



MODELOS PREDITIVOS DE ESTRESSE TERMO-FISIOLÓGICO: ESTUDO EMPÍRICO COMPARATIVO EM AMBIENTES EXTERNOS

Leonardo Marques Monteiro; Márcia Peinado Alucci

Departamento de Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Universidade de São Paulo, Brasil – leo4mm@gmail.com; marcialu@usp.br

RESUMO

Consideram-se brevemente os modelos preditivos de estresse termo-fisiológico encontrados na literatura concernente. Em seguida, é apresentado um quadro resumo com as variáveis consideradas por cada um deles. Propõe-se então uma classificação para auxiliar na simulação computacional para verificação de aplicabilidade por meio de correlações com dados empíricos. O objetivo da pesquisa foi verificar comparativamente os resultados de diferentes modelos preditivos de estresse termo-fisiológico em ambientes externos na cidade de São Paulo. O método adotado foi indutivo experimental, por meio de levantamento de campo de variáveis microclimáticas e respostas subjetivas, e deductivo, por meio de simulação de modelos preditivos. Partiu-se do pressuposto que em situações gerais haja correlação significativa entre o estado de esforço fisiológico do organismo humano e a preferência subjetiva por determinada exposição à situação térmica. Assim, o levantamento de campo foi realizado em 24 cenários microclimáticos distintos com a aplicação de mais de 600 questionários. Para a realização das simulações, foram considerados nove modelos distintos, abarcando 15 índices. Os resultados das simulações foram correlacionados com os do levantamento de campo, determinando-se a capacidade preditiva de cada modelo. O índice de Carga Térmica de Blazejczyk (1996) apresentou a melhor correlação, de 0,89; seguido do Índice de Estresse Térmico de Givoni (1969), com 0,84; e do índice de Esforço Fisiológico de Blazejczyk (1996), com 0,81. A contribuição desta pesquisa é a determinação de um método para verificação comparativa experimental da aplicabilidade de diferentes modelos preditivos de estresse termo-fisiológico e identificação de respectivos índices para adequada avaliação de ambientes externos na cidade de São Paulo.

Palavras-chave: estresse termo-fisiológico, ambientes externos, modelos preditivos, estudo empírico.

ABSTRACT

Thermo-physiological stress predictive models found in literature are briefly presented. A summary of their variables is considered. Following, a classification is proposed to help the computational simulations in order to verify their applicabilities considering their correlations with empirical data. The objective of the research was to verify comparatively different thermo-physiological stress predictive models in external environments of the city of São Paulo. The method adopted was empirical inductive, through field survey of microclimatic variables and subjective answers, and deductive, through predictive models simulation. A presupposition of this research is that in general cases there is significant correlation between the physiological strain of the human body and the subjective preference to certain microclimatic situation. The field research was done in 24 different microclimatic scenarios, applying over 600 questionnaires. In order to perform the simulations, nine different models were considered, taking into account 15 indexes. The simulation results were correlated with the ones of the field research, determining the predictive capacity of each model. The Heat Load Index, by Blazejczyk (1996), presented the better correlation, of 0,89; followed by the Index of Thermal Stress, by Givoni (1969), with 0,84; and the Physiological Strain Index, by Blazejczyk (1996), with 0,81. The research provided a method to comparative experimental verification of applicability of different thermo-physiological stress predictive models and identification of respective indexes in order to proper assessment of external environment in the city of São Paulo.

Keywords: thermal-physiological stress, external environment, predictive models, empirical study.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho considera os modelos preditivos de estresse térmico encontrados na literatura concernente, apresentando-se, em seguida, um quadro resumo com as variáveis consideradas por cada um deles e ainda uma proposição de classificação para auxiliar na eleição dos modelos a serem simulados computacionalmente para verificação de sua validade com relação a dados empíricos.

1.1 Temperatura resfriada pelo vento: Wind Chill Temperature (WCT)

Siple & Passel (1945, citados por WILLIAMSON, 2003) desenvolveram a temperatura resfriada pelo vento a partir dos dados obtidos com experiências na Antártica. Os dados experimentais foram tratados descartando-se as observações distintas do padrão encontrado. Assim, chegou-se a uma linha de regressão, encontrando-se uma parábola. A equação proposta é:

$$WCT = (12,15 + 11,6 \cdot v_{10}/2 - v_{10}) \cdot (33 - t_{ar}) \text{ para } -9^{\circ}\text{C} \leq t_{ar} \leq 10^{\circ}\text{C} \text{ e } v_{10} \leq 22,3 \text{ m/s} \quad (\text{eq.01})$$

onde: WCT = temperatura resfriada pelo vento, em $^{\circ}\text{C}$; t_{ar} = temperatura do ar, em $^{\circ}\text{C}$; v_{10} = velocidade do ar a 10m do solo, em m/s

1.2 Índice de estresse térmico por calor: Heat Stress Index (HSI)

Belding & Hatch (1955, citado por GIVONI, 1969) propõem o índice de estresse térmico por calor para espaços externos, através de modelo de balanço térmico. Para cálculo do calor acumulado os autores propõem as seguintes equações experimentais:

$$E = M + 22 \cdot (t_{rm} - t_{sk}) + 2 \cdot v^{0,5} \cdot (t_{ar} - t_{sk}) \quad (\text{eq.02})$$

$$E_{\max} = 10 \cdot v^{0,4} \cdot (p_{sk} - p_{ar}) \quad (\text{eq.03})$$

onde: $[22 \cdot (t_{rm} - t_{sk})]$ = trocas por radiação, em Btu/h; t_{rm} = temperatura radiante média, em $^{\circ}\text{F}$; t_{sk} = temperatura superficial da pele, em $^{\circ}\text{F}$; $[2 \cdot v^{0,5} \cdot (t_{ar} - t_{sk})]$ = trocas por convecção, em Btu/h; t_{ar} = temperatura do ar, em $^{\circ}\text{F}$; v = velocidade do ar, em ft/min; E_{\max} = suor requerido para evaporação, em Btu/h; E_{\max} = potencial de perda de calor por evaporação, p_{sk} = pressão de vapor na pele, em mmHg; p_{ar} = pressão parcial de vapor de água do ar, em mmHg

Para estabelecimento do índice, considerando-se E_{\max} e E_{\max} em W, adota-se o maior valor entre:

$$HSI = (E_{\max}/E_{\max}) \cdot 100 \text{ e } HSI = (E_{\max}/632,27) \cdot 100 \quad (\text{eq.04})$$

Este índice é válido para as seguintes condições: t_{ar} : 21-49 $^{\circ}\text{C}$; p_{ar} : 3-42 mmHg (22,5-315,0 kPa); v : 0,25-10,0 m/s e M : 86-430 W. Os valores deste índice são apresentados na Tabela 1 e as respostas fisiológicas do trabalhador para exposição de 8 horas a várias cargas térmicas na Tabela 2.

Tabela 1: Índice de estresse por calor (HSI), Belding & Hatch (1955, citado por GIVONI, 1969)

HSI	Classificação
0	Ausência de estresse térmico (faixa de conforto térmico)
0 - 100	Equilíbrio térmico (faixa de desconforto térmico)
100 - 200	Acúmulo de calor no corpo (faixa de estresse térmico)

1.3 Temperatura de globo e de bulbo úmido: Wet Bulb Globe Temperature (WBGT)

Yaglou (1957) propõe a temperatura de globo e de bulbo úmido. Para condições internas e externas, sem radiação solar direta, este índice é dado por:

$$WBGT = 0,7 \cdot t_{nwb} + 0,3 \cdot t_g \quad (\text{eq.05})$$

onde: WBGT = temperatura de globo e de bulbo úmido, em $^{\circ}\text{C}$; t_g = temperatura de globo, em $^{\circ}\text{C}$; t_{nwb} = temperatura de bulbo úmido natural, em $^{\circ}\text{C}$

Para condições externas com radiação solar direta, tem-se (ISO 7243, 1989):

$$WBGT = 0,7 \cdot t_{nwb} + 0,2 \cdot t_g + 0,1 \cdot t_{ar} \quad (\text{eq.06})$$

onde: t_{ar} = temperatura do ar, em $^{\circ}\text{C}$

1.4 Índice de estresse térmico: The Index of Thermal Stress (ITS)

Givoni (1969) propõe o índice de estresse térmico, desenvolvido para considerar os diversos mecanismos de troca de calor pelo corpo humano e ainda níveis de atividade metabólica e variedade de vestimentas. Originalmente esta modelagem não considerava as trocas por radiação. Para considerar as trocas por radiação de longa, o autor sugere a utilização da temperatura de globo ao invés da temperatura do ar no cálculo das trocas convectivas. Posteriormente, passou-se a considerar a radiação solar (R_c). A equação geral que fornece os valores do índice é:

$$\text{ITS} = [(M - W) \pm C' + R_c] \cdot \exp [0,6 \cdot (E_{rsw} / E_{max} - 0,12)] \quad (\text{eq.07})$$

onde: M = metabolismo; W = trabalho mecânico, C' = trocas convectivas e radiativas de onda longa, E_{rsw} = perda requerida por evaporação, E_{max} = perda por evaporação máxima, todos em kcal/h; ITS = índice de estresse térmico, adimensional.

1.5 Índice Humidex

Masterton & Richardson (1979) propõem o Humidex, índice que fornece uma temperatura equivalente em função dos valores da temperatura e da umidade relativa do ar. Vale ressaltar que o índice em questão considera apenas as variáveis temperatura e umidade do ar, não considerando a velocidade do ar, efeitos da radiação térmica e parâmetros do indivíduo (atividade e vestimentas). As equações propostas são:

$$HU = t_{ar} + (5/9) \cdot (p_v - 10) \quad (\text{eq.08})$$

onde: HU = temperatura equivalente Humidex, em °C; t_{ar} = temperatura do ar, em °C; p_v = pressão parcial de vapor de água do ar.

O Humidex é utilizado pelo Serviço Meteorológico do Environment Canadá (2000) para alertar a população sobre possíveis perigos relativos a estresse térmico por calor. O índice proposto por esta entidade é apresentado na Tabela 3. Segundo a entidade citada, a situação de golpe térmico é caracterizada pela interrupção da sudação, com elevação da temperatura corpórea. Os consequentes sintomas são pele quente e seca, podendo levar a delírios, convulsões e morte.

Tabela 2: Níveis de classificação do Humidex, Environment Canadá (2000).

Humidex (HU)	Classificação
≤ 30	Sem desconforto
30 - 40	Algum desconforto
40 - 45	Muito desconforto, evitar esforço físico
≥ 45	Situação de perigo
≥ 54	Golpe térmico eminente

1.6 Expo de Sevilha em 1992: Critérios para níveis de sudação em espaços externos

A instalação do condicionamento climático dos espaços abertos da Expo de Sevilha, em 1992, foi parte integrante do programa de desenvolvimento patrocinado pela Sociedade Estatal Expo'92. O objetivo principal era encontrar soluções técnicas e economicamente viáveis que permitissem melhorar as condições de conforto nos referidos espaços abertos. Com relação à avaliação do projeto dos espaços abertos da Expo de Sevilha, Domínguez et al. (1992) colocam que, ainda que para uma situação de conforto seja desejável a ausência total de sudação, admitiram-se níveis variáveis de sudação não nulos, mas ainda bastante baixos, de acordo com a intensidade de condicionamento requerida. Assim, para zonas de passagem, onde se deseja uma intensidade média de condicionamento, estabeleceu-se nível de sudação não superior a 90g/h e para zonas de permanência, onde se deseja uma intensidade alta de condicionamento, estabeleceu-se nível de sudação não superior a 60g/h.

1.7 Modelo MENEX (Man-ENvironment heat EXchange model)

Blazejczyk (2002) propõe o modelo MENEX (Man-ENvironment heat EXchange model). O modelo utiliza o balanço térmico do corpo humano. Para avaliação dos resultados, o autor propõe quatro diferentes critérios, que são apresentados a seguir.

1.7.1 Carga térmica: Heat Load (HL)

A carga térmica é avaliada em função do calor acumulado (S), da radiação solar absorvida (R_c) e das perdas evaporativas pela pele (E_{sk}). Assim:

$$HL = [(S + 360) / 360]^{[2 - 1/(1+R_c)]} \text{ para } S \leq 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } E_{sk} \geq -50 \text{ W/m}^2 \quad (\text{eq.09})$$

$$HL = [(S + 360) / 360]^{[2 + 1/(1+R_c)]} \text{ para } S > 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } E_{sk} \geq -50 \text{ W/m}^2 \quad (\text{eq.10})$$

$$HL = (E/-50) \cdot [(S + 360) / 360]^{[2 - 1/(1+R_c)]} \text{ para } S \leq 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } E_{sk} < -50 \text{ W/m}^2 \quad (\text{eq.11})$$

$$HL = (E/-50) \cdot [(S + 360) / 360]^{[2 + 1/(1+R_c)]} \text{ para } S > 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } E_{sk} < -50 \text{ W/m}^2 \quad (\text{eq.12})$$

onde: HL = índice de carga térmica no organismo, adimensional. Este índice classifica o estresse do indivíduo segundo os intervalos presentes na Tabela 5.

Tabela 3: Carga térmica: Heat Load (HL), Blazejczyk (2002).

HL	Classificação
$\leq 0,810$	Estresse elevado por frio
0,811 - 0,930	Estresse moderado por frio
0,931 - 1,185	Neutralidade térmica
1,186 - 1,600	Estresse moderado por calor
$\geq 1,600$	Estresse elevado por calor

1.7.2 Estímulo devido à radiação solar: Intensity of Radiation Stimuli (R')

O estímulo devido à intensidade de radiação solar é calculado em função da radiação solar absorvida pelo corpo nu. Assim, para o estabelecimento deste índice, deve-se calcular a radiação solar absorvida pelo corpo desconsiderando-se o fator de roupa (f_{cl}) e a transmissividade da roupa (τ_{cl}). O estímulo menor que 60 W/m² é considerado fraco, até 120 W/m², moderado, e quando superior, forte.

$$R' = \alpha_{sk} \cdot I_{sol} \quad (\text{eq.13})$$

onde: R' = índice de estímulo devido à radiação solar, em W/m²; α_{sk} = taxa de absorção de onda curta pela pele, adimensional; I_{sol} = radiação solar total incidente, em W/m². A classificação do índice está na Tabela 6.

1.7.3 Esforço fisiológico: Physiological Strain (PhS)

O esforço fisiológico do organismo é definido através dos principais meios de troca de calor. No caso de esforço por frio, ocorre a perda de calor convectiva pela pele (C) e, no caso de esforço por calor, tem-se a perda de calor evaporativa pela pele (E_{sk}). Assim, este índice é dado em função da relação entre o calor trocado por convecção (C) e o calor perdido por evaporação (E):

$$PhS = C/E_{sk} \quad (\text{eq.14})$$

onde: PhS = índice de esforço fisiológico, adimensional. A classificação do índice é apresentada na Tabela 7.

Tabela 4: Esforço fisiológico: Physiological Strain (PhS), BLAZEJCZYK (2002).

PhS	Classificação
$< 0,25$	Esforço elevado por calor
0,25 - 0,49	Esforço moderado por calor
0,50 - 0,99	Esforço leve por calor
1,00 - 1,99	Esforço leve por frio
2,00 - 4,00	Esforço moderado por frio
$> 4,00$	Esforço elevado por frio

1.7.4 Índice de transpiração perceptível: Sensible Perspiration (SP)

O índice de transpiração perceptível fornece avaliação subjetiva baseada na percepção do suor secretado que não é efetivamente evaporado. O estabelecimento do índice baseia-se na seguinte relação:

$$SP = -0,3 \cdot 5 \cdot (E_{rsw}/E_{max}) \quad (\text{eq.15})$$

onde: SP = índice de suor aparente, adimensional. A classificação do índice SP é apresentada na Tabela 8.

Tabela 5: Índice de transpiração perceptível: Sensible Perspiration (SP), BLAZEJENCYK (2002).

SP	Classificação	SP	Classificação
0	Testa e corpo secos	4	Roupa parcialmente molhada
1	Pele úmida sem umidade visível	5	Roupa quase totalmente molhada
2	Pele úmida com umidade visível	6	Roupa totalmente molhada
3	Testa e corpo molhados		

1.8 Nova temperatura resfriada pelo vento: New Wind Chill Temperature (NWCT)

Bluestein & Osczevski (2002) apresentam o trabalho de pesquisa empírica para reformulação das equações para determinação da nova temperatura resfriada pelo vento. Os ensaios para a determinação do novo índice basearam-se na modelagem física do rosto do indivíduo exposto ao vento, através da metade frontal de um cilindro vertical térmico, de 180mm de diâmetro externo, composto de 25 camadas concêntricas, simulando as trocas de calor. As equações para determinação da temperatura resfriada pelo vento e do tempo no qual ocorre congelamento da superfície da pele do rosto (Frostbite time):

$$NWCT = 13,12 + 0,6215 \cdot t_{ar} - 11,37 \cdot v_{10}^{0,16} + 0,3965 \cdot t_{ar} \cdot v_{10}^{0,16} \quad (eq.16)$$

para $t_{ar} \leq 10^{\circ}\text{C}$ e $v_{10} \geq 4,8 \text{ km/h}$

onde: NWCT = nova temperatura resfriada pelo vento, em $^{\circ}\text{C}$; t_{ar} = temperatura do ar, em $^{\circ}\text{C}$; v_{10} = velocidade do ar a 10m do solo, em km/h

$$Ft = \{ \{ -24,5 \cdot [(0,667 \cdot v_{10}) + 4,8] \} + 2111 \} \times (-4,8 - t_{ar})^{-1,668} \quad (eq.17)$$

onde: Ft = tempo no qual ocorre congelamento da superfície do rosto, em min

2 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS

A tabela 6 fornece um resumo dos diversos modelos apresentados, considerando-se as referências bibliográficas utilizadas e as diversas variáveis envolvidas em cada um deles.

Tabela 6: Modelos e índices de estresse térmico e variáveis consideradas

Referência	Modelo	Índices	Variáveis													
			individuais				micro-climáticas				derivadas		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
Siple & Passel, 1945	WCT	WCTI											x		x	
Belding & Hatch, 1955	HS	HSI						x	x	x	x					
Yaglou, 1957;	WBGT	WBGT					x				x	x				
Givoni, 1969	TS	ITS					x	x	x	x						
Masterton & Richardson, 1979	Humidex	HU					x	x								
ISO 7933, 1989	Vogt	S _{W_{req}}	x	x	x	x	x	x	x	x						
		w	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
		S	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
		S _{W_{req} g/h}	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		
Blazejczyk, 2002	MENEX	HL	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
		PhS	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
		R'			x										x	
		SP	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
Bluestein & Osczevski, 2002	NWCT	NWCTI										x		x		
		Ft										x		x		

Para facilitar a eleição dos modelos a serem simulados, e a posterior consideração 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). Nesta pesquisa, apenas os modelos de esforço fisiológico foram considerados. Com relação ao método predominante de modelagem, os modelos de esforço fisiológico podem ser subdivididos em modelos numéricos e modelos analíticos, segundo sejam, respectivamente, adotadas abordagens predominantemente indutivas ou dedutivas.

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. 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. A tabela 7 apresenta a classificação proposta, apontando ainda para o objetivo inicial do índice, seja ele a de utilização para exposição a situações térmicas quentes, frias ou ambas.

Tabela 7: Proposição de classificação dos modelos de estresse térmico

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 (Sw_{req} , w, S), Sevilha (Sw_{req}') MENEX (HL, PhS, R', SP)		
Principal critério interpretativo	Analogia	Parâmetros Fisiológicos	Analogia	Parâmetros Fisiológicos
Índices	WBGT ⁽¹⁾ , HU ⁽¹⁾ NWCTI ⁽²⁾	WCTI ⁽²⁾ , Ft ⁽²⁾ HSI ⁽¹⁾ , ITS	-	$Sw_{req}, w, S^{(1)}$, $Sw_{req}'^{(1)}$ 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.

Com base na tabela 7, verifica-se que os únicos índices de estresse térmico originalmente desenvolvidos para situações térmicas quentes e frias são o ITS, de Givoni (1969) e os HL e PhS, do modelo MENEX, de Blazejczyk (2002). Estes índices serão utilizados para a verificação comparativa com dados subjetivos levantados empiricamente. Ressalta-se que se pressupõe aqui que haja correlação significativa entre o estado de esforço fisiológico do organismo humano e a preferência subjetiva por determinada exposição a situação térmica. Desta forma, não pretendemos aqui estabelecer condições de conforto térmico, mas apenas verificar qual modelo de esforço fisiológico apresenta melhores correlações com a percepção térmica das pessoas, assumindo que a utilização de tal modelo é suficientemente válida para a avaliação do estresse térmico dessas mesmas pessoas.

3 LEVANTAMENTOS EMPÍRICOS

Para os levantamentos em campo, definiu-se o seguinte procedimento. Foi estabelecida uma base a céu aberto em que cento e cinqüenta pessoas foram entrevistadas, em seis horários diferentes, em um dia de verão e um dia de inverno. 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 ambientais locais, para em seguida receberem um questionário de

percepção e preferência de sensação térmica. Neste questionário, perguntou-se também se alguma peça de roupa foi alterada desde o momento do registro fotográfico. Depois de respondidos, os questionários foram recolhidos, aguardando-se o próximo horário para a aplicação do mesmo questionário

Os equipamentos utilizados serão aqui sucintamente descritos. Foi utilizada uma estação meteorológica marca ELE modelo EMS com sensores de temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento modelo e piranômetro Eppley, registrando-se os dados em data logger marca ELE modelo MM900 EE 475-016. As medições realizaram-se em intervalos de um segundo e os registros foram realizados pelos equipamentos em intervalos de um minuto. Foi montado ainda 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. Dada 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. 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. A seguir, serão consideradas mais detalhadamente questões normativas e as especificações dos instrumentos que consequentemente foram empregados.

3.1 Especificações Normativas

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 onde há risco de estresse térmico. As especificações referentes à faixa de medição e precisão para estresse são apresentadas pela norma, assim como o tempo de resposta do sensor, que depende da massa, da área superficial, da presença de protetor e das características do ambiente (temperatura, umidade e velocidade do ar e radiação térmica). Com base nos resultados do pré-teste realizado anteriormente ao levantamento, considerou-se ainda 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 deu-se com as pessoas paradas e em pé).

3.2 Especificações dos Equipamentos

No levantamento em questão, os sensores utilizados para determinação da temperatura do ar são do tipo semicondutor. A faixa de leitura é de -20 °C a +60 °C, com resolução de 0,1 °C, precisão de $\pm 0,4$ °C e tempo de resposta de 0,1 °C/s. Os sensores para determinação de umidade são de capacitors, obtendo-se a umidade relativa. A faixa de leitura é de 10% a 95%, com resolução de 0,1%, precisão de $\pm 3\%$ (a 25 °C, entre 30% e 95%) e $\pm 5\%$ (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 a velocidade do ar, cada um dos três sets de anemômetros empregados utilizou quatro sensores de hélice. Estes sensores apresentam faixa de leitura de 0,4 a 30,0m/s, com resolução de 0,1m/s, e precisão de $\pm 2\%+d$. 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 $\pm 2\%+d$. 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. Para a consideração da temperatura radiante, utilizou-se o procedimento baseado em termômetro de globo, o qual requer ainda a temperatura e velocidade do ar para determinação da temperatura radiante média. Utilizou-se em cada base dois globos de 17 cm de diâmetro, um preto fosco e outro cinza médio fosco, com emissividade próxima a 0,95. Para a determinação da temperatura do ar no interior dos globos foram empregados termômetros de mercúrio. Para a determinação da temperatura radiante média, realizou-se o balanço térmico das trocas entre o ambiente interno do globo e o ambiente externo.

3.3 Questionários Aplicados

O levantamento das respostas subjetivas se deu baseado nos princípios estabelecidos pela norma ISO 10551 (1995). Utilizaram-se os critérios de ponto central e escalas de intensidades positivas e/ou

negativas. Contudo, a norma em questão propõe um questionário com cinco perguntas padrão, as quais não foram diretamente transcritas para o português. Respeitando as peculiaridades lingüísticas de cada idioma, optou-se por reinterpretar as cinco perguntas originais, dando origem a um questionário em português com quatro questões. Além destas quatro questões de avaliação global do ambiente, foram propostas outras quatro para a tentativa de verificação da percepção e preferência relativas às variáveis ambientais específicas. A Figura 1 traz as questões relativas à avaliação subjetiva do questionário proposto e aplicado. Além destas questões, havia um cabeçalho de identificação e de verificação da possível mudança no vestuário em relação ao momento do registro fotográfico. Aplicou-se também um questionário inicial para verificação de informações pessoais (sexo, idade, altura, peso) e verificação da aclimatação, perguntando-se sobre as cidades em que já viveu e por quanto tempo.

-
1. Neste exato momento, eu estou sentindo:

()	()	()	()	()	()	()
muito frio	frio	um pouco	nem frio	um pouco	calor	muito calor
		de frio	nem calor	de calor		
 2. Neste exato momento, com relação às condições climáticas, eu estou:

()	()	()	()
confortável	um pouco	desconfortável	muito desconfortável
	desconfortável		
 3. Neste exato momento, eu preferiria estar sentindo:

()	()	()	()	()	()	()
muito mais	mais	um pouco	sem	um pouco	mais	muito mais
frio	frio	mais de frio	mudanças	mais de calor	calor	calor
 4. Neste exato momento, com relação às condições climáticas, na minha opinião estar neste local é:

()	()	()	()
perfeitamente	facilmente	dificilmente	intolerável
tolerável	tolerável	tolerável	
 5. Com relação à temperatura do ar, eu preferiria que esta estivesse: () mais baixa () como está () mais alta () não sei dizer
 6. Com relação à umidade do ar, eu preferiria que o ar estivesse: () mais seco () como está () mais úmido () não sei dizer
 7. Com relação ao vento, eu preferiria que este estivesse: () mais fraco () como está () mais forte () não sei dizer
 8. Com relação à radiação solar, eu preferiria que esta estivesse: () mais branda () como está () mais intensa () não sei dizer
-

Figura 1: Questionário para verificação de percepção e preferência de sensação térmica

3.4 Resultados do Levantamento Empírico

A tabela 8 apresenta os resultados dos dados microclimáticos para os dias de verão e inverno, respectivamente. A tabela 9 apresenta os resultados das variáveis individuais e subjetivas.

Tabela 8: Resultados das variáveis ambientais para o dia de verão e de inverno.

28/03/05	tar	ur	v	trm	lg		30/05/05	tar	ur	v	trm	lg
9:00	27,2	49,3	0,77	38,1	498		9:00	21,2	66,7	0,55	35,1	408
9:10	26,4	51,2	0,73	34,5	333		9:10	21,7	64,7	0,77	37,9	435
9:20	25,1	54,5	0,73	31,8	258		9:20	22,1	65,0	0,59	40,7	464
9:30	24,5	58,4	0,67	30,1	236		9:30	22,8	60,3	0,72	40,3	518
9:40	25,4	56,6	0,44	32,4	372		9:40	23,1	60,0	0,64	42,0	476
9:50	25,5	55,2	0,29	32,4	311		9:50	23,4	58,8	0,73	38,9	368
10:00	25,5	55,6	0,11	31,1	293		10:00	24,3	55,5	0,59	33,8	338
10:10	27,1	49,7	0,05	31,1	348		10:10	25,1	53,3	0,45	33,1	372
10:20	27,1	48,7	0,11	34,3	430		10:20	25,6	52,4	0,41	42,9	410
10:30	25,9	52,4	0,24	33,5	360		10:30	25,9	50,2	1,02	42,8	469
10:40	26,6	51,7	0,29	34,0	367		10:40	26,3	48,5	0,59	43,1	685
10:50	28,2	46,0	0,37	40,5	468		10:50	26,7	46,6	0,46	44,0	603
11:00	28,7	45,0	0,72	56,5	774		11:00	27,0	46,2	0,49	44,1	661
11:10	28,0	47,6	0,81	41,8	519		11:10	27,6	44,1	0,45	45,3	716
11:20	29,1	43,4	0,80	59,0	1074		11:20	27,3	46,0	0,51	51,4	755
11:30	28,7	46,7	1,02	57,6	896		11:30	28,4	41,4	0,42	52,3	784
11:40	28,1	47,5	0,83	39,4	540		11:40	28,9	39,5	0,57	45,8	820
11:50	29,1	43,3	0,79	44,5	614		11:50	30,2	36,0	0,85	49,6	902
12:00	29,7	40,3	0,97	64,8	1019		12:00	30,8	33,6	0,66	48,8	725

Tabela 9: Resultados das variáveis individuais e subjetivas.

	Data	Hora	variáveis subjetivas				variáveis individuais					
			Sens	Conf	Pref	Tol	tar	ur	v	rad	M[met]	Icl[clo]
1	28/3	9:00	0,20	0,33	-0,17	0,43	-0,20	0,13	0,07	-0,20	1,3	0,59
2	28/3	9:20	0,52	0,40	-0,32	0,64	-0,44	0,52	0,20	-0,20	1,3	0,50
3	28/3	9:40	1,25	1,04	-1,17	1,08	-0,67	0,25	0,75	-0,75	1,3	0,52
4	28/3	11:00	1,38	1,17	-1,17	1,13	-0,67	0,29	0,67	-0,79	1,3	0,48
5	28/3	11:20	2,37	2,26	-1,85	2,04	-0,81	0,22	0,70	-0,89	1,3	0,53
6	28/3	11:40	1,65	1,38	-1,23	1,38	-0,81	0,35	0,77	-0,85	1,3	0,53
7	25/5	9:00	0,78	0,83	-0,74	1,00	-0,30	0,04	0,00	-0,74	1,3	0,66
8	25/5	9:20	1,45	1,36	-1,36	1,55	-0,50	0,32	0,82	-0,82	1,3	0,64
9	25/5	9:40	1,68	1,23	-1,09	1,45	-0,45	0,32	0,64	-0,77	1,3	0,67
10	25/5	11:00	1,70	1,26	-1,17	1,43	-0,57	0,22	0,48	-0,83	1,3	0,55
11	25/5	11:20	2,17	2,04	-1,79	1,92	-0,71	0,21	0,96	-1,00	1,3	0,58
12	25/5	11:40	2,27	2,09	-1,77	1,95	-0,68	0,50	0,86	-0,95	1,3	0,57

4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COMPARATIVAS

Conforme argumentado anteriormente, os índices de estresse térmico a serem verificados são o índice de estresse térmico (ITS), de Givoni (1969) e os de carga térmica (HL) e de esforço fisiológico (PhS), do modelo MENEX, de Blazejczyk (2002). Para a realização da comparação entre os 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. 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 e as utilizadas no levantamento de campo. A tabela 10 apresenta os resultados do levantamento empírico (Sens) e dos índices ITS, PhS e HL para os valores médios encontrados para cada uma das doze situações microclimáticas levantadas. A tabela 11 apresenta os resultados finais encontrados para todo o conjunto de levantamentos empíricos.

Tabela 10: Valores médios obtidos para cada uma das 12 situações microclimáticas

	Sens	Interpretação	ITS	Interpretação	PhS	Esforço Fisiológico	HL	Estresse
1	0,20	confortável	43,2	neutralidade	1,02	leve (neutralidade)	1,07	neutralidade térmica
2	0,52	pouco quente	49,4	neutralidade	0,78	leve (neutralidade)	1,09	neutralidade térmica
3	1,25	pouco quente	59,9	esforço (calor)	0,42	moderado (por calor)	1,08	neutralidade térmica
4	1,38	pouco quente	136,6	esforço (calor)	0,30	moderado (por calor)	1,51	moderado (por calor)
5	2,37	quente	191,9	estresse (calor)	0,28	moderado (por calor)	1,57	moderado (por calor)
6	1,65	quente	73,6	esforço (calor)	0,48	moderado (por calor)	1,24	moderado (por calor)
7	0,78	pouco quente	63,7	esforço (calor)	0,84	leve (neutralidade)	1,15	neutralidade térmica
8	1,45	pouco quente	68,8	esforço (calor)	0,76	leve (neutralidade)	1,28	moderado (por calor)
9	1,68	quente	51,6	esforço (calor)	0,82	leve (neutralidade)	1,27	moderado (por calor)
10	1,70	quente	94,0	esforço (calor)	0,39	moderado (por calor)	1,36	moderado (por calor)
11	2,17	quente	169,7	estresse (calor)	0,32	moderado (por calor)	1,50	moderado (por calor)
12	2,27	quente	153,6	estresse (calor)	0,30	moderado (por calor)	1,43	moderado (por calor)

Tabela 11: 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 predições corretas
Givoni (1969)	ITS	0,84	0,75	62%
MENEX, Blazejczyk (2002)	PhS	0,81	0,71	58%
MENEX, Blazejczyk (2002)	HL	0,89	0,76	72%

5 CONCLUSÕES

O PhS apresentou as correlações menos significativas: -0,81 para a correlação com o parâmetro do modelo e 0,71 para a correlação com as faixas interpretativas. 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 correlações melhores: 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 0,76). 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, verifica-se que a porcentagem de previsões corretas é bem superior: 72% contra 62% do ITS e 58% do PhS. Desta forma, reconhecendo-se as limitações da base empírica utilizada, considera-se que o Heat Load (HL) apresenta-se como critério mais adequado para avaliação das condições de estresse térmico dos usuários em espaços abertos na cidade de São Paulo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE. **Handbook of fundamentals**. ASHRAE, Atlanta, 1997.
- BELDING, H. S.; HATCH, T. F. Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strain. **Heating, Piping, Air Conditioning**, 27, p.129-42, 1955.
- BLAZEJCZYK, K.. **Man-environment heat exchange model**. <http://www.igipz.pan.pl/klimat/blaz/menex.ppt>. Acesso realizado em 24/04/2004, 2002.
- BLUESTEIN, M.; OSCZEWSKI, R. Wind chill and the development of frostbite in the face. Preprints, in: 15th **Conference on Biometeorology and Aerobiology**, Kansas City, AMS, p. 168-71, 2002.
- DOMINGUEZ et al. **Control climático en espacios abiertos**: el proyecto Expo'92. Sevilla: Universidad de Sevilla, 1992.
- GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. New York: John Wiley & Sons, 1969.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7726**. Ergonomics: instruments for measuring physical quantities. ISO, Genève, Switzerland, 1989.
- _____. **ISO 10551**. Ergonomics of the thermal environment: assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales. ISO, Genève, Switzerland, 1995.
- _____. **ISO 7243**. Hot environments: estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Genève: ISO, 1989.
- _____. **ISO 7933**. Hot environments: analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate. Genève: ISO, 1989.
- 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: AES, 1979.
- SIPLE, P. A.; PASSEL C. F. Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. in: **Proceedings of the American Philosophical Society**, 89(1), p.177-99, 1945.
- WILLIAMSON, S. P. (coord.). **Report on wind chill temperature and extreme heat indices: evaluation and improvement projects**. Washington: OMS, 2003.
- YAGLOU, C. P.; MINARD, D. Control of heat casualties at military training centers. **AMA Archives of Industrial Health**, 16, p. 302-16, 1957.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.