os diferentes modos de operação dos edifícios, o texto proposto inclui também orientações e requisitos para avaliar o conforto térmico em edificações existentes, por meio de medições em campo das condições ambientais e da aplicação de questionários de satisfação com os usuários.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a adequabilidade dos métodos para a avaliação de conforto térmico descritos na proposta de norma brasileira NBR 16.401-2, utilizando os dados provenientes da Base Brasileira de Conforto Térmico.

3. MÉTODO

Com o intuito de verificar a adequabilidade dos métodos de avaliação constantes na proposta de revisão da norma NBR 16.401-2 (ABNT, 2021), adotou-se os dados documentados pela Base Brasileira de Conforto Térmico em ambientes internos. A base de dados foi compilada conforme os procedimentos descritos em André et al. (2019), totalizando 10.917 conjuntos de dados (variáveis ambientais, pessoais e votos acerca do conforto térmico). A esse banco de dados adicionou-se a categorização dos votos por experimento conforme o local, a data e o horário de realização do monitoramento das condições ambientais e aplicação de questionários. Os experimentos foram conduzidos nos três tipos de climatização citados na proposta de revisão: AC, VN e MM. No âmbito dessa classificação, assumiu-se como ambientes AC aqueles climatizados apenas por ar-condicionado, não sendo possível a adoção da ventilação natural como estratégia alternativa (ar condicionado central, sem a operação de janelas). Portanto, tais ambientes não se enquadram na classificação denominada MM. No total, foram compilados 241 experimentos, sendo 50 em AC, 124 em MM e 67 em NV.

A avaliação de conforto térmico foi realizada conforme os requisitos e as condições de aplicabilidade dos métodos descritos na proposta de revisão da norma, resumidos na Tabela 1. Em linhas gerais, os métodos disponíveis são: 1) método geral para a determinação das condições térmicas aceitáveis em espaços ocupados, sendo este subdividido em: a) método da zona gráfica de conforto térmico; b) método da zona analítica de conforto térmico; e c) método da zona gráfica para altas velocidades do ar; 2) determinação das condições térmicas aceitáveis em ambientes ventilados naturalmente e controlados pelos usuários. Neste trabalho, as condições de aceitabilidade e conforto para os dados da Base Brasileira foram verificadas por meio do método indicado em 1-b) zona analítica e, em 2) método para ambientes ventilados naturalmente. A análise pelos métodos 1-a) e 1-c) serão conduzidas em trabalhos futuros e, portanto, retiradas do escopo deste artigo. Os dados de velocidade do ar média, taxa metabólica, isolamento da vestimenta e temperatura média predominante do ar externo ($T_{mpa(ext)}$) documentados na base foram considerados para a análise e discussão sobre a adequabilidade dos métodos de conforto.

Tabela 1 – Condições de aplicabilidade dos métodos de avaliação segundo a proposta de revisão da norma 16401-2 (ABNT, 2021)

Velocidade do ar média (m/s)	Taxa metabólica (met)	Isolamento da vestimenta (clo)	$T_{mpa(ext)}$ (°C)	Método de Avaliação de Conforto
< 0,20	1,0 – 2,0	0 – 1,5	-	1-a) zona analítica de conforto térmico
> 0,20	1,0 – 2,0	0 – 1,5	-	1-b) zona gráfica para altas velocidades do ar
≤ 1,2 m/s	1,0 – 1,5	0,5 – 1	10 – 33,5	2) ambientes ventilados naturalmente

Para a avaliação de conforto térmico a partir do método analítico, foram considerados como indicadores o PMV (*Predicted Mean Vote* ou voto médio predito) e o correspondente PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied* ou porcentagem predita de insatisfeitos) médios por experimento. Os índices foram calculados por meio do *CBE Thermal Comfort Tool*, ferramenta on-line disponibilizada pelo CBE[1] (*Center for the Built Environment*) da Universidade de Berkeley. Na entrada para o cálculo dos indicadores, considerou-se os valores médios de cada variável ambiental e pessoal por experimento e como dado de saída, obteve-se o respectivo valor de PMV.

Os critérios de conformidade avaliados foram –0,5 < PMV < +0,5 e PPD < 10% para o método da zona analítica de conforto, segundo o texto da proposta de revisão. Para confrontar o método de predição e o conjunto de dados coletados nos experimentos, o valor do PMV calculado com base nas condições pessoais e ambientais foi comparado aos percentuais reais de pessoas insatisfeitas, denominado nesta pesquisa como PPD real. Para isso, assumiu-se duas condições para a determinação do percentual de insatisfeitos: 1) a proporção de votos na escala sétima de conforto térmico fora do intervalo entre –0,5 e +0,5, seguindo a recomendação proposta pela revisão da norma; e 2) a proporção de votos fora do intervalo entre -1 e +1, que busca avaliar a adequabilidade da primeira. Isto é, no caso do critério 1, a porcentagem de pessoas com votos

[1] Link de acesso: https://comfort.cbe.berkeley.edu/ (Acesso em: 4 de março de 2021)

-3, -2, -1, +1, +2 e +3 estariam insatisfeitas com o ambiente térmico; enquanto no critério 2, menos restritivo, considerou-se como insatisfeitos os ocupantes com votos -3, -2, +2 e +3.

A avaliação da aceitabilidade térmica pelo método para ambientes VN foi feita com base na temperatura média predominante do ar externo ($T_{mpa(ext)}$), e a correspondente temperatura operativa interna média por experimento, ambas determinadas com base nas diretrizes incluídas na revisão da norma. O critério de conformidade avaliado foram os limites de aceitabilidade do método para 80% dos ocupantes. O voto de aceitabilidade térmica foi adotado nessa análise, sendo que os experimentos com aceitabilidade térmica superior e inferior a 80% foram categorizados e plotados sobre o gráfico do método para os ambientes ventilados naturalmente.

4. RESULTADOS

4.1. Condições de aplicabilidade

As variáveis descritas na Tabela 2 (velocidade do ar média, taxa metabólica, isolamento da vestimenta e $T_{mpa(ext)}$) atendem aos critérios de aplicabilidade expostos na proposta de revisão da norma e informados na Tabela 1. Observa-se que a mediana dos valores de velocidade do ar média por experimento é predominantemente baixa, especialmente na amostra de ambientes AC. No entanto, existem experimentos com velocidade do ar média acima de 0,2 m/s em todos os tipos de climatização categorizados (ver valores máximos na Tabela 2). Esse é um ponto importante a ser notado, uma vez que a aplicação do método analítico é indicada sob circunstâncias de velocidade média abaixo de 0,2 m/s, discutida adiante.

Tabela 2 – Descrição de variáveis ambientais e pessoais por tipo de climatização

Variável		Velocidade do ar média (m/s)			Taxa metabólica (met)			Isolamento da vestimenta (clo)			$T_{mpa(ext)}$ (°C)		Nº de Experimentos
Estatística		Mediana	Máx.	Mín.	Mediana	Máx.	Mín.	Mediana	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	
Climat.	AC	0,10	0,39	0,00	1,0	1,2	1,0	0,55	0,88	0,33	30,1	18,2	50
	MM	0,15	0,63	0,00	1,0	1,5	1,0	0,56	1,19	0,34	27,0	16,1	124
	VN	0,24	1,25	0,00	1,2	1,2	1,0	0,44	0,65	0,33	30,1	26,6	67

As condições de taxa metabólica e de $T_{mpa(ext)}$ estão em conformidade com requisitos de aplicabilidade do método para ambientes ventilados naturalmente em todos os tipos de climatização. Entretanto, alguns dos valores de isolamento médio da vestimenta por experimento estão abaixo do limite aplicável (de 0,5 a 1 clo), o que é discutido no item 4.3. Os baixos valores de isolamento da vestimenta são uma característica marcante da Base Brasileira, sendo observados em todos os tipos de climatização e especialmente nas amostras provenientes de ambientes escolares, onde não existe nenhuma restrição relacionada à forma como os alunos se vestem.

4.2. Avaliação de conforto pelo método da zona analítica

Na análise das condições de conforto pelo método da zona analítica, foram utilizados apenas os experimentos com velocidade do ar média menor ou igual a 0,2 m/s, de acordo com o critério de aplicabilidade desse método descrito na Tabela 1. Foram contabilizados, portanto, 177 de 241 experimentos (73%). O PPD real, isto é, o percentual real de pessoas insatisfeitas (determinado por meio dos votos de sensação térmica), é mostrado em função do PMV calculado a partir das condições térmicas de cada experimento na Figura 1.

O PPD real adotado para o critério 2, menos restritivo, com votos de sensação térmica acima de +1 e abaixo de -1 (Figura 1B), apresenta resultados mais coerentes ao previsto pelo método da zona analítica quando comparado ao que é considerado desconfortável pelo critério 1, conforme mostrado na Figura 1A. Tal fato pode ser observado pela distribuição de pontos e curvas de tendência nos dois gráficos, em relação à curva do modelo PMV/PPD representada pela linha sólida na cor cinza. Observando, ainda, a aplicação do critério 2 (Figura 1B), percebe-se grande quantidade de casos (77 de 177 experimentos) com 100% de aceitação, isto é, 0% de insatisfação, o que não condiz com a predição do método. Este considera que a menor insatisfação média esperada em um ambiente é de 5%, enquanto o ponto mínimo da curva de tendência da Figura 1B está em torno de 3%.

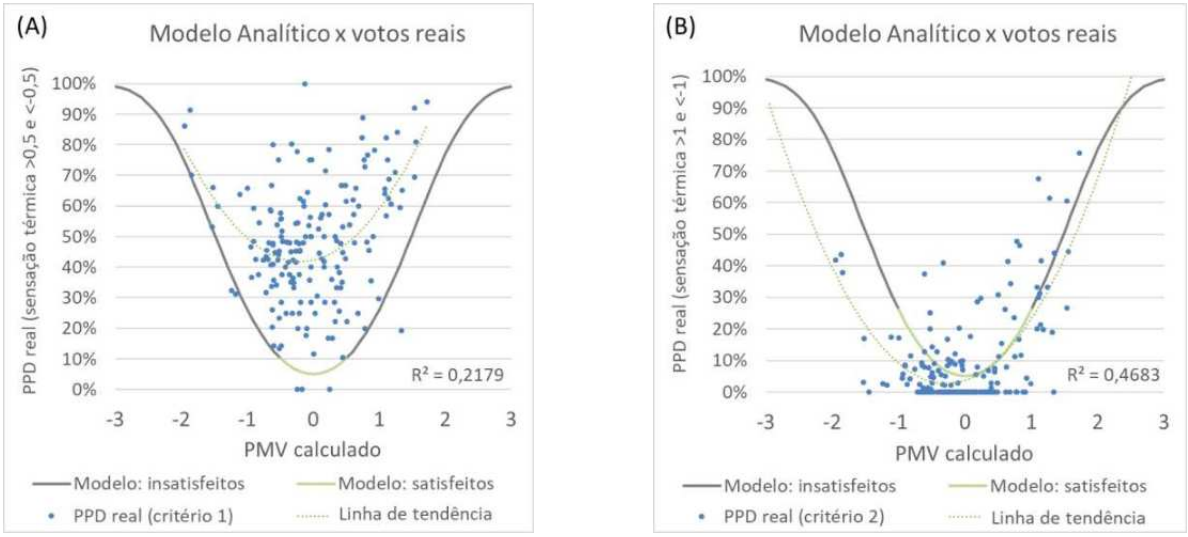

Figura 1 – Método da zona analítica com percentual de insatisfeitos pelos critérios 1 (A) e 2 (B)

Com relação à aderência dos resultados obtidos e os critérios de restrição dos intervalos de conforto térmico orientados pelos índices PMV/PPD, é importante resgatar a discussão a respeito da rigidez no controle de temperaturas internas e a sensação térmica geral dos usuários destes ambientes. Arens et al. (2010) analisaram essa questão, comparando os votos reais de conforto e/ou aceitabilidade térmica com as três classes de qualidade térmica dos ambientes propostas pelas normas ISO 7730 (2005), EN 15251 (CEN, 2007) e ASHRAE 55 (ANSI, 2017). Estas classes são definidas a partir de intervalos máximos aceitáveis de variação de PMV: Classe A entre +0,2 e -0,2; Classe B entre +0,5 e -0,5; e Classe C entre +0,7 e -0,7. Os resultados observados indicaram que as três classes não apresentam resultados diferentes de conforto e/ou aceitabilidade comparados aos votos reais, de forma que ambientes com temperatura do ar rigidamente controladas não oferecem maior aceitabilidade para os usuários do que em ambientes das classes B e C. Considerando a qualidade do ambiente interno, o caminho tradicional entre pesquisa e prática tem sido por meio da implementação de códigos de construção e normas regulamentadoras. Deve-se considerar, no entanto, que se tratando de normas, a imposição de limites mais restritivos pode representar maior segurança em relação às condições de projeto. Arens et al. (2010) identificam, ainda, que o próprio PMV pode não representar com a precisão necessária as distinções exigidas para ser considerado nos intervalos propostos. Destaca-se, ainda, que o modelo PMV/PPD de Fanger (1970), proveniente de estudo realizado em câmaras climáticas com usuários em atividade sedentária e com vestimentas uniformes, considera desconfortável apenas os votos maiores que +2 e menores que -2. De Vecchi (2015) discutiu, também, a adequabilidade do intervalo de PMV entre +1,5 e -1,5 para o contexto brasileiro a partir dos estudos de campo realizados.

Considerando o exposto, e na sequência de análises pelo método analítico, foi fixado o critério 2 para o PPD real, com o percentual de pessoas que acusou sensação térmica acima de +1 e abaixo de -1, e os experimentos foram avaliados por tipo de climatização, representados na Figura 2. A partir da diferenciação entre os modos de operação, é possível observar que o percentual de insatisfeitos não é simétrico para nenhum dos grupos avaliados. Os dados coletados em ambientes VN indicam tendência de desconforto relacionada à sensação de calor, mas pouco pode ser dito em relação às condições ambientais de frio (PMV < 0), uma vez que não há amostra climática (estudos de campo realizados em climas frios) representativa nesse caso. De certo modo, os ocupantes desses ambientes demonstram maior exigência em relação às condições térmicas internas do que o previsto no método para sensações de leve calor (PMV em torno de 1).

Já em ambientes AC e MM, a condição térmica não se relacionou com o percentual real de insatisfeitos conforme previsto pelo método, ainda que a correlação mais forte entre o PPD real e o PMV calculado seja observada pela polinomial AC, representada pela linha tracejada de cor azul clara, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,55. Em AC, pode-se dizer que houve maior tolerância às sensações de frio, em comparação às sensações de calor verificadas em VN. Porém, foram registrados casos de condições ambientais próximas ao neutro (PMV calculado próximo a 0) que não agradaram à maioria das pessoas. Em MM, por exemplo, não há uma relação tão clara entre o PMV calculado para uma condição térmica e o percentual real de sensações consideradas desconfortáveis. A aceitabilidade foi bastante elevada na maioria dos experimentos (82 de 93), sendo maior ou igual ao percentual de 90% recomendado para o conforto térmico geral.

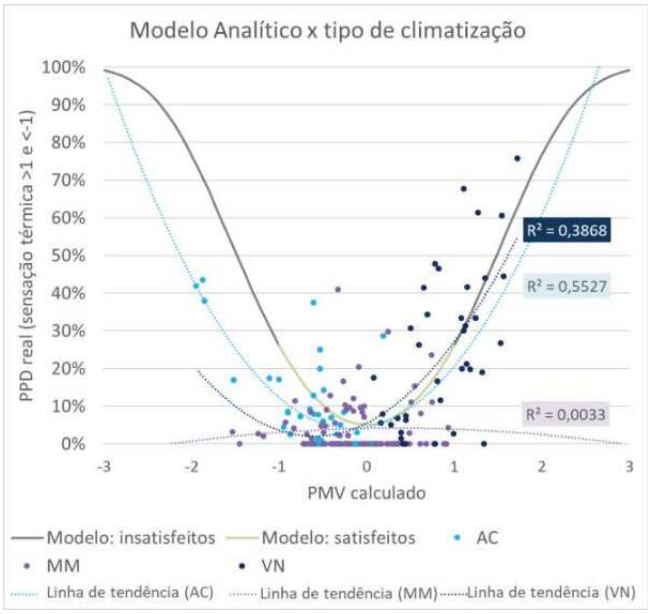

Figura 2 – Método da zona analítica com a discriminação dos experimentos por tipo de climatização

4.3. Avaliação de conforto pelo método para ambientes ventilados naturalmente

A verificação das condições térmicas aceitáveis pelo método para ambientes ventilados naturalmente foi efetuada para todos os dados de votos e experimentos disponíveis (AC, MM e VN), apesar do critério de aplicabilidade referente ao isolamento da vestimenta, devido à representatividade dos baixos valores de clo na amostra de dados da Base Brasileira, além da restrição relacionada à existência do sistema de condicionamento artificial mecânico operante.

Em uma análise inicial, todos os votos de aceitabilidade térmica existentes na base (n = 10.917) foram plotados no gráfico do método para espaços VN e, posteriormente, comparados com o cenário de aceitabilidade por experimento, considerando o percentual de 80% de aceitabilidade como referência.

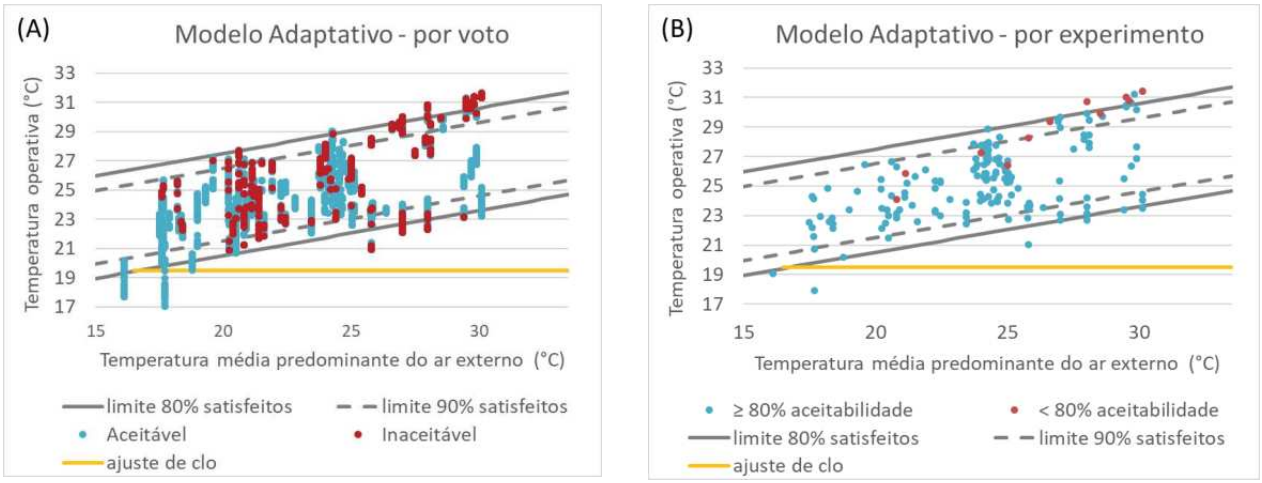

Figura 3 – Predição de aceitabilidade térmica do método para espaços VN, por voto (A) e por experimento (B)

A Figura 3A ilustra o total de votos existentes na base, categorizados por “aceitável” e “inaceitável”. Observa-se que, ao plotar dados absolutos de aceitabilidade térmica no gráfico (Figura 3A), a insatisfação em relação ao ambiente térmico pode ser verificada sob diversas condições ambientais que fundamentalmente são consideradas aceitáveis pelo método. Além disso, a representação de dados absolutos não permite diferenciar a quantidade de participantes e/ou votos obtidos em um mesmo experimento e, logo, sob as mesmas condições de exposição. No entanto, quando observado o percentual de votos dentro de um determinado experimento (Figura 3B), verifica-se melhor aderência entre os resultados encontrados e a predição do método, uma vez que o percentual real de aceitabilidade térmica para um grupo de pessoas é diretamente comparado ao critério de aceitabilidade proposto pelo método – ou seja, no mínimo 80% de

aceitação do ambiente térmico. Entretanto, ainda é possível observar casos com alto percentual de desconforto (aceitabilidade < 80%, indicada pelos pontos em vermelho) dentro dos limites da zona e uma tendência relacionando este desconforto às temperaturas internas mais elevadas. Tal fato deve-se à densificação dos votos de inaceitabilidade térmica (maior representatividade desses votos) em um mesmo experimento nas condições de temperatura operativa interna acima de 28 °C e $T_{mpa(ext)}$ acima de 26 °C.

Os experimentos com percentual de aceitabilidade térmica maior ou igual a 80% foram representados na Figura 4 por tipo de climatização. Nota-se que as temperaturas operativas internas mais baixas correspondem à operação do ar-condicionado (AC), e as mais elevadas, à ventilação natural (VN). É importante ressaltar que não houve experimentos com menos de 80% de aceitabilidade em ambientes AC e que todos esses experimentos estiveram dentro dos limites de temperatura operativa interna preditos pelo método aplicado. Considerando que este estabelece condições de aceitabilidade térmica a partir da relação entre temperatura externa e interna, essa relação não é verificada em AC, uma vez que nesses experimentos a condição de temperatura operativa interna (em torno de 23 °C na maioria dos casos) independe da média predominante externa. Por outro lado, observa-se que os dados plotados na Figura 4 provenientes de edificações MM e VN seguem a relação linear entre temperatura operativa interna e temperatura média predominante do ar externo – ou seja, respondem melhor à proposta de predição do método baseado no modelo adaptativo. As condições ambientais referentes aos experimentos VN estão situadas nas proximidades do limite superior de temperatura operativa interna aceitável, ao passo que os experimentos realizados em MM possuem condições ambientais mais moderadas e variadas. Para apenas 2 de 25 experimentos realizados em ambientes VN seria predita aceitabilidade térmica abaixo de 80%; entretanto, o resultado real indica o contrário: aceitabilidade térmica acima de 80% (Figura 4). Portanto, o método para espaços ventilados naturalmente se mostrou adequado ao conjunto de experimentos avaliados, principalmente nas amostras MM e VN. Ou seja, a maioria dos pontos manteve-se dentro do limite gráfico normativo (80% de aceitabilidade térmica), representado pelas linhas cinza denominadas “limite 80% satisfeitos” nos gráficos.

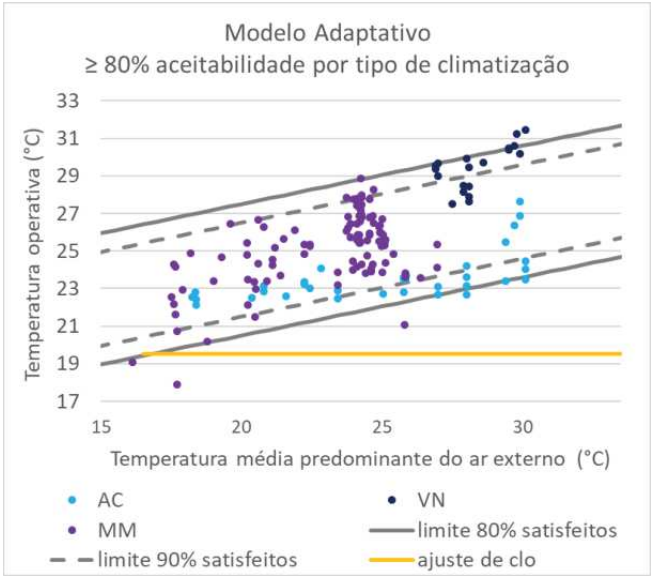

Figura 4 – Método para espaços VN com a discriminação dos experimentos com 80% de aceitabilidade ou mais

A exploração de diferenças regionais relacionadas ao conforto adaptativo de edificações naturalmente ventiladas foi analisada por Parkinson et al. (2020). Os autores se propuseram a replicar a análise de De Dear e Brager (1998) em um conjunto de dados maior e mais representativo provenientes da Base de Dados II da ASHRAE (FÖLDVÁRY LIČINA et al., 2018), e avaliar eventuais diferenças observadas nos princípios de conforto adaptativo em diferentes regiões. A partir da comparação de dados entre edificações europeias, norte americanas e australianas com experimentos realizados em edificações asiáticas (Oriente Médio, Índia e sul, sudeste e leste da Ásia), o estudo identificou que o gradiente de adaptabilidade térmica proposto pelo modelo adaptativo da ASHRAE 55 é amplamente comparável com os padrões de conforto observados em edificações localizadas em climas mais quentes, assim como observado nos resultados apontados neste estudo para o contexto brasileiro. No entanto, foi observada uma diferença notável no termo de interceptação da temperatura operativa (eixo Y), identificada como dois graus mais quente que o modelo da ASHRAE 55. De acordo com os autores, temperaturas neutras mais altas sugerem que haja a necessidade de o modelo refletir diferenças regionais além daquelas descritas apenas pela adaptação ao clima através, por exemplo, da

adoção de ajustes opcionais como o incremento da velocidade do ar, na determinação do limite de aceitabilidade. Dessa forma, é possível, ao invés da proposição de um novo modelo local, manter a compatibilidade com o modelo original incluindo uma solução mais abrangente de acordo com questões regionalmente específicas.

Essa discussão vai de encontro com a ocorrência observada nos dados analisados neste estudo de temperaturas operativas internas ainda mais baixas consideradas aceitáveis pelos ocupantes do que o predito pelo método, mesmo com a zona de ajuste do isolamento da vestimenta (linha amarela "ajuste clo" nas figuras Figura 3 e Figura 4) proposta no projeto de revisão da norma. De acordo com esse ajuste, proposto inicialmente por De Vecchi et al. (2014), as temperaturas operativas internas acima de 19,5 °C seriam aceitáveis em ambientes sem sistemas de condicionamento operantes, independentemente da condição externa, devido à possibilidade de adaptação da vestimenta em condições internas de frio, com o incremento do isolamento, o que de fato foi observado nesses experimentos. Por outro lado, o método para espaços VN também se mostrou adequado considerando o limite superior de temperatura operativa interna aceitável, situação na qual figura a adaptação da vestimenta às condições internas de calor, com a diminuição do isolamento. Nos experimentos presentes na Base Brasileira, os valores médios variaram entre 0,33 e 1,19 clo (Tabela 2). Isso reforça o fato de que, além do contexto climático e da adaptação fisiológica, existem influências culturais que interferem na percepção térmica dos usuários. Ou seja, é viável discutir a expansão das condições de aplicabilidade do critério isolamento de vestimenta na proposta de revisão da norma, considerando uma população com isolamento médio da vestimenta abaixo de 0,5 clo e acima de 1,0 clo.

4.4. Adequabilidade dos métodos de avaliação em edificações de modo misto (MM)

A proposta de revisão da NBR 16.401-2 contempla uma sugestão para a avaliação das condições de conforto térmico em edificações com condicionamento artificial que operam de forma mista (MM). Nesse caso, são assumidas duas possibilidades: o ambiente é operado ora com predomínio de condicionamento artificial ligado (AC ligado) e ora com predomínio de condicionamento artificial desligado (AC desligado). Para a primeira situação, é recomendada a adoção do método da zona analítica e para a segunda, a adoção do método para edificações VN. A adequabilidade dos métodos por modo de operação (AC ligado ou desligado) foi analisada nas edificações MM e está representada na Figura 5.

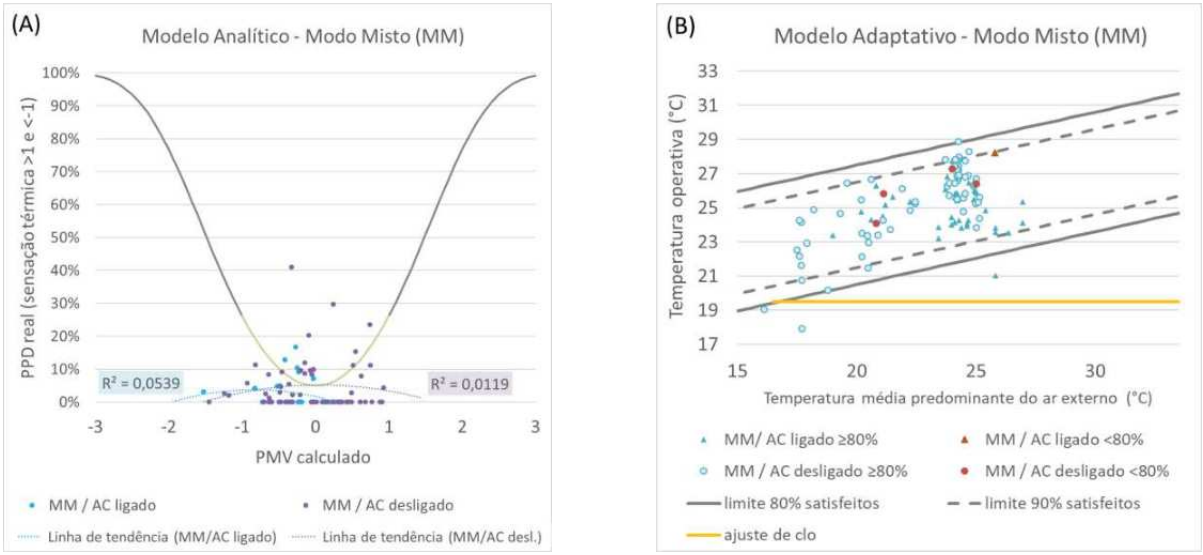

Figura 5 – Método da zona analítica (A) e para espaços VN (B) para edificações de modo misto (MM), com AC ligado e desligado

A avaliação pelo método da zona analítica (Figura 5A), não indica uma tendência clara do PPD real em função do PMV calculado para as condições ambientais vigentes em cada modo de operação – assim como fora observado para os experimentos MM de forma geral (Figura 2). É pequena a quantidade de experimentos com percentual de votos de sensação térmica fora do intervalo entre –1 e +1 em relação ao total (11 de 93 experimentos), especialmente com AC ligado. Na representação dos dados da base sobre o método da zona analítica, há maior dispersão dos pontos referentes à amostra com AC desligado – curiosamente sob condições ambientais consideradas próximas à neutralidade (PMV em torno de 0).

A avaliação pelo método para espaços VN (Figura 5B), indicou a mesma tendência identificada na análise por tipo de climatização (Figura 4): adequabilidade do método independentemente do modo de

operação predominante. Notou-se que a quantidade de experimentos com aceitabilidade real abaixo de 80% e que está dentro dos limites normativos de aceitabilidade predita (em vermelho) é muito pequena em relação ao total de experimentos realizados em MM. Foram contabilizados 6 de 124 experimentos nessa condição, ou seja, 5% do total; destes 6 experimentos, 5 tiveram AC desligado, podendo representar o momento imediatamente anterior ao seu acionamento. Esta observação alinha-se ao apresentado por Parkinson et al. (2020), no sentido da interpretação da operação em modo misto como edifícios projetados para serem naturalmente ventilados, com oportunidades de adaptação suficientes para que as expectativas dos usuários também sejam reduzidas, e que possuam recursos de condicionamento de ar em *stand-by* para evitar o superaquecimento em condições climáticas mais extremas. De qualquer forma, a inadequação da predição do método para os referidos 6 experimentos não é representativa em relação ao total de experimentos avaliados.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a adequabilidade dos métodos para a avaliação de conforto térmico descritos na proposta de norma brasileira NBR 16.401-2, utilizando para tal os dados provenientes da Base Brasileira de Conforto Térmico. As análises focaram no método da zona analítica e no método para a avaliação de ambientes ventilados naturalmente controlados pelos usuários.

Os resultados provenientes da aplicação do método da zona analítica sugerem que limites menos restritivos para a avaliação de conforto térmico relacionada aos votos de sensação térmica dos ocupantes podem ser considerados mais adequados quando comparados à condição descrita pelo método analítico (-0,5< PMV< +0,5). No entanto, por se tratar de uma norma, limites mais restritivos podem representar maior segurança em relação às condições de projeto, não sendo esta necessariamente uma imposição derivada fundamentalmente do modelo analítico de P.O. Fanger. Além disso, cabe destaque à grande quantidade de casos com aproximadamente 100% de aceitação ao ambiente térmico, principalmente nos ambientes MM (44% dos casos). Os resultados observados reforçam a importância das oportunidades adaptativas fornecidas pelos ambientes MM, onde os ocupantes podem de fato operar a edificação oscilando entre o uso da ventilação natural e o condicionamento artificial de acordo com suas expectativas e condições climáticas externas.

Com relação ao método para ambientes ventilados naturalmente controlados pelos usuários, a avaliação das condições de conforto se mostrou adequada ao conjunto de experimentos da Base Brasileira, independentemente do tipo de climatização. Na maioria dos casos avaliados, a plotagem de dados na zona proposta pelo método – ou seja, atendimento ou não do limite normativo mínimo de 80% para a aceitabilidade térmica – foi condizente com o percentual real de aceitabilidade térmica verificado nos experimentos. A adequabilidade deste método foi verificada em 118 de 124 experimentos (ou 95%) em MM, independentemente do modo de operação predominante (AC ligado ou desligado), em 23 de 25 experimentos realizados em VN e em 100% dos experimentos realizados em AC. No entanto, deve-se destacar que a abrangência do limite superior de temperaturas proposto pela zona de conforto térmico adaptativo não necessariamente funciona nos espaços condicionados artificialmente, o que torna inviável assumir que esse método é válido para estender os *setpoints* de temperatura nos espaços predominantemente condicionados artificialmente. Ainda com relação ao método para espaços VN, é importante destacar que o intervalo de isolamento médio da vestimenta dos dados levantados nos experimentos de campo está entre 0,33 e 1,19 clo, extrapolando os requisitos de isolamento mínimo e máximo propostos. Essa variação sugere a discussão da expansão das condições de aplicabilidade do critério de isolamento de vestimenta na proposta de revisão da norma, de modo que tal critério possa ser aplicado considerando populações com isolamento médio da vestimenta abaixo de 0,5 clo e acima de 1 clo.

Vale ainda ressaltar que a complexidade envolvida na avaliação do conforto térmico pode ser melhor compreendida apenas com a expansão de estudos que incluam a percepção dos ocupantes em paralelo à caracterização das variáveis ambientais. Nesse sentido, espera-se que a proposta de revisão da norma traga a possibilidade de expansão da Base Brasileira de Conforto Térmico a partir da ampla adoção de métodos de coleta de dados validados internacionalmente em pesquisas da área. Dessa forma, torna-se possível contemplar maior diversidade climática, e ampliar a base comparativa para que, no futuro, limites e requisitos mais próximos às particularidades nacionais possam ser estudados na avaliação de conforto.

Finalmente, os resultados deste trabalho validam a proposta de revisão da NBR 16.401-2, destacando a importância que esta atualização normativa representa para o contexto brasileiro frente à versão atual que permanece em vigor. Entretanto, sugerem também que novas revisões podem ser necessárias para adaptar os métodos propostos à realidade cultural brasileira e à expectativa térmica gerada pelas edificações comumente encontradas no país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRÉ, M. et al. Conforto térmico em ambientes internos no brasil e o desenvolvimento da base brasileira de dados. In: ANAIS [DO] XV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E XI ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO: MUDANÇAS CLIMÁTICAS, CONCENTRAÇÃO URBANA E NOVAS TECNOLOGIAS / ASSOCIAÇÃO NACIONAL DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ANTAC); ORGANI 2019, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2019.

ANDRÉ, M.; DE VECCHI, R.; LAMBERTS, R. Feasibility of using personal fans for increasing thermal comfort in mixed- mode shared work spaces in Brazil: a field study. In: (NCEUB, Ed.)WINDSOR CONFERENCE: RESILIENT COMFORT IN A HEATING WORLD 2020, London, UK. **Anais**... London, UK: NCEUB (Network for Comfort and Energy Use in Buildings), 2020.

ANSI. **ASHRAE Handbook of Fundamentals**. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2005.

ANSI. **ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.

ARENS, E. et al. Are "class A" temperature requirements realistic or desirable? **Building and Environment**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 4–10, 2010.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **3º Projeto de Revisão NBR 16401-2:** Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. 2021. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/node/808>

BUONOCORE, C. et al. Exploring the Brazilian Thermal Comfort Database: an overview on the main contributions. In: (S. Roaf, F. Nicol, W. Finlayson, Eds.)PROCEEDINGS OF 11TH WINDSOR CONFERENCE: RESILIENT COMFORT 2020, Witney, Oxon, GB. **Anais**... Witney, Oxon, GB: Ecohouse Initiative Ltd, 2020.

CANDIDO, C. et al. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and Environment**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 222–229, 2010.

CEN. **Standard EN15251:** Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, AFNOR, 2007. Disponível em: <https://standards.globalspec.com/std/1110417/cen-en-15251>. Acesso em: 12 abr. 2018

DE DEAR, R.; BRAGER, G. Thermal adaptation in the Built Environment: a literature review. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 83–96, 1998.

DE DEAR, R.; BRAGER, G.; COOPER, D. **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference: Final Report on ASHRAE RP - 884**. Sydney: MRL, 1997.

DE VECCHI, R. **Avaliação de conforto térmico em edificações comerciais que operam sob sistemas mistos de condicionamento ambiental em clima temperado e úmido**. 2015. Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 2015.

DE VECCHI, R. et al. ASHRAE 55 adaptive model application in hot and humid climates: the Brazilian case. **Architectural Science Review**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 93–101, 2015. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00038628.2014.981145>

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**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 189–202, 2014.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering.** Copenhagen, Dinamarca: McGraw-Hill, 1970.

FÖLDVÁRY LIČINA, V. et al. Development of the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. **Building and Environment**, [s. l.], v. 142, n. June, p. 502–512, 2018.

HOYT, T.; ARENS, E.; ZHANG, H. Extending air temperature setpoints : Simulated energy savings and design considerations for new and retro fi t buildings. **Building and Environment**, [s. l.], v. 88, p. 89–96, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.010>

ISO. **International Standard ISO 7730 —** Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, International Organization for Standardization, 2005.

PARKINSON, T.; DE DEAR, R.; BRAGER, G. Nudging the adaptive thermal comfort model. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 206, p. 109559, 2020.

SCHWEIKER, M. et al. Drivers of diversity in human thermal perception–A review for holistic comfort models. **Temperature**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 308–342, 2018.