



VERIFICAÇÃO COMPARATIVA EXPERIMENTAL DA APLICABILIDADE DE DIFERENTES MODELOS PREDITIVOS DE CONFORTO TÉRMICO EM AMBIENTES EXTERNOS

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

(1) Departamento de Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de São Paulo – e-mail: leo.mm@uol.com.br; (2) marciaalu@usp.br

RESUMO

Proposta: A maior parte das pesquisas de conforto térmico é desenvolvida para ambientes internos. Contudo, há também relevante produção adaptada ou desenvolvida especificamente para ambientes externos. A consideração desses espaços implica em fatores adicionais, comumente não encontrados em ambientes internos, que trazem maior complexidade para a análise termo-fisiológica: radiação solar, ventos, atividades físicas diferenciadas, possibilidade de taxas de suor significativas, entre outros. O objetivo desta pesquisa foi verificar a aplicabilidade de diferentes modelos preditivos de conforto e/ou estresse térmico em ambientes externos na cidade de São Paulo. **Método/abordagens:** O método adotado foi indutivo experimental (levantamento de campo de variáveis micro-climáticas e respostas subjetivas) e dedutivo (simulação de modelos preditivos). O levantamento de campo foi realizado em 36 cenários micro-climáticos distintos com a aplicação de mais de 900 questionários. Para a realização das simulações, foram processados computacionalmente vinte modelos preditivos, considerando-se trinta e dois índices distintos. **Resultados:** Os resultados das simulações foram correlacionados com os do levantamento de campo, determinando-se a capacidade preditiva de cada modelo. **Contribuições/originalidade:** Verificação comparativa experimental da aplicabilidade de diferentes modelos preditivos de conforto e/ou estresse térmico em ambientes externos na cidade de São Paulo.

Palavras-chave: conforto térmico, estresse térmico, modelos preditivos, ambientes externos.

ABSTRACT

Propose: Most of researches concerning thermal comfort focus on indoor spaces. However, there are also relevant researches concerning outdoor spaces, which require the consideration of additional factors, as solar radiation, winds, different activities, sweat rates, among others. This research focuses the relations between urban micro-climatic variables and thermal comfort. The research objects are the empirical and rational predictive models of outdoor thermal comfort. The objective is to verify their applicability in case studies in São Paulo, Brazil. **Methods:** The method adopted is experimental inductive (field research of micro-climatic variables and subjective answers) and deductive (simulation of predictive models). The field research consists of 36 different micro-climatic scenarios and over 900 applied questionnaires. The simulations consider twenty predictive models and thirty-two different indexes. **Findings:** All the predictive models were computationally processed and the results of the simulations are compared to the results of the empirical field research. **Originality/value:** Experimental comparative verification of different outdoor thermal comfort predictive models in the city of São Paulo.

Keywords: thermal comfort, thermal stress, predictive models, outdoor spaces.

1. INTRODUÇÃO

Neste artigo é apresentado um estudo comparativo entre e os resultados de modelos preditivos de adequação térmica e os resultados de levantamentos empíricos realizados na cidade de São Paulo. Para a realização das simulações, foram processados computacionalmente vinte modelos preditivos, levando em consideração trinta e dois índices distintos. Com relação aos levantamentos de campo, estes foram realizados em 36 cenários micro-climáticos distintos com a aplicação de mais de 900 questionários. A descrição dos levantamentos realizados pode ser encontrada em Monteiro (2005a). No presente artigo serão considerados: apresentação sumária dos diversos modelos, índices e variáveis envolvidas; uma proposta de classificação dos modelos; os critérios de comparação adotados; e apresentação e discussão dos resultados.

A tabela 1 traz os modelos utilizados para as simulações assim como as referências bibliográficas específicas em que podem ser encontradas suas formulações matemáticas. Estas podem também ser encontradas em Monteiro (2005b). A tabela traz ainda as diversas variáveis independentes que foram utilizadas na consideração de cada um dos modelos em estudo. Observando-se a tabela, é possível verificar que alguns índices, apresentados em Monteiro (2005b), não foram aqui considerados, pois: não foram localizadas as equações para a temperatura resultante (TR) de Missenard (1946) e para o índice de taxa de suor prevista para quatro horas (P4SR), de McAriel et al. (1947); o índice equatorial de conforto, proposto por Webb (1960, citado por Santamouris & Asimakopoulos, 1996) não foi considerado, pois não se localizou escala interpretativa para seus valores; a temperatura percebida (TP), proposta por Jendritzky (2003), não foi considerada, pois não se localizou o modelo para consideração seletiva da vestimenta; o índice termo climático universal (UTCI) também não foi considerado, pois ainda não foi definido o modelo de balanço a ser utilizado, tampouco foram estabelecidos todos os seus parâmetros. Os demais modelos foram processados computacionalmente em planilhas eletrônicas de cálculos, facilitando o trabalho de processamento da grande quantidade de dados de entrada e de saída.

2. CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS E DOS ÍNDICES

Para facilitar a discussão dos resultados, foi realizada uma classificação dos modelos estudados, considerando conceitos modelares e modais. Consideraram-se ainda os seus respectivos índices, segundo o critério de interpretação apresentado. Assim, os modelos foram classificados segundo dois critérios: o objeto de predição e o método predominante de modelagem. Segundo o objeto de predição, tem-se a consideração ou do esforço fisiológico (cujos índices são comumente referidos como de estresse térmico), ou da sensação térmica (cujos índices são comumente considerados como de conforto térmico). Com relação ao método predominante de modelagem, tanto os modelos de esforço fisiológico quanto os modelos de sensação térmica podem ser subdivididos em modelos numéricos e modelos analíticos, segundo sejam, respectivamente, adotadas abordagens predominantemente indutivas ou dedutivas (ver tabelas 2 e 3).

Já os índices foram classificados segundo o seu principal critério interpretativo. Assim, os índices considerados baseiam-se predominantemente em um dos dois seguintes critérios: analogia ou parametrização. Quando a interpretação é realizada através de analogia, verifica-se, invariavelmente, a adoção de temperaturas equivalentes. Estas são temperaturas equivalentes de referência, no caso de modelos de esforço fisiológico, e temperaturas equivalentes de sensação térmica, no caso dos modelos que têm esta como objeto de predição. Em ambos os casos, é habitual o estabelecimento posterior de faixas interpretativas para os valores das temperaturas equivalentes. Nos casos em que não ocorre um processo analógico, observa-se o estabelecimento de um parâmetro específico, ou ainda da relação entre diversos parâmetros. No caso de índices de estresse térmico, os parâmetros são fisiológicos. Já com relação aos índices de conforto térmico, tem-se parametrização através de variáveis fisiológicas ou através de escalas arbitrárias de valores. Em ambos os casos verifica-se posterior correlação dos valores encontrados com respostas subjetivas. Assim, ainda que nas duas situações tenha-se uma interpretação qualitativa subjetiva, convencionou-se aqui a divisão dos índices parametrizados segundo a utilização de parâmetros ditos fisiológicos ou qualitativos. Estes foram assim chamados porque a escala de valores é arbitrada pelas respostas subjetivas, recaindo a ênfase no caráter qualitativo. Já aqueles foram assim chamados porque a escala de valores é determinada efetivamente pelo parâmetro ou relação de parâmetros fisiológicos.

Tabela 1: Modelos processados computacionalmente para simulação comparativa

Referência	Modelo	Índices	Variáveis													
			individuais				micro-climáticas			deri-vadas		climáticas				
			M	W	I _{cl}	R _e	t _{ar}	p _{ar}	v _{ar}	t _{rm}	t _g	t _{bu}	t _{bs}	ur	v ₁₀	R
Houghton, 1923; Szokolay, 2001	ET	ET*					x	x								
Vernom & Warner, 1932; Szokolay, 2001	ET	CET*					x	x			x					
ASHRAE, 1997	OT	OT					x		x	x	x					
ASHRAE, 1992, Szokolay, 2001	ET+OT	EOT*					x	x	x	x						
Siple & Passel, 1945	WCT	WCTI											x	x		
Belding & Hatch, 1955	HSI	HSI					x	x	x	x						
Yaglou, 1957; ISO 7243, 1989	WBGT	WBGT					x				x	x				
Gagge, 1967	Gagge	SET*	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
Givoni, 1969	ITS	ITS					x	x	x	x						
Masterton & Richardson, 1979	Humidex	HU					x	x								
Jendritzky, 1979, 1991	KMM	PMV	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
		PPD	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
ISO 7933, 1989	Vogt	S _{w_{req}}	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
		w	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
		S	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
		S _{w_{req}g/h}	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
Dominguez, 1992	Sevilha	S _{w_{req}} '	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	
Brown & Gillespie, 1995	Comfa	S'	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
Aroztegui, 1995	Tne	Tne											x	x	x	
Blazejczyk, 1996, 2000, 2002	MENEX	HL	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
		PhS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
		R'				x							x			
		STI	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
		SP	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
		ECI				x										
DeFreitas, 1997	DeFreitas	PSI	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
		STE	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
Höppe, 1999	MEMI	PET	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
Noguchi & Givoni, 2000	TS	TS					x	x	x	x				x		
Bluestein & Osczevski, 2002	NWCT	NWCT I											x	x		
		Ft											x	x		
Nikolopoulou, 2004	ASV	ASV											x	x	x	x

Tabela 2: Proposta de classificação dos modelos de esforço fisiológico

Objeto de predição	Esforço fisiológico (estresse)			
Método predominante	Indutivo (modelos numéricos)	Dedutivo (modelos analíticos)		
Modelos	WCT (WCTI) WBGT Humidex (HU) NWCT (NWCTI, Ft) HSI ITS	Vogt (S_{req} , w, S) Sevilha (S_{req}') MENEX (HL, PhS, R', SP)		
Principal critério interpretativo	Analogia	Parâmetros Fisiológicos		
Índices	WBGT ⁽¹⁾ HU ⁽¹⁾ NWCTI ⁽²⁾	WCTI ⁽²⁾ Ft ⁽²⁾ HSI ⁽¹⁾ ITS	-	$S_{req}, w, S^{(1)}$ $S_{req}', (1)$ HL PhS R' ⁽¹⁾ SP ⁽¹⁾

(1) Índices que consideram apenas exposição a situações térmicas quentes.

(2) Índices que consideram apenas exposição a situações térmicas frias.

Tabela 3: Proposta de classificação dos modelos de sensação térmica

Objeto de predição	Sensação térmica (conforto)		
Método predominante	Indutivo (modelos numéricos)	Dedutivo (modelos analíticos)	
Modelos	ET*, CET* OT, EOT* Tne TS ASV	Gagge (SET*) KMM (PMV, PPD) Comfa (S') MENEX (STI, ECI) De Freitas (PSI; STE) MEMI (PET)	
Principal critério interpretativo	Analogia	Parâmetros Fisiológicos	Parâmetros Qualitativos
Índices	ET* CET* OT EOT*	- Tne TS ASV	SET* STI PET S' ECI PSI STE PMV PPD

3. CRITÉRIOS DE COMPARAÇÃO

Para a realização da comparação entre os diversos modelos foram estabelecidos três critérios que estão baseados na correlação entre os resultados fornecidos pelos diversos modelos e os resultados encontrados no levantamento de campo, levando em consideração os valores médios obtidos em cada uma das trinta e seis situações levantadas.

Assim, para cada modelo, a consideração dos resultados é realizada através, primeiramente, da correlação entre os resultados do parâmetro adotado pelo modelo e os resultados, em termos de respostas subjetivas de percepção de sensação térmica, do levantamento de campo.

O segundo critério é a correlação entre os resultados do índice do modelo e os resultados, também em termos de respostas subjetivas de percepção de sensação térmica, do levantamento de campo.

Por fim, é considerada a porcentagem de equivalência de respostas do índice para os casos em que haja a possibilidade de estabelecimento de correlação lingüística entre as faixas interpretativas deste e as utilizadas no levantamento de campo.

As faixas de interpretação dos valores dos índices podem ser encontradas nas referências mencionadas na tabela 1 e em Monteiro (2005b). Com relação aos índices baseados em temperaturas equivalentes, utilizaram-se as faixas interpretativas propostas por De Freitas (1997). Ainda que o autor aponte a utilização desse critério apenas para os índices baseados em temperatura efetiva, adotou-se o mesmo para os demais casos, por falta de outras referências bibliográficas (exceto para o caso do STI, em que se utilizou Blazejczyk, 1996).

4. RESULTADOS

A tabela 4 apresenta os resultados em termos correlativos e de percentual de acerto preditivo. A consideração dos resultados será realizada através do agrupamento dos diversos índices, segundo a classificação proposta nas tabelas 2 e 3. Assim, configuram-se dois grandes grupos, segundo o objeto de predição do modelo: esforço fisiológico e sensação térmica. Cada grupo está subdividido em três subgrupos. Não se considerou aqui a classificação segundo o método predominante do modelo, por se acreditar que as comparações são mais facilmente realizadas segundo critérios estabelecidos de acordo com os dados de saída dos modelos. Assim, os critérios utilizados para cada grupo, que também estão presentes na referida tabela, serão elucidados a seguir.

Para a consideração dos resultados dos índices baseados em modelos de esforço fisiológico, foram estabelecidos três subgrupos: índices normativos de estresse térmico por calor, outros índices de estresse térmico por calor e índices de estresse térmico por calor e frio. Essa subdivisão foi realizada considerando-se que, inicialmente, devem ser discutidas as ferramentas normativas passíveis de serem aplicadas a espaços abertos. Em seguida, serão considerados os demais índices que consideram apenas situações térmicas quentes. Por fim, têm-se os índices que abrangem situações térmicas quentes e frias. Os índices WCTI e NWCTI são índices relativos à exposição a situações térmicas frias, conforme pode ser veirificado na tabela 2. Contudo foram considerados juntamente com o terceiro subgrupo, por razão que será apresentada oportunamente na discussão do referido subgrupo.

Para a consideração dos resultados dos índices baseados em modelos de sensação térmica, foram estabelecidos três subgrupos, baseando-se no principal critério interpretativo de seus índices, segundo a tabela 3. Assim, têm-se: índices de sensação térmica baseados em analogia (temperatura equivalente), índices de sensação térmica baseados em parâmetros fisiológicos e índices de sensação térmica baseados em parâmetros qualitativos.

Tabela 4: Módulos das correlações entre resultados do levantamento de campo e das simulações.

Modelo	Índices	Correlação com o parâmetro do modelo	Correlação com as faixas interpretativas	Porcentagem de previsões corretas
ET	ET*	0,73	0,59	44%
ET	CET*	0,89	0,77	11%
OT	OT	0,72	0,69	47%
ET+OT	EOT*	0,70	0,66	42%
WCT	WCTI	0,69	0,64	31%
HSI	HSI	0,83	0,72	68%
WBGT	WBGT	0,86	-	-
Gagge	SET*	0,89	0,84	28%
ITS	ITS	0,84	0,75	62%
Humidex	HU	0,74	0,70	69%
KMM	PMV	0,87	0,82	75%
"	PPD	0,70	-	-
Vogt	Swreq	0,87	-	-
"	W	0,86	-	-
Sevilha	Swreq'	0,89	0,83	72%
Comfa	S'	0,89	0,65	61%
Tne	Tne	0,88	0,70	33%
MENEX	HL	0,89	0,76	62%
"	PhS	0,81	0,71	28%
"	R'	0,86	0,76	69%
"	STI	0,87	0,79	53%
"	SP	0,89	0,82	78%
"	ECI	0,78	0,72	42%
De Freitas	PSI	0,89	0,76	72%
"	STE	0,79	0,71	58%
MEMI	PET	0,89	0,78	31%
TS	TS	0,87	0,84	78%
NWCT	NWCTI	0,62	0,60	22%
ASV	ASV	0,85	0,77	76%

5. CONSIDERAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1 Modelos de esforço fisiológico (estresse térmico)

5.1.1 Índices normativos de estresse térmico por calor

As normas ISO 7243:1989, NR-15:1978, ISO 7933:1989 serão aqui consideradas. Segundo a norma ISO 7243:1989, todas as situações analisadas não oferecem risco de estresse por calor para aclimatados ou não aclimatados. A NR-15:1978 oferece resultado análogo: como as situações em discussão levam em consideração atividade leve (pessoas em pé e relaxadas), a norma permitiria trabalho contínuo. A norma ISO 7933:1989 também não indicou restrição em nenhum dos seus critérios, sejam de estresse térmico (Swreq e w) ou de esforço fisiológico (S e Swreq em g/h). Observa-se, segundo esta norma, que na situação mais crítica o tempo de atenção e o tempo limite são de 6,6 e 8,2 horas para não aclimatados e 9,9 e 13,2 horas para aclimatados. Esta situação é a única

que também apresenta restrição de tempo de trabalho para atividade moderada segundo a NR-15:1978.

Em resumo, considerando as normas em questão, pode-se afirmar que nenhuma das situações em análise apresenta estresse térmico. Assim, considerando que estas três normas fornecem informações acerca do risco de estresse térmico, no limite poder-se-ia argumentar que a única informação fornecida por elas é que as situações em análise não apresentam este risco. Contudo, apesar das referidas situações não fazerem parte da faixa de avaliação qualitativa dessas normas, é interessante observar a alta correlação positiva dos índices WBGT, Swreq e w com o valor médio das respostas de percepção de sensação térmica, respectivamente 0,86; 0,87 e 0,86. Com relação ao S, como este valor manteve-se sempre nulo, não é possível estabelecer qualquer correlação. Quanto aos tempos de atenção e limite, estes apresentaram correlação negativa, numericamente igual em módulo à correlação de Swreq, uma vez que são obtidos a partir deste.

5.1.2 Outros índices de estresse térmico por calor

Serão considerados aqui o HSI, HU, Swreq (Sevilha), R' e SP. A menor correlação encontrada foi a do HU (0,74 para o índice e 0,70 para a interpretação do índice). Dado que este índice considera apenas as variáveis temperatura e umidade do ar, pode-se afirmar que houve um coeficiente de correlação significativamente alto. Este fato pode ser explicado considerando-se a alta correlação negativa entre a umidade relativa e as respostas de sensação de conforto encontradas no levantamento de campo. Já a correlação do R' foi significativamente alta (0,86 e 0,76), considerando-se que o índice é sensível apenas à radiação térmica e ao tipo de roupa. Contudo, conforme visto no levantamento em questão, a correlação mais significativa com as respostas de sensação térmica se deu através da temperatura radiante média. Deve-se considerar, ainda, a alta correlação desta com a temperatura do ar e desta com o isolamento da roupa. Assim, o bom desempenho do índice se explica, já que os momentos de desconforto por calor foram marcadamente caracterizados pela presença de radiação solar direta.

O HSI, apesar de considerar as quatro variáveis ambientais, acabou apresentando um resultado inferior (0,83 e 0,72) se comparado aos dois índices já citados, que não consideram todas as variáveis. Esse índice considera separadamente trocas convectivas, radiativas e evaporativas. Porém cada uma das trocas é considerada através de sucessões de aproximações empíricas. Assim, apesar de considerar as trocas isoladas, o modelo não é analítico, mas sim numérico. Provavelmente a base empírica adotada, ou o tratamento desta, não foram satisfatórios, se considerados para o caso em estudo, fato que é compreensível uma vez que o objetivo do índice é avaliar o estresse por calor e, conforme já verificado no item anterior, nenhuma situação configura-se necessariamente como de estresse. Para uma melhor elucidação da questão, seriam necessários estudos comparativos dos resultados individuais das diferentes trocas segundo os diversos modelos. Seria possível, inclusive, a proposição de novas relações empíricas para as diversas trocas isoladas, gerando modelos numéricos a partir de resultados de modelos analíticos que apresentam correlações com os resultados do levantamento de campo suficientemente significativas.

Por fim, os dois índices de estresse térmico por calor que apresentaram melhores correlações foram o Swreq (0,89 e 0,83) e o SP (0,89 e 0,82). Estes índices fornecem informações interessantes uma vez que focam em aspectos opostos relacionados ao estresse térmico. O índice de Sevilha caracteriza o uso do espaço em função do esforço fisiológico. Nos resultados encontrados, verifica-se que todos os espaços sem ocupação foram assim caracterizados em coincidência com a presença de radiação solar direta. Espaços de passagem são devidos a situações sem radiação solar direta, mas com maiores temperaturas do ar ou menores velocidades do vento. Já o SP caracteriza o efeito aparente do esforço fisiológico, indicando e caracterizando a presença de suor no corpo. Observa-se alta correlação entre as indicações deste índice, as indicações do modelo de Sevilha e ainda as respostas colhidas em campo. Coincide, assim, o critério pele seca com a zona de permanência e de conforto, o critério de pele sem umidade visível com a zona de passagem e pouco quente, e o critério de pele com umidade visível com a zona sem ocupação e quente, em mais de 75% dos casos.

5.1.3 Índices de estresse térmico por calor e frio

Os índices WCTI, NWCTI, ITS, PhS e HL serão aqui considerados. Em verdade, o WCTI e NWCTI

são índices de estresse térmico por frio, uma vez que avaliam apenas o efeito do vento sobre a temperatura do ar. Entretanto, como comumente apresentam-se tabelas de interpretação de seus valores também para temperaturas mais elevadas, foram aqui assim considerados. Os resultados, porém, indicaram os mais baixos índices de correlação: -0,69 e 0,64 para o índice original, e 0,62 e 0,60 para o novo (considerando-se respectivamente os valores do índice e as suas interpretações). Conforme já foi visto, a correlação entre as velocidades do ar e as respostas de sensação térmica foi bastante baixa. Assim, era de se esperar resultados semelhantes no desempenho destes índices. Contudo, independentemente deste fato, é interessante observar que o índice original tende a apontar para situações quentes, enquanto o novo índice aponta para situações mais frias.

O PhS apresentou correlação um pouco mais significativa: -0,81 e 0,71. Porém, qualitativamente este índice tende a indicar situações de esforço fisiológico por frio na maioria dos casos em que se obtiveram respostas de sensação térmica neutra. Já o ITS, apresentou correlação ainda melhor: 0,84 e 0,75. Qualitativamente as respostas deste índice parecem bastante satisfatórias, indicando neutralidade térmica em praticamente todas as situações e esforço por calor apenas quando as respostas de sensação térmica apresentaram valores próximos a 1,0.

Por fim, o índice de estresse térmico que apresentou melhor desempenho foi o HL (0,89 e 0,75). Observa-se que os valores do índice apresentaram correlação bem mais significativa que os demais, ainda que a correlação de sua interpretação esteja muito próxima da do ITS. Contudo, dado que os valores do índice apresentam correlação bem mais elevada, é possível melhorar a correlação de suas respostas propondo-se novas faixas de interpretação para seus valores. Este estudo será realizado na continuação dos trabalhos de pesquisa.

5.2 Modelos de sensação térmica (conforto térmico)

5.2.1 Índices de sensação térmica baseados em analogia (*temperatura equivalente*)

Serão aqui considerados quatro índices empíricos (ET*, CET*, OT, EOT*) e três analíticos (SET*, PET e STI). O índice ET* e sua interpretação apresentaram as menores correlações (0,73 e 0,59) apresentando ainda apenas 44% de acerto. Isto é devido ao fato de que este modelo não considera os efeitos radiativos que, conforme já colocado, tiveram alta correlação com as respostas encontradas. Os índices OT e EOT* apresentaram resultados um pouco melhores: 0,72; 0,69; 47% e 0,70; 0,66; 42% respectivamente. É curioso ainda observar que, com a consideração dos efeitos da umidade, a EOT* acabou por apresentar resultados menos satisfatórios que a OT.

Dos índices empíricos, o que apresentou as mais altas correlações foi o CET*: 0,89 e 0,77. Contudo, apresentou apenas 11% de acerto nas previsões. Isto demonstra que as correlações dos valores do índice são bastante altas, mas que os intervalos de interpretação podem ser melhorados e, principalmente, a interpretação de cada intervalo. A CET* considera apenas a temperatura de globo corrigindo-a com relação aos efeitos da umidade, segundo o modelo de ET*. Esse índice empírico corrigido, que considera apenas duas tomadas de medição, apresenta resultado tão significativo devido à alta correlação entre temperatura de globo e as respostas de sensação térmica verificada nos casos levantados.

Com relação aos índices analíticos, os três apresentaram resultados bastante significativos: 0,86 e 0,79 para o STI; 0,89 e 0,78 para o PET e 0,89 e 0,84 para o SET*. Contudo, a porcentagem de acertos desses índices é ainda bastante baixa (respectivamente 53%, 31% e 28%), indicando que a escala de interpretação adotada para seus valores não é satisfatória. Em um próximo trabalho programado, serão propostas novas escalas interpretativas em função dos resultados aqui obtidos.

5.2.2 Índices de sensação térmica baseados em parâmetros fisiológicos

Serão considerados aqui os seguintes índices, baseados em modelos analíticos: ECI, STE, PSI e S do modelo Comfa. O ECI e o STE apresentaram as correlações mais baixas deste grupo: respectivamente -0,78 e 0,72; e 0,79 e 0,71. Esses índices fazem previsão das sensações térmicas em termos da temperatura da pele e do isolamento da roupa. Estes índices apresentam alta correlação entre si, contudo, o STE aponta, qualitativamente para situações mais frias e o ECI para situações mais

quentes. Considerando válidas as associações apresentadas por esses índices e, confrontando-as com as situações levantadas em campo, pode-se afirmar que nestas tem-se uma associação de situações de conforto com temperaturas da pele mais baixas e com isolamentos de roupa mais altos.

O PSI e o S do Comfa apresentaram as correlações mais significativas do grupo: 0,86; 0,76; 72% para o PSI e 0,89; -0,65 e 61% para o S. O PSI apresenta, com sua atual escala de interpretação, o melhor desempenho. Contudo, uma vez que a correlação dos valores do índice é maior no modelo do Comfa, uma adaptação de suas faixas de interpretação possivelmente levará à correlação mais significativa do grupo. Deve-se notar que a correlação negativa deste modelo (-0,65), deve-se ao simples fato de que a sua interpretação é feita em termos de preferência, e não de percepção, de sensação térmica. Na continuação da pesquisa, quando for proposta nova escala e faixas de interpretação, será utilizado o padrão comumente encontrado de percepção, facilitando a comparação deste índice com os demais.

5.2.3 Índices de sensação térmica baseados em parâmetros qualitativos

Serão aqui discutidos os seguintes índices baseados em modelos analíticos: PMV e PPD (KMM), e os seguintes, baseados em modelos empíricos: Tne, TS e ASV.

O índice PMV, modelado através do KMM, apresenta correlações bastante significativas: 0,87 e 0,82. A alta correlação da interpretação do índice se deve em parte à adoção nesta pesquisa de escala de valores igual a do modelo em questão. Contudo, deve-se ressaltar que o valor de velocidade do vento na situação crítica teve que ser limitado. Velocidades do vento mais significativas acabam por resultar em incoerências. Caso houvesse velocidades do ar mais significativas em várias situações, a correlação apresentada por este modelo seria bastante baixa. Apenas a título de ilustração, a inclusão da situação crítica altera a correlação do parâmetro do modelo de 0,87 para 0,49.

Com relação aos índices empíricos, obtiveram-se para Tne 0,88; 0,70; 33%, para TS 0,87; 0,84; 78% e para ASV 0,85; 0,77; 76%. A baixa porcentagem de acertos para Tne deve-se à adoção incorreta das faixas de interpretação. Feita esta ressalva, estes índices, ainda que desenvolvidos para outras regiões, apresentam resultados satisfatórios, que podem ainda ser otimizados se fossem empregadas escalas de interpretação específicas para o caso em análise.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme pode ser observado, os três critérios estabelecidos permitem aproximações sucessivas dos modelos em estudo. A primeira correlação verifica o potencial do modelo, em termos do parâmetro adotado, ou da relação entre parâmetros adotada, para prever a sensação térmica. A segunda correlação aponta o potencial do índice de interpretação do modelo. A terceira correlação fornece, efetivamente, uma quantificação dos acertos, em termos de predição, do modelo e de seu respectivo índice.

Considerando essas diferentes aproximações, será realizada, na continuação dos trabalhos de pesquisa, proposta de calibração para os modelos estudados através de novas faixas interpretativas, gerando maior correlação com os dados empíricos e melhor porcentagem de predições corretas, possibilitando, assim, uma melhor utilização dos referidos modelos para verificação da adequação térmica de ambientes externos na cidade de São Paulo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. *Handbook of fundamentals*. Atlanta: ASHRAE, 1997.
- BELDING, H. S.; HATCH, T. F. Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strain. *Heating, Piping, Air Conditioning*, 27, p.129-142, 1955.
- BLAZEJCZYK, Krysztof. *Menex 2002*. <http://www.igipz.pan.pl/klimat/blaz/menex.htm>. 2002a. Acesso realizado em 24/04/2004.
- BLUESTEIN, M.; OSCZEWSKI, R. Wind chill and the development of frostbite in the face. *Preprints, 15th Conf. on Biomet. and Aerobiology*, Kansas City, MO: Amer. Meteor. Soc., p. 168-171, 2002.

- BROWN, Robert D.; GILLESPIE, Terry J. *Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency*. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- DOMINGUEZ et al. *Control climatico en espacios abiertos: el proyecto Expo'92*. Sevilla: Universidad de Sevilla, 1992.
- GAGGE, A. P.; STOLWIJK J. A. J.; HARDY, J. D. "Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures". *Environ. Res.*, 1, p. 1-20, 1967.
- GIVONI, Baruch. *Man, climate and architecture*. New York: John Wiley & Sons, 1969.
- GIVONI, Baruch; NOGUCHI, Mikiko. Issues in outdoor comfort research. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 17, 2000, Cambridge. *Proceedings...* London: James & James, p. 562-565, 2002.
- HÖPPE, Peter R. The physiological equivalent temperature: a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43, p. 71-75, 1999.
- HOUGHTEN, F.C.; YAGLOU, C.P. Determining lines of equal comfort. *ASHVE Transactions*, 29, 1923.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7933. *Hot environments: analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate*. Genève: ISO, 1989.
- _____. ISO 7243. *Hot environments: estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature)*. Genève: ISO, 1989.
- JENDRITZKY, Gerd et al. *Klimatologische Probleme – ein einfaches Verfahren zur Vorhersage der Wärmebelastung*, in Zeitschrift für angewandte Bäder und Klimaheilkunde. Freiburg, 1979.
- MASTERTON, J. M.; RICHARDSON, F. A. Humidex: a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. *Environment Canada*, CLI 1-79. Ontario, Downsview: Atmospheric Environment Service, 1979.
- MCARIEL, B.; et al. The prediction of the physiological effect of warm and hot environments, *Med. Res. Council*, 47, London, 1947.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO (Brasil). NR15. *Atividades e operações insalubres*, Anexo 3 - Limites e tolerância para exposição ao calor. Brasília: Ministério do Trabalho, 1978.
- MISSENARD, A. Equivalences thermiques des ambiances; equivalences de passage; equivalence de séjour. *Chaleur et Industrie*, 1948.
- MONTEIRO, L.; ALUCCI, M. Procedimentos de quantificação de variáveis para análise termofisiológica em espaços abertos. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. In: *Anais...* Maceió: ENCAC, 2005a.
- MONTEIRO, L.; ALUCCI, M. Índices de conforto térmico em espaços abertos. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. In: *Anais...* Maceió: ENCAC, 2005b.
- NIKOLOPOULOU, Marialena (org). *Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach*. Atenas: CRES, 2004.
- SIPLE, P. A.; PASSEL C. F. Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89 (1), p.177-199, 1945.
- WEBB, C. Thermal discomfort in an equatorial climate. *Journal of the IHVE*, 27, p.10.
- YAGLOU, C. P.; MINARD, D. Control of heat casualties at military training centers. *A.M.A. Archives of Industrial Health*, 16, p. 302-16, 1957.

8. AGRADECIMENTOS

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