

Influência da umidade do ar no conforto térmico de usuários de edificações de escritórios em Florianópolis/SC

Influence of air humidity on the thermal comfort of users of office buildings in Florianópolis/SC

Candi Citadini de Oliveira 

Ricardo Forgiarini Rupp 

EneDir Ghisi 

Resumo

O conforto térmico apresenta elevada importância para a conservação de energia em edificações, bem como para a satisfação e o desempenho dos usuários. O principal objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da umidade do ar no conforto térmico de usuários de edificações de escritórios localizadas no clima subtropical úmido de Florianópolis/SC. Com base em dados previamente coletados em campo, foram efetuadas análises estatísticas considerando a umidade do ar e as respostas subjetivas dos usuários obtidas por meio de um questionário eletrônico. Analisou-se a percepção térmica e da umidade do ar de ocupantes de uma edificação com sistema central de ar-condicionado e duas edificações híbridas, onde houve alternância entre os modos de operação por ventilação natural e por ar-condicionado. Os resultados obtidos indicam ausência de relação entre a razão de umidade e a percepção térmica, no entanto mostram significativa influência da sensação de umidade e da preferência quanto à umidade sobre o conforto térmico. Ademais, assim como apontam outros autores, confirmou-se a importância da utilização da umidade absoluta ao invés da umidade relativa nas análises de conforto térmico.

Palavras-chave: Umidade relativa. Razão de umidade. Conforto térmico. Edificações de escritórios. Ventilação híbrida.

Abstract

Thermal comfort is highly important not only for energy conservation in buildings, but also for users' satisfaction and performance. The main objective of this project is to assess the effect of air humidity on the thermal comfort of users of office buildings located in a humid subtropical climate, in Florianópolis/SC, southern Brazil. Based on field data previously collected, statistical analyses were performed considering the air humidity and users' subjective responses obtained by means of an electronic questionnaire. The thermal perception and the air humidity perception of occupants of a building with central air-conditioning system and two mixed-mode buildings, in which there was alternation between the natural ventilation mode and the air-conditioning mode, were analysed. The results obtained indicate no relation between humidity ratio and thermal perception, however, a significant influence of humidity sensation and humidity preference on thermal comfort was observed. In addition, the study confirmed, as other authors had already pointed out, the importance of the use of absolute humidity instead of relative humidity in thermal comfort analyses.

¹Candi Citadini de Oliveira

¹Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

²Ricardo Forgiarini Rupp

²Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

³EneDir Ghisi

³Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

Recebido em 26/11/19

Aceito em 23/01/20

Keywords: Relative humidity. Humidity ratio. Thermal comfort. Office buildings. Hybrid ventilation.

Introdução

O conforto térmico apresenta elevada importância para a satisfação e o desempenho de usuários de diferentes tipos de edificações, visto que melhora o seu bem-estar e rendimento. Ademais, representa alto potencial de conservação de energia, visto que o conhecimento das condições e dos parâmetros relacionados ao conforto térmico permite selecionar a melhor alternativa de condicionamento do ambiente térmico e ajustar as condições ambientais de acordo com as preferências dos ocupantes. Um fator importante a ser considerado nas análises de conforto térmico é a umidade do ar, cujos efeitos sobre o conforto térmico são avaliados nesta pesquisa.

De acordo com a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar-Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA), a utilização do ar-condicionado em edificações comerciais representa de 30% a 40% do consumo total de energia (ASSOCIAÇÃO..., 2013). Essa quantia significativa se deve, principalmente, à manutenção da temperatura constante nos ambientes internos, independentemente do clima local e da estação do ano. Em contrapartida ao elevado consumo de energia por parte dos sistemas de ar-condicionado, outras estratégias para promover conforto térmico têm sido adotadas em edificações de escritórios, como é o caso do uso de ventilação natural para elevar ou reduzir a carga térmica do ambiente interno (RUPP; GHISI, 2013).

Diversos autores investigaram a influência da umidade do ar sobre o conforto térmico humano. Foram realizados estudos em diferentes locais, como câmaras climáticas (CHOW *et al.*, 2010; JING *et al.*, 2013; KONG *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2019; TOFTUM; JORGENSEN; FANGER, 1998; ZHAI *et al.*, 2017, 2013), salas de aula (BUONOCORE *et al.*, 2018; GIVONI *et al.*, 2006), residências (QI *et al.*, 2020; RIJAL; HUMPHREYS; NICOL, 2015) e escritórios (DAMIATI *et al.*, 2016; RUPP; GHISI, 2013; WAGNER *et al.*, 2007). Destaca-se que a maior parte das pesquisas envolvendo a umidade do ar foi desenvolvida em locais de clima quente e úmido. Apesar de a maioria dos estudos considerar em suas análises a umidade relativa do ar, Givoni *et al.* (2006), Kong *et al.* (2019), Li *et al.* (2019), Nicol, Humphreys e Roaf (2012) e Qi *et al.* (2020) sugerem a utilização da umidade absoluta do ar, que pode ser expressa pela pressão parcial de vapor da água ou pela razão de umidade. A justificativa dos autores refere-se ao fato de a umidade relativa estar associada à temperatura do ar, o que pode mascarar o efeito da umidade no conforto térmico, enquanto isso não acontece para a razão de umidade.

Quanto à redução do consumo de energia em ambientes condicionados artificialmente, Chow *et al.* (2010) sugerem que é mais eficiente elevar a velocidade do ar no ambiente do que reduzir a temperatura e a umidade do ar, considerando-se o mesmo nível de conforto térmico. Por outro lado, Damiani *et al.* (2016) e Zhai *et al.* (2013) afirmam que valores adequados de umidade do ar apresentam potencial de conservação de energia devido à ampliação dos limites aceitáveis de temperatura interna. Ademais, mantêm os ocupantes confortáveis, visto que intensificam o processo de evaporação do suor pelo corpo, aumentando, assim, a perda de calor para o ambiente em locais quentes.

Buonocore *et al.* (2018), Jing *et al.* (2013) e Kong *et al.* (2019) afirmam que, a altas temperaturas, elevados valores de umidade relativa estão geralmente relacionados à menor aceitabilidade térmica do ambiente e ao maior desconforto térmico, além de implicarem em maiores valores na escala de sensação térmica. Em contrapartida, Chow *et al.* (2010), Givoni *et al.* (2006) e Zhai *et al.* (2017) observaram fraca influência da umidade relativa sobre a sensação térmica. Givoni *et al.* (2006) e Kong *et al.* (2019) sugerem que a exposição prolongada a elevadas umidades está relacionada à menor sensibilidade e melhor adaptabilidade dos usuários em relação às variações ambientais para condições de alta temperatura e elevada umidade do ar, porém apontam a necessidade de outros estudos em ambientes quentes e úmidos para confirmar esta análise. Destaca-se que Buonocore *et al.* (2018) e Givoni *et al.* (2006) realizaram trabalhos em salas de aula com ventiladores e sem ar-condicionado, em locais de clima predominantemente quente e úmido ao longo de diferentes estações do ano. Por outro lado, os demais autores desenvolveram suas pesquisas em câmaras climáticas simulando ambientes quentes e úmidos, com valores de velocidade do ar variáveis.

Toftum, Jorgensen e Fanger (1998) avaliaram o efeito da umidade da pele na percepção térmica dos usuários para a condição de neutralidade térmica. Os autores observaram que, à medida que a umidade da pele aumenta, menor é a aceitabilidade das pessoas em ambientes com elevada umidade do ar. Rijal, Humphreys e Nicol (2015) verificaram que a umidade relativa e a umidade absoluta do ar estão relacionadas à umidade da pele, cujo aumento gera redução na temperatura de conforto do ambiente interno. Isso ocorre pelo fato de a umidade presente no ambiente reduzir o processo de evaporação que acontece entre o corpo e o ambiente, havendo menor perda de calor (TSUTSUMI *et al.*, 2007). Ademais, Damiani *et al.* (2016) e Rijal, Humphreys e Nicol (2015) não identificaram efeito direto da umidade relativa e da umidade absoluta sobre a

temperatura de conforto térmico, mas verificaram que esta apresenta forte relação com os votos subjetivos de umidade. A partir disso, é possível compreender que as umidades relativa e absoluta do ambiente apresentam influência indireta no conforto térmico dos ocupantes, sendo que a percepção de menor umidade possibilita maiores temperaturas de conforto e, com isso, redução da necessidade de condicionamento artificial do ar.

Desta forma, a comparação de pesquisas relacionadas aos efeitos da umidade do ar no conforto térmico permite perceber a disparidade de resultados obtidos quanto à importância desta variável. Alguns trabalhos apontam a tendência de melhoria da sensação térmica e do conforto térmico, bem como o aumento da aceitabilidade térmica dos usuários, com a redução da umidade do ar e da umidade da pele, enquanto outros não verificaram influência destas variáveis no conforto térmico dos ocupantes. Portanto, vê-se a importância de serem realizados novos estudos e investigações a respeito da influência da umidade do ar no conforto térmico, principalmente em regiões de clima úmido.

Nesse contexto, o objetivo deste artigo é investigar o efeito da umidade do ar na percepção de conforto térmico de usuários de edificações de escritórios localizadas no clima subtropical úmido de Florianópolis/SC. Neste estudo serão analisadas duas edificações híbridas, que podem operar com ventilação natural ou ar-condicionado, e uma edificação com sistema central de ar-condicionado.

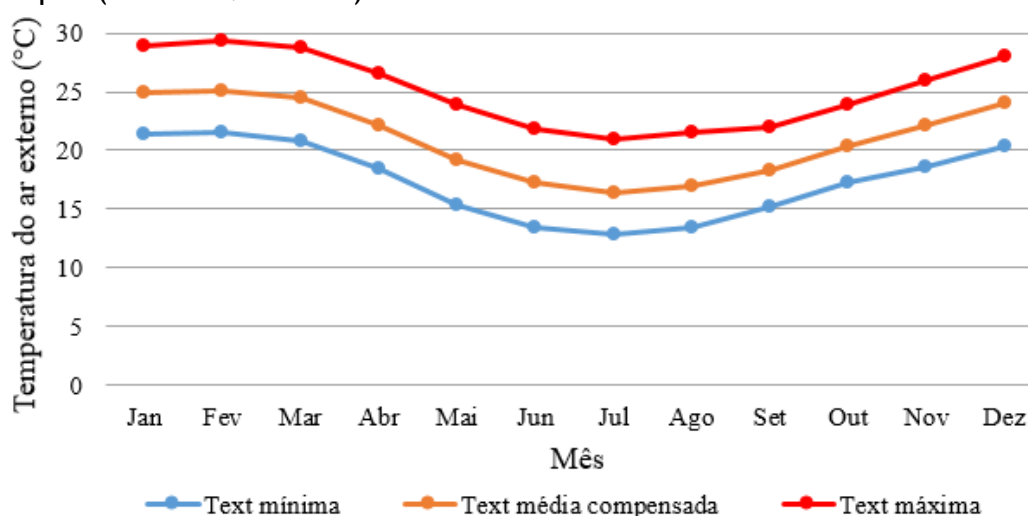
Método

Este estudo baseia-se na análise de dados previamente coletados com ênfase na variável umidade do ar. Utilizou-se parte dos dados referentes aos anos de 2015 e 2016 da tese de Rupp (2018), que foram coletados em três edificações de escritórios situadas em Florianópolis, Santa Catarina. A fim de não identificar as empresas envolvidas, as edificações foram designadas H1 e H2, para as edificações híbridas, e CC para a edificação com sistema central de ar-condicionado. Destaca-se que as edificações híbridas apresentam sistemas de ar-condicionado instalados e janelas acessíveis e operáveis pelos ocupantes; e a alternância do modo de operação ocorre de acordo com a preferência dos usuários.

Caracterização do local de estudo

O município de Florianópolis, onde estão localizadas as três edificações nas quais foram coletados os dados utilizados neste estudo, situa-se no extremo leste do estado de Santa Catarina, na região sul do Brasil. Segundo o zoneamento bioclimático brasileiro, a cidade localiza-se na zona bioclimática 3 (ABNT, 2005). O clima é classificado como subtropical úmido, com verões quentes e invernos amenos. A média anual de temperatura do ar externo (Text) é igual a 20,9 °C, com temperatura média igual a 16,4 °C no mês mais frio (julho) e temperatura média igual a 25,1 °C no mês mais quente do ano (fevereiro). As temperaturas mínimas, médias compensadas e máximas mensais do ar externo podem ser observadas na Figura 1.

Figura 1 - Temperaturas mínimas, médias compensadas e máximas mensais do ar externo para Florianópolis (dados de 1981 a 2010)



Fonte: Normais Climatológicas (1981-2010) (BRASIL, 2018).

A cidade está situada majoritariamente em uma ilha banhada pelo oceano Atlântico e, por conta de sua proximidade com o mar, apresenta elevados valores de umidade relativa do ar ao longo do ano. A média anual de umidade relativa (UR) é igual a 80,4%, com valores máximos e mínimos em torno de 98% e 50%, respectivamente (Figura 2). Destaca-se que em Florianópolis há ocorrência de precipitação ao longo de todo o ano, com pluviosidade média anual igual a aproximadamente 1700 mm e não existindo uma estação seca. O município apresenta as quatro estações do ano bem definidas, havendo a possibilidade de mudanças repentinas das condições climáticas por conta de frentes frias oriundas de massas de ar polares.

Contextualização dos dados utilizados

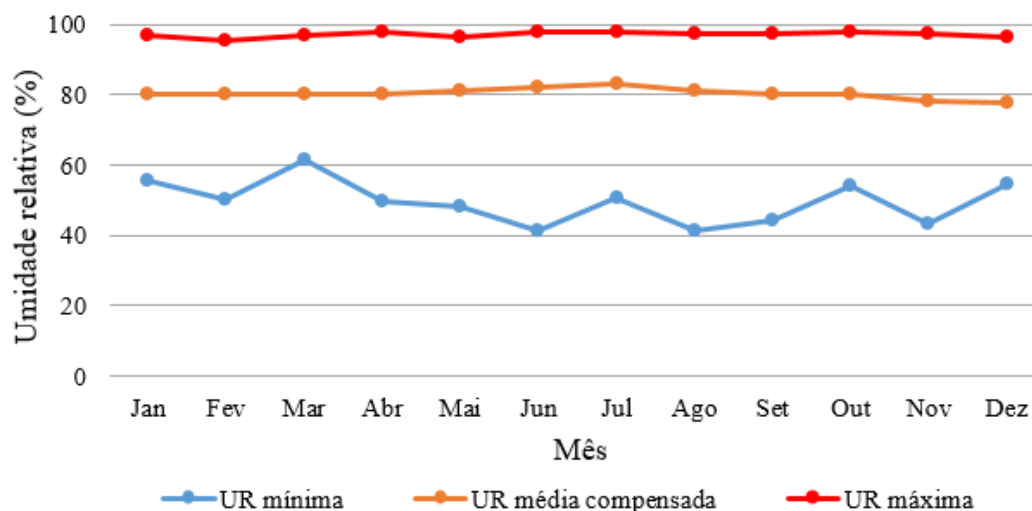
Os dados utilizados neste trabalho são oriundos de estudos de campo em escritórios. Simultaneamente, foram efetuadas medições das variáveis ambientais nos ambientes internos das edificações selecionadas para o estudo e coletados dados subjetivos dos usuários a partir de um questionário eletrônico. A coleta de dados ocorreu em diversos dias entre janeiro de 2015 e março de 2016, abrangeu as diferentes estações climáticas e não foi simultânea nas três edificações (RUPP, 2018).

Para as medições das variáveis ambientais internas, foram usadas estações microclimáticas (confortímetros) para medir a temperatura do ar, a temperatura de globo, a velocidade do ar e a umidade relativa do ar – as quais foram registradas em intervalos de cinco minutos. Utilizou-se também um termoanemômetro portátil para medições pontuais de temperatura do ar e velocidade do ar. Quanto à coleta de dados subjetivos, aplicou-se um questionário eletrônico o qual os usuários acessavam por meio de seus computadores pessoais. O questionário foi aplicado a cada 20 minutos, iniciando às 9h00 (manhã) e às 14h00 (tarde), com duração aproximada de 140 minutos. No questionário, constavam questões gerais sobre as características antropométricas e demográficas dos usuários e questões sobre a percepção térmica e da umidade do ar. A Tabela 1 apresenta as opções de resposta e os respectivos valores atribuídos para cada pergunta considerada no questionário. Maiores informações sobre a coleta de dados em campo podem ser encontradas em Rupp (2018).

Análise de dados

Com o intuito de avaliar a relação entre as variáveis ambientais e subjetivas, foram realizadas análises estatísticas a partir de histogramas de frequência, correlações, regressões lineares, gráficos de linha e gráficos de barra. Destaca-se que cada resposta subjetiva de um participante em determinado momento foi combinada com as condições ambientais medidas no instante da resposta.

Figura 2 - Umidades relativas mínimas, médias compensadas e máximas mensais do ar externo para Florianópolis (dados de 1981 a 2010)



Fonte: Normais Climatológicas (1981-2010) (BRASIL, 2018).

Tabela 1 - Opções de resposta e respectivos valores atribuídos, para cada questão do questionário

Questões do questionário	Opções de resposta	Valores atribuídos
Sensação térmica	Muito calor	+3
	Calor	+2
	Levemente calor	+1
	Neutro	0
	Levemente frio	-1
	Frio	-2
	Muito frio	-3
Preferência térmica	Mais resfriado	+1
	Assim mesmo	0
	Mais aquecido	-1
Aceitabilidade térmica	Inaceitável	+1
	Aceitável	0
Conforto térmico	Desconfortável	+1
	Confortável	0
Sensação de umidade*	Muito úmido	+3
	Úmido	+2
	Pouco úmido	+1
	Neutro	0
	Pouco seco	-1
	Seco	-2
	Muito seco	-3
Preferência quanto à umidade*	Diminuir a umidade	+1
	Não mudar	0
	Aumentar a umidade	-1
Aceitabilidade da umidade*	Inaceitável	+1
	Aceitável	0

Nota: *as questões referentes à percepção de umidade apresentam a opção extra "Não sei responder".

Primeiramente calculou-se a umidade absoluta do ar com base nas medições de temperatura do ar e de umidade relativa do ar. Devido ao fato de que a umidade relativa se encontra associada à temperatura, considerou-se melhor utilizar a umidade absoluta nas análises, conforme sugerem Nicol, Humphreys e Roaf (2012). De acordo com a ISO 7726 (INTERNATIONAL..., 1998), a umidade absoluta pode ser expressa por meio da pressão parcial de vapor da água (Equações 1 e 2) ou da razão de umidade (Equação 3).

$$P_{as} = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T_a}{T_a + 273}\right) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

P_{as} é a pressão de vapor da água saturada (kPa); e

T_a é a temperatura do ar (°C).

$$P_a = \frac{P_{as} * RH}{100} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

P_a é a pressão parcial de vapor da água (kPa);

P_{as} é a pressão de vapor da água saturada (kPa); e

RH é a umidade relativa (%).

$$W_a = 622,0 \frac{P_a}{P - P_a} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

W_a é a razão de umidade (g/kg);

P_a é a pressão parcial de vapor de água (kPa); e

P é a pressão atmosférica total (kPa), igual a 101,325 kPa.

A fim de resumir e possibilitar melhor compreensão visual dos dados, apresentou-se um sumário estatístico das variáveis ambientais e antropométricas de acordo com a edificação e o modo de operação. Com o intuito de verificar de que maneira ocorre a distribuição dos dados referentes à sensação térmica e à sensação de umidade, foram feitos histogramas de frequência. Para as demais variáveis subjetivas, analisou-se a frequência de votos por meio de uma tabela de acordo com o tipo de edificação e o modo de operação.

Foram efetuadas correlações entre as variáveis temperatura do ar e sensação térmica e as variáveis umidade relativa e razão de umidade. Além disso, relacionou-se a temperatura do ar com a média dos votos de sensação térmica e preferência térmica de acordo com a razão de umidade. Também foram feitas correlações e análises da distribuição de votos envolvendo a razão de umidade e as variáveis sensação, preferência e aceitabilidade da umidade. Para os usuários em conforto e desconforto térmico, investigou-se a distribuição dos votos de sensação de umidade e preferência quanto à umidade. Destaca-se que, nos gráficos em que os valores de razão de umidade foram agrupados a cada 1 g/kg, consideraram-se apenas os intervalos com número de observações igual ou superior a 30 a fim de obter maior representatividade dos resultados.

Resultados e discussões

A fim de investigar a influência da umidade do ar no conforto térmico de usuários de escritórios situados em Florianópolis, foi analisada a relação entre esta variável e a percepção térmica e da umidade do ar.

Apresentação e caracterização dos dados

Os dados utilizados consistem de 2644 medições referentes às variáveis ambientais e antropométricas, sendo 268 da edificação H1, 1767 da edificação H2 e 609 da edificação CC. Cabe ressaltar que H1 e H2 são edificações híbridas, em que houve alternância entre os modos de operação por ventilação natural e ar-condicionado, e CC é uma edificação com sistema central de ar-condicionado. No total das respostas ao questionário eletrônico, 1570 foram de homens e 1074 de mulheres. Nas edificações H1 e H2 foram, respectivamente, 147 e 688 respostas do gênero feminino e 121 e 1079 do gênero masculino, enquanto na edificação CC foram contabilizadas 239 respostas de mulheres e 370 de homens. Desta forma, percebe-se que, em duas das três edificações, a maior parte dos usuários é do gênero masculino.

Foram considerados dados de edificações reais e, por isso, não houve distribuição uniforme de dados quanto às variáveis ambientais consideradas. Apesar de dificultar a realização de algumas análises devido ao pequeno número de observações em alguns casos, a coleta de dados em edificações existentes permite representação mais fiel da realidade quanto às variações das variáveis ambientais e à complexidade do ambiente real em que estão os usuários. É importante ressaltar que nesta pesquisa foram considerados dados apenas de edificações de escritórios situadas em clima subtropical úmido.

A Tabela 2 apresenta a média e o desvio padrão das seguintes variáveis ambientais: temperatura do ar (T_a), temperatura média diária do ar externo (T_{ext}), velocidade do ar (V_a), umidade relativa (UR), umidade relativa média diária do ar externo (UR_{ext}), pressão parcial de vapor da água (P_a) e razão de umidade (W_a). Os dados foram agrupados de acordo com o tipo de edificação e o modo de operação – ventilação natural (VN) ou ar-condicionado (AC). É possível observar que, de maneira geral, os valores médios de temperatura do ar e velocidade do ar foram semelhantes para todas as edificações e modos de operação. Por outro lado, os valores médios de temperatura externa e umidade externa do ar foram, respectivamente, inferiores e superiores para as edificações híbridas operando com ventilação natural, indicando que a ventilação natural foi utilizada principalmente em estações intermediárias e durante o inverno. Quanto à umidade relativa, pressão parcial de vapor da água e razão de umidade, verificam-se valores superiores para o modo de operação por ventilação natural em relação ao ar-condicionado, o que pode estar relacionado à redução da umidade do ar pela utilização de aparelhos de ar-condicionado.

A Tabela 3 mostra a média e o desvio padrão das variáveis antropométricas idade, altura, peso, isolamento da vestimenta e atividade metabólica. De modo geral, identifica-se grande semelhança entre os valores médios de idade, altura, peso e atividade metabólica dos usuários em todas as edificações e modos de operação. Entretanto, nota-se diferença significativa da média do isolamento da vestimenta entre os dois modos de operação nas edificações híbridas, sendo superior para ventilação natural. Isto confirma a predominância do uso de ventilação natural em estações intermediárias e no inverno.

Tabela 2 - Sumário estatístico das variáveis ambientais de acordo com a edificação e o modo de operação

Edificação	H1		H2		CC
	VN n=132	AC n=136	VN n=1002	AC n=765	AC n=609
Tar (°C)	23,0 ± 1,4	24,4 ± 1,2	23,5 ± 1,3	23,9 ± 1,2	24,0 ± 0,9
Text (°C)	18,6 ± 2,4	26,8 ± 1,1	18,8 ± 1,7	22,4 ± 2,8	23,6 ± 1,8
Var (m/s)	0,10 ± 0,01	0,19 ± 0,15	0,11 ± 0,08	0,11 ± 0,03	0,12 ± 0,08
UR (%)	69 ± 4	55 ± 8	66 ± 8	60 ± 5	63 ± 4
URext (%)	82 ± 6	78 ± 4	83 ± 6	80 ± 5	71 ± 6
Pa (kPa)	1,614 ± 0,091	1,394 ± 0,232	1,590 ± 0,202	1,478 ± 0,147	1,558 ± 0,118
Wa (g/kg)	10,07 ± 0,58	8,68 ± 1,46	9,92 ± 1,28	9,21 ± 0,93	9,72 ± 0,75

Tabela 3 - Sumário estatístico das variáveis antropométricas de acordo com a edificação e o modo de operação

Edificação	H1		H2		CC
	VN n=132	AC n=136	VN n=1002	AC n=765	AC n=609
Idade (anos)	41 ± 10	38 ± 9	38 ± 11	37 ± 10	38 ± 10
Altura (m)	1,68 ± 0,09	1,73 ± 0,09	1,70 ± 0,10	1,71 ± 0,10	1,72 ± 0,09
Peso (kg)	72 ± 13	76 ± 17	75 ± 15	76 ± 16	76 ± 17
Isolamento da vestimenta (clo)	0,83 ± 0,28	0,55 ± 0,08	0,76 ± 0,20	0,62 ± 0,11	0,62 ± 0,10
Atividade metabólica (met)	1,2 ± 0,2	1,2 ± 0,1	1,2 ± 0,1	1,2 ± 0,1	1,2 ± 0,1

A fim de verificar de que forma ocorre a distribuição do conjunto de dados, foram feitos histogramas de frequência da sensação térmica e da sensação de umidade, conforme as Figuras 3 e 4. Os dados referentes à opção de resposta “Não sei responder” para a sensação de umidade não foram incluídos nesta análise. Pode-se observar que, para todas as edificações, a maior parte dos votos indicou sensação térmica neutra – isto é, a maioria dos usuários não sentiu frio nem calor nas condições consideradas. Destaca-se que, nas edificações híbridas, houve uma quantidade levemente maior de votos referentes à sensação térmica de calor do que de frio, enquanto na edificação com sistema central de ar-condicionado ocorreu o contrário. Verifica-se que, para as três edificações, a maioria dos ocupantes considerou a sensação de umidade neutra. Também pode-se notar que houve maior quantidade de votos indicando ambiente úmido do que ambiente seco nas edificações híbridas no modo de operação por ventilação natural. O oposto foi observado nas edificações híbridas operando com ar-condicionado e na edificação com sistema central de ar-condicionado, o que é justificado pela redução da umidade do ar por aparelhos de ar-condicionado.

Na Tabela 4 é possível observar, para cada tipo de edificação e modo de operação, as frequências dos votos das seguintes variáveis subjetivas:

- preferência térmica;
- aceitabilidade térmica;
- conforto térmico;
- preferência quanto à umidade; e
- aceitabilidade da umidade.

Figura 3 - Histogramas de frequência dos votos de sensação térmica para (A) edificações híbridas de acordo com o modo de operação (n=2010) e (B) edificação com sistema central de ar-condicionado (n=609)

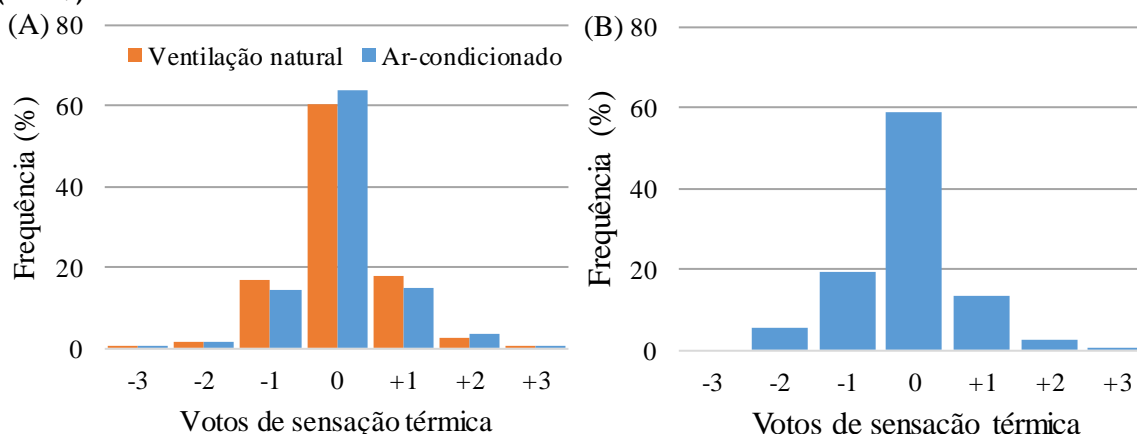
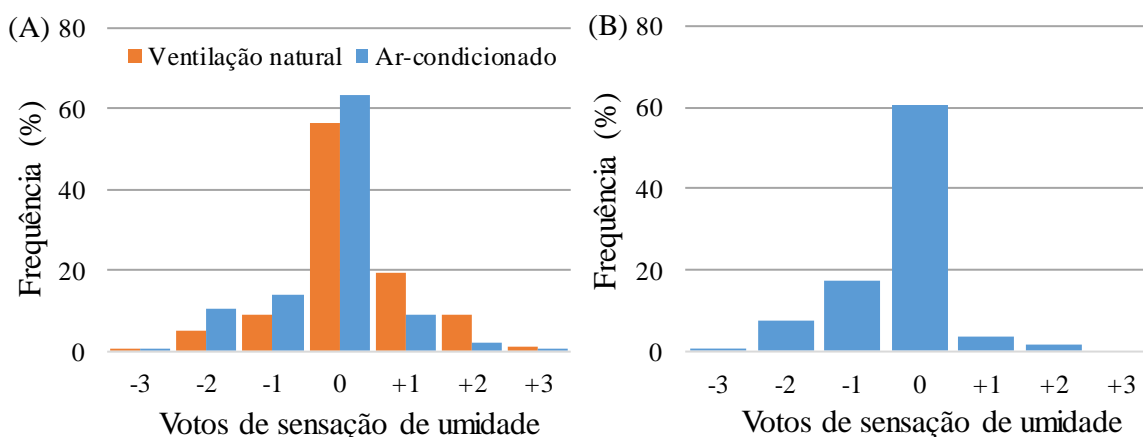


Figura 4 - Histogramas de frequência dos votos de sensação de umidade para (A) edificações híbridas de acordo com o modo de operação (n=1870) e (B) edificação com sistema central de ar-condicionado (n=556)



Para as três edificações, a maioria dos votos indicou preferência térmica neutra, ou seja, a maior parte dos ocupantes preferia continuar se sentindo da maneira que estava no momento em que respondeu ao questionário (Tabela 4). Além disso, percebe-se que todas as edificações apresentaram maior quantidade de votos de pessoas que preferiam estar mais resfriadas do que mais aquecidas. Quanto à aceitabilidade térmica e ao conforto térmico, verifica-se que, em todas as edificações, mais de 80% dos participantes consideraram-se em conforto térmico e aceitaram o ambiente térmico no momento em que responderam ao questionário eletrônico. É importante ressaltar que, nas edificações híbridas, o percentual de votos de aceitabilidade e conforto térmico foi superior para o modo de operação por ventilação natural. Em relação à percepção de umidade, em todas as edificações houve predominância da preferência por não mudar a umidade e aceitabilidade da umidade superior a 80%. Nota-se preferência por diminuir a umidade nas edificações híbridas no modo de operação por ventilação natural e preferência por aumentar a umidade nos demais casos, o que indica correspondência entre os votos de sensação de umidade (Figura 4A) e preferência quanto à umidade (Tabela 4). Destaca-se o significativo percentual de votos “Não sei responder” para as variáveis envolvendo a umidade do ar, sendo em torno de 10%. De modo geral, observa-se que as edificações híbridas proporcionam condições térmicas similares às edificações com sistema central de ar-condicionado. Portanto, a adoção da estratégia de ventilação híbrida pode gerar economia de energia com a redução do uso de ar-condicionado (RUPP; GHISI, 2013).

Tabela 4 - Frequência dos votos das variáveis subjetivas de acordo com o tipo de edificação e modo de operação

Edificação	Híbridas		CC
	VN	AC	AC
Votos das variáveis subjetivas			
Preferência térmica	n=1134	n=876	n=609
+1	16,9%	18,3%	20,9%
0	72,4%	70,9%	64,7%
-1	10,7%	10,8%	14,4%
Aceitabilidade térmica	n=1134	n=876	n=609
+1	4,9%	8,3%	6,6%
0	95,1%	91,7%	93,4%
Conforto térmico	n=1134	n=875	n=609
+1	12,9%	16,6%	17,4%
0	87,1%	83,4%	82,6%
Preferência quanto à umidade	n=1134	n=901	n=609
+1	15,7%	4,2%	2,3%
0	67,0%	70,9%	62,7%
-1	7,7%	11,7%	19,7%
"Não sei responder"	9,6%	13,2%	15,3%
Aceitabilidade da umidade	n=1134	n=901	n=609
+1	5,9%	6,2%	3,9%
0	87,2%	83,4%	84,4%
"Não sei responder"	6,9%	10,4%	11,7%

Análise estatística dos dados

As variáveis razão de umidade e pressão parcial de vapor da água foram calculadas de acordo com equações determinadas na ISO 7726 (INTERNATIONAL..., 1998), sendo que a razão de umidade depende unicamente da pressão parcial de vapor da água. Neste estudo, a nível do mar, obteve-se que a relação entre as duas variáveis é linear e pode ser expressa de maneira simplificada por meio da Equação 4.

$$W_a = 6,3362 * P_a - 0,1563$$

Eq. 4

Onde:

W_a é a razão de umidade (g/kg); e

P_a é a pressão parcial de vapor de água (kPa).

A Figura 5 apresenta a relação entre a temperatura do ar e as variáveis umidade relativa e razão de umidade. À medida que ocorre elevação da temperatura do ar, pode-se observar a leve tendência de redução da umidade relativa e de aumento da razão de umidade. Destaca-se que valores mais elevados de temperatura do ar foram medidos quando o sistema de ar-condicionado estava em operação, o que acarretou diminuição da umidade relativa do ar.

Na Figura 6, é apresentada a sensação térmica em função da umidade relativa e da razão de umidade. Conforme o aumento da umidade relativa, verifica-se a tendência de redução da sensação térmica. Por outro lado, o aumento da razão de umidade tende a elevar a sensação térmica. Resultados consoantes foram obtidos por Givoni *et al.* (2006), que os justificaram pela tendência de elevados valores de umidade relativa estarem geralmente associados a baixas temperaturas, sendo que estas podem apresentar influência sobre o efeito da umidade no conforto térmico. Em contrapartida, os autores verificaram que a razão de umidade praticamente não varia conforme a temperatura do ar.

Destaca-se que nas Figuras 5 e 6 a distribuição de dados é apresentada para cada tipo de edificação, observando-se maior dispersão para as edificações híbridas e maior concentração dos dados para a edificação com sistema central de ar-condicionado. No entanto, ressalta-se que as linhas de tendência e as regressões lineares foram geradas com base nos dados de todas as edificações.

Figura 5 - Relação entre a temperatura do ar e as variáveis (A) umidade relativa (n=2644) e (B) razão de umidade (n=2644)

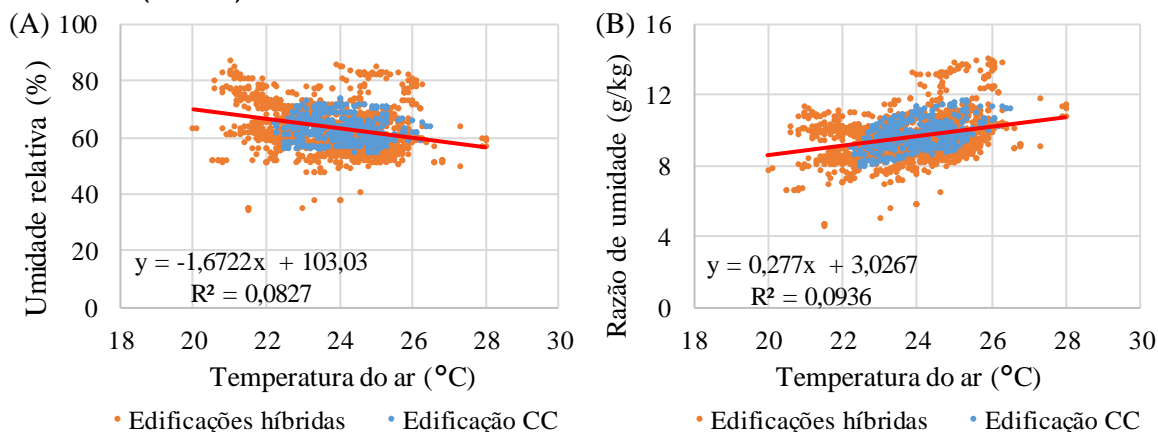
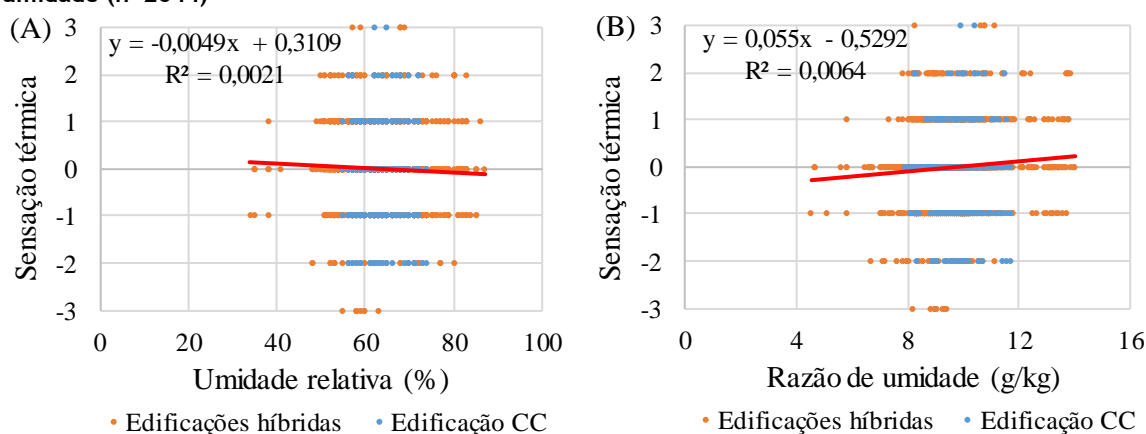


Figura 6 - Sensação térmica em função das variáveis (A) umidade relativa (n=2644) e (B) razão de umidade (n=2644)



Uma vez que as variáveis pressão parcial de vapor da água e razão de umidade são correspondentes, sendo que esta é utilizada mais frequentemente em cartas psicrométricas, e que o esperado é a sensação térmica aumentar conforme a umidade, as próximas análises envolvendo umidade foram baseadas apenas na razão de umidade. Ressalta-se que as análises referentes às Figuras 7 a 9 foram realizadas considerando-se os dados conjuntos de todas as edificações e modos de operação.

Com base na Figura 7, foi analisada a relação entre a temperatura do ar e a média dos votos de sensação térmica e preferência térmica de acordo com a razão de umidade. De maneira geral, é possível verificar que a média dos votos de sensação térmica e de preferência térmica apresentou pouca variação em torno de “neutro” e “não mudar”, respectivamente. Houve leve tendência de aumento da sensação e da preferência térmica conforme a elevação da temperatura do ar para todos os valores de razão de umidade considerados, com exceção de 11 g/kg. Desta forma, não se identificou significativa influência da razão de umidade sobre a percepção térmica – assim como obtido por Chow *et al.* (2010), Givoni *et al.* (2006) e Zhai *et al.* (2017), que observaram fraca influência da umidade sobre a sensação térmica.

A Figura 8 mostra correlações entre a razão de umidade e a sensação, a preferência e a aceitabilidade da umidade. Pode-se observar que, com o aumento da razão de umidade, há a tendência de aumento da sensação e da preferência quanto à umidade e a tendência de haver maior inaceitabilidade da umidade. No entanto, a correlação entre as variáveis é bastante fraca. Wagner *et al.* (2007) também identificou ausência de correlação entre a umidade absoluta e os votos subjetivos de umidade.

Na Figura 9 é apresentada a distribuição dos votos de sensação, preferência e aceitabilidade da umidade em relação à razão de umidade. Destaca-se que os dados referentes à opção de resposta “Não sei responder” não foram incluídos nestas análises. É possível observar que, para todos os valores de razão de umidade considerados, a maioria dos votos indicou sensação de umidade neutra e preferência por não mudar a

umidade. Com o aumento da razão de umidade, verifica-se a tendência de aumento dos votos indicando sensação de ambiente úmido e preferência por diminuir a umidade. Simultaneamente, ocorre a tendência de redução dos votos indicando sensação de ambiente seco e preferência por aumentar a umidade, conforme esperado. A única exceção a estes resultados foi a razão de umidade igual a 12 g/kg, em que se observa o contrário. É importante ressaltar a significativa porcentagem de votos indicando sensação de ambiente úmido e preferência por diminuir a umidade para a razão de umidade igual a 13 g/kg, o que evidencia a diferente percepção dos usuários para elevadas quantidades de umidade absoluta no ambiente. Nota-se ainda que a aceitabilidade da umidade foi superior a 80% para todos os valores de razão de umidade.

Figura 7 - Relação entre a temperatura do ar e a média dos votos de (A) sensação térmica (n=2363) e (B) preferência térmica (n=2363), de acordo com a razão de umidade

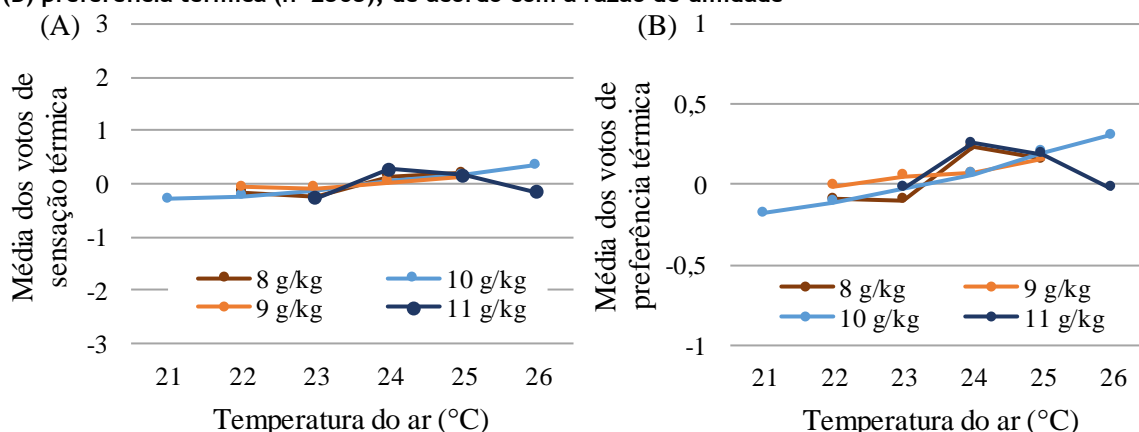


Figura 8 - Relação entre razão de umidade e as variáveis (A) sensação de umidade (n=2426), (B) preferência quanto à umidade (n=2323) e (C) aceitabilidade da umidade (n=2401)

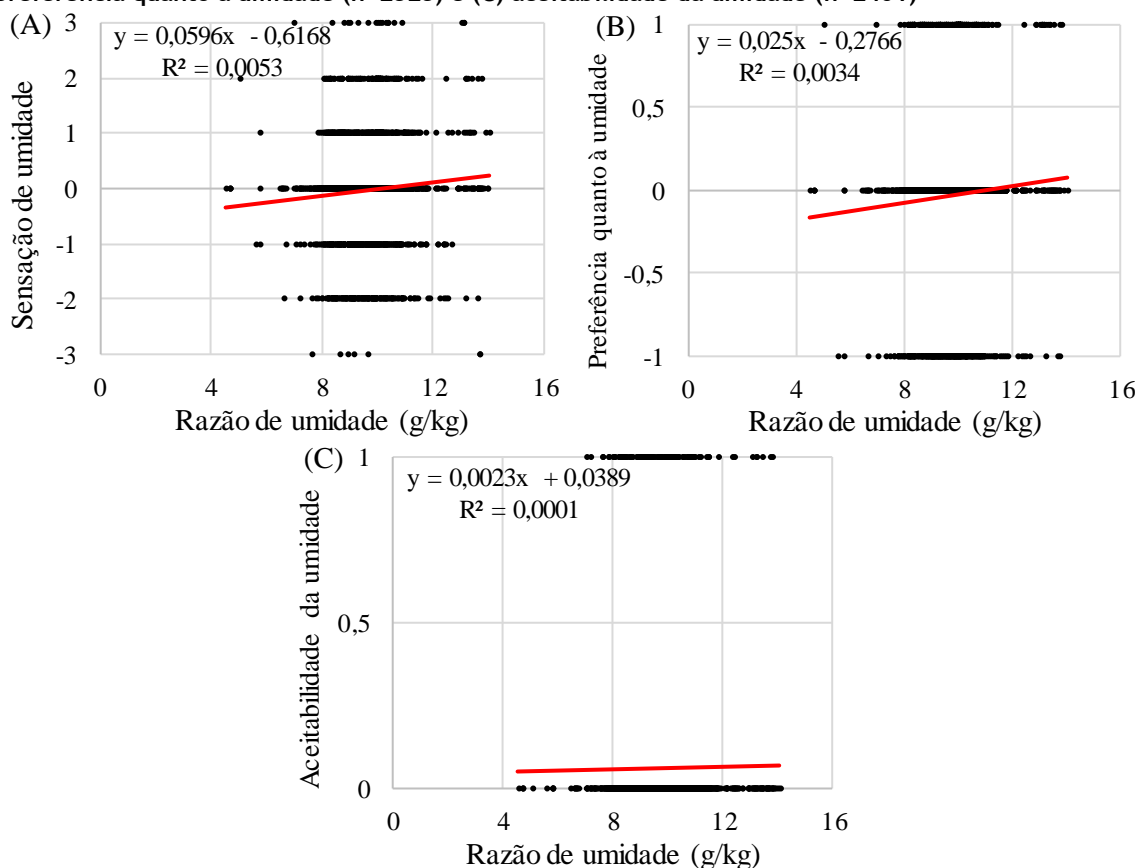
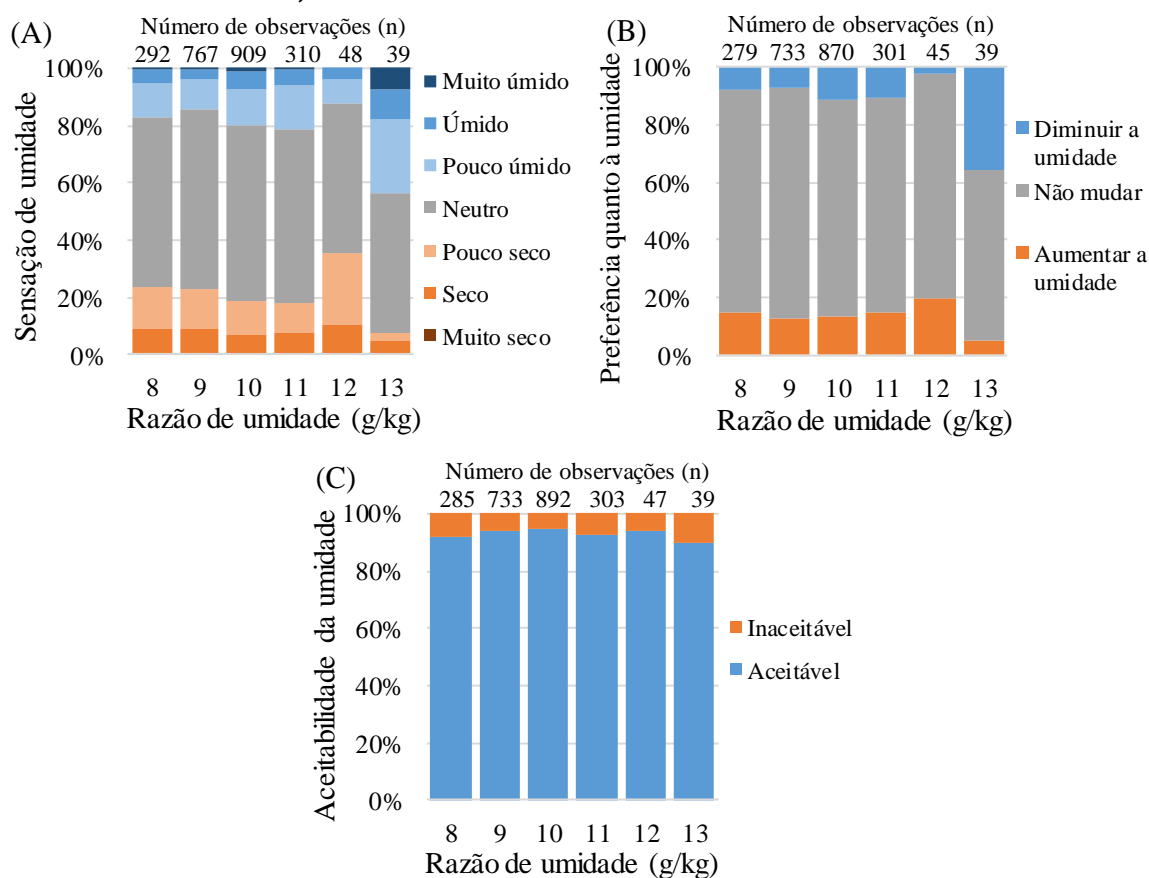


Figura 9 - Distribuição dos votos de (A) sensação de umidade, (B) preferência quanto à umidade e (C) aceitabilidade da umidade, de acordo com a razão de umidade



Visto que a umidade do ar em Florianópolis é elevada durante o ano todo (Figura 2) devido à proximidade com o mar, é possível que os usuários apresentem menor sensibilidade e melhor adaptabilidade às condições de umidade locais (GIVONI *et al.*, 2006; KONG *et al.*, 2019). Além disso, destaca-se que, para elevados valores de temperatura do ar, os ocupantes optaram por utilizar o sistema de ar-condicionado, que reduz a umidade do ambiente. Assim, problemas de desconforto térmico apontados em outros estudos (BUONOCORE *et al.*, 2018; JING *et al.*, 2013; ZHAI *et al.*, 2013) associados a altas umidades com temperaturas elevadas não foram observados neste trabalho.

Analisou-se também a distribuição dos votos de sensação de umidade e preferência quanto à umidade de acordo com o tipo de edificação e modo de operação, para os usuários em conforto e desconforto térmico, conforme mostram as Tabelas 5 e 6. Pode-se observar que os ocupantes em conforto térmico apresentaram votos de sensação de umidade indicando ambiente predominantemente neutro ou pouco úmido/seco e elevada preferência por não mudar a umidade. Para os usuários em desconforto térmico, apesar de haver distribuição mais uniforme dos dados de sensação de umidade, a maioria dos votos também se concentra em sensação de ambiente neutro ou pouco úmido/seco. Em relação à preferência quanto à umidade, houve distribuição mais uniforme de dados para os usuários em desconforto térmico. Os ocupantes de edificações híbridas operando com ventilação natural apresentaram maior percentual de votos indicando ambiente úmido e preferência por diminuir a umidade, em comparação aos votos indicando ambiente seco e preferência por aumentar a umidade, tanto para conforto quanto desconforto térmico. O oposto foi verificado nas edificações híbridas no modo de operação por ar-condicionado e na edificação com sistema central de ar-condicionado. Destaca-se que para os ocupantes em desconforto térmico, em comparação àqueles em conforto térmico, houve porcentagem superior de respostas “Não sei responder” para sensação e preferência quanto à umidade. Portanto, nota-se significativa influência da sensação de umidade e da preferência quanto à umidade sobre o conforto térmico.

Tabela 5 - Distribuição dos votos de sensação de umidade de acordo com o tipo de edificação e modo de operação para os usuários em conforto e desconforto térmico

Edificação		Conforto térmico			Desconforto térmico		
		Híbridas		CC	Híbridas		CC
Sensação de umidade		VN n=988	AC n=730	AC n=503	VN n=146	AC n=145	AC n=106
+3	Muito úmido	0,8%	0,1%	0,0%	3,4%	3,4%	0,0%
+2	Úmido	6,9%	0,8%	1,2%	19,2%	6,9%	3,8%
+1	Pouco úmido	17,3%	7,1%	3,0%	22,6%	14,5%	5,7%
0	Neutro	57,8%	62,5%	64,0%	17,1%	30,3%	45,3%
-1	Pouco seco	7,9%	12,3%	16,3%	11,0%	11,7%	23,6%
-2	Seco	3,2%	8,6%	6,4%	13,0%	16,6%	13,2%
-3	Muito seco	0,1%	0,1%	0,2%	0,7%	1,4%	0,9%
	"Não sei responder"	6,0%	8,4%	8,9%	13,0%	15,2%	7,5%

Tabela 6 - Distribuição dos votos de preferência quanto à umidade de acordo com o tipo de edificação e modo de operação para os usuários em conforto e desconforto térmico

Edificação		Conforto térmico			Desconforto térmico		
		Híbridas		CC	Híbridas		CC
Preferência quanto à umidade		VN n=988	AC n=730	AC n=503	VN n=146	AC n=145	AC n=106
+1	Diminuir a umidade	13,2%	2,9%	1,5%	32,9%	11,7%	5,7%
0	Não mudar	72,5%	77,1%	68,7%	30,1%	40,0%	43,4%
-1	Aumentar a umidade	5,8%	9,0%	17,1%	20,5%	24,1%	27,4%
	"Não sei responder"	8,6%	11,0%	12,8%	16,4%	24,1%	23,6%

Conclusão

Este trabalho discutiu os resultados de um estudo de campo conduzido em escritórios situados no clima subtropical úmido de Florianópolis, SC, que envolveu 2644 medições de variáveis ambientais e antropométricas, em duas edificações híbridas e uma edificação com sistema central de ar-condicionado. Nas edificações híbridas, observou-se média de temperatura externa do ar inferior e média de isolamento da vestimenta superior para o modo de operação por ventilação natural em comparação ao modo de operação por ar-condicionado, o que confirmou a predominância do uso de ventilação natural em estações intermediárias e no inverno.

De modo geral, em todas as edificações e modos de operação, a maior parte dos usuários considerou a sensação térmica e a preferência térmica neutras, além de ambiente térmico aceitável e confortável (mais de 80% dos votos). Assim, constatou-se que as edificações híbridas proporcionam condições térmicas semelhantes às edificações com sistema central de ar-condicionado. Em relação à umidade do ar, a maioria dos dados indicou sensação de umidade neutra e preferência por não mudar a umidade, além de aceitabilidade da umidade superior a 80% nas três edificações. Além disso, verificou-se maior quantidade de votos indicando ambiente úmido e preferência por diminuir a umidade nas edificações híbridas no modo de operação por ventilação natural. O oposto foi observado nas edificações híbridas operando com ar-condicionado, o que pode ser justificado pela redução da umidade do ar por aparelhos de ar-condicionado.

Os resultados obtidos apontaram que a razão de umidade e a pressão parcial de vapor da água apresentam relação linear entre si que pode ser expressa por uma equação simplificada, válida para as condições deste estudo a nível do mar. Também se observou que a elevação da temperatura do ar e da sensação térmica está relacionada à redução da umidade relativa e ao aumento da razão de umidade. A partir disso, confirmou-se que a razão de umidade é a variável que melhor representa a umidade do ar. Assim, apesar de a umidade relativa ser mais frequentemente utilizada em estudos sobre conforto térmico, recomenda-se o uso da razão de umidade em pesquisas futuras.

De modo geral, não se identificou significativa influência da razão de umidade sobre a percepção térmica. Por outro lado, houve concordância entre a variação da razão de umidade e as respostas subjetivas de sensação, preferência e aceitabilidade da umidade, existindo leve relação entre essas variáveis. Além disso,

os resultados apontaram significativa influência da sensação de umidade e da preferência quanto à umidade sobre o conforto térmico. Portanto, percebe-se a necessidade de serem realizados novos estudos a respeito do efeito da umidade do ar na percepção térmica e na percepção quanto à umidade do ar, principalmente em locais de clima quente ou subtropical e úmido.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações: parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO. **O uso do ar-condicionado e o consumo de energia elétrica**. 2013. Disponível em: <http://abrava.com.br/?p=11091>. Acesso em: 10 out. 2019.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas (1981-2010)**. Brasília, 2018.
- BUONOCORE, C. *et al.* Influence of relative air humidity and movement on human thermal perception in classrooms in a hot and humid climate. **Building and Environment**, v. 146, p. 98-106, 2018.
- CHOW, T. T. *et al.* Thermal sensation of Hong Kong people with increased air speed, temperature and humidity in air-conditioned environment. **Building and Environment**, v. 45, n. 10, p. 2177-2183, 2010.
- DAMIATI, S. A. *et al.* Field study on adaptive thermal comfort in office buildings in Malaysia, Indonesia, Singapore, and Japan during hot and humid season. **Building and Environment**, v. 109, p. 208-223, 2016.
- GIVONI, B. *et al.* Thermal sensation responses in hot, humid climates: effects of humidity. **Building Research and Information**, v. 34, n. 5, p. 496-506, 2006.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7726**: ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities. 2nd. ed. Geneva, 1998.
- JING, S. *et al.* Impact of relative humidity on thermal comfort in a warm environment. **Indoor and Built Environment**, v. 22, n. 4, p. 598-607, 2013.
- KONG, D. *et al.* Effects of indoor humidity on building occupants' thermal comfort and evidence in terms of climate adaptation. **Building and Environment**, v. 155, p. 298-307, 2019.
- LI, C. *et al.* Seasonal effect of humidity on human comfort in a hot summer/cold winter zone in China. **Indoor and Built Environment**, v. 28, n. 2, p. 264-277, 2019.
- NICOL, F.; HUMPHREYS, M.; ROAF, S. **Adaptive thermal comfort principles and practice**. Abingdon: Routledge, 2012.
- QI, Y. *et al.* Large-scale and long-term monitoring of the thermal environments and adaptive behaviors in Chinese urban residential buildings. **Building and Environment**, v. 168, artigo 106524, 2020.
- RIJAL, H. B.; HUMPHREYS, M.; NICOL, F. Adaptive thermal comfort in Japanese houses during the summer season: behavioral adaptation and the effect of humidity. **Buildings**, v. 5, n. 3, p. 1037-1054, 2015.
- RUPP, R. F. **Conforto térmico humano em edificações de escritórios localizadas no clima subtropical úmido de Florianópolis/SC**. Florianópolis, 2018. 289 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- RUPP, R. F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica através do uso da luz natural e da ventilação híbrida em edifícios comerciais em Florianópolis. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 75-86, out./dez. 2013.
- TOFTUM, J.; JORGENSEN, A. S.; FANGER, P. O. Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin. **Energy and Buildings**, v. 28, n. 1, p. 1-13, 1998.
- TSUTSUMI, H. *et al.* Effect of humidity on human comfort and productivity after step changes from warm and humid environment. **Building and Environment**, v. 42, n. 12, p. 4034-4042, 2007.
- WAGNER, A. *et al.* Thermal comfort and workplace occupant satisfaction – Results of field studies in German low energy office buildings. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 7, p. 758-769, 2007.

ZHAI, Y. *et al.* Comfort under personally controlled air movement in warm and humid environments. **Building and Environment**, v. 65, p. 109-117, 2013.

ZHAI, Y. *et al.* Selecting air speeds for cooling at sedentary and non-sedentary office activity levels. **Building and Environment**, v. 122, p. 247-257, 2017.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem ao CNPq pelos recursos investidos nesta pesquisa.

Candi Citadini de Oliveira

Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações | Universidade Federal de Santa Catarina | Trindade | Florianópolis - SC - Brasil | Caixa Postal 476 | CEP 88040-970 | Tel.: (48) 3721-2115 | E-mail: candi.c.oliveira@gmail.com

Ricardo Forgiarini Rupp

Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações | Universidade Federal de Santa Catarina | E-mail: ricardorupp@gmail.com

Enedir Ghisi

Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações | Universidade Federal de Santa Catarina | E-mail: enedir.ghisi@ufsc.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

Fax: +55 (51) 3308-4054

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.