



XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído

JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

CONTROLE DE OPERAÇÃO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS COM VENTILAÇÃO HÍBRIDA: UMA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO USUÁRIO

Eduardo Rodrigues Quesada (1); Leticia de Oliveira Neves (2)

(1) Graduando de Engenharia Civil na Universidade Estadual de Campinas, edurquesada@gmail.com

(2) Professora Doutora do Departamento de Arquitetura e Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, leticia@fec.unicamp.br, Universidade Estadual de Campinas, Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária, Campinas, SP, CEP 13083-889, Tel.: (19) 3521-2384

RESUMO

Edifícios que aliam o uso do ar-condicionado com a ventilação natural, também conhecidos como edifícios com modo-misto de ventilação, têm sido recorrentemente pesquisados ao longo das últimas duas décadas, em função de seu grande potencial de economia de energia. Sob a promessa de garantir conforto térmico a um baixo consumo energético, tais edificações enfrentam o desafio de ter o comportamento de seu usuário pouco conhecido e uma lacuna em normas internacionais, no que diz respeito a modelos de conforto térmico que atendam às suas especificidades. Este artigo relata a pesquisa de campo desenvolvida por meio de quatro rodadas de medição, compreendidas no intervalo de um ano, em três saletas comerciais de edifícios híbridos localizados na cidade de São Paulo, tendo por objetivo analisar o comportamento do usuário em edifícios de escritórios de modo misto, em situações em que se provê total liberdade para que os usuários do ambiente abram/fechem as janelas e/ou operem o equipamento de ar-condicionado. Variáveis climáticas internas foram monitoradas, assim como a operação do ar-condicionado e da ventilação natural por parte dos usuários. Os dados monitorados foram comparados com os modelos preditivos de conforto térmico das normas ASHRAE 55-2017 e EN 15251-2007, de forma a identificar que modelo de conforto melhor representa a situação encontrada. Como resultados, observaram-se: semelhança entre os *setpoints* adotados para os períodos de uso do ar-condicionado e da ventilação natural; usuários passivos em suas interações com as estratégias de climatização (poucas alterações entre os sistemas ao longo do dia); inadequação do modelo estático de conforto térmico e boa compatibilidade do modelo adaptativo, em comparação com os dados aferidos, podendo-se considerar as vertentes das normas ASHRAE 55-2017 e EN 15251-2007 igualmente eficazes.

Palavras-chave: comportamento do usuário, modelos preditivos de conforto térmico, edifícios de escritórios, ventilação híbrida.

ABSTRACT

Buildings that combine the use of air conditioning with natural ventilation, also known as mixed-mode ventilated buildings, have been a recurrent subject of research over the past two decades, due to its great potential for energy saving. Under the promise of ensuring thermal comfort at a low energy consumption, these constructions face the challenge of having its occupant behavior barely known and a gap in international standards, concerning thermal comfort models that fulfill its specificities. This paper reports the field research developed through four measurement rounds, comprised within the interval of one year, of three office rooms from mixed-mode buildings located in the city of São Paulo, aiming to analyze and understand occupant behavior in buildings where users are able to freely operate both windows and air-conditioning equipment. Indoor environmental variables were monitored, as well as user control variables (manual operation of air-conditioning and natural ventilation systems). Measured data were compared with predictive thermal comfort models from ASHRAE 55-2017 and EN 15251-2007, in order to identify which thermal comfort model best represents the situation found. The results observed were: similar setpoints adopted for air-conditioned and naturally ventilated periods; passive users regarding interactions with ventilation strategies (few alterations between both systems during the day); inadequacy of the static model

and good compatibility of the adaptive model, being possible to consider the strands from ASHRAE 55-2017 and EN 15251-2007 equally effective.

Keywords: occupant behavior, predictive thermal comfort models, office buildings, mixed-mode ventilation.

1. INTRODUÇÃO

Os edifícios com modo-misto de ventilação (MMV) têm sido recorrentemente pesquisados ao longo das últimas duas décadas, demonstrando haver um esforço acadêmico para não só popularizar essa tipologia construtiva, por conta de suas vantagens, como também para preencher lacunas científicas a respeito da mesma. Sabe-se que as edificações híbridas são uma ótima solução para promover resfriamento, ar fresco, qualidade do ar interno e conforto térmico para seus usuários (BRAGER et al., 2000). Tais benefícios são obtidos aliando os sistemas de ventilação natural (VN) e mecânica, o que os torna mais confortáveis para os usuários do que as tipologias que funcionam apenas com ventilação natural e ainda garante menor consumo de energia com relação a edifícios que operam apenas com ar-condicionado (AC).

No entanto, apesar das diversas vantagens, pouco se sabe sobre o comportamento dos usuários e o perfil de uso dessas edificações. Algumas das principais normas internacionais que tratam da temática do conforto no ambiente construído (ASHRAE, 2017; ISO, 2005; CEN, 2007) não abordam tal estratégia e/ou não são específicas ao definirem requisitos para operação e estratégias de controle dessas edificações. Essa limitação normativa afeta a eficácia de simulações computacionais que visam estabelecer o consumo energético dessa tipologia construtiva, sendo comum encontrar consideráveis divergências entre as demandas reais dos prédios e o que apontam os resultados obtidos por *softwares* (ANDERSEN et al., 2007; HALDI & ROBINSON, 2008; SCHWEIKER & SHUKUYA, 2009; FABI et al., 2013).

Nesse contexto, diversas revisões literárias investigaram a produção acadêmica sobre edifícios híbridos e os respectivos modelos preditivos comumente utilizados (BORGESON & BRAGER, 2008; FABI et al., 2012; GUNAY et al., 2013; SALCIDO et al., 2016). O que se encontra recorrentemente em artigos científicos é o emprego dos modelos adaptativo e estático de conforto térmico, utilizando as normas internacionais ASHRAE 55 (2017) e EN 15251 (2007) como referências prescritivas de tais modelos, para uma análise de sua compatibilidade com dados oriundos de medições de campo nas edificações com modo misto de ventilação. Como resultados, alguns pesquisadores sugerem o uso do modelo teórico adaptativo (DEUBLE & de DEAR, 2012; FU & WU, 2015), outros o recomendam só para os períodos de uso da ventilação natural (RUPP & GHISI, 2017; RUPP et al., 2018) e há trabalhos que vão além e apontam para a inadequação da aplicação do modelo estático nessa tipologia construtiva (DEUBLE & de DEAR, 2012).

Tendo em vista a necessidade de mais estudos de campo com edificações que associam os sistemas de ar-condicionado e ventilação natural (ACKERLY et al., 2011), este artigo visa contribuir com a discussão da aplicabilidade dos modelos teóricos de conforto térmico em edifícios com modo misto de ventilação e com a investigação do comportamento do usuário dessas edificações. Para isso, apresentam-se os resultados da pesquisa de campo desenvolvida em três escritórios comerciais de edifícios de modo misto localizados na cidade de São Paulo, onde o clima é subtropical úmido, em que foram monitoradas variáveis climáticas internas e a livre operação dos sistemas de ar-condicionado e ventilação natural (operação de janelas) pelos usuários. Vale ressaltar que este artigo dá sequência ao trabalho iniciado por Neves et al. (2018), em que já havia sido feita uma análise de amostra parcial dos dados.

2. OBJETIVO

Este artigo tem por objetivo identificar que modelo preditivo de conforto térmico melhor se adequa ao padrão de uso verificado por medições de campo em edifícios de escritórios de modo misto, em situações em que há total liberdade para que os ocupantes do ambiente abram/fechem as janelas e/ou operem o equipamento de ar-condicionado.

3. MÉTODO

Esta pesquisa fundamenta-se em um estudo de caso realizado por meio de medições em campo. Para levantamento dos dados requeridos, quatro rodadas de medições de campo, uma em cada estação do ano, foram realizadas em três salas comerciais de edifícios de escritórios de modo-misto localizados na cidade de São Paulo, onde o clima característico é o subtropical úmido. No monitoramento, foram aferidos os valores de variáveis climáticas internas e foi monitorado o comportamento dos usuários das salas com relação ao uso do aparelho de ar-condicionado e do sistema de ventilação natural (janelas operáveis). O estudo será explicado em detalhes nos subitens a seguir.

3.1. Saletas comerciais

A seleção dos escritórios que seriam objeto de estudo desta pesquisa baseou-se no banco de dados elaborado por Neves et al. (2017), que contém informações sobre 153 edificações de escritórios com modo misto de ventilação localizadas em São Paulo. Após contato com os proprietários, três saletas comerciais foram escolhidas, sendo duas delas pertencentes a um mesmo edifício.

O escritório 01 fica no 4º andar de uma edificação de 13 andares (Figuras 1a e 2a), tem área de 25 m², ventilação unilateral com orientação Noroeste e ar-condicionado tipo janela. O escritório 02 encontra-se no 6º andar dessa mesma edificação, possui área de 33 m², ventilação natural cruzada nas fachadas de orientação Nordeste e Noroeste e ar-condicionado tipo janela. O escritório 03 localiza-se no 4º andar de uma edificação de 11 andares (Figuras 1b e 2b), tem área de 29 m², ventilação unilateral voltada para a fachada de orientação Sudoeste e aparelho de ar-condicionado tipo *split*.

Em todos os escritórios, o modelo das janelas é máximo ar e os usuários possuem completa liberdade para operar tanto o sistema de ar-condicionado quanto o de ventilação natural, em modo concorrente, a qualquer momento.



Figura 1 – Edifícios monitorados: (a) escritórios 01 e 02 (4º e 6º andar, respectivamente); (b) escritório 03 (4º andar).



Figura 2 – Plantas do pavimento-tipo dos edifícios monitorados: (a) escritórios 01 e 02; (b) escritório 03.

3.2. Monitoramento de campo

O monitoramento de campo foi realizado em quatro períodos, escolhidos de forma que houvesse uma rodada de medições para cada estação do ano. Nessas quatro rodadas, foram aferidas as seguintes variáveis climáticas internas: temperatura do ar, temperatura de globo, velocidade do ar e umidade relativa do ar. Foram também monitoradas as variáveis de controle do usuário sobre os sistemas de ar-condicionado e ventilação natural (janelas operáveis). A Figura 3 apresenta a planta das saletas comerciais monitoradas, sendo a legenda de ícones coloridos referente ao posicionamento dos equipamentos de medição das variáveis climáticas internas, do sensor de monitoramento da operação da janela para ventilação natural e do sensor de monitoramento da operação do aparelho de ar-condicionado.

A Tabela 1 apresenta os equipamentos utilizados nas medições e suas localizações em cada escritório. Um sensor de estado foi utilizado para monitorar a operação das janelas e um *datalogger* de temperatura do ar e umidade relativa foi fixado nas aletas do aparelho de ar-condicionado e programado para realizar registros a cada 5 minutos, de modo a permitir a identificação dos instantes de acionamento do aparelho. Os demais equipamentos foram montados em um tripé, posicionado próximo a um canto da sala (onde não atrapalhasse o uso cotidiano da mesma), a uma altura de 1,10 m do piso (correspondente à altura da cabeça

de uma pessoa sentada ou do abdômen de uma pessoa em pé) e protegidos de exposição direta à luz solar. As medições foram realizadas a cada 15 minutos.

As variáveis climáticas externas tiveram seus valores coletados a partir da base *online* de uma estação meteorológica automática localizada a pouco menos de 10 km dos edifícios (INMET, 2018). Um resumo das particularidades de cada rodada de medições é apresentado a seguir, na Tabela 2.

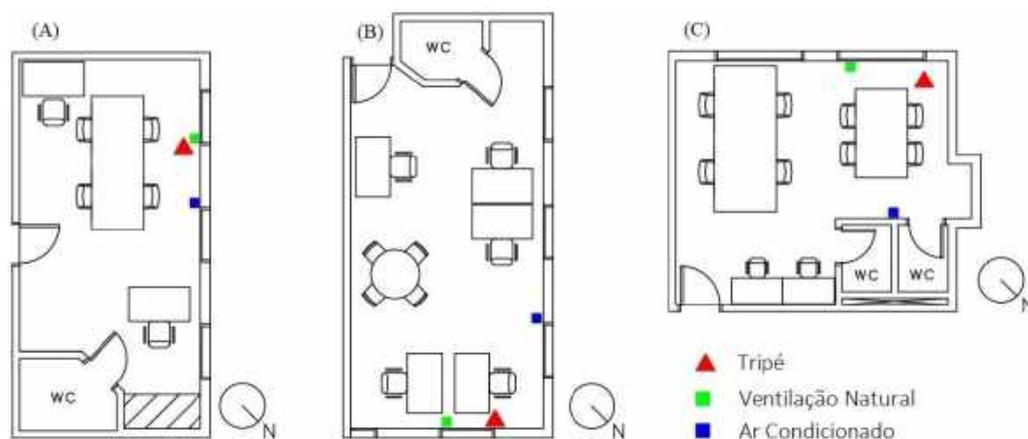


Figura 3 – Salas comerciais monitoradas: (a) escritório 01; (b) escritório 02; (c) escritório 03.

Tabela 1 – Especificações técnicas dos equipamentos usados nas medições de campo.

Equipamento	Intervalo de medição	Precisão
Datalogger de temperatura e umidade relativa do ar	-20 °C até +55 °C 0 até 100%	± 0,4 °C ± 2%
Datalogger de temperatura do ar (para temperatura de globo)	-35 °C até +55 °C	± 0,5 °C
Datalogger de temperatura e velocidade do ar	1 até +20 m/s	± (0,03 m/s + 5%)
Sonda de velocidade do ar	0 até +10 m/s	± (0,03 m/s + 5%)
Sonda de temperatura do ar	-50 °C até +125 °C	± 0,2 °C
Datalogger de temperatura e umidade relativa do ar (para monitorar operação do ar-condicionado)	-20 °C até +85 °C 0 até +100 %	± 0,5 °C 0,60%
Datalogger sensor de estado (para monitorar operação das janelas)	Frequência máxima 1 Hz	± 1 minuto por mês a 25 °C

Tabela 2 – Principais informações sobre o monitoramento de campo.

Estação	Período de Monitoramento	Taxa metabólica (met)	Vestimenta (clo)
Inverno	20 de junho a 02 de julho de 2017	1,20	0,97
Primavera	03 a 26 de outubro de 2017		0,55
Verão	19 de janeiro a 05 de fevereiro de 2018		0,45
Outono	04 a 18 de abril de 2018		0,57

Os valores adotados para taxa metabólica correspondem a atividades de escritório (ASHRAE, 2017) e os valores adotados para vestimenta foram calculados a partir de observações em campo. Como velocidade do ar interna, adotou-se o valor médio de 0,05 m/s para todas as rodadas do monitoramento, uma vez que os valores de medição obtidos eram extremamente baixos. Vale ressaltar que o padrão horário considerado ao longo de todas as medições e por todos os equipamentos foi o solar, ignorando-se o horário de verão.

3.3. Análise dos dados

Por meio das prescrições da norma ASHRAE 55 (2017), calcularam-se a temperatura radiante média e a temperatura operativa com auxílio dos dados climáticos internos aferidos. Procedeu-se, então, com a organização de todos os dados em tabelas e a extração das análises gráficas, as quais viabilizaram traçar um perfil de uso para os edifícios comerciais de modo-misto analisados.

3.4. Modelos preditivos de conforto térmico

Os intervalos de conforto estabelecidos pelos modelos de predição estático e adaptativo foram comparados com os dados coletados em campo. Para tal verificação, utilizaram-se como base a norma americana ASHRAE 55 (2017) e a norma europeia EN 15251 (2007). Para o cálculo dos índices de Fanger (1970), fez-se uso da calculadora *online* “Thermal Comfort Tool” do Center for the Built Environment (CBE, 2018).

Para o cálculo das temperaturas externas usadas pelo modelo adaptativo de ambas as normas, foi utilizada a Equação 1 a seguir (ASHRAE, 2017; CEN, 2007).

$$T_{mep} = (1 - \alpha) \times \{T_{ed-1} + \alpha \times T_{ed-2} + \alpha^2 \times T_{ed-3} \dots\} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

α é uma constante entre 0 e 1, adotada como sendo 0,8 por recomendação das normas;

T_{ed-n} é a temperatura média externa diária de n dias atrás, para $1 \leq n \leq 7$ [°C];

T_{mep} é a temperatura média externa predominante ou média externa exponencialmente ponderada [°C].

O cálculo dos limites superior e inferior de temperatura operativa, utilizados como base para avaliação pelo modelo adaptativo, variam de acordo com cada uma das normas. A Equação 2 refere-se ao que prescreve a norma ASHRAE 55 (2017) e a Equação 3 é indicada pela EN 15251 (2007), na qual foi considerada a categoria III (edifícios já existentes) para as edificações monitoradas. Ambas as normas preveem um índice mínimo de 80% de ocupantes satisfeitos.

$$LS / LI(80\%) = 0,31 \times T_{mep} + 17,8 \pm 3,5 \quad \text{Equação 2}$$

$$LS / LI(80\%) = 0,33 \times T_{mep} + 18,8 \pm 4,0 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

T_{mep} é a temperatura média externa predominante calculada pela Equação 1 [°C];

LS/LI(80%) são os limites superior e inferior para 80% de aceitabilidade dos usuários [°C].

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Variáveis climáticas e perfil de usuário

Com base nos dados horários de períodos em que o ar-condicionado ou a ventilação natural estiveram em funcionamento, extraíram-se as seguintes análises estatísticas da amostra: média, desvio padrão (DP), mínimo (Mín) e máximo (Máx). O resultado, apresentado na Tabela 3, evidencia a semelhança entre as condições climáticas internas que levam ao uso de ambos os sistemas; contudo, a ventilação natural é recorrente em um intervalo mais abrangente de temperaturas externas. A Figura 4, também referente aos períodos estiveram acionados o ar-condicionado ou a ventilação natural (janelas abertas), mostra boa correlação entre a temperatura operativa interna e a temperatura externa, para o uso da ventilação natural ($R^2 = 0,5648$ – Figura 4a), o que não é válido para os dados de ar-condicionado ($R^2 = 0,0131$ – Figura 4b).

Tabela 3 – Síntese estatística das principais variáveis climáticas para os períodos de uso do ar-condicionado (AC), da ventilação natural (VN) e de ambos combinados.

Parâmetro	Período AC (N = 484 h)				Período VN (N = 237 h)				Períodos combinados	
	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP
TBS (°C)	24,31	1,42	20,88	30,23	24,40	2,05	20,00	29,10	24,34	1,65
TRM (°C)	24,09	1,65	20,53	33,11	24,66	2,26	19,79	30,67	24,28	1,89
Top (°C)	24,20	1,51	20,75	31,28	24,53	2,15	19,89	29,89	24,31	1,75
UR (%)	47,11	8,34	31,38	70,95	61,38	7,41	44,30	81,98	51,80	10,47
Text (°C)	24,98	4,19	13,20	34,60	21,08	3,90	13,40	30,20	23,70	4,49

TBS = temperatura de bulbo seco interna, TRM = temperatura radiante média, Top = temperatura operativa, UR = umidade relativa do ar, Text = temperatura externa do ar.

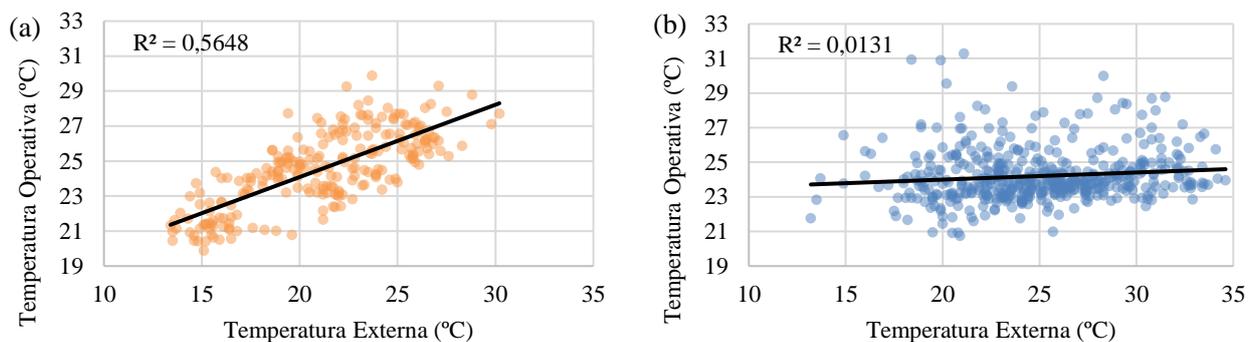


Figura 4 – Temperatura externa *versus* temperatura operativa interna: (a) período de uso da ventilação natural (VN); (b) período de uso do ar-condicionado (AC).

Visando compreender o efeito da sazonalidade no *setpoint* de temperatura operativa, a Figura 5 apresenta um diagrama de caixa dividido por tipo de sistema (ar-condicionado ou ventilação natural) e por estação do ano. Podem ser observadas alterações sazonais predominantemente nos períodos de uso da ventilação natural (janelas abertas), quando os indicadores gráficos de média, mediana, mínimo e máximo cobrem um maior espectro de temperaturas.

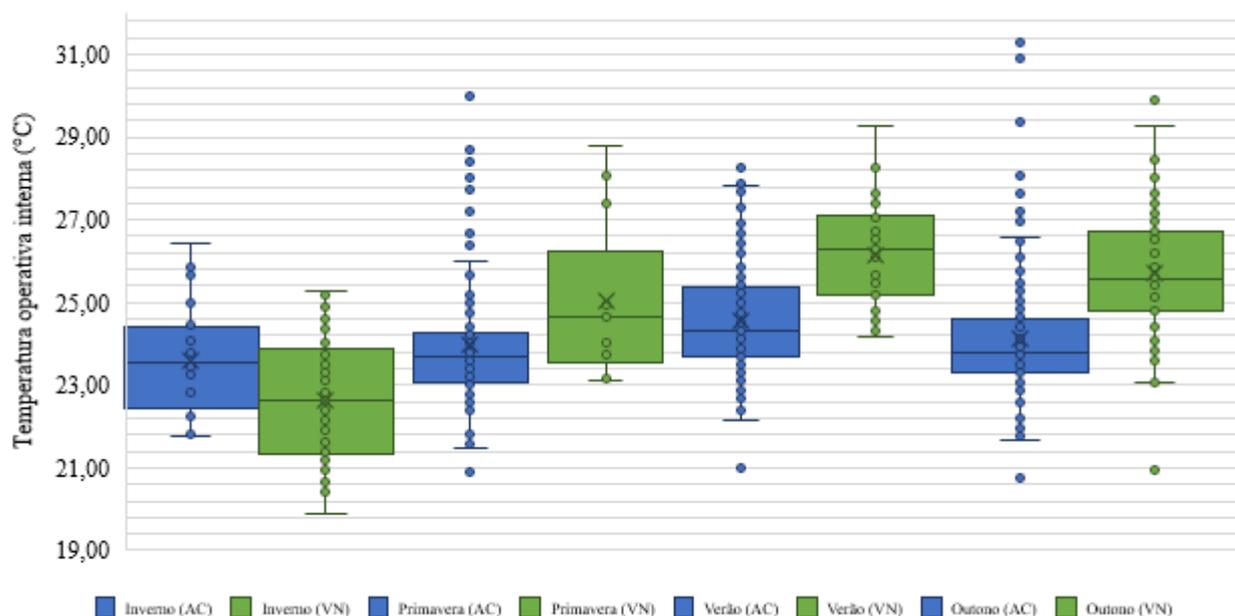


Figura 5 – Análise estatística da temperatura operativa interna ao longo dos períodos de uso do ar-condicionado (AC) e da ventilação natural (VN) para cada uma das estações do ano monitoradas. As linhas horizontais internas representam a mediana, as externas representam o mínimo e o máximo, as extremidades das caixas são o primeiro e o terceiro quartis, o “x” é a média e os pontos são os *outliers*.

A Figura 6 apresenta a frequência com que cada sistema esteve acionado nas diferentes horas do dia, visando melhor investigar o comportamento do usuário ao longo do dia. Observa-se um pico de uso do aparelho condensador de ar-condicionado entre 14 e 15 h, o que coincide com o período do dia em que as temperaturas externas são mais altas. Em contrapartida, no caso da ventilação natural, nota-se uma queda no acionamento desse sistema nesse mesmo horário, mas há uma incidência quase constante de seu uso nas demais horas, entre 11 e 18 h. Verifica-se, assim, que a operação do sistema de ar-condicionado está correlacionada com os horários do dia em que a temperatura externa é mais elevada. O uso da ventilação natural (abertura de janelas), por sua vez, é distribuído mais uniformemente ao longo do dia.

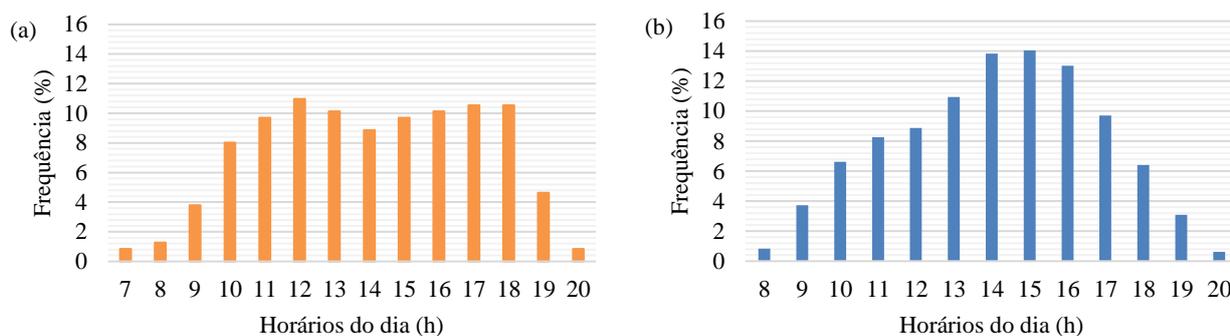


Figura 6 – Distribuição de frequência do uso de cada sistema nas diferentes horas do dia: (a) período de uso da ventilação natural (VN); (b) período de uso do ar-condicionado (AC).

Com o intuito de investigar a atividade e/ou passividade dos usuários das saletas comerciais monitoradas – isto é, o quanto eles interagem com os sistemas no ambiente de trabalho – analisou-se quantas vezes ao dia os ocupantes ligam ou desligam os sistemas de ar-condicionado e/ou ventilação natural e, depois de acionados, por quanto tempo os sistemas permanecem em operação ininterrupta. Os resultados destas análises são apresentados na Figura 7, correspondendo aos dados de acionamento tanto do ar-condicionado como das janelas operáveis e considerando apenas os dias em que houve pelo menos uma interação com algum dos sistemas.

Pelos gráficos, nota-se que na maioria dos dias (89%) houve, no máximo, duas interações dos usuários com os sistemas de climatização do escritório (Figura 7a). Além disso, verifica-se que, apesar de haver uma distribuição relativamente uniforme das durações de uso de algum dos sistemas, entre 1 e 12 h (Figura 7b), as maiores frequências se dão para 8 e 9 h de operação ininterrupta, ou seja, um dia inteiro de trabalho. Ambos os resultados convergem para a constatação de que os usuários das salas monitoradas têm perfil de uso passivo das estratégias de climatização.

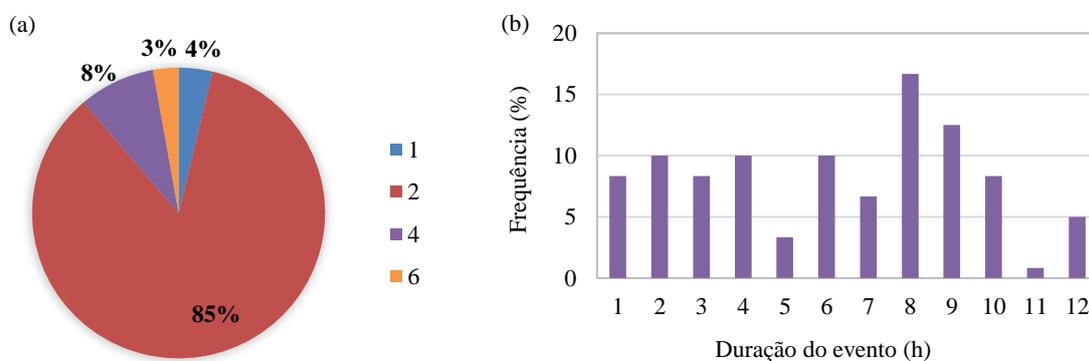


Figura 7 – Distribuição de frequência combinando os dados de ambos os sistemas: (a) quantidade de interações dos usuários com os sistemas de ar-condicionado e/ou ventilação natural ao longo do dia (liga/desliga ou abre/fecha); (b) quantidade de horas ininterruptas de operação de um sistema.

Para averiguar a veracidade dessa constatação, levantaram-se também os horários exatos de todos os instantes em que algum dos sistemas, ar-condicionado ou ventilação natural, foi ligado ou desligado. Os dados compilados são apresentados na Figura 8, onde as colunas amarelas se referem à ativação de um sistema e as cinzas à sua desativação. Apesar de haver frequências não desprezíveis em diversas horas do dia, nota-se o seguinte padrão: para a função ON, há dois picos, um às 9 h e outro às 13 h, horários de início da jornada diária e de almoço; já para a função OFF, há três picos, por volta de 12 h, 17 h e 19h30, respectivamente os horários de almoço e dois possíveis horários de fim da jornada diária de trabalho. Apesar destas constatações não serem conclusivas, já representam a identificação de uma tendência de intervir nas estratégias de ventilação dos escritórios prioritariamente em horários de chegada e saída dos mesmos. Isso reafirma o caráter passivo no perfil dos usuários aqui monitorados, ou seja, a pouca interação com o ambiente, em termos de conforto térmico, durante a atividade de trabalho.

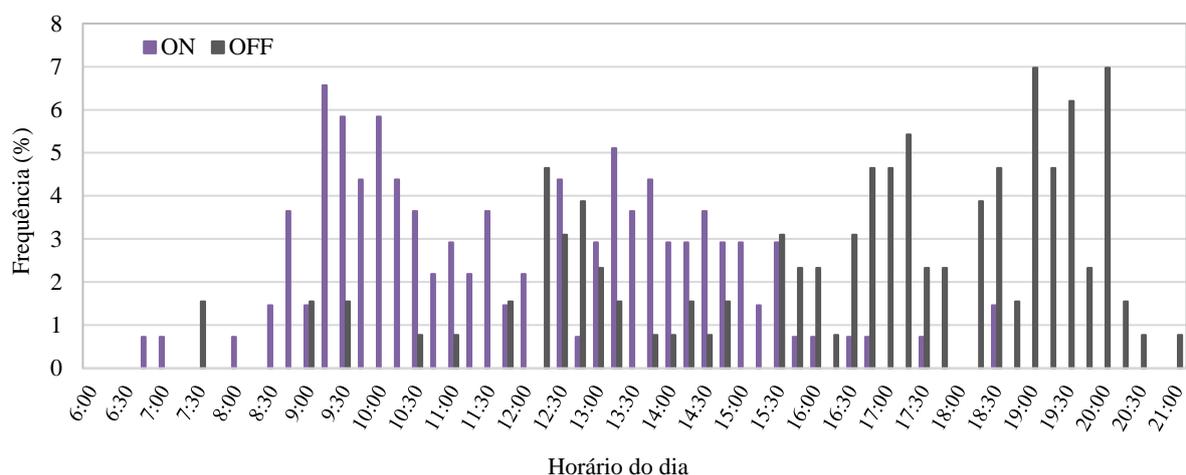


Figura 8 – Horários de acionamento (ON) e desligamento (OFF) dos sistemas de ar-condicionado (AC) ou ventilação natural (VN).

4.2. Modelos preditivos de conforto térmico

Considerando-se os modelos estático e adaptativo de conforto térmico prescritos tanto pela ASHRAE 55 (2017) quanto pela EN 15251 (2007), a amostra de dados levantada nesta pesquisa para os períodos de uso do ar-condicionado e da ventilação natural foi submetida aos critérios estabelecidos por tais normas internacionais, a fim de comparar os dados e identificar qual modelo preditivo melhor se aplica à realidade dos edifícios de escritórios com ventilação híbrida aqui monitorados. Vale ressaltar que esta análise parte do pressuposto que os usuários se encontravam em situação de conforto durante a operação de ambos os sistemas, o que não chegou a ser averiguado por meio de investigação direta com os ocupantes.

Para o modelo estático, a norma americana ASHRAE 55 (2017) estabelece como aceitável um percentual de pessoas insatisfeitas (*Predicted Percentage of Dissatisfied – PPD*) menor que 10%, enquanto a europeia EN 15251 (2007) estabelece um PPD menor que 15% para edificações de categoria III, que é o caso dos edifícios monitorados nesta pesquisa. No caso do modelo adaptativo, o critério de conforto das normas é o mesmo – a temperatura operativa deve se enquadrar entre os limites superior e inferior definidos para 80% de aceitabilidade – mas o que difere são as fórmulas que originam tais limites (Equações 2 e 3).

Os resultados obtidos – apresentados na Tabela 4 – indicam variações consideráveis nos resultados da aplicação dos diferentes modelos para cada estação do ano e para cada estratégia de climatização. Contudo, o modelo adaptativo se mostra mais aderente do que o estático em todas as estações e para os períodos de uso tanto do ar-condicionado quanto da ventilação natural. No conjunto anual de dados, conclui-se que o modelo estático europeu (CEN, 2007) é mais adequado que o americano (ASHRAE, 2017), mas a comparação entre os modelos adaptativos evidencia um empate entre as normas. A Figura 9 ilustra a comparação entre os modelos adaptativos.

Tabela 4 – Resumo estatístico dos cálculos de comparação entre os modelos estático e adaptativo das normas ASHRAE 55 (2017) e EN 15251 (2007) e os dados monitorados em campo para os períodos de uso do ar-condicionado (AC) e da ventilação natural (VN).

Estação	Modelo preditivo de conforto térmico	Período AC (N = 484 h)			Período VN (N = 237 h)		
		% de atendimento	Média	DP	% de atendimento	Média	DP
Inverno	Estático - ASHRAE (PMV)	65	0,41	0,28	65	0,31	0,30
	Estático - EN (PMV)	80			89		
	Adaptativo - ASHRAE (Top)	100	23,6	1,3	100	22,6	1,4
	Adaptativo - EN (Top)	100			93		
Primavera	Estático - ASHRAE (PMV)	88	-0,01	0,40	77	0,26	0,53
	Estático - EN (PMV)	92			77		
	Adaptativo - ASHRAE (Top)	97	24,0	1,4	92	25,0	1,9
	Adaptativo - EN (Top)	99			100		
Verão	Estático - ASHRAE (PMV)	83	0,05	0,39	41	0,52	0,36
	Estático - EN (PMV)	91			65		
	Adaptativo - ASHRAE (Top)	99	24,6	1,3	98	26,1	1,2
	Adaptativo - EN (Top)	98			100		
Outono	Estático - ASHRAE (PMV)	80	0,01	0,49	39	0,58	0,43
	Estático - EN (PMV)	90			62		

	Adaptativo - ASHRAE (Top)	95	24,2	1,8	96	25,7	1,6
	Adaptativo - EN (Top)	93			99		
Anual	Estático - ASHRAE (PMV)	83	0,03	0,43	52	0,45	0,39
	Estático - EN (PMV)	91			74		
	Adaptativo - ASHRAE (Top)	97	24,2	1,5	98	24,5	2,1
	Adaptativo - EN (Top)	97			97		

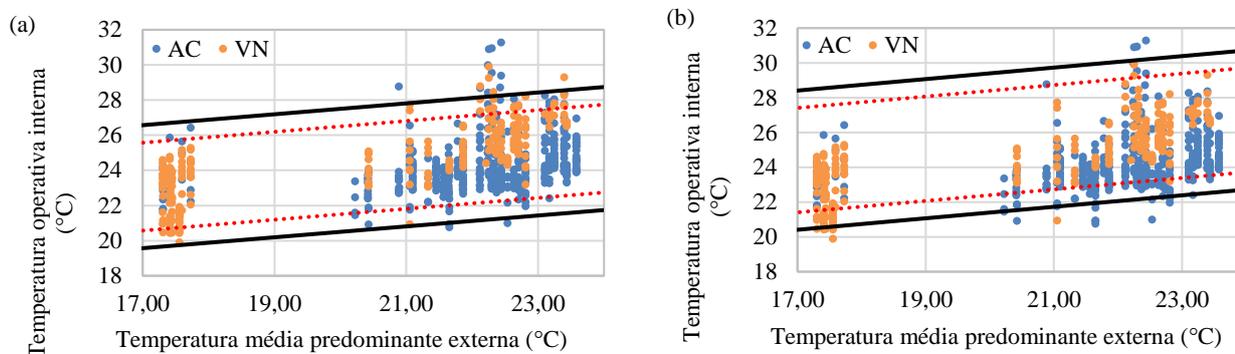


Figura 9 – Plotagem dos pontos do monitoramento dos períodos de uso do ar-condicionado (AC) e da ventilação natural (VN) sob as retas-limite de 80% (preta contínua) e 90% (vermelha tracejada) de aceitabilidade do modelo adaptativo das normas: (a) ASHRAE 55 (2017); (b) EN 15251 (2007).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Medições de campo foram realizadas sazonalmente em três saletas comerciais de edifícios de escritório que operam em modo misto, localizados da cidade de São Paulo. Com os resultados, analisou-se o comportamento do usuário com relação à operação dos sistemas de ventilação natural e de ar-condicionado e averiguou-se que modelo preditivo de conforto térmico melhor representa a realidade expressa pelos dados monitorados.

Com relação ao padrão de uso das estratégias de climatização, notou-se semelhança entre as condições climáticas nas quais foi atingido o conforto térmico para os períodos de uso do ar-condicionado e da ventilação natural, porém observa-se uma correlação entre a temperatura do ar externa e a temperatura operativa interna apenas para os períodos em que os ambientes encontravam-se naturalmente ventilados. A utilização do sistema de ar-condicionado se apresentou mais frequente nos horários mais quentes do dia, enquanto a ventilação natural teve seu uso distribuído quase uniformemente ao longo das horas do dia.

Quanto ao comportamento dos usuários, verificou-se um perfil passivo no que diz respeito ao uso das estratégias de climatização. Este perfil se mostrou consistente pelos seguintes fatores: baixo número de interações com os sistemas ao longo do dia, longos períodos de uso ininterrupto da mesma estratégia de climatização e tendência de concentração dos instantes de ativação e desativação do ar-condicionado e da ventilação natural nos momentos de chegada e saída do escritório.

Por fim, uma análise comparativa entre os modelos preditivos de conforto térmico e os dados monitorados em campo mostrou o modelo adaptativo de conforto como o mais adequado para representar a realidade das saletas monitoradas, com porcentagens de atendimento sempre superiores a 92%. Os resultados obtidos pela aplicação do modelo adaptativo da norma americana ASHRAE 55 (2017) e da europeia EN 15251 (2007) mostraram-se semelhantes. Já o modelo estático se mostrou inadequado para considerável parte do ano e, principalmente, para os períodos de uso das janelas operáveis (ventilação natural) – chegando a mostrar um atendimento em apenas 39% das situações, para a análise de outono. Dentre as duas opções de modelo estático analisadas, a norma europeia EN 15251 (2007) apresentou melhor aderência.

Os autores identificaram que, em futuras análises, seria interessante monitorar uma maior quantidade de salas comerciais, de forma a permitir traçar um perfil de uso típico desta tipologia de edificações e contribuir para a elaboração de estratégias de projeto e operação mais realistas e centradas no comportamento do usuário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERLY, K.; BAKER, L.; BRAGER, G. Window use in mixed-mode buildings: a literature review. Summary report. USA: Center for the Built Environment, University of California, 2011.

- ANDERSEN, R. V.; OLESEN, B. W.; TOFTUM, J. Simulation of the effects of occupant behaviour on indoor climate and energy consumption. *Proceedings of Clima. Clima 2007 WellBeing Indoors*, p. 9, 2007.
- ASHRAE - American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers. *ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ASHRAE, Atlanta, GA: 2017.
- BORGESON, S.; BRAGER, G. Occupant control of windows: accounting for human behavior in building simulation. Internal report. USA: Center for the Built Environment, University of California, 2008.
- BRAGER, G.; RING, E.; POWELL, K. Mixed-mode ventilation: HVAC meets mother nature. *Engineered Systems*, 2000.
- CBE - Center for the Built Environment. *Thermal Comfort Tool*. Disponível em: <<http://comfort.cbe.berkeley.edu/>>. Acesso em: 01 de Dezembro, 2018.
- CEN - Comité Européen de Normalisation. *Standard EN 15251-2007: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, CEN, Brussels, 2007.
- DEUBLE, M. P.; de DEAR, R. J. Mixed-mode buildings: A double standard in occupants' comfort expectations. *Building and Environment*, v. 54, p.53-60, 2012.
- FABI, V. et al. A methodology for modelling energy-related human behaviour: Application to window opening behaviour in residential buildings. *Building Simulation*, 6, p.415-427, 2013.
- FABI, V.; ANDERSEN, R. V.; CORGNATI, S.; OLESEN, B. W. Occupants' window opening behaviour: a literature review of factors influencing occupant behaviour and models. *Building and Environment*, 2012.
- FANGER, P. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
- FU, Xiuzhang; WU, Dingxin. Comparasion of the efficiency of building hybrid ventilation systems with different thermal comfort models. *Energy Procedia*, v. 78, p.2820-2825, 2015.
- GUNAY, H. Burak; O'BRIEN, William; BEAUSOLEIL-MORRISON, Ian. A critical review of observation studies, modeling, and simulation of adaptive occupant behaviors in offices. *Building and Environment*, v. 70, p.31-47, 2013.
- HALDI, F.; ROBINSON, D. On the behaviour and adaptation of office occupants. *Building and Environment*, 43, p. 2163-2177, 2008.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. *Dados climáticos de São Paulo*. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 30 de Abril, 2018.
- ISO - International Organization for Standardization. *Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for the thermal comfort*. ISO 7730. Suíça, 2005.
- NEVES, L. O. et al. Developing user profiles for mixed-mode office buildings operation based on occupant behaviour evaluation. *WINDSOR CONFERENCE: RETHINKING COMFORT*, 2018, Windsor. *Proceedings*. Windsor: NCEUB, p. 254 - 263, 2018.
- NEVES, L. O. et al. Envelope design of mixed-mode office buildings: theory versus practice. *Design to Thrive. Passive and Low Energy Architecture*, Edimburgh, UK, 2017.
- RUPP, R. F.; GHISI, E. Predicting thermal comfort in office buildings in a Brazilian temperate and humid climate. *Energy and Buildings*, v. 144, p. 152-166, 2017.
- RUPP, Ricardo Forgiarini; DEAR, Richard de; GHISI, Enedir. Field study of mixed-mode office buildings in Southern Brazil using an adaptive thermal comfort framework. *Energy and Buildings*, v. 153, p.1475-1486, 2018.
- SALCIDO, J. C.; RAHEEM, A. A.; ISSA, R. R. A. From simulation to monitoring: Evaluating the potential of mixed-mode ventilation (MMV) systems for integrating natural ventilation in office buildings through a comprehensive literature review. *Energy and Buildings*, 127, p. 1008-1018, 2016.
- SCHWEIKER, M.; SHUKUYA, M. Comparison of theoretical and statistical models of air-conditioning-unit usage behaviour in a residential setting under Japanese climatic conditions. *Building and Environment*, 44, p. 2137-2149, 2009.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa (projetos FAPESP n° 2016/02734-0 e n° 2016/19464-5).