

CONFORTO TÉRMICO EM ESPAÇOS ABERTOS. PARTE 1: CONSIDERAÇÃO DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Leonardo Marques Monteiro (1); Marcia Peinado Alucci (2)

Departamento de Tecnologia, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil, tel: 55 11 3091-4538 r.214, fax: 55 11 3091-4539
e-mail: (1) leo4mm@gmail.com (2) marcialu@usp.br

RESUMO

O objetivo desta pesquisa, “Conforto térmico em espaços abertos”, foi quantificar as correlações entre variáveis microclimáticas urbanas (temperatura, umidade e velocidade do ar e radiação térmica) e variáveis subjetivas (percepção de sensações térmicas), mediadas por variáveis individuais (vestimentas e atividade física), possibilitando a predição do grau de adequação térmica de espaços abertos para uma população adaptada às condições climáticas em que se encontra. Os métodos utilizados foram: indutivo experimental (levantamento em campo de variáveis microclimáticas, individuais e subjetivas), estatístico (regressão numérica), analítico (balanço termo-fisiológico) e comparativo (temperatura equivalente). Como resultado final obteve-se a proposição de um índice de temperatura equivalente para avaliação do conforto térmico em espaços abertos na cidade de São Paulo. Ressalta-se aqui a contribuição e originalidade do trabalho na medida em que pesquisas específicas de quantificação dessas correlações para espaços abertos são recentes internacionalmente, não havendo índice estabelecido para São Paulo. Este primeiro artigo, “Conforto térmico em espaços abertos. Parte 1: consideração de variáveis ambientais”, apresenta os levantamentos empíricos das 72 situações microclimáticas e da aplicação dos 2258 questionários, os procedimentos para correlações entre as variáveis temperatura, umidade e velocidade do ar e temperatura radiante média e a percepção de sensação térmica levantadas empiricamente e, finalmente, a proposição do índice de temperatura equivalente percebida (TEP).

Palavras-chave: conforto térmico, espaços abertos, modelo preditivo, temperatura equivalente.

ABSTRACT

The objective of this research, “Outdoor thermal comfort”, was to quantify the correlations between the urban microclimatic variables (air temperature, humidity and velocity and thermal radiation) and subjectivity variables (perception of thermal sensation variables), mediated by means of individual variables (clothing insulation and metabolic rate), allowing the prediction of the outdoor thermal environment adequacy to a population adapted to a given climatic condition. The methods used were: experimental inductive (field research of microclimatic, individual and subjective variables), statistic (numeric regression), analytic (thermo-physiological model) and comparative (equivalent temperature). As a final result there is the proposition of an index of equivalent temperature for outdoor thermal comfort in the city of São Paulo. The contribution and originality of the work relies on the fact that specific researches of quantifications of such correlations for open spaces are recent internationally, and there is not an established index for São Paulo. This first paper, “Outdoor thermal comfort. Part 1: consideration of microclimatic variables”, presents the empirical research of 72 microclimatic situations and application of 2258 questionnaires, the procedures for the correlations between the variables air temperature, humidity and velocity and mean radiant temperature and the perception of thermal sensation gathered empirically and, finally, the proposition of the index of temperature of equivalent perception (TEP).

Keywords: thermal comfort, outdoor spaces, predictive model, equivalent temperature.

1 INTRODUÇÃO

As alterações microclimáticas provocadas pela intervenção humana não são necessariamente prejudiciais, constituindo-se inclusive como partido de intervenção urbana. Nesse sentido, visando o conforto térmico humano, pode-se sugerir uma abordagem em três etapas, em que se reconheça primeiramente as condições microclimáticas consideradas termicamente adequadas, em seguida os mecanismos pelos quais forma e matéria afetam o microclima e finalmente realizar os cruzamentos desses dois conhecimentos para efetivamente propor intervenções. Esta pesquisa concentra-se no escopo da primeira etapa, enfocando os modelos preditivos e respectivos índices para avaliação de espaços abertos no meio urbano.

Monteiro e Alucci (2005a e 2005b) descrevem 20 modelos e 32 índices de conforto térmico desenvolvidos, adaptados ou que foram aplicados em espaços abertos, internacionalmente. Os mesmos autores (2007a) fazem um resumo e crítica desse cenário, apresentando ainda o panorama brasileiro das pesquisas na área. Em estudo posterior (2007b), os autores comparam os resultados dos modelos e índices apresentados anteriormente e propõem calibrações específicas (2007c) com base em levantamentos empíricos realizados na cidade de São Paulo.

Este artigo é o primeiro, de uma seqüência de três, que apresenta a proposição de uma nova modelagem por meio da correlação das diversas variáveis ambientais e individuais com respostas subjetivas de percepção de sensação térmica. A proposição está apoiada em estudos analíticos complementares aos dados levantados empiricamente. A correlação de múltiplas variáveis é comumente realizada por meio de regressões lineares, como pode ser verificado em Givoni & Noguchi (2000, 2002, 2004) e Nikolopoulou (1998, 2002, 2004), gerando equações bastante simples e de fácil utilização.

Os procedimentos e resultados apresentados neste artigo dizem respeito inicialmente a um conjunto mais restrito de situações microclimáticas, constituído de um total de trinta e seis situações, com a aplicação de 876 questionários. Novos levantamentos de campo foram então realizados, para que o estudo pretendido fosse efetivamente realizado. Assim, chegou-se a um conjunto mais abrangente de situações microclimáticas, totalizando setenta e duas situações, com a aplicação de 1750 questionários em pessoas aclimatadas. Foram ainda aplicados 508 questionários em pessoas não aclimatadas, a serem discutidos no artigo final. A seguir, são apresentados o objetivo da pesquisa, os métodos utilizados, os resultados encontrados, a proposição da temperatura equivalente percebida (TEP) e as conclusões. Todas as informações apresentadas podem ser encontradas, em detalhe, em Monteiro (2008).

2 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é a quantificação da correlação entre variáveis microclimáticas urbanas e variáveis subjetivas mediadas por variáveis individuais, ou seja, a predição da percepção de sensações térmicas por meio da temperatura, umidade e velocidade do ar e temperatura radiante, possibilitando a predição do grau de adequação térmica de espaços abertos para uma população adaptada às condições climáticas em que se encontra, no caso específico, na cidade de São Paulo.

3 MÉTODOS

3.1 Levantamentos de campo

As especificações dos instrumentos para determinação de quantidades físicas foram realizadas segundo a norma ISO 7726 (1998). Maiores detalhes podem ser encontrados em Monteiro e Alucci (2005c). A seguir, apresenta-se um resumo dos procedimentos realizados para os levantamentos de campo das variáveis ambientais, individuais e subjetivas.

Foram estabelecidas três bases para determinação das diversas variáveis: uma primeira a céu aberto, uma segunda sob copa de árvores e uma terceira sob cobertura têxtil tensionada. Uma base central, com sensores de velocidade e direção de vento a 10m de altura, foi estabelecida para referenciar as variáveis ambientais, situando-se espacialmente entre as três bases citadas. No total, em cada dia, foram entrevistadas cerca de cento e cinquenta pessoas, em cada uma das três bases, em seis horários diferentes. Esse procedimento foi realizado em dias representativos de verão e dias representativos de inverno, totalizando setenta e duas situações microclimáticas distintas com a aplicação de 2258 questionários, dos quais 1750 referiam-se a pessoas aclimatizadas.

A execução operacional dos levantamentos foi realizada da seguinte maneira. Estabeleceram-se dois grupos de setenta e cinco pessoas. Realizaram-se os procedimentos com o primeiro grupo nos três primeiros horários, repetindo-se os procedimentos com o segundo grupo nos três horários seguintes. Cada grupo foi subdividido em três, cada um de vinte e cinco integrantes. Cada subgrupo dirigiu-se a uma base. Na primeira

base, todas as pessoas receberam etiquetas identificadoras (A01-A25, B01-B25, C01-C25), responderam um questionário para verificação de características gerais (sexo, idade, peso, altura) e aclimatação (locais onde já viveu e por quanto tempo) e foram fotografadas (em grupos de cinco) para posterior identificação da vestimenta. Após esses procedimentos iniciais, todos ficaram vinte minutos expostos às condições ambientes locais, para em seguida receberem um questionário de percepção e preferência de sensação térmica. Nesse questionário, perguntou-se também se alguma peça de roupa foi alterada desde o momento do registro fotográfico. Depois de respondidos, os questionários foram recolhidos e cada grupo se dirigiu à próxima base, onde permaneceram por mais trinta minutos, realizando-se o mesmo procedimento até terem passado pelas três bases. O segundo grupo de setenta e cinco pessoas passou então pelos mesmos procedimentos, mas a troca de bases foi realizada em sentido inverso ao do primeiro grupo.

Os equipamentos utilizados em cada base são aqui sucintamente descritos. Na base a céu aberto foi utilizada uma estação meteorológica marca ELE modelo EMS com sensores de temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento e piranômetro Eppley, registrando-se os dados em data logger marca ELE modelo MM900 EE 475-016. Na base sob cobertura arbórea utilizou-se estação meteorológica Huger Eletronics modelo GmbH WM918, com sensores de temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento, armazenando-se os dados diretamente em microcomputador portátil. Na base sob cobertura têxtil tensionada foi utilizada estação Innova 7301, com módulo de conforto (sensores de temperatura, umidade e velocidade do ar) e de estresse térmico (do qual se utilizou o termômetro de globo), registrando-se os dados em data logger da mesma marca, modelo 1221. Na base a 10m de altura utilizou-se estação meteorológica semelhante (modelo GmbH WM921) à da base sob copas de árvores, enviando-se os dados para microcomputador portátil por meio de ondas de rádio. Os registros realizados pelos equipamentos se deram em intervalos de um minuto. Em cada uma das três bases, foi montado um set com dois termômetros de globo. Os globos de latão utilizados apresentam diâmetro de 17 cm. Em cada set, pintou-se um globo de preto fosco e outro de cinza médio fosco. Os termômetros utilizados em cada globo são de mercúrio. A leitura e o registro dos dados deram-se a cada dez minutos.

Dado o grande número de pessoas mobilizadas para o levantamento de campo em questão, decidiu-se pela realização de medições extras das variáveis ambientais caso houvesse algum problema com o registro eletrônico em curso. Assim montou-se um set com um termohigrômetro marca Homis modelo 229 e um set com quatro anemômetros marca Homis modelo 209 em cada uma das bases. Os dados de temperatura e umidade do ar foram registrados a cada dez minutos. Os dados de velocidade do ar foram registrados de cinco em cinco segundos durante um minuto, a cada dez minutos.

Segundo a Norma ISO 7726 (1998), as especificações dos instrumentos para determinação de quantidades físicas do ambiente dividem-se em duas classes: tipo C (conforto), para ambientes moderados; e tipo S (estresse), para ambientes com estresse térmico. As especificações referentes à faixa de medição e precisão são apresentadas na Tabela 1. O tempo de resposta do sensor depende da massa, da área superficial, da presença de protetor e das características do ambiente (temperatura, umidade e velocidade do ar e radiação térmica).

Tabela 1: Características requerida e desejável dos instrumentos (adaptada de ISO 7726, 1998)

Variáveis	Faixa para conforto	Precisão para conforto	Faixa para estresse	Precisão para estresse
Temperatura do ar (t_{ar})	10–40 °C	Requerida: $\pm 0,5$ °C Desejada: $\pm 0,2$ °C	-40–120 °C	Requerida: $\pm 0,5$ °C (0-50°C) Desejada: $\pm 0,25$ °C (0-50°C)
Temperatura radiante (t_{rm})	10–40 °C	Requerida: ± 2 °C Desejada: $\pm 0,2$ °C	-40–150 °C	Requerida: ± 5 °C (0-50°C) Desejada: ± 5 °C (0-50°C)
Velocidade do ar (v_{ar})	0,05–1 m/s	Requerida: $\pm[0,05 + 0,05V]$ Desejada: $\pm[0,02 + 0,07V]$	0,2–20 m/s	Requerida: $\pm[0,1 + 0,05V]$ Desejada: $\pm[0,05 + 0,05V]$
Umidade absoluta (p_{ar})	0,5–3,0 kPa	$\pm 0,15$ kPa ($ t_{ar}-t_{rm} < 10^{\circ}C$)	0,5–6,0 kPa	$\pm 0,15$ kPa ($ t_{ar}-t_{rm} < 20^{\circ}C$)

Os métodos de medições devem levar em consideração a homogeneidade e a heterogeneidade das variáveis medidas. Deve-se também observar o caráter estacionário e variacional do tempo das grandezas medidas. Para o critério de conforto, diz-se que um ambiente é homogêneo se verificado um erro, para cada medição com relação à média de todas as medições, de no máximo 3 vezes o valor da precisão requerida para temperatura do ar e de no máximo 2 vezes para as demais variáveis. Para o critério de estresse, admitem-se no máximo 4 vezes para temperatura do ar, 3 vezes para temperatura radiante média e 2 vezes para as demais variáveis. A precisão requerida das medidas é em relação à média. O caráter estacionário e transiente é avaliado de maneira análoga. Quando o ambiente é muito heterogêneo, as quantidades físicas devem ser medidas em diversos pontos, levando-se em conta os resultados parciais obtidos para se determinar o valor médio das quantidades a serem consideradas na avaliação do conforto ou do estresse

térmico. A Tabela 2 apresenta as posições a serem utilizadas na medição das quantidades físicas e os coeficientes de ponderação a serem usados no cálculo do valor médio dessas quantidades.

Tabela 2: Altura de medição para as variáveis do ambiente (ISO 7726, 1998).

Posição	Coeficiente de Ponderação				Altura recomendada	
	Ambiente Homogêneo		Ambiente Heterogêneo		Sentado	De pé
	Classe C	Classe S	Classe C	Classe S		
Cabeça			1	1	1,1 m	1,7 m
Abdômen	1	1	1	2	0,6 m	1,1 m
Calcanhar			1	1	0,1 m	0,1 m

Com base nos resultados do pré-teste realizado anteriormente ao levantamento, considerou-se que os ambientes eram homogêneos, ainda que para as variáveis temperatura radiante média e velocidade do ar tenham sido encontrados, nas medições realizadas a 0,1m, alguns desvios ligeiramente maiores do que o especificado pela norma. Assim, no levantamento propriamente dito, realizaram-se medições apenas a 1,1 m de altura (a aplicação dos questionários subjetivos deu-se sempre com as pessoas paradas e em pé).

Nos levantamentos em questão, os sensores utilizados para determinação da temperatura do ar são do tipo semiconductor. A faixa de leitura é de -20 °C a +60 °C, com resolução de 0,1 °C, precisão de ± 0,4 °C e tempo de resposta de 0,1 °C/s. Os sensores para determinação de umidade são de capacitância, obtendo-se a umidade relativa. A faixa de leitura é de 10% a 95%, com resolução de 0,1%, precisão de ± 3% (a 25 °C, entre 30% e 95%) e ± 5% (a 25 °C, entre 10% e 30%) e tempo de resposta de 3 minutos para mudança de 45% a 95% e de 5 minutos para o inverso.

Para cada um dos três *sets* de anemômetros empregados, utilizaram-se quatro sensores de hélice. Esses sensores apresentam faixa de leitura de 0,4 a 30,0m/s, com resolução de 0,1m/s, e precisão de ± 2%+d, onde d é o valor numérico do registro em m/s. As estações meteorológicas utilizadas possuem sensores de velocidade do ar compostos por copo (magnitude) e pá (direção/sentido), apresentando faixa de leitura de 0,3 a 30,0m/s, resolução de 0,1m/s e precisão de ± 2%+d. O registro dos dados das estações meteorológicas foi realizado a cada minuto, considerando-se a média das leituras realizadas a cada segundo, obtendo-se o valor médio da velocidade no minuto e o desvio padrão. O registro dos dados dos *sets* foi realizado de cinco em cinco segundos durante um minuto, a cada dez minutos.

Para cálculo da temperatura radiante média utilizou-se procedimento baseado em termômetro de globo, que requer ainda a temperatura e a velocidade do ar. Utilizaram-se globos de 17 cm de diâmetro, com emissividade próxima a 0,95. Para a determinação da temperatura do ar no interior dos globos foram empregados termômetros de mercúrio. A norma ISO 7726 (1998) alerta para a utilização da cor cinza médio quando o globo for exposto ao sol, dada a sua absorção de radiação térmica de onda curta semelhante à das pessoas normalmente vestidas. Para o cálculo da temperatura radiante média, realiza-se o balanço das trocas térmicas entre o globo e o ambiente em questão. O tempo de resposta de um termômetro de globo é, segundo a norma referida, de aproximadamente 20 a 30 minutos, dependendo das características do globo e do ambiente em avaliação. Como resultado, têm-se as seguintes formulações respectivamente para convecção natural e convecção forçada.

$$t_{rm} = \{(t_g + 273)^4 + [(0,25 \cdot 10^8) / \epsilon_g] \cdot (|t_g - t_{ar}| / D)^{1/4} \cdot (t_g - t_{ar})\}^{1/4} - 273 \quad \text{Equação 1}$$

$$t_{rm} = \{(t_g + 273)^4 - [(1,1 \cdot 10^8 \cdot v_{ar}^{0,6}) / (\epsilon_g \cdot D^{0,4})] \cdot (t_g - t_{ar})\}^{1/4} - 273 \quad \text{Equação 2}$$

onde: t_g é a temperatura de globo, em °C;
 ϵ_g é a emissividade do globo, adimensional;
D é o diâmetro do globo, em m.

3.2 Modelagem numérica para avaliação preditiva

Nos subitens seguintes, são apresentados os estudos de correlação de múltiplas variáveis para a predição de sensação térmica sem necessariamente serem realizados levantamentos *in loco*. Possibilita-se, assim, a avaliação de projetos e ainda a avaliação de espaços existentes sem a necessidade obrigatória de realização de medições de campo.

No caso de não haver medições *in loco*, é necessária a utilização de modelagem específica para predição das condições microclimáticas específicas do espaço em avaliação, considerando-se os efeitos da matéria e forma urbana nas condições climáticas que comumente são conhecidas por meio de dados registrados em estações meteorológicas. Ressalta-se que essa modelagem não é objeto de estudo desta pesquisa. No tópico seguinte é considerada, portanto, a modelagem para predição da sensação térmica a partir das condições microclimáticas.

3.2.1 Modelagem numérica para o conjunto mais restrito de situações

A seguir são apresentadas as regressões lineares realizadas para os valores médios alcançados para as trinta e seis situações levantadas inicialmente.

A primeira tentativa de estabelecimento de uma equação a partir de regressão linear foi realizada observando-se trinta e seis conjuntos de dados, considerando-se os valores médios obtidos para as situações consideradas. A equação seguinte foi obtida em função das quatro variáveis ambientais.

$$\text{Sens} = 7,188 - 0,182 \cdot t_{\text{ar}} - 0,0670 \cdot \text{UR} - 0,309 \cdot v_{\text{ar}} + 0,0604 \cdot t_{\text{rm}} \quad \text{Equação 3}$$

com: $r = 0,925$; $r^2 = 0,855$; $r^2_{\text{aj}} = 0,836$; $\text{ep} = 0,339$; $p < 0,001$

onde: Sens é a sensação térmica, adimensional;
 UR é a umidade relativa, em porcentagem;
 r é o coeficiente de correlação, adimensional;
 r^2 é o coeficiente de determinação, adimensional;
 r^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado, adimensional;
 ep = erro padrão, adimensional;
 p = nível de significância, adimensional.

Observa-se alta correlação (0,925) entre os resultados da equação e os dados observados, sendo superior à correlação de todos os modelos estudados. O erro padrão é bastante razoável, dados os valores que a sensação térmica assume. Ao se considerar o valor que se assume tradicionalmente para p ($p < 0,05$), o valor encontrado indica que as variáveis contribuem efetivamente para a predição da variável dependente.

Contudo, considerando-se qualitativamente os resultados esperados de tal equação, observa-se um comportamento estranho devido aos sinais dos coeficientes das variáveis temperatura do ar e umidade relativa. Esse fato se deve à presença de multicolinearidade presente entre as variáveis independentes. Há alta correlação entre as variáveis temperatura do ar e umidade relativa. Assim, os resultados do modelo ficam prejudicados devido à colinearidade interna.

A tabela a seguir apresenta os resultados para a constante da equação e cada variável considerada.

Tabela 2: Resumo estatístico da constante e das quatro variáveis independentes

	c	ep	t	p	VIF
constante	7,188	4,592	1,565	0,128	
t_{ar}	-0,182	0,120	-1,524	0,138	25,738
UR	-0,0670	0,0302	-2,220	0,034	24,099
v_{ar}	-0,309	0,164	-1,889	0,068	1,152
t_{rm}	0,0604	0,00876	6,893	<0,001	2,348

Onde: c = coeficiente; ep = erro padrão; t = valor estatístico t; p = nível de significância; VIF = fator de inflação da variância; todos adimensionais.

O valor estatístico t testa a hipótese nula de que o coeficiente da variável independente seja igual a zero, ou seja, que ela não contribui para a predição da variável dependente. O valor de t é a razão entre o coeficiente de regressão e o seu erro padrão. Os valores de p apresentados referem-se à predição da variável dependente por combinação linear das variáveis independentes. Os elevados valores de VIF para as variáveis temperatura do ar e umidade relativa revelam a multicolinearidade, uma vez que tradicionalmente se adota $VIF < 4$. Quando VIF é igual à unidade, não há redundância nas outras variáveis independentes. Assim, devido aos altos valores de VIF, optou-se pela retirada de uma das duas variáveis independentes.

Como o valor de p da variável umidade relativa do ar é bem mais baixo que o da temperatura do ar, dever-se-ia retirar essa variável da análise. Contudo, considerando-se os argumentos apresentados no item anterior, em que se colocou que a umidade relativa varia em função da temperatura do ar, optou-se por removê-la, ao invés da temperatura do ar. Estudos posteriores verificam outras possibilidades.

Por enquanto, é considerado novo estudo sem a variável umidade relativa. Realizou-se nova regressão linear observando-se os mesmos 36 dados, que consideram os valores médios obtidos para as trinta e seis situações consideradas. A equação foi obtida em função de três variáveis ambientais.

$$\text{Sens} = -2,858 + 0,0698 \cdot t_{\text{ar}} + 0,0603 \cdot t_{\text{rm}} - 0,306 \cdot v_{\text{ar}} \quad \text{Equação 4}$$

com: $r = 0,912$; $r^2 = 0,832$; $r^2_{\text{aj}} = 0,816$; $\text{ep} = 0,359$; $p < 0,001$

A Tabela 4 apresenta um resumo dos resultados estatísticos para a constante da equação e cada variável considerada.

Tabela 3: Resumo estatístico da constante e das três variáveis independentes

	c	ep	t	p	VIF
constante	-2,858	0,831	-3,439	0,002	
t _{ar}	0,0698	0,0400	1,744	0,091	2,562
t _{rm}	0,0603	0,00928	6,495	<0,001	2,348
v _{ar}	-0,306	0,173	-1,764	0,087	1,152

Verifica-se que a variável temperatura radiante média apresenta valor de p muito inferior ao das demais variáveis, indicando que a variável dependente poderia ser prevista consideravelmente a partir apenas dessa variável. De fato, em item anterior, foi verificada a forte correlação entre elas: 0,88, valor consideravelmente próximo do valor 0,91 encontrado para as três variáveis em consideração.

A tabela seguinte mostra os resultados de análise de variância para a primeira equação proposta, com quatro variáveis dependentes, e para a segunda equação proposta, com três variáveis independentes.

Tabela 4: Análise de variância para as regressões realizadas

	DF	SS	MS	F	p
Regressão	4	20,928	5,232	45,661	<0,001
Resíduo	31	3,552	0,115		
Total	35	24,480	0,699		
Regressão	3	20,363	6,788	52,759	<0,001
Resíduo	32	4,117	0,129		
Total	35	24,480	0,699		

Onde: DF = grau de liberdade; SS = soma dos quadrados; MS = razão entre SS e DF; F = teste estatístico F; p = nível de significância; todas adimensionais.

Verificam-se resultados bastante próximos, com a soma dos quadrados totais idêntica em ambos os casos. Contudo, por meio do teste estatístico F, que considera a razão entre os quadrados médios MS_{reg} e MS_{res} (sendo que MS é a razão entre a soma dos quadrados SS e o grau de liberdade DF), observa-se um maior valor para a regressão com três variáveis, indicando que as variáveis independentes consideradas contribuem mais significativamente para a predição da variável dependente do que quando consideradas juntamente com a variável umidade relativa.

A modelagem resultante apresenta, conforme se verificou na apresentação dos procedimentos realizados, correlação de 0,91 com os dados observados nas trinta e seis situações consideradas. Com relação aos resultados encontrados nas simulações apresentadas em Monteiro e Alucci (2007b e 2007c), observa-se que o maior valor de correlação encontrado foi 0,89. Assim, pode-se afirmar que a modelagem proposta apresenta resultados mais significativos – o que era esperado, uma vez que foi obtida a partir de dados observados regredidos. Pode-se colocar ainda que, conforme é verificado na continuidade deste trabalho, a utilização do modelo em questão é mais fácil e direta que a da maioria dos modelos considerados, e tão fácil e direta quanto a de qualquer modelo considerado.

3.2.2 Modelagem numérica para conjunto mais abrangente de situações

A seguir são apresentadas as regressões lineares realizadas para os valores médios alcançados para as setenta e duas situações levantadas.

Assim como no estudo anterior, a primeira tentativa de estabelecimento de uma equação a partir de regressão linear foi realizada considerando-se as quatro variáveis independentes. Ainda que já se saiba previamente que há multicolinearidade entre as variáveis temperatura do ar e umidade relativa, manteve-se aqui tal consideração apenas para se manter a estrutura de raciocínio empregada anteriormente. Assim, a equação seguinte foi obtida em função das quatro variáveis ambientais, para as setenta e duas situações levantadas.

$$\text{Sens} = -1,237 + 0,022 \cdot t_{ar} - 0,0120 \cdot UR - 0,257 \cdot v_{ar} + 0,0656 \cdot t_{rm} \quad \text{Equação 5}$$

$$\text{com: } r = 0,936; r^2 = 0,875; r^2_{aj} = 0,868; ep = 0,315; p < 0,001$$

Verifica-se alta correlação (0,94) entre os resultados da equação e os dados observados, sendo superior à correlação de todos os modelos estudados. Comparando-se a equação com os modelos realizados para o grupo de situações mais restrito, com apenas trinta e seis casos, constata-se que a equação apresenta coeficientes mais próximos do modelo final então alcançado.

Ainda assim, verifica-se que, conforme pode ser observado na tabela seguinte, apesar do aumento da variação das condições de umidade, a variável umidade relativa apresenta colinearidade com a variável temperatura do ar, fato que se traduz, na prática, no coeficiente negativo para a constante da umidade

relativa. Desta forma, no próximo tópico é realizada regressão linear suprimindo-se tal variável e, em seguida, são apresentados os mesmos procedimentos, anteriormente já realizados para o grupo mais restrito de trinta e seis situações microclimáticas, agora para o grupo mais abrangente de setenta e duas situações. A tabela seguinte apresenta um resumo dos resultados estatísticos para a constante da equação e cada variável considerada.

Tabela 5: Resumo estatístico da constante e das quatro variáveis independentes

	c	ep	t	p	VIF
Constante	-1,237	1,24	-0,998	0,322	
t _{ar}	0,022	0,0291	0,754	0,453	8,764
UR	-0,012	0,0094	-1,276	0,206	9,816
v _{ar}	-0,257	0,114	-2,244	0,028	1,271
t _{rm}	0,0656	0,0059	11,164	<0,001	2,334

De acordo com os resultados da Tabela 5, há multicolinearidade entre as variáveis independentes. A variável com maior valor de VIF é comumente descartada e nova regressão é realizada. No caso do conjunto mais restrito de dados, observou-se que a temperatura do ar apresentava valor de VIF mais elevado, mas, ainda assim, optou-se pela remoção da variável umidade relativa, por entender-se que esta depende daquela, e não o contrário. No caso atual, considerando-se uma maior quantidade de dados, fica evidente que aquela decisão foi acertada, tanto que tal variável apresenta agora o maior de VIF, devendo ser descartada, independentemente de outras considerações externas. Desta forma, na seqüência, é considerado o estudo sem a variável umidade relativa.

Nova regressão múltipla linear foi realizada observando-se os mesmos setenta e dois conjuntos de dados, que consideram os valores médios obtidos para as situações verificadas. A equação seguinte foi obtida em função de três variáveis ambientais.

$$\text{Sens} = -2,787 + 0,0544 \cdot t_{ar} + 0,0687 \cdot t_{rm} - 0,304 \cdot v_{ar} \quad \text{Equação 6}$$

com: $r = 0,934$; $r^2 = 0,872$; $r^2_{aj} = 0,867$; $ep = 0,317$; $p < 0,001$

Comparando-se os resultados com os encontrados para o conjunto de situações mais restrito, verifica-se que a correlação de 0,91 sobe para 0,93. Assim, observa-se que o aumento da abrangência da amostra contribui para uma correlação mais alta, mantendo-se a significância da mesma, com $p < 0,001$. A tabela a seguir apresenta um resumo dos resultados estatísticos para a constante da equação e cada variável considerada.

Tabela 6: Resumo estatístico da constante e das três variáveis independentes

	c	ep	t	p	VIF
Constante	-2,787	0,249	-11,17	<0,001	
t _{ar}	0,0544	0,0143	3,796	<0,001	2,1
t _{rm}	-0,304	0,011	-2,803	<0,001	1,135
v _{ar}	0,0687	0,0053	12,861	<0,001	1,915

Verifica-se que todas as variáveis independentes contribuem significativamente para a predição da variável dependente. A significância é bastante alta, com $p < 0,001$ para todos os casos (comumente adota-se $p < 0,05$), e os valores de VIF estão todos abaixo do esperado (comumente adota-se $VIF < 4$).

4 RESULTADOS DO NOVO MODELO

A última modelagem proposta apresenta, conforme se verificou por meio dos procedimentos realizados, correlação de 0,93 com os dados observados nas setenta e duas situações consideradas, contra a correlação de 0,91 da modelagem baseada na observação dos dados de trinta e seis situações. De qualquer forma, a primeira modelagem já apresentava resultados superiores aos dos demais modelos levantados e simulados, cuja melhor correlação foi de 0,89. A tabela 8 apresenta a análise de variância para as quatro regressões apresentadas anteriormente.

Por meio do teste estatístico F, observa-se um maior valor para a regressão com três variáveis, o que indica que as variáveis independentes consideradas contribuem mais significativamente para a predição da variável dependente do que quando consideradas juntamente com a variável independente umidade relativa.

De forma análoga, pode-se verificar que o aumento da quantidade de dados observados propiciou contribuição significativa, que pode ser notada por meio dos valores de F mais elevados para as regressões com o conjunto de dados mais abrangentes.

Verifica-se também que, para esse caso, o incremento no valor do teste estatístico F é ainda mais significativo, indicando que realmente deve-se utilizar a regressão múltipla de três variáveis realizada a partir do conjunto de dados mais abrangente.

Tabela 7: Análise de variância para as regressões realizadas

	DF	SS	MS	F	p
Regressão	4	20,928	5,232	45,661	<0,001
Resíduo	31	3,552	0,115		
Total	35	24,480	0,699		
Regressão	3	20,363	6,788	52,759	<0,001
Resíduo	32	4,117	0,129		
Total	35	24,480	0,699		
Regressão	4	46,667	11,667	117,44	<0,001
Resíduo	67	6,656	0,0993		
Total	71	53,323	0,751		
Regressão	3	46,505	15,502	154,61	<0,001
Resíduo	68	6,818	0,1		
Total	71	53,323	0,751		

4.1 Modelagem analítica

A seguir, apresentam-se os procedimentos realizados para a consideração da umidade relativa do ar na modelagem numérica proposta anteriormente. Com base nos resultados encontrados chegou-se a uma equação que, considerando apenas três variáveis, fornece correlação mais significativa que as fornecidas pelas simulações realizadas com os modelos pré-existentes. Assim, como exercício teórico, resolveu-se adaptar a equação obtida por regressão, visando à consideração da umidade relativa do ar.

Optou-se, então, pela utilização dos resultados encontrados por outro modelo, para posterior verificação de sua validade por meio dos dados levantados considerados em termos de umidade absoluta, que não apresentam colinearidade com a temperatura do ar, pois, ao contrário da umidade relativa, não dependem dela.

Considerando-se a equação geral apresentada por Nikolopoulou (2004) para a Europa, utilizou-se a variação no voto atual de sensação induzida por variação nos valores de umidade relativa do ar, para contemplar essa na equação obtida a partir da regressão linear com três variáveis. Ainda que se assumia que o efeito da umidade na sensação de conforto é distinto em diversas regiões, devido à aclimação das pessoas, pode-se realizar um exercício teórico, uma vez que os valores encontrados são utilizados apenas como referência, já que na continuidade dos estudos são considerados os dados de umidade absoluta para a devida calibração do modelo.

Desta forma, partindo-se da variação de valores encontrada para o modelo apresentado pela autora, iterativamente acrescentaram-se e diminuíram-se pequenos incrementos na constante da equação proposta e no coeficiente da nova variável independente, obtendo-se uma nova equação que apresenta correlação com os dados observados da mesma ordem que a equação original. Assim, obtém-se a equação seguinte.

$$\text{Sens} = -2,457 + 0,0544 \cdot t_{\text{ar}} + 0,0687 \cdot t_{\text{rm}} + 0,0134 \cdot \text{UR} - 0,304 \cdot v_{\text{ar}} \quad \text{Equação 7}$$

Contudo, considerando-se o estudo experimental comparativo com os dados de umidade absoluta, verifica-se a aplicabilidade apenas parcial dos resultados encontrados com esse exercício teórico, uma vez que a correlação encontrada a partir desses dados foi de 0,917, com $p < 0,001$. Assim, por esse valor não estar muito próximo ao da correlação original de 0,934, optou-se por realizar nova regressão com base, inicialmente, nos dados de umidade absoluta, para então convertê-los em umidade relativa na equação proposta, que é apresentada na seqüência.

$$\text{Sens} = -3,557 + 0,0632 \cdot t_{\text{ar}} + 0,0677 \cdot t_{\text{rm}} + 0,0105 \cdot \text{UR} - 0,304 \cdot v_{\text{ar}} \quad \text{Equação 8}$$

Considerando-se a correlação entre essa equação e a equação originalmente regredida, obtém-se um valor de 0,997, com $p < 0,001$ (mais precisamente, p é da ordem de 10^{-35}), indicando a validade preditiva da nova equação proposta. Com relação à correlação dessa com os dados empíricos, obteve-se um valor de 0,928, com $p < 0,001$. Deste modo, resolveu-se tomá-la como definitiva, uma vez que possíveis ganhos com novas modelagens seriam deveras restritos, não sendo possível melhorar a correlação da regressão linear múltipla anteriormente apresentada (0,934), considerando-se os resultados com duas casas significativas (0,93).

4.2 Proposição de índice baseado em temperatura equivalente

Em Monteiro e Alucci (2007a), em que se apresenta a revisão histórica e o estado da arte de índices e modelos de sensação térmica e esforço fisiológico, observou-se a tendência em se adotarem temperaturas equivalentes no lugar de escalas interpretativas.

Considerando-se a aplicação para espaços abertos, índices de temperatura equivalente apresentam algumas vantagens. Não precisam, em princípio, de escalas interpretativas, uma vez que fazem referência a uma situação equivalente de comparação. Por não precisarem de escala interpretativa, podem ser utilizados individualmente como valores de referência para sensação térmica, uma vez que consideram as diferentes variáveis ambientais e apresentam interpretação de caráter indutivo.

Para a proposição de uma equação que fornece valores de temperatura equivalente, assumiram-se aqui as seguintes condições para o ambiente de referência:

- temperatura radiante média igual à temperatura do ar: $t_{rm} = t_{ar}$
- velocidade do ar aproximadamente igual a zero: $v_{ar} = 0,1$ m/s
- umidade relativa igual a cinquenta por cento: $UR = 50\%$

Baseando-se essas assunções, a relação entre a temperatura equivalente a ser proposta e as sensações previstas pela equação anteriormente apresentada é dada pelas equações seguintes.

$$\begin{aligned} \text{Sens} &= -3,062 + 0,131 \cdot t_{ar} && \text{Equação 9} \\ t_{ar} &= 23,395 + 7,639 \cdot \text{Sens} && \text{Equação 10} \end{aligned}$$

Desta forma, correlacionando-se as variáveis ambientais das setenta e duas situações levantadas e o valor médio de percepção de sensação térmica verificado em cada uma delas (tendo como base os resultados dos 1750 questionários aplicados), e realizando-se as considerações teóricas e adaptações numéricas apresentadas ao longo deste artigo, tem-se, para pessoas em pé e paradas, com vestimentas escolhidas por elas próprias, a proposição da equação seguinte, onde TEP = temperatura equivalente percebida.

$$\text{TEP} = -3,777 + 0,4828 \cdot t_{ar} + 0,5172 \cdot t_{rm} + 0,0802 \cdot UR - 2,322 \cdot v_{ar} \quad \text{Equação 11}$$

Em resumo, a temperatura equivalente percebida de um dado ambiente pode ser sucintamente definida como uma escala de sensação térmica que apresenta valores numericamente iguais aos da temperatura do ar de um ambiente de referência ($t_{ar}=t_{rm}$, $UR=50\%$ e $v_{ar}=0$) em que se verifica o mesmo valor médio de percepção de sensação térmica que no ambiente em questão.

Ressalta-se que a equação foi obtida a partir de dados compreendidos em determinadas situações ambientais e que a utilização em outras situações depende da verificação de correlação de resultados de possíveis extrapolações com dados observados. Os limites verificados no levantamento de variáveis ambientais são apresentados na Tabela 9 junto com os limites para a temperatura equivalente percebida.

Ainda que a vantagem de temperaturas equivalentes seja a possibilidade de interpretação intuitiva de seus valores, é também interessante a existência de escalas interpretativas, uma vez que a interpretação intuitiva só é possível após a exposição a vários ambientes e o conhecimento de suas respectivas temperaturas equivalentes. Deste modo, apresenta-se na Tabela 10 as faixas para interpretação do índice de temperatura equivalente percebida, em função dos valores médios de sensação térmica.

Tabela 9: Valores-limite das variáveis envolvidas na TEP, considerando-se os dados observados.

variável	valor mínimo	valor máximo
t_{ar}	15,1	33,1
UR	30,9	94,7
v_{ar}	0,1	3,6
t_{rm}	15,5	65,5
TEP	13,7	45,3

Tabela 10: Faixas interpretativas para a temperatura equivalente percebida (TEP).

TEP	Sensação
> 42,4	muito calor
34,9 ~ 42,4	calor
27,3 ~ 34,8	pouco calor
19,6 ~ 27,2	neutralidade
12,0 ~ 19,5	pouco frio
4,4 ~ 11,9	frio
< 4,4	muito frio

Conforme pode ser verificado na penúltima equação apresentada, a temperatura do ar de neutralidade de sensação térmica para o caso do ambiente de referência é, teoricamente, de 23,4°C, valor central da faixa de neutralidade da tabela recém apresentada, ou seja, temperatura equivalente percebida de neutralidade (TEP_n).

5 CONCLUSÕES

A nova modelagem proposta, representativa das situações urbanas específicas estudadas na cidade de São Paulo, é derivada de tratamento estatístico da base de dados empírica, análise de modelos e proposição de temperatura equivalente percebida. Verifica-se que a correlação dos resultados preditivos modelares encontrados (0,93) são mais significativos que de qualquer outro modelo, mesmo calibrado (Monteiro e Alucci, 2007b e 2007c). Ainda que seja de se esperar que, na comparação de um modelo com os demais, na qual o critério de comparação seja a própria base empírica geradora do modelo, tenham-se melhores resultados correlativos do próprio modelo, não se pode negar a conclusão de que um simples modelo linear gerado, dada uma população adaptada a determinadas condições climáticas, é de mais fácil utilização e apresenta melhores resultados que qualquer outro modelo. Tem-se, assim, a confirmação de que a predição de conforto térmico em espaços abertos requer modelos com calibração e validação específicas para dada população adaptada a determinadas condições climáticas. Tem-se, ainda, com base nos diversos critérios e procedimentos desenvolvidos ao longo da pesquisa, o cumprimento do objetivo da mesma, com a proposição de um método e a quantificação das correlações propostas, entre variáveis microclimáticas urbanas e variável subjetiva de percepção de sensação térmica. A mediação por variáveis individuais, taxa metabólica e isolamento térmico da roupa, será verificada no próximo artigo: “*Conforto térmico em espaços abertos. Parte 2: consideração da taxa metabólica e isolamento térmico da roupa*”. A consideração de outras variáveis e apresentação da modelagem final serão realizadas no terceiro e último artigo: “*Conforto térmico em espaços abertos. Parte 3: consideração do sexo, aclimatação e adaptação*”.

6 REFERÊNCIAS

- BLAZEJCZYK, Krzysztof; MENEX 2002. In: THE DEVELOPMENT OF HEAT STRESS WATCH WARNING SYSTEMS FOR EUROPEAN CITIES. Freiburg May 3, 2003. **Proceedings of Conference...**, Friburgo, 2003. Disponível em <http://www.gees.bham.ac.uk/research/phewe/freiburg/>. Visita realiza em 09/10/2004.
- BLAZEJCZYK, Krzysztof; TOKURA, Hiromi; BORTKIEWCZ, Alicja; Szymczak, W. Solar radiation and thermal physiology in man. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BIOMETEOROLOGY & INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATOLOGY, 15, 1999, Sydney. **Selected Papers from the Conference...** Geneva: World Meteorological Organization, p. 267-272, 2000.
- GIVONI, Baruch; NOGUCHI, Mikiko. Outdoor Comfort Responses of Japanese Persons. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 21, 2004, Eindhoven. **Proceedings...** 2004.
- _____. Issues in outdoor comfort research. In: Passive and Low Energy Architecture, 19, 2002, Toulouse. **Proceedings...** 2002.
- _____. Issues and Problems in Outdoor Comfort Research. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 17, 2000, Cambridge. **Proceedings...** 2000.
- ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION). **ISO 7726**. Ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities. Genève: ISO, 1998.
- JENDRITZKY, Gerd et al. **Klimatologische Probleme** – ein einfaches Verfahren zur Vorhersage der Wärmebelastung, in Zeitschrift für angewandte Bäder und Klimaheilkunde. Freiburg, 1979.
- JENDRITZKY, Gerd; NÜBLER, W. A model analyzing the urban thermal environment in physiologically significant terms. **Arch. Meteor. Geophys. Bioclimatol.** Serial B 29, p. 313-326, 1981.
- MONTEIRO, L. M. **Modelos preditivos de conforto térmico**: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos. 378p. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. Questões teóricas de conforto térmico em espaços abertos: consideração histórica, discussão do estado da arte e proposição de classificação de modelos. **Ambiente Construído**, 7, 3, p. 43-58, 2007a.
- _____. Conforto térmico em espaços abertos com diferentes abrangências microclimáticas. Parte 1: verificação experimental de modelos preditivos. In: IX Encontro Nacional e V Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. **Anais...** Antac, 2007b.
- _____. Conforto térmico em espaços abertos com diferentes abrangências microclimáticas. Parte 2: proposição de calibração de modelos preditivos. In: IX Encontro Nacional e V Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. **Anais...** Antac, 2007c.
- _____. Índices de conforto térmico em espaços abertos. Parte 1: revisão histórica. In: VIII Encontro Nacional e IV Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2005, Maceió. **Anais...** Antac, 2005a.
- _____. Índices de conforto térmico em espaços abertos. Parte 2: estado da arte. In: VIII Encontro Nacional e IV Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2005, Maceió. **Anais...** Antac, 2005b.
- _____. Procedimentos para quantificação de variáveis para análise termofisiológica em espaços abertos. In: VIII Encontro Nacional e IV Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2005, Maceió. **Anais...** Antac, 2005c.
- NIKOLOPOULOU, Marialena. **Designing Open Spaces in the Urban Environment**: a Bioclimatic Approach. Atenas: CRES, 2004.
- _____. Microclimate and comfort conditions in urban spaces: an intricate relationship. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 19, 2002, Toulouse. **Proceedings...** 2002.
- _____. **Thermal Comfort in Outdoor Urban Spaces**. PhD thesis. University of Cambridge: 1998.

7 AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro.