

RESILIÊNCIA DAS EDIFICAÇÕES ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.

PARTE 2: ESTUDO DE CASO - DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS DE IDOSOS

Carolina A. Alves (1); Denise H. S. Duarte (2); Fábio L. T. Gonçalves (3)

- (1) Doutoranda, carolina.alves@gmail.com, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 876, Cidade Universitária, São Paulo/SP, (011) 3091 4681
(2) Professora Doutora, dhduarte@terra.com.br, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 876, Cidade Universitária, São Paulo/SP, (011) 3091 4681
(3) Professor Assoc., fabio.goncalves@iag.usp.br, Inst. de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Univ. de São Paulo, Rua do Matão, 1226, Cidade Universitária, São Paulo/SP, (011) 3091 4681

RESUMO

O objeto desta pesquisa é o desempenho térmico de edifícios residenciais na cidade de São Paulo, tendo em vista as mudanças climáticas previstas e a maior vulnerabilidade da população idosa. O objetivo é a avaliação de desempenho térmico e de conforto ambiental de edifícios residenciais no cenário RCP 8.5 do Quinto Relatório do IPCC e durante a onda de calor ocorrida em janeiro e fevereiro de 2014. São utilizados estudos de casos reais e simulações computacionais. O método é indutivo, por meio de levantamentos de campo, e dedutivo, por meio de comparações entre os resultados das medições e das simulações computacionais; o trabalho apresenta estudos preditivos do comportamento térmico e do conforto ambiental de três unidades residenciais de idosos, simuladas utilizando-se software computacional. Para a avaliação de conforto térmico foram adotados dois modelos adaptativos: De Dear *et al.*, 1997 / ASHRAE 55, 2013 e Humphreys *et al.*, 2010. A aplicação da faixa de 90% de satisfeitos do modelo de conforto de De Dear *et al.* (1997) / ASHRAE 55 (2013) mostrou um clara e progressiva redução da condição de conforto. Além disso, na aplicação de ambos os modelos com o critério de graus-hora na zona de frio ou de calor, houve uma pequena redução na primeira e um maior aumento na segunda. Observou-se que, na ocorrência de onda de calor, o aumento abrupto na temperatura do ar tende a acentuar o desconforto por calor. A combinação de ambos os fenômenos (mudanças climática e onda de calor), pode levar a um efeito potencializador de desconforto por calor. Por fim, nota-se que a melhor ventilação e a baixa carga térmica interna são fatores que contribuíram positivamente para um melhor desempenho em cenários de mudanças climáticas.

Palavras-chave: mudanças climáticas, desempenho térmico, dados climáticos.

ABSTRACT

The object of this research is the thermal performance of residential buildings in the city of São Paulo, in view of the projected climate change and the increased vulnerability of the elderly population. The objective is the evaluation of thermal performance and environmental comfort of residential buildings in the RCP 8.5 scenario of the IPCC Fifth Assessment Report, and under the January and February 2014 heat wave. Real case studies and computer simulations are employed. The method is inductive, by field surveys and deductive by comparison of measurement results and computer simulations. The paper presents predictive thermal and environmental comfort studies of three elderly residential units, simulated by computer software. For the thermal comfort evaluation, two adaptive models were employed: De Dear *et al.*, 1997 / ASHRAE 55, 2013 e Humphreys *et al.*, 2010. The 90% satisfied people De Dear *et al.* (1997) / ASHRAE 55 (2013) comfort range demonstrated an evident and progressive comfort condition reduction. Furthermore, both adopted comfort model application, using the degree-hours in the cold or heat zone criteria, there was a small reduction in the first and a larger increase in the second. It was observed, due to the heat wave occurrence, a sharp increase in the air temperature, which tends to increase the heat discomfort. The combination of both weather changes and heat wave phenomena may lead to the heat discomfort increase. Finally, one can note that better ventilation and low internal heat load contributed positively to the better performance in climate change scenarios.

Keywords: climate change, thermal performance, weather data.

1. INTRODUÇÃO

O artigo “Desempenho térmico do ambiente construído no contexto das mudanças climáticas na cidade de São Paulo. Parte 1: uma revisão crítica” apresentou uma contextualização dos efeitos das mudanças climáticas sobre os edifícios e as cidades, assim como o papel deles na ocorrência do fenômeno e a exposição das alterações climáticas já verificadas e previstas para a cidade de São Paulo.

Tendo em vista o contexto de mudanças climáticas apresentado e o envelhecimento da população brasileira, esse estudo (que se insere dentro de um projeto temático¹), procurou avaliar o desempenho térmico de três unidades residenciais habitadas por pessoas idosas utilizando índices de conforto adaptativo.

2. OBJETIVO

O objeto desta pesquisa é a avaliação de desempenho e conforto térmico em edifícios residenciais na cidade de São Paulo, tendo em vista as mudanças climáticas previstas e a maior vulnerabilidade da população idosa. O objetivo é a avaliação de desempenho térmico e de conforto ambiental de edifícios residenciais no cenário RCP 8.5 do Quinto Relatório do IPCC, IPCC AR5, e durante a onda de calor ocorrida em janeiro e fevereiro de 2014.

Trata-se de um trabalho que procurou estudar, a partir de uma amostra selecionada, a relação entre conforto ambiental em ambientes residenciais, o possível impacto das mudanças climáticas no estoque edificado existente e possíveis estratégias para adaptação e mitigação. Neste projeto, as questões de conforto térmico são direcionadas à população de idosos, população essa que está crescendo em proporção na população brasileira e mundial e que, por sua maior fragilidade fisiológica, é mais suscetível às consequências das mudanças climáticas sobre a saúde humana.

3. MATERIAL E MÉTODO

Este trabalho foi estruturado em duas frentes complementares: levantamentos de dados empíricos em estudos de casos reais e simulações computacionais. O método é indutivo, por meio de levantamentos de campo, e dedutivo, por meio de comparações entre os resultados das medições e das simulações computacionais; o trabalho apresenta estudos preditivos do comportamento térmico e do conforto ambiental de três unidades residenciais de idosos, com uso de simulação computacional.

Para a base de dados empíricos, foram realizados levantamentos arquitetônicos, dimensionais, construtivos e de uso e ocupação de residências de idosos voluntários e medições de variáveis ambientais (temperatura do ar, umidade relativa do ar, temperatura radiante média e velocidade do vento) no interior das unidades.

Para a simulação foram utilizados dados climáticos simulados e medidos. As simulações computacionais de desempenho térmico horário em base anual dessas unidades foram feitas utilizando o modelo EDSL/Bentley TAS (*Thermal Analysis Software*) V8i, disponível na FAUUSP para uso acadêmico, em condições climáticas atuais e em cenários futuros de mudanças climáticas.

Os dados climáticos simulados foram tratados a partir de dados cedidos pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas/IAG-USP representando os períodos presente (1975 a 2005), futuro próximo (2015 a 2044), futuro intermediário (2045 a 2074) e futuro distante (2076 a 2096). Os dados medidos foram os registrados pela estação meteorológica do IAG-USP², localizada na zona sul de São Paulo, para três períodos distintos: o ano de 2013 (presente), quando foram monitoradas as residências, o ano de 1972 (passado), selecionado como representativo do período de construção das residências estudadas, e também o ano de 2014 (presente com ocorrência de onda de calor), para fins de estudo dos efeitos da onda de calor ocorrida em janeiro e fevereiro desse mesmo ano.

Sobre os resultados de desempenho térmico das unidades selecionadas foram aplicados dois índices de conforto térmico adaptativo para comparação da condição obtida em cada cenário de simulação frente às

¹ Projeto temático FAPESP, Biometeorologia humana: análise dos efeitos de variáveis ambientais (meteorológicas, conforto térmico e poluição atmosférica) e das mudanças climáticas na população geriátrica da cidade de São Paulo, processo 2010/10189-5. Coordenador: Prof. Dr. Fábio Luiz Teixeira Gonçalves (IAGUSP). O projeto envolve IAGUSP, FMUSP, POLIUSP e FAUUSP, com a equipe do LABAUT – Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética. Vigência de 01/07/2011 a 30/06/2015.

² A Estação Meteorológica se localiza no Parque de Ciência e Tecnologia da USP na Avenida Miguel Stéfano, 4200, Água Funda, zona sul de São Paulo. Coordenadas Geográficas: 23,65°S / 46,62°W. Altitude: 800m. Número na WMO: 83.004.

exigências de conforto humano. Os resultados foram analisados comparativamente entre os diferentes cenários climáticos e também entre as unidades habitacionais estudadas, adotando-se os índices de conforto adaptativo De Dear *et al.* (1997) / ASHRAE 55 (2013) e Humphreys *et al.* (2010), considerados os mais adequados para a avaliação térmica da operação em modo passivo no clima local, dentre os índices já existentes.

3.1. As Residências para o estudo

Para este trabalho, as salas de estar de três residências foram monitoradas, simuladas em modelo computacional e os resultados foram avaliados. A amostra compõe-se de residências de idosos, que se dispuseram a participar voluntariamente desta pesquisa, indicados pelo serviço de atendimento domiciliar do Hospital das Clínicas de São Paulo, o NADI (Núcleo de Assistência Domiciliar do Instituto Central do Hospital das Clínicas, da Faculdade de Medicina da USP), sendo a Faculdade de Medicina da USP participante do projeto temático no qual este trabalho se inseriu.

A primeira residência, Cerqueira César é um apartamento no segundo andar de edifício de dez pavimentos, com quatro unidades por andar, em área central da cidade de São Paulo, com 62m², habitada por uma família de três pessoas. A orientação da fachada e, conseqüentemente, dos dormitórios, é noroeste, enquanto o estar possui abertura para o pátio interno do edifício, com orientação sudeste. A segunda, Vila Ida, é uma casa térrea com amplas aberturas e área ajardinada ao redor. É habitada por uma única pessoa e localiza-se em área exclusivamente habitacional com edificações vizinhas de um ou dois pavimentos, com presença de vegetação. A sala de estar possui aberturas voltadas para as direções predominantes sul e oeste. A terceira unidade, Freguesia do Ó, é uma residência de três pavimentos, sendo térreo, superior e semi-enterrado, sem recuos laterais, habitada por duas pessoas. Localiza-se na zona noroeste de São Paulo em região predominantemente residencial e com edificações vizinhas com gabarito de um a dois pavimentos. A abertura do estar coincide com a orientação da fachada principal e tem orientação noroeste.

As três residências foram construídas há mais de 40 anos e são compostas de materiais de construção nacionais tradicionais, com vedações verticais em alvenaria de blocos cerâmicos, com coeficiente global de transferência de calor (U), de aproximadamente 1,5 W/m²°C, com revestimento em reboco e pintura de cor clara. A fachada de cada uma das residências pode ser observada na Figura 1. O pé direito em todas elas tem altura de 2,7m. O apartamento Cerqueira César é composto por laje de concreto e as residências Vila Ida e Freguesia do Ó possuem laje de concreto com cobertura em telhado cerâmico. Todas são naturalmente ventiladas e possuem janelas operáveis.



Figura 1. Fachada das residências Cerqueira César, Vila Ida e Freguesia do Ó.

3.2. Dados empíricos

Para o levantamento dos dados empíricos, registros das variáveis ambientais no interior das residências foram realizados utilizando confortímetros de fabricação nacional Sensu, durante dois períodos, por aproximadamente 10 dias em cada um deles e, para a leitura dos dados foram selecionados quatro dias em cada um dos períodos de medição: um período frio, de 20 a 23 de abril / 2013, e um período quente, de 7 a 10 de dezembro / 2013.

Os confortímetros foram posicionados sobre tripés com altura aproximada dos sensores de 1,1m (ISO 7726, 1998). Sua locação foi definida com a participação e consentimento dos voluntários em pontos que não prejudicassem a rotina dos residentes em suas habitações. As variáveis registradas foram temperatura do ar, umidade relativa do ar, temperatura de globo e velocidade do ar. Para a base de dados externos, dados meteorológicos foram obtidos da estação meteorológica do IAG-USP.

O objetivo das medições foi a calibração do modelo computacional para as condições climáticas locais. Como se tratam de unidades naturalmente ventiladas, a variação dos dados de temperatura e umidade é fortemente relacionada às condições externas, porém, as edificações geram um microclima interno: devido

à sua massa térmica, eles suavizam a grande variação externa e retêm parte da carga térmica recebida pelos elementos externos de vedação por algumas horas. Então, a temperatura interna média sempre é mais alta que a externa e há variabilidade diurna e a anual em função do clima externo.

Apesar de se localizarem em diferentes contextos urbanos da cidade, prováveis diferenças microclimáticas causadas pela malha urbana diversa não foram avaliadas neste estudo.

3.3. Dados climáticos

Os arquivos climáticos representam as variações climáticas observadas nos últimos anos e esperadas para os anos futuros na cidade de São Paulo. Os arquivos climáticos utilizados são compostos por sete variáveis meteorológicas: temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação global e difusa, nebulosidade, velocidade e direção do vento. Dois conjuntos de dados climáticos foram adotados: o primeiro composto por dados simulados e o segundo por dados medidos.

Os dados simulados de temperatura e umidade relativa do ar foram cedidos pela professora Rosmeri P. Rocha, do IAG-USP, cuja base de dados para a simulação é proveniente da estação meteorológica do IAG-USP. Para compor os arquivos climáticos, as demais variáveis foram mantidas constantes em todos eles, obtidas de um arquivo climático existente para a cidade de São Paulo³. Os dados foram simulados com base no cenário RCP 8.5 do Quinto Relatório do IPCC (IPCC AR5), o mais pessimista dos cenários propostos. Os cenários simulados representam quatro períodos: presente (1975 a 2005), futuro próximo (2015 a 2044), futuro intermediário (2045 a 2074) e futuro distante (2076 a 2096).

Os dados medidos são baseados em registros da estação meteorológica do IAG-USP. Para esse estudo os períodos/anos são representativos de: ano de 2013 (presente), quando foram monitoradas as residências, ano de 1972 (passado), selecionado como representativo do período de construção das residências estudadas, e também ano de 2014 (presente com ocorrência de onda de calor), para fins de estudo dos efeitos da onda de calor ocorrida em janeiro e fevereiro desse mesmo ano.

3.4. Simulações térmicas computacionais

As simulações computacionais foram realizadas com o software EDSL/Bentley TAS (*Thermal Analysis Software*), que inclui, nos cálculos, as várias trocas térmicas que ocorrem nos edifícios, considerando seus elementos construtivos, ganhos internos de cargas térmicas e dados climáticos locais.

Os modelos virtuais das unidades residenciais estudadas foram construídos baseados nos levantamentos realizados. Para a calibração, as simulações foram realizadas com o arquivo climático do ano de 2013, quando foram medidas as variáveis de conforto térmico no interior das residências. Os valores de temperatura do ar, temperatura radiante média e umidade relativa do ar resultantes das simulações foram comparados com os dados medidos, ambos no mesmo período, para fins de calibração do modelo. Sabendo-se que o modelo é uma representação simplificada da realidade e que é impossível ter conhecimento e controle da totalidade das condições de exposição do objeto real, como ter acesso às propriedades térmicas precisas dos materiais e a rotina de ocupação dos ambientes, é compreensível a impossibilidade de se obter o mesmo desempenho entre os objetos reais e simulados. Deste modo, o objetivo da calibração foi chegar a modelos que tivessem desempenho térmico o mais similar possível dos ambientes reais. Os modelos, assim elaborados, podem, então, ser simulados usando diferentes arquivos climáticos, representando diferentes cenários climáticos (atuais, passados e futuros). A calibração foi realizada por sobreposição das curvas de dados medidos e simulados testando pequenos ajustes nas cargas internas e nas taxas de ventilação, em ambos os casos para o mesmo período, em 2013. As curvas representativas dos dados medidos e simulados das variáveis ambientais temperatura do ar, temperatura radiante média e umidade relativa para cada uma das três unidades residenciais consideradas (Cerqueira César, Vila Ida e Freguesia do Ó) neste estudo são apresentados a seguir, em forma de gráficos, na Figura 2.

Após a calibração dos modelos, as simulações foram realizadas para os sete cenários climáticos e os resultados foram analisados separadamente entre os dois grupos: arquivos climáticos de cenários climáticos simulados (presente, futuro próximo, futuro intermediário e futuro distante) e arquivos climáticos de cenários de dados medidos (passado, presente, presente com onda de calor). Para os cenários de dados medidos, apenas os meses de janeiro e fevereiro, período de onda de calor, foram considerados para a avaliação da

³ Arquivo climático TMY obtido através da página eletrônica do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, LabEEE, da Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, cujo ano base é 1984 e a fonte dos dados é a estação do aeroporto de Congonhas, em São Paulo.

condição de conforto. Em seguida, os resultados dos diferentes cenários foram comparados.

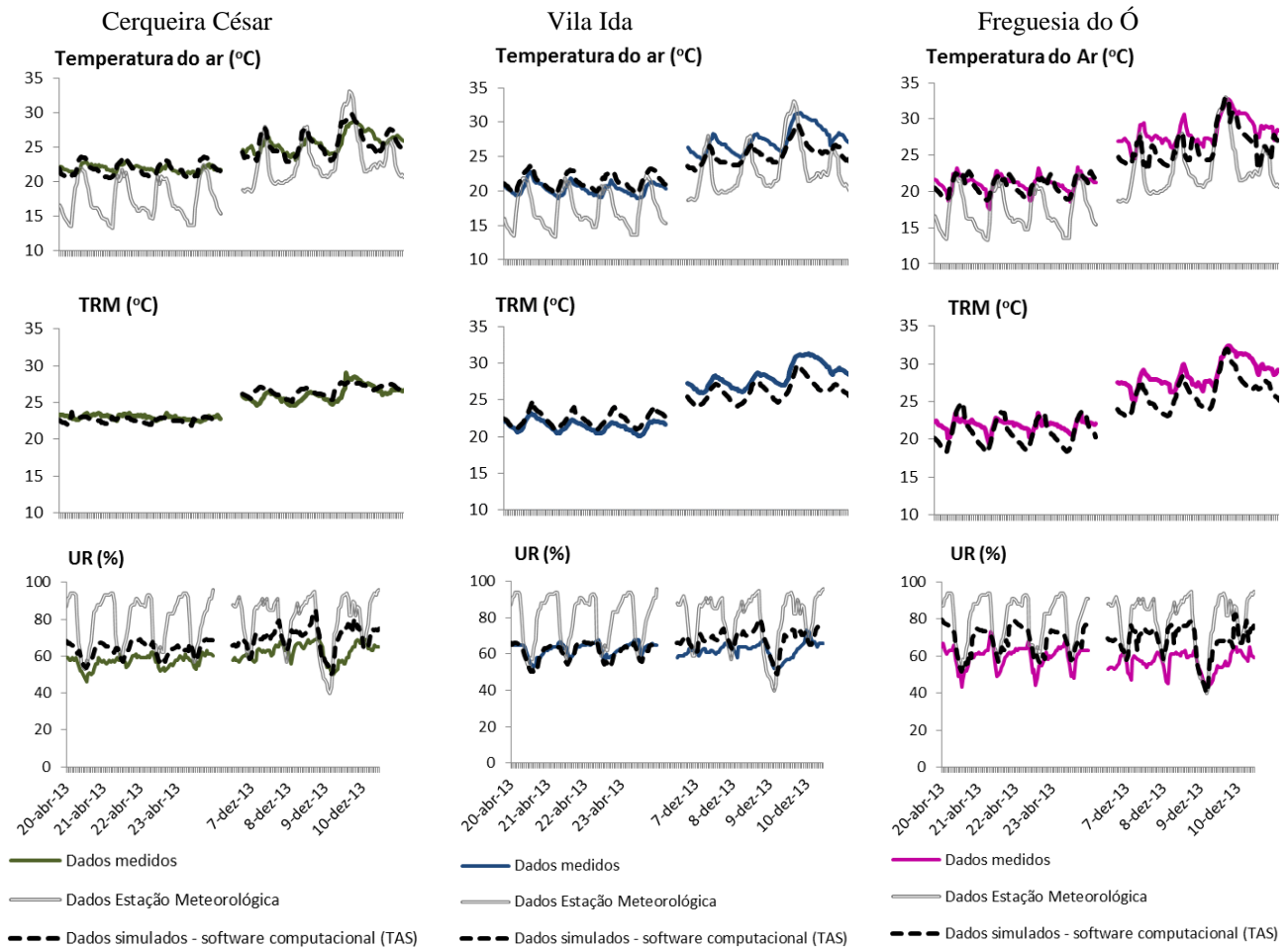


Figura 2. Sobreposição das curvas das variáveis ambientais temperatura do ar, temperatura radiante média e umidade relativa medidas e simuladas adotada para fins de calibração dos modelos computacionais das três unidades residenciais do estudo.

Após a calibração dos modelos, as simulações foram realizadas para os sete cenários climáticos e os resultados foram analisados separadamente entre os dois grupos: arquivos climáticos de cenários climáticos simulados (presente, futuro próximo, futuro intermediário e futuro distante) e arquivos climáticos de cenários de dados medidos (passado, presente, presente com onda de calor). Para os cenários de dados medidos, apenas os meses de janeiro e fevereiro, período de onda de calor, foram considerados para a avaliação da condição de conforto. Em seguida, os resultados dos diferentes cenários foram comparados.

Para esta pesquisa foram adotados índices de conforto adaptativo. Índices dessa natureza propõem uma abordagem comportamental e se justificam pelo fato

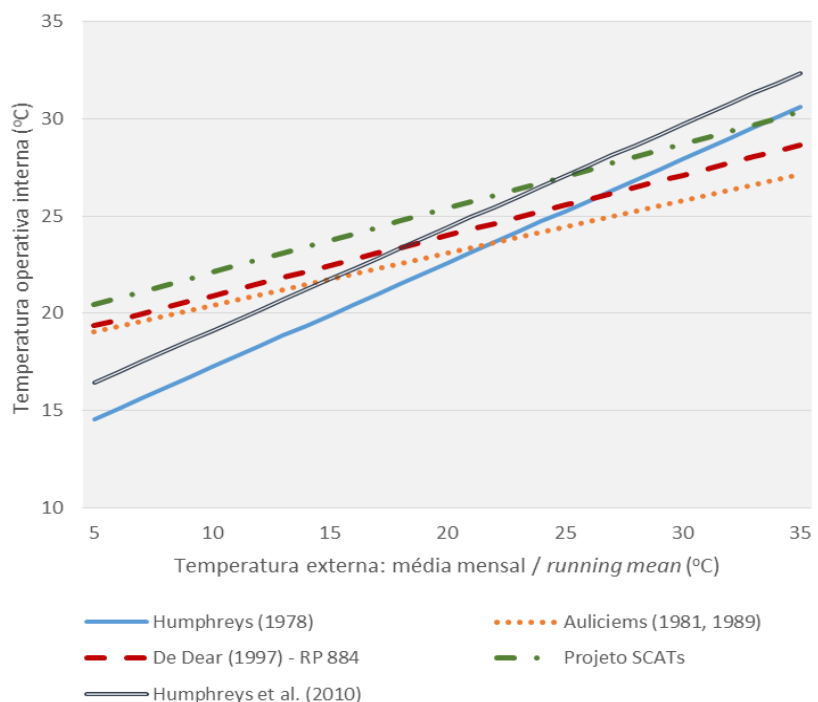


Figura 3. Sobreposição das equações de regressão de cada um dos modelos de conforto. Elaboração dos autores.

de que os indivíduos se adaptam ao meio, tanto fisiologicamente quanto psicologicamente (ROAF *et al.*, 2009). Por incorporarem o conceito de variação da temperatura de conforto em função da temperatura externa esses modelos aproximam as condições internas e externas, e sua incorporação pode resultar em redução da demanda de energia. Inicialmente foram levantados cinco modelos de conforto adaptativo, cuja equação de temperatura neutra ou de conforto são expostas na Figura 3 (Humphreys, 1978; Auliciems, 1981, 1989; De Dear *et al.*, 1997; Mccartney, Nicol, 2002; Humphreys *et al.* 2010). O gráfico da Figura 3 mostra a relação, comum a todos os índices apresentados, de aumento da temperatura interna neutra ou de conforto com o aumento da temperatura externa. Sob este aspecto, a similaridade entre as equações dos modelos apresentados é evidente e reforçam-se uns aos outros. Para aplicação nesta pesquisa dois índices de conforto adaptativo foram adotados: De Dear *et al.* (1997), conforme norma ASHRAE 55 (2013) e Humphreys *et al.* (2010), o primeiro, normatizado, apresentando faixas de conforto e proposto sobre uma ampla base de dados, incluindo climas tropicais; e o segundo, ainda que não normatizado, escolhido devido também à sua pertinência para climas tropicais, sendo ele o que apresenta a correlação mais forte entre temperatura operativa interna e temperatura externa. Por se tratar de residências habitadas por idosos, a faixa de conforto da ASHRAE 55 (2013) considerada foi a de 90% de satisfeitos (faixa mais restritiva).

A avaliação dos resultados considerou a porcentagem de horas de conforto e desconforto segundo a faixa adotada da ASHRAE 55 (2013) (tanto para calor quanto para frio) e o número de graus-hora acima (zona de calor) e abaixo (zona de frio) da linha neutra ou de conforto para ambos os índices.

Após a calibração dos modelos, as simulações foram realizadas para os sete cenários climáticos e os resultados foram analisados separadamente entre os dois grupos: arquivos climáticos de cenários climáticos simulados e arquivos climáticos de cenários de dados medidos, meses de janeiro e fevereiro. Em seguida, os resultados dos diferentes cenários foram comparados.

4. RESULTADOS

Os resultados representam a avaliação da condição de conforto e desconforto segundo o índice De Dear *et al.* (1997) / ASHRAE 55 (2013) e graus-hora acima e abaixo da linha neutra de ambos os índices adotados para esse estudo (De Dear *et al.*, 1997/ ASHRAE 55, 2013 e Humphreys *et al.*, 2010). Os resultados são expostos separadamente para cada um dos dois conjuntos de cenários climáticos utilizados: simulados e medidos. No primeiro caso são avaliadas todas as horas do ano e no segundo, apenas as horas referentes aos meses de janeiro e fevereiro, por terem sido esses os meses em que se verificou a ocorrência de onda de calor.

Os resultados podem ser visualizados nas Figuras 4 e 5, onde são expostos os valores obtidos para cada cenário climático estudado, em cada uma das residências, avaliados segundo os dois índices de conforto selecionados (De Dear *et al.*, 1997/ ASHRAE 55, 2013 e Humphreys *et al.*, 2010), segundo os critérios de porcentagem de horas em conforto ou desconforto (por frio ou calor), segundo o primeiro índice, normatizado, e somatório de graus-hora acima e abaixo da linha de conforto segundo ambos os índices. Para a avaliação utilizando o critério de graus-hora na zona de frio é adotada como convenção o sinal de negativo (-), tanto para fins de compreensão, quanto de representação gráfica, o que significa que esses valores estão abaixo da linha neutra, ou de conforto. Por fim, a Tabela 1 apresenta um resumo das variações da condição de conforto observada entre os cenários extremos de cada um dos grupos de cenários climáticos propostos (presente/futuro distante e passado/presente com onda de calor).

4.1. Cenários climáticos simulados

A comparação dos resultados obtidos nas simulações computacionais com cenários climáticos simulados mostra que a condição de desconforto por calor é crescente conforme a evolução dos cenários. A aplicação da faixa de conforto do índice De Dear *et al.* (1997) / ASHRAE 55 (2013) e a observação da variação entre os cenários presente e futuro distante apresentam uma pequena redução na porcentagem de horas em conforto, sendo a redução média de 52% (Cerqueira César: 55%, Vila Ida: 48% e Freguesia do Ó: 54%) e aumento médio de 184% em horas de insatisfação por calor (Cerqueira César 243%, Vila Ida 155% e Freguesia do Ó, 152%). De maneira similar, a tendência de variação avaliada em graus-hora em todos os casos revela aumento do número de graus-hora na zona de calor e redução na zona de frio (sendo o aumento na zona de calor consideravelmente maior que redução na zona de frio).

De acordo com o modelo de Humphreys *et al.* (2010) a variação entre os cenários presente e futuro distante é aproximadamente 50% menor que a variação dos mesmos parâmetros segundo o modelo De Dear *et al.* (1997) / ASHRAE 55 (2013), sendo a redução na zona de frio de 24% segundo o modelo de Humphreys *et al.* (2010) e de 48% segundo o modelo de De Dear *et al.* (1997) / ASHRAE 55 (2013) e aumento na zona de calor de 83% e 137% respectivamente.

		Modelo de Dear <i>et al.</i> (1997) / ASHRAE 55 (2013)						Modelo Humphreys <i>et al.</i> (2010)		
		Faixa de conforto: 90% aceitabilidade			Graus-hora acima ou abaixo da linha neutra					
		0%	50%	100%	-15500	0	15500	-15500	0	15500
Cerqueira César	Presente (1975-2005)	10	83	8	-8489	4887	-9584	3367		
	Futuro próximo (2015-2044)	7	80	13	-6059	7929	-9334	4091		
	Futuro intermed. (2045-2074)	7	75	18	-5848	9634	-8827	5732		
	Futuro distante (2076-2096)	4	69	26	-4272	13095	-6101	8868		
Vila Ida	Presente (1975-2005)	27	67	6	-13384	4035	-14858	2894		
	Futuro próximo (2015-2044)	23	70	7	-11676	4938	-14314	3146		
	Futuro intermed. (2045-2074)	18	71	11	-9770	6635	-13750	3733		
	Futuro distante (2076-2096)	14	72	14	-7910	8184	-9884	4019		
Freguesia do Ó	Presente (1975-2005)	40	48	13	-19660	6708	-20880	5312		
	Futuro próximo (2015-2044)	33	50	17	-16286	8654	-18505	6441		
	Futuro intermed. (2045-2074)	26	50	24	-12631	12272	-15891	8651		
	Futuro distante (2076-2096)	18	50	32	-9264	16030	-9482	12327		
		■ insatisfação por calor ■ conforto: 90% de satisfeitos ■ insatisfação por frio			■ zona de calor ■ zona de frio			■ zona de calor ■ zona de frio		

Figura 4. Residências Cerqueira César, Vila Ida e Freguesia do Ó: resultados médios anuais de simulação avaliados segundo índices de conforto adaptativo – cenários climáticos simulados.

4.2. Cenários climáticos medidos

De maneira análoga, foi realizada uma avaliação adotando-se dados climáticos medidos e as avaliações também constataram tendência similar às anteriores: em todas as residências avaliadas, aumento na zona de calor e redução na zona de frio, sendo a primeira maior que a segunda.

De acordo com os resultados das simulações, avaliadas com o modelo de De Dear *et al.* (1997) / ASHRAE 55 (2013), utilizando-se a faixa de 90% de pessoas satisfeitas, o progressivo aquecimento do clima observado nas décadas recentes (de 1972 para 2013) provocou, nos três casos avaliados, um aumento médio das horas em desconforto por calor de aproximadamente 60% (Cerqueira Cesar: 74%, Vila Ida: 56% e Freguesia do Ó: 50%). Por outro lado, a ocorrência de onda de calor praticamente triplicou a porcentagem de horas em desconforto entre os anos consecutivos de 2013 e 2014 (Cerqueira Cesar: 200%, Vila Ida: 164% e Freguesia do Ó: 144%), sendo que o aumento total do desconforto por calor, entre o passado e o presente com onda de calor foi, em média de 334% (Cerqueira Cesar: 423%, Vila Ida: 313% e Freguesia do Ó: 266%)

A porcentagem de horas em desconforto por frio aumentou de 1972 para 2013 e se reduziu entre 2013 e 2014 nas residências Vila Ida e Freguesia do Ó, enquanto, no apartamento Cerqueira César permaneceu em zero em ambos os casos. A porcentagem de horas em conforto, em todos os casos, apresentou redução com a progressão dos cenários climáticos.

Do mesmo modo que na avaliação anterior, de maneira similar, a tendência de variação avaliada em

Tabela 1. Resumo da variação da condição de conforto obtida a partir dos resultados das simulações computacionais de cada uma das três residências entre os extremos de cada um dos grupos de cenários climáticos propostos (simulados e medidos), avaliados segundo os dois índices de conforto selecionados (De Dear *et al.*, 1997/ ASHRAE 55, 2013 e Humphreys *et al.*, 2010); inclui valores médios por critério de avaliação.

	Índice de conforto	Critério de avaliação	Residência	FRIO	CONFORTO	CALOR
CENÁRIOS SIMULADOS: Presente para Futuro Distante	Modelo De Dear et al. (1997) / ASHRAE 55 (2013)	Horas em conforto/desconforto	Cerqueira César	-55%	-16%	243%
			Vila Ida	-48%	7%	155%
			Freguesia do Ó	-54%	5%	152%
	Média	-52%	-1%	184%		
	Graus-hora acima e abaixo da linha neutra	Cerqueira César	-50%	-	168%	
		Vila Ida	-41%	-	103%	
Freguesia do Ó		-53%	-	139%		
Média	-48%	-	137%			
Modelo Humphreys et al. (2010)	Graus-hora acima e abaixo da linha neutra	Cerqueira César	-21%	-	113%	
		Vila Ida	-13%	-	37%	
		Freguesia do Ó	-38%	-	99%	
Média	-24%	-	83%			
Média total do conjunto de cenários climáticos simulados				-41%	-1%	134%
CENÁRIOS MEDIDOS: Passado para Presente com Onda de Calor	Modelo De Dear et al. (1997) / ASHRAE 55 (2013)	Horas em conforto/desconforto	Cerqueira César	0%	-42%	423%
			Vila Ida	-65%	-18%	313%
			Freguesia do Ó	-79%	-35%	266%
	Média	-48%	-32%	334%		
	Graus-hora acima e abaixo da linha neutra	Cerqueira César	-77%	-	218%	
		Vila Ida	-64%	-	180%	
Freguesia do Ó		-76%	-	234%		
Média	-72%	-	211%			
Modelo Humphreys et al. (2010)	Graus-hora acima e abaixo da linha neutra	Cerqueira César	-53%	-	244%	
		Vila Ida	-37%	-	152%	
		Freguesia do Ó	-62%	-	226%	
Média	-51%	-	207%			
Média total do conjunto de cenários climáticos medidos				-57%	-32%	251%

A evolução do desempenho das três residências avaliadas nos cenários climáticos propostos revela que a Vila Ida apresenta maior resiliência, resultando em menores variações na condição de conforto (como pode ser observado nas Figuras 4 e 5 e Tabela 1). Esta unidade apresenta uma condição inicial intermediária entre as três avaliadas nos cenários climáticos simulados (cenário presente: 67% das horas em conforto, enquanto Cerqueira César e Freguesia do Ó apresentam respectivamente 83% e 48%) e, nos cenários climáticos medidos, 91% das horas em conforto no cenário passado (enquanto Cerqueira César e Freguesia do Ó apresentam respectivamente 91% e 74%), apresentando, inclusive, elevação no número de horas em conforto na evolução deste segundo grupo de cenários. É importante, porém, ressaltar que esta residência possui uma condição ótima de ventilação, ganho de cargas internas desprezível e implantação em local ocupado por residências de 1 ou 2 pavimentos e presença de áreas ajardinadas no entorno próximo. É, por fim, entre as residências analisadas, aquela que possui menor massa térmica, por apresentar apenas 1 pavimento e recuos laterais em todos os seus lados. Em contrapartida, nota-se que a residência Cerqueira César apresentou as maiores variações de condição de conforto com a evolução dos cenários. Por se tratar de um apartamento no segundo andar de um edifício multipavimentos e 4 unidades por andar, essa é a unidade com maior massa térmica e, também, cujo ambiente analisado possui a maior carga interna, além de apresentar condição de ventilação não tão favorecida, pois o estar possui apenas janelas voltadas para o átrio central e para a área de serviço, e a ventilação cruzada depender da comunicação com os quartos. A residência Freguesia do Ó, por sua vez, apresenta condição intermediária entre as outras duas, tanto quanto a massa térmica, quanto às cargas internas e, por fim, quanto às variações na condição de conforto com a evolução dos cenários.

As condições das três residências são bastante diferentes por se tratar de distintas tipologias, ocupação, orientação geográfica, local de implantação, entre outros, o que torna frágil a comparação entre elas. Ainda assim pode-se depreender que a melhor ventilação e a baixa carga térmica interna são fatores que contribuíram positivamente para a manutenção do melhor desempenho térmico; e negativamente, as altas cargas internas; o papel da massa térmica não ficou claro nos resultados obtidos.

5.1. Considerações finais

Para se ter um exemplo das possíveis consequências ocasionadas pelas mudanças climáticas que estão ocorrendo e que devem se intensificar em um futuro próximo, na onda de calor registrada em janeiro e fevereiro de 2014 foram registrados aumentos no consumo de energia atribuídos, em grande parte, ao ar-condicionado, e com maior crescimento na parcela doméstica (BRASIL, 2014a; 2014b). Uma vez instalados, os equipamentos serão utilizados sempre que houver aumento na temperatura (WU, PETT, 2006), o que significa que, se não houver estratégias de mitigação e adaptação para os edifícios, dificilmente os padrões de consumo voltarão a ser como antes. Não é possível, portanto, ignorar a crescente participação do condicionamento artificial do ar no Brasil, principalmente no setor residencial, onde seu emprego não era, até pouco tempo, significativo. Os objetivos de eficiência energética nos novos e futuros cenários climáticos demandarão, pois, adaptações nos edifícios existentes e alterações mais substanciais no projeto e no modo de operação dos novos edifícios ao longo da sua vida útil, em particular nos residenciais, com a adoção de estratégias passivas de condicionamento e de modo misto de operação visando ao conforto térmico dos usuários, à menor dependência energética e à não intensificação do aquecimento urbano pelo calor gerado pelos sistemas de condicionamento ambiental. Por fim destaca-se a necessidade de adoção e implementação de cenários de mudanças climáticas para a avaliação dos edifícios projetados e/ou que passam por alterações e reformas para que possam atender às demandas de todo o seu período de operação, assim como para permitir a avaliação dos impactos futuros de políticas energéticas, programas de etiquetagem e outras ações no sentido da eficiência energética e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, Carolina Abrahão. **Resiliência das edificações às mudanças climáticas na Região Metropolitana de São Paulo. Estudo de caso: desempenho térmico de edifícios residenciais para idosos**. 2014. (Dissertação de mestrado em Arquitetura) - Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, 2014.
- ALVES, Carolina Abrahão, DUARTE; Denise H. Silva; GONÇALVES, Fábio L. Teixeira. Residential Buildings Thermal Performance and Comfort for the Elderly under Climate Changes Context in the city of São Paulo, Brazil. **Energy and Buildings** (no prelo).
- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers). **ASHRAE 55-2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta: ASHRAE, 2013.
- AULICIEMS, A. Towards a psycho-physical model of thermal perception. **International Journal of Biometeorology**, v. 25, p. 109-122, 1981.
- AULICIEMS, A. Thermal Comfort. **Building design and human performance**, p. 3-28. Nova York: Nancy Ruck, Van Nostrand Reinhold, 1989.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Resenha mensal do mercado de energia elétrica**, v. 77. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), fevereiro, 2014.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Resenha mensal do mercado de energia elétrica**, v. 78. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), março, 2014.
- DE DEAR, R.; BRAGER, G. S. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. **ASHRAE Trans**, v. 104, part 1A, p. 145-167, 1998.
- DE DEAR, R, BRAGER, G, COOPER, D. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference: **Final Report on RP 884**. Macquarie University, Sydney, Australia, 1997.
- HUMPHREYS, M. A. Outdoor temperatures and comfort indoors, **Building Research and Practice**, 6:2, 2-105, 1978
- HUMPHREYS, M. A., RIJAL, H. B., NICOL, J. F. Examining and developing relation between climate and thermal comfort indoors. Proceedings of conference: **Adapting to change: New thinking on comfort** Cumberland Lodge, Windsor, UK. 9-11 April 2010.
- ISO (International Organization Standardization). ISO 7726. Ergonomics: instruments for measuring physical quantities. Genève: ISO, 1998.
- MCCARTNEY K.J and NICOL J.F. Developing an Adaptive Control Algorithm for Europe: Results of the SCATs Project. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 623-635, 2002.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. IPCC Working Group III Contribution to AR5. 2014.
- _____. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. IPCC Working Group II Contribution to AR5. 2014
- _____. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. IPCC Working Group I Contribution to AR5. 2013.
- ROAF, Sue, CRICHTON, David; NICOL, Fergus. **A adaptação de edificações e cidades às mudanças climáticas: Um guia de sobrevivência para o século XXI**. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- WU, Anson, PETT, Jacky. **Cold comfort for Kyoto? Carbon implications from increasing residential cooling demand**. A scoping report. ACE: Londres: 2006.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo auxílio financeiro para esta pesquisa, à Prof. Dra. Rosmeri P. da Rocha (IAG-USP) pela disponibilização de dados climáticos futuros simulados e aos professores Maurício Roriz (em memória), Arlindo Tribess e Joana C. S. Gonçalves pelas valiosas contribuições ao trabalho.