

Questões teóricas de conforto térmico em espaços abertos: consideração histórica, discussão do estado da arte e proposição de classificação de modelos

Theoretical issues on outdoor thermal comfort: historical review, state-of-the-art discussion, and proposal for model classification

Leonardo Marques Monteiro
Marcia Peinado Alucci

Resumo

Este artigo revisa e discute as pesquisas sobre conforto térmico em espaços abertos, especificamente os modelos analíticos e numéricos e os parâmetros propostos por diversos autores através de método de balanço térmico e pesquisas empíricas. A contribuição do presente trabalho é fornecer uma revisão histórica sucinta das modelagens existentes e o atual estado da arte nas pesquisas de conforto térmico em espaços abertos, apresentando equações e parâmetros propostos, e, ainda, uma discussão acerca da área de pesquisa e de possíveis novas abordagens. Como resultado final, estabelece-se uma síntese por meio de proposição de classificação para o conjunto de modelos e índices existentes.

Palavras-chave: Conforto térmico. Espaços abertos. Modelos preditivos.

Abstract

This paper reviews and discusses research studies on outdoor thermal comfort, focussed on the analytical and numerical models and parameters proposed by several authors through the thermal balance method and empirical studies. This investigation aims to provide a brief historical review of existing models, to present an overview of state-of-the-art research in outdoor thermal comfort research studies, including proposed equations and parameters, as well as to discuss areas for future research and potential new approaches. As a final result, this article presents a synthesis through a proposal of classification for the existing models.

Keywords: Thermal comfort. Open spaces. Predictive models.

Leonardo Marques Monteiro
Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo
Universidade de São Paulo
Rua do Lago, 876, Cidade
Universitária
São Paulo - SP - Brasil
CEP 05508-080
Tel.: (11) 3091-4538
Fax: (11) 3091-4539
E-mail: leo4mm@gmail.com

Marcia Peinado Alucci
Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo
Universidade de São Paulo
E-mail: marcialu@usp.br

Recebido em 25/01/07
Aceito em 18/03/07

Introdução

Hipócrates, em 400 a.C., já havia descrito qualitativamente as principais variáveis que influem no conforto térmico: temperatura, umidade, ventos e radiação, conforme afirma Araújo (1996). As primeiras medições de temperatura do ar de que se tem registro foram realizadas em Florença e em Pequim, em meados do século XVII. Durante o século XVIII foram por vezes levantadas opiniões sobre a sensação térmica em ambientes, mas estas foram sempre consideradas evasivas. Ainda segundo a autora, no início do século XIX têm-se na Europa os primeiros estudos relacionados a estresse térmico, motivados pelos problemas de saúde de mineradores e trabalhadores da indústria têxtil. Ainda que determinados padrões tenham sido estabelecidos ao longo do século XIX, métodos capazes de medir as variáveis e correlacioná-las com o conforto térmico foram desenvolvidos apenas no início do século XX, motivados em parte pelo advento do sistema de ar condicionado. Dessa forma, a grande maioria dos estudos acabou se concentrando em descrever e correlacionar as variáveis apenas em ambientes climatizados. Outrossim, vários estudos desenvolvidos são passíveis de serem aplicados em ambientes não condicionados. Alguns estudos foram ainda adaptados para determinadas situações em ambientes externos e outros desenvolvidos especificamente para tais situações.

Dessa forma, ainda que a maior parte das pesquisas de conforto térmico seja desenvolvida para espaços fechados, há também relevante produção adaptada ou desenvolvida especificamente para espaços abertos. A consideração desses espaços implica fatores adicionais, comumente não encontrados em ambientes internos, que trazem maior complexidade para a análise termofisiológica: radiação solar, ventos, atividades físicas diferenciadas, possibilidade de taxas de suor significativas, entre outros. Focando a carência de divulgação das pesquisas voltadas para espaços abertos em nosso país, este artigo apresenta, historicamente, os diversos trabalhos de pesquisa mais relevantes para o estudo do conforto térmico nesses ambientes, considerando então o estado da arte em pesquisas de conforto térmico em espaços abertos e apresentando sete relevantes trabalhos divulgados durante os últimos dez anos. Os valores referenciais para interpretação dos modelos são apresentados conjuntamente com os resultados finais desta pesquisa no artigo subsequente. Apresenta-se aqui ainda uma síntese das discussões realizadas, através da proposição de uma classificação para os modelos existentes,

auxiliando nos estudos consequentes do referido artigo acerca de questões empíricas.

Modelos Preditivos

São considerados, na seqüência, vinte e quatro modelos preditivos, que culminam em trinta e três diferentes índices. Após extenso levantamento bibliográfico, foram selecionados aqueles modelos e índices que tenham sido desenvolvidos especificamente para avaliação de espaços abertos; adaptados para aplicação nesses espaços; ou, ainda, que de forma imprópria, tenham sido utilizados recorrentemente para tal propósito. Com relação a estes últimos, ainda que estudos indiquem que não sejam de fato aplicáveis, foram considerados no texto, uma vez que, em artigo subsequente, far-se-á a verificação dos diversos modelos apresentados. Acredita-se, assim, que a verificação possa confirmar os resultados comumente encontrados na literatura ou ainda abrir caminhos para novas indagações.

Temperatura efetiva¹ (ET)

Houghten *et al.* (1923), a partir de estudos em laboratório da ASHVE, propõem a Temperatura Efetiva, determinada mediante a combinação da temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido e da velocidade do vento. Estudos de Glickman (1950), Smith (1958) e Givoni (1963), citados por Givoni (1969), demonstram que a Temperatura Efetiva superestima o efeito da umidade.

Nova Temperatura efetiva² (ET*)

Vernon e Warner (1932) propõem a Nova Temperatura Efetiva, através da substituição da temperatura de bulbo seco pela temperatura de globo, para consideração dos efeitos da radiação. Esse índice foi adotado pela ASHRAE, em 1967, com a nomenclatura de Temperatura Efetiva Corrigida (ASHARE, 1967).

Taxa de suor prevista para quatro horas³ (P4SR)

McAriel *et al.* (1947) desenvolveram o índice de taxa de suor prevista para quatro horas, com base em experimentos em que se avaliavam as respostas fisiológicas em um período de quatro horas sob determinada condição climática. Esse índice considera a temperatura de globo, a temperatura de

¹ Effective Temperature

² New Effective Temperature

³ Predictable 4-hour Sweat Rate

bulbo úmido, a velocidade do vento, a taxa metabólica e dois padrões de vestimentas.

Temperatura resultante⁴ (RT)

Missenard (1948), a partir de experimentos similares ao de Houghten, mas com períodos de exposição de maior duração, propõe a Temperatura Resultante. Segundo Givoni (1969), esse índice apresenta resultados mais coerentes, com as respostas fisiológicas observadas em laboratório, do que os de Temperatura Efetiva. Esses quatro índices recém-apresentados são utilizados a partir de nomogramas, e as equações que deram origem a eles não foram originalmente publicadas.

Temperatura resfriada pelo vento⁵ (WCT)

Siple e Passel (1945), citados por Williamson (2003), desenvolvem a temperatura resfriada pelo vento a partir dos dados obtidos com experiências na Antártica. Chegou-se a uma linha de regressão, encontrando-se uma parábola. Contudo, a equação parabólica era válida apenas para valores de velocidade do vento menores que 22,3 m/s, uma vez que, a partir deste ponto, tinha-se a inflexão da curva. Dessa forma, os resultados não deveriam ser extrapolados para além desse valor. A equação proposta é:

$$WCT = (12,15 + 11,6 \cdot v_{10}/2 - v_{10}) \cdot (33 - t_{ar})$$

para $-9 \text{ }^\circ\text{C} \leq t_{ar} \leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ e $v_{10} \leq 22,3 \text{ m/s}$, (1)

onde:

t_{ar} = temperatura do ar, [$^\circ\text{C}$]; v_{10} = velocidade do ar a 10 m, [m/s].

Índice de estresse térmico por calor⁶ (HSI)

Belding e Hatch (1955), citados por Givoni (1969), propõem o índice de estresse térmico por calor para espaços externos, através de modelo de balanço térmico. Para tanto, realizam quatro suposições fisiológicas: o total de trocas no corpo equivale ao suor requerido para evaporação: $E_{rsw} = M + R + C$; o esforço fisiológico imposto por certo estresse térmico é determinado pela relação E_{rsw}/E_{max} ; a temperatura da pele mantém-se constante durante o estresse térmico: $t_{sk} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$; e a capacidade máxima de sudação durante 8 h é 1 L/h (390 W/m²). Considera-se E_{rsw} e E_{max} em W, aceitando-se valor máximo de $E_{max} = 632,27 \text{ W}$.

$$HSI = (E_{rsw}/E_{max}) \cdot 100$$
 (2)

⁴ Resultant Temperature
⁵ Wind Chill Temperature
⁶ Heat Stress Index

Este índice é válido para as seguintes condições: t_{ar} : 21-49 $^\circ\text{C}$; p_{ar} : 3-42mmHg (22,5-315kPa); v : 0,25-10,0m/s e M : 86-430W.

Temperatura de globo e de bulbo úmido⁷ (WBGT)

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

$$WBGT = 0,7 \cdot t_{nwb} + 0,3 \cdot t_g$$
 (3)

$$WBGT = 0,7 \cdot t_{nwb} + 0,2 \cdot t_g + 0,1 t_{ar}$$
 (4)

onde:

t_g = temperatura de globo; t_{nwb} = temperatura de bulbo úmido natural; t_{ar} = temperatura do ar, [$^\circ\text{C}$].

A norma ISO 7243 (1989a) avalia o estresse térmico do trabalhador com base na temperatura de globo e de bulbo úmido, segundo esse método. A adoção desse índice empírico pela norma deve-se à facilidade de realização das medições requeridas. A Norma Regulamentadora de Segurança e Higiene do Trabalho NR 15 (BRASIL, 1978) prevê o Índice de Bulbo Úmido – Termômetro de Globo (IBUTG) como índice técnico legal brasileiro para a avaliação das condições de trabalho em ambientes sob temperaturas elevadas. O método apresentado é equivalente ao da norma ISO 7243, propondo, contudo, valores-limite diferenciados.

Índice equatorial de conforto⁸ (EC)

Webb (1960), citado por Santamouris (1996), propõe o índice equatorial de conforto, a partir de estudos de conforto térmico em Cingapura. Foi desenvolvido correlacionando-se os dados levantados de temperatura, pressão e velocidade do ar com a temperatura do ar saturado e parado, a qual produziria a mesma sensação global de conforto. Esse índice aplica-se para condições onde a temperatura de bulbo úmido (t_{wb}) seja maior que 25 $^\circ\text{C}$ e a temperatura do ar seja igual à temperatura radiante média. A equação experimental proposta pelo autor é:

$$EC = 0,574 \cdot t_{ar} + 0,2033 \cdot p_v - 1,8 \cdot v^{0,5} + 42$$
 (5)

onde:

t_{ar} = temperatura do ar, [$^\circ\text{C}$]; p_{ar} = pressão parcial de vapor, [mmHg]; v = velocidade do ar, [m/s].

⁷ Wet Bulb Globe Temperature
⁸ Equatorial Comfort

Nova temperatura efetiva padrão⁹ (SET*)

Gagge (1967) propõe uma nova determinação para a temperatura efetiva padrão, podendo ser definida como a temperatura equivalente à temperatura do ar na qual, em um ambiente de referência, o indivíduo apresenta a mesma temperatura da pele e a mesma fração de pele coberta por suor regulatório que no ambiente em questão. O ambiente real e o de referência são equivalentes em termos de esforço fisiológico e de conforto térmico, porque a temperatura da pele e a fração de pele coberta por suor regulatório estão altamente correlacionadas com o desconforto subjetivo em ambientes frios e quentes respectivamente.

Para a determinação da SET* é necessária a utilização de um modelo de dois nós de termorregulação, como o de Gagge (1986), realizando as etapas: cálculo das condições de temperatura da pele e fração coberta por suor, para dada combinação de parâmetros meteorológicos e individuais; e entrada dos valores encontrados no mesmo modelo utilizado, resolvendo o sistema de equações para achar a temperatura do ar, considerando o ambiente de referência ($t_{rm}=t_{ar}$; $v=0,15$ m/s; $ur=0,5$; $M=1,2$ met; $I_{clo}=0,6$ clo). A temperatura do ar encontrada é a nova SET*.

Índice de estresse térmico¹⁰ (ITS)

Givoni (1969) propõe o índice de estresse térmico. Originalmente, essa modelagem não considerava as trocas por radiação. Para considerar as trocas por radiação de onda longa, o autor sugere a utilização da temperatura de globo, em vez da temperatura do ar, no cálculo das trocas convectivas. Posteriormente, propõe ainda uma equação para a consideração da radiação solar. As equações específicas podem ser localizadas na obra citada, assim como valores para coeficientes de roupa, terreno e postura. Assim, têm-se:

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

onde:

M= metabolismo; W= trabalho mecânico; C'= trocas convectivas e radiativas de onda longa; R_c= trocas radiantes de onda curta; E_{rsw}= perda requerida por evaporação; E_{max}= perda por evaporação máxima, [kcal/h].

Índice Humidex (HU)

Masterton e 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:

$$HU = t_{ar} + (5/9) \cdot (p_v - 10) , \quad (7)$$

onde:

t_{ar} = temperatura do ar, [°C]; p_{ar} = pressão parcial de vapor de água, [hPA].

O Humidex é utilizado pelo Serviço Meteorológico do Environment Canada (2000) como alerta para a população. O índice classifica situações desde “sem desconforto” até “golpe térmico iminente”.

Modelo climático de Michel¹¹ (KMM)

Jendritzky e Nübler (1981) relatam a proposição do Modelo Climático de Michel, originalmente proposto por Jendritzky *et al.* (1979). Esse modelo trata-se de uma adaptação do modelo proposto por Fanger (1970), através de um modelo de radiação que computa os fluxos de radiação de ondas longa e curta, considerando-os no valor de temperatura radiante média.

Para o modelo climático de Michel são necessárias: temperatura do ar e do ponto de orvalho, velocidade do ar e altura do anemômetro, quantidade e tipos através de dados sinópticos FM12. Com relação ao indivíduo, realizou-se uma padronização, de onde vem o nome do modelo. Michel é um nome alemão típico e comum: sexo masculino, 35 anos, 1,75 m, 75 kg, andando a 4 km/h (172,5 W). Consideram-se roupas entre 0,5-1,75 clo, referentes a verão e inverno. A partir dessas considerações, determinam-se os valores de PMV de acordo com as equações propostas por Fanger. Contudo, devido às limitações da modelagem deste autor – principalmente com relação à determinação da temperatura da pele e da taxa de suor regulatório, as quais são realizadas apenas em função do metabolismo –, os valores de PMV estimados para as situações externas não são coerentes com as respostas subjetivas.

⁹ New Standard Effective Temperature

¹⁰ The Index of Thermal Stress

¹¹ Klima Michel Model

Modelo baseado na taxa de suor requerida (Swreq)

O índice de taxa de suor requerida foi desenvolvido por Vogt *et al.* (1981), citados por Parsons (1993), a partir do HSI, estabelecido por Belding e Hatch (1955), e do ITS desenvolvido por Givoni (1976).

A norma ISO 7933 (1989b) baseia-se no modelo proposto por Vogt *et al.*, propondo a avaliação de estresse térmico através de cálculo da taxa de suor requerida (S_{wreq}). Constitui-se em um método analítico baseado na troca de calor entre o indivíduo e o ambiente, que apresenta o balanço termofisiológico do corpo humano. Comparativamente ao método do índice WBGT, o cálculo da taxa de suor requerida permite uma estimativa mais precisa do estresse e, ainda, a determinação das estratégias de intervenção, baseando-se na análise das trocas de calor realizada pelo método. A partir dos resultados do balanço termofisiológico, a ISO 7933 prevê recomendações baseadas em dois critérios de estresse (valores máximos de fração da pele coberta por suor e taxas máximas de suor) e dois de esforço fisiológico (valores máximos de calor armazenado no corpo e valores máximos de perda de água).

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 90 g/h e, para zonas de permanência, onde se deseja uma intensidade alta de condicionamento, estabeleceu-se nível de sudação não superior a 60 g/h. Segundo os critérios dos autores, todo o suor secretado deve ser evaporado para que a situação seja de conforto.

Fórmula de Conforto¹² (COMFA)

Brown e Gillespie (1995) propõem uma fórmula de conforto para ambientes externos. A formulação baseia-se no balanço térmico do indivíduo e apresenta algumas peculiaridades na forma de consideração de seus termos constituintes. A equação proposta é:

$$B = M' + R_{abs} - R_{emit} - C - E_{sk}, \quad (8)$$

onde:

B = saldo energético; M' = metabolismo de aquecimento; R_{abs} = radiação absorvida; R_{emit} = radiação emitida; C = troca convectiva; E_{sk} = perda latente pela pele, $[W/m^2]$.

As perdas sensíveis e latentes pela respiração são consideradas mediante um fator de respiração aplicado ao metabolismo. Assim, determina-se o metabolismo de aquecimento:

$$M' = (1 - f_{res}) \cdot M \quad (9)$$

$$f_{res} = 0,15 - 0,0173 \cdot p_{v,tar} - 0,0014 \cdot t_{ar}, \quad (10)$$

onde:

M = metabolismo, $[W/m^2]$; f_{res} = fator de respiração, adimensional; $p_{v,tar}$ = pressão de saturação de vapor a t_{ar} , $[kPa]$; t_{ar} = temperatura do ar, $[^{\circ}C]$.

Verifica-se que as formulações acima são as comumente encontradas na literatura, apenas apresentadas de maneira diversa. O mesmo acontece para os demais termos do balanço. Com relação às trocas radiativas, os autores apresentam separadamente as radiações solar e terrestre absorvidas pelo corpo e a radiação emitida pelo corpo. A descrição completa delas pode ser localizada na obra já referida.

Temperatura neutra exterior (T_{ne})

Aroztegui (1995) propõe a Temperatura Neutra Exterior, a partir do trabalho de Humphreys (1975). Este propõe a Temperatura Neutra, definida como a temperatura ambiente considerada termicamente neutra pela população. O autor apresenta uma relação linear, válida para ambientes interiores, verificada entre a temperatura média mensal (t_{mm}) e a Temperatura Neutra (T_n), em situações cuja velocidade do ar é baixa e a temperatura radiante média é próxima à temperatura do ar. Aroztegui (1995) incorpora variáveis relativas à radiação solar e à velocidade do vento. Baseando-se ainda no ITS de Givoni (1969), o autor propõe uma equação empírica que considera as variáveis características do exterior com relação à temperatura neutra interior. Para

¹² Comfort Formula

uma taxa de sudção em atividade sedentária e adotando-se condições médias para as características do indivíduo (0,8 clo) e do entorno (umidade: 35%-65%), foi determinada a equação da temperatura neutra exterior:

$$T_{ne} = 3,6 + 0,31t_{mm} + \{100 + 0,1R_{dn}[1 - 0,52(v^{0,2} - 0,88)]\} / 11,6v^{0,3}, \quad (11)$$

onde:

t_{mm} = temperatura média mensal, [°C]; R_{dn} = radiação solar direta normal, [W/m²]; v = velocidade do ar, [m/s].

A equação é válida para valores entre 18,5 °C e 28,5 °C para indivíduos em atividade sedentária com roupas leves. Para outras atividades têm-se as correções: M=210 W:-2 °C; M=300 W:-4,5 °C; M=400 W:-7 °C.

Modelo MENEX¹³

Blazejczyk (1996 *apud* 2002) propõe o modelo Menex. As peculiaridades do modelo são: o cálculo das perdas evaporativas pela pele considerando-se um coeficiente de ponderação por sexo (1,0 para homens e 0,8 para mulheres), o cálculo das perdas por radiação de onda longa pela pele considerando-se uma ponderação devida à nebulosidade, e ainda o cálculo de radiação solar através de modelos específicos. As doze equações desses modelos podem ser encontradas em Blazejczyk (2001). Para a avaliação dos resultados, o autor propõe três critérios, os quais devem ser considerados em conjunto: carga térmica, estímulo devido à intensidade de radiação solar e esforço fisiológico do organismo. O autor propõe ainda um índice de temperatura subjetiva e um índice de suor aparente. Todos são apresentados a seguir.

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

$$HL = [(S+360)/360]^{2-1/(1+R_c)} \text{ para } S \leq 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } E_{sk} \geq -50 \text{ W/m}^2 \quad (12)$$

$$HL = [(S+360)/360]^{2+1/(1+R_c)} \text{ para } S > 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } E_{sk} \geq -50 \text{ W/m}^2 \quad (13)$$

$$HL = (E/-50) \cdot [(S+360)/360]^{2-1/(1+R_c)} \text{ para } S \leq 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } E_{sk} < -50 \text{ W/m}^2 \quad (14)$$

$$HL = (E/-50) \cdot [(S+360)/360]^{2+1/(1+R_c)} \text{ para } S > 0 \text{ W/m}^2 \text{ e } E_{sk} < -50 \text{ W/m}^2 \quad (15)$$

O estímulo devido à intensidade de radiação solar – Intensity of Radiation Stimuli (R') – é calculado em função da radiação solar absorvida pelo corpo

nu. Assim, para o estabelecimento desse 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}).

$$R' = \alpha_{sk} \cdot I_{sol}, \quad (16)$$

onde:

α_{sk} = taxa de absorção de onda curta, adimensional;
 I_{sol} = radiação solar total incidente, [W/m²].

O esforço fisiológico – Physiological Strain (PhS) – 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}).

$$PhS = C/E_{sk} \quad (17)$$

O índice de temperatura subjetiva – Subjective Temperature Index (STI) – representa a sensação subjetiva do ambiente térmico pelo indivíduo.

$$STI = T_{rm} \pm [ISI^{0,75} / (5,39 \cdot 10^{-8}) + 273^4]^{0,25} - 273 \quad (18)$$

O índice de suor aparente – Sensible Perspiration (SP) – fornece uma avaliação subjetiva baseada em termos da percepção do suor secretado que não é efetivamente evaporado.

$$SP = -0,3 \cdot 5 \cdot (E_{rsw}/E_{max}) \quad (19)$$

De Freitas (1997), citado por Blazejczyk (2001), apresenta o índice de capacidade de armazenamento – Potential Storage Index (PSI). Esse índice é a capacidade hipotética de calor que uma pessoa com temperatura da pele constante a 32 °C e isolamento da roupa igual a 1 clo consegue armazenar em condições normais. O modelo Menex, de Blazejczyk (1996), é utilizado para efetuar os cálculos matemáticos e a escala usada para interpretação é dada na tabela a seguir. De Freitas propõe ainda o uso da temperatura da pele que equilibra o balanço térmico – Skin Temperature Equilibrating heat balance (STE) – como índice de comparação para a predição da sensação térmica. O modelo utilizado também é o Menex.

Modelo de Munique¹⁴ (MEMI)

Höppe (1999) propõe o Modelo de Munich. Este modelo baseia-se na equação de balanço térmico do corpo humano e em alguns parâmetros do modelo de dois nós de Gagge (1986). As diferenças do modelo de Höppe com relação ao de Gagge são os modos de calcular a taxa de suor regulatório (em função de t_{sk} e t_{cl}) e dos fluxos de calor, considerando em separado as partes do corpo cobertas e descobertas por roupa. Assim, a

¹³ Man-ENvironment heat EXchange model

¹⁴ Munich Energy-Balance Model for Individuals

primeira equação a ser apresentada representa o balanço energético; a segunda, o fluxo de calor do centro do corpo para a superfície da pele; e a terceira, o fluxo de calor da superfície da pele para a superfície externa da roupa:

$$M-W+R+C+Q_{res}-E_{dif}-E_{rsw}=0 \quad (20)$$

$$F_{c-sk}=v_b \cdot \rho_b \cdot c_b \cdot (t_c-t_{sk}) \quad (21)$$

$$F_{sk-cl}=(t_{sk}-t_{cl})/I_{cl}, \quad (22)$$

onde:

F_{c-sk} = fluxo de calor do centro do corpo para a superfície da pele, [W/m²]; v_b = fluxo de sangue do centro do corpo para a pele, [l/s·m²]; ρ_b = densidade do sangue, [kg/l]; c_b = calor específico do sangue, [W·s/K·kg]; F_{sk-cl} = fluxo de calor da superfície da pele para a superfície externa da roupa, [W/m²].

Resolvendo esse sistema de três equações, encontram-se os valores da temperatura da superfície externa da roupa, da pele e do centro do corpo.

Höppe define a temperatura equivalente fisiológica – Physiological Equivalent Temperature (PET) – de dada situação como a temperatura equivalente à temperatura do ar na qual, em uma situação típica interna, o balanço térmico do corpo humano é mantido, com temperaturas do centro do corpo e da pele iguais às da situação em questão. Para o ambiente de referência, tem-se: $t_{rm}=t_{ar}$; $v=0,1$ m/s; $p_v=12$ hPa; $M=114$ W; $I_{clo}=0,9$ clo. As etapas de cálculo são: cálculo das condições térmicas do corpo, temperatura da pele do centro do corpo, através dos sistemas de equações do modelo MEMI, para dada combinação de parâmetros meteorológicos e individuais; e inserção dos valores encontrados de temperatura da pele e do centro do corpo no modelo MEMI, resolvendo o sistema de equações para achar a temperatura do ar, considerando os valores de referência. A temperatura do ar encontrada é a PET.

Temperatura efetiva padrão externa¹⁵ (OUT-SET*)

Pickup e Dear (1999) propõem a temperatura efetiva padrão externa a partir do modelo de temperatura efetiva padrão de Gagge (1967), adaptando-o mediante a consideração detalhada das trocas radiativas com o meio externo através de um modelo específico (OUR-MRT), que fornece um valor equivalente de temperatura radiante média a ser utilizado. Potter e Dear (1999) apresentam o estudo de campo realizado para a calibração do modelo. As equações do OUT-MRT, assim como uma comparação positiva dos

resultados com os do modelo de Blazejczyk (1996), podem ser encontradas em Pickup e Dear. Possíveis aplicações do OUT-SET* encontram-se também em Pickup e Dear.

Índice de sensação térmica¹⁶ (TS)

Givoni e Noguchi (2000) relatam pesquisa experimental de conforto térmico em espaços abertos, envolvendo levantamento de dados subjetivos e microclimáticos. Foram estudadas as relações entre sensação térmica e sensação global de conforto, por meio de pesquisa desenvolvida pela Fujita Corporation em um parque da cidade de Yokohama, no Japão.

O objetivo da pesquisa era determinar o efeito quantitativo dos vários aspectos de projeto que interferem na incidência do sol e dos ventos. O levantamento foi realizado por alguns dias durante as quatro estações, de 1994 a 1995. A pesquisa foi realizada mediante a aplicação de questionário de respostas subjetivas a três pares de indivíduos, submetidos a diferentes condições experimentais: área sombreada, área ao sol e área aberta protegida do vento com uma placa transparente, encontrando-se as três áreas próximas entre si. As condições meteorológicas foram levantadas durante a aplicação do questionário. Com base nos dados experimentais desenvolveu-se a seguinte equação de predição da sensação de conforto do indivíduo em área externa:

$$TS=1,7+0,118 \cdot t_{ar}+0,0019 \cdot I_H-0,322 \cdot v-0,0073 \cdot ur+0,0054 \cdot t_{s,ent}, \quad (23)$$

onde:

t_{ar} = temperatura na sombra, [°C]; I_H = radiação solar no plano horizontal, [W/m²]; v = velocidade do vento, [m/s]; ur = umidade relativa, [%]; $t_{s,ent}$ = temperatura superficial do entorno, [°C].

Nova temperatura resfriada pelo vento¹⁷ (NWCT)

A nova temperatura resfriada pelo vento foi determinada a partir da combinação dos trabalhos de Bluestein e Zecher (1999) e Osczevski (2000a, 2000b), apresentados por Bluestein e Osczevski (2002), que realizam o trabalho de pesquisa empírica para a reformulação das equações para a 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. Adotou-se velocidade do indivíduo igual a 4,8 km/h, obtida a partir de pesquisas realizadas com pedestres

¹⁵ Outdoor Standard Effective Temperature

¹⁶ Thermal Sensation

¹⁷ New Wind Chill Temperature

atravessando ruas em cruzamentos. Assumiu-se, como pior caso, que o indivíduo anda contra o vento.

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

para $t_{ar} \leq 10$ °C e $v_{10} \geq 4,8$ km/h (24)

$$Ft = \{ \{-24,5 \cdot [(0,667 \cdot v_{10}) + 4,8]\} + 2111 \} \cdot (-4,8 - t_{ar}) - 1,668$$
 (25)

onde:

t_{ar} = temperatura do ar, [°C]; v_{10} = velocidade do ar a 10 m, [km/h]; Ft = tempo no qual ocorre congelamento da superfície do rosto, [min].

Nova temperatura percebida¹⁸ (PT*)

Jendritzky (2003) propõe a Nova Temperatura Percebida. Devido às limitações do KMM, este seria adaptado sucessivamente. Primeiramente, em 1995, a partir dos estudos de Staiger *et al.* (1998), passou-se a utilizar a temperatura percebida em vez do PMV. Em 1998, revisou-se o modelo de radiação a partir do VDI3789-Part2 (1994), dando origem ao modelo RayMan, proposto por Matzarakis *et al.* (2000). Por fim, em 2000, a partir do estudo da proposição do PMV* de Gagge *et al.* (1986), chegou-se à determinação de uma nova temperatura percebida (PT*). Dessa forma, o KMM é hoje composto de quatro módulos sucessivos: o modelo RayMan; a abordagem de t_{m} de Fanger; o modelo de balanço de energia do corpo humano; e o cálculo da PT*. Esta equivale à temperatura de um ambiente de referência, com relação às variáveis microclimáticas e individuais, conforme se segue: $t_m = t_{ar}$; $ur = 50\%$; $v = 0$ m/s; $M = 172,5$ W; $I_{clo} = 0,5 - 1,75$ clo (selecionada de acordo com as condições climáticas).

Voto real de sensação¹⁹ (ASV)

Nikolopoulou (2004) apresenta os trabalhos desenvolvidos pelo projeto Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces (RUROS), que tinha por objetivo fornecer ferramentas para o desenvolvimento das etapas iniciais de projeto de espaços abertos, levando-se em consideração as características urbanas e climáticas. A autora coloca que, do ponto de vista do projeto, é interessante desenvolver modelos simples que utilizem dados já disponíveis. Assim, para cada uma das cidades onde foram realizados levantamentos de campo, foi proposta uma equação linear simples para predição de conforto

baseado em dados de estação meteorológica. A partir dos levantamentos realizados pelo projeto RUROS, Nikolopoulou (2004) propõe um modelo combinado de predição de conforto que, segundo a autora, é representativo das diversas realidades climáticas da Europa. A equação modelada proposta é:

$$ASV = 0,049 \cdot t_{ar} + 0,001 \cdot H + 0,051 \cdot v_{ar} + 0,014 \cdot ur - 2,079$$
 (26)

Essa equação é válida para valores de temperatura do ar entre 5 °C e 35 °C. Conforme já colocado, os dados a serem utilizados são provenientes de estação meteorológica. Assim, as especificidades de dada situação espacial não podem ser consideradas. Contudo, a autora coloca que, para um caso típico de verão em Atenas, pode-se considerar que, em uma área densamente sombreada por árvores, tem-se uma redução de 2 °C na temperatura do ar, uma redução de 40-80% na radiação solar global e uma redução de 60-80% na velocidade do ar.

Índice termoclimático universal²⁰ (UTCI)

O índice termoclimático universal (UTCI) está em desenvolvimento pela Comissão 6 da Sociedade Internacional de Biometeorologia (International Society of Biometeorology – ISB). Essa comissão foi criada especificamente para tal propósito (ISB, 2004).

Definiu-se, inicialmente, que o índice a ser estabelecido deverá ser térmica e fisiologicamente válido, aplicável a todos os tipos de clima e independente das características pessoais dos indivíduos. Assim, com relação à caracterização geral do índice, ficou estabelecido que o UTCI será um índice de temperatura equivalente; deverá responder por todo o contínuo termorregulatório; deverá considerar simultaneamente a situação geral do corpo e situações específicas de determinadas partes do corpo; será baseado em modelo de termorregulação de múltiplos nós. Deverá considerar ainda, com relação ao frio, hipotermia, exposição da pele e risco de congelamento e desconforto na face, nas mãos e nos pés; com relação ao calor, hipertermia, desidratação e desconforto por calor. Para os dados de entrada, estabeleceu-se que a topografia geral a ser considerada é de paisagem plana, podendo-se considerar ainda uma topografia regional ou local, por exemplo, através da configuração de *canyons* urbanos; os fluxos radiativos de ondas longa e curta serão considerados através do cálculo de temperatura radiante média; os ventos de referência a 1,1 m, considerando-se 2/3 do valor a

¹⁸ Perceived Temperature

¹⁹ Actual Sensation Vote

²⁰ Universal Thermal Climate Index

10 m. Assume-se que o vento incida lateralmente no indivíduo. O ambiente de referência é $t_{\text{ar}}=t_{\text{ar}}$; $u_r=50\%$; $v=0$ m/s; $M=135$ W; $I_{\text{clo}}=0,5-2,0$ clo. Assume-se que as pessoas variam quanto ao tipo de roupa usada, adaptando-se a diferentes situações térmicas, objetivando alcançar o conforto térmico. Fora dos limites teóricos de conforto, o valor da resistência da roupa será mantido fixo.

As próximas atividades da comissão são a validação dos resultados de novos modelos analíticos complexos e a discussão do modo de consideração da base de dados fisiológicos. O objetivo final é o estabelecimento de um índice universal que contemple todos os processos fisiológicos termorregulatórios na diversidade de possíveis condições climáticas e de possíveis adaptações em relação a vestimentas, fornecendo escalas regionais de conforto e de alerta de perigo.

Discussão

Considerando os modelos e os respectivos índices apresentados, realiza-se aqui a consideração histórica e a verificação do estado da arte, objetivando a identificação das diferentes abordagens adotadas para a subsequente classificação do material apresentado.

Os trabalhos empíricos de Temperatura Efetiva (ET), de Houghten *et al.* (1923), de Nova Temperatura Efetiva (ET*), de Vernon e Warner (1932), e de Temperatura Resultante (RT), de Missenard (1948), representam as primeiras tentativas para o estabelecimento de um índice genérico para predição de conforto por meio de uma escala de sensação térmica. O índice de taxa de suor previsto para quatro horas por McAriel *et al.* (1947) constituiu-se numa tentativa de prever o estresse térmico em situações de trabalho mais extremas. Esses índices foram divulgados na forma de nomogramas para facilitar seu uso. Já a temperatura de globo e de bulbo úmido (WBGT) de Yaglou (1957) é até hoje utilizada devido à simplicidade de obtenção de dados. A norma internacional ISO 7243 (1989a) e a norma nacional NR 15 (BRASIL, 1978) são baseadas nesse trabalho. O índice de temperatura resfriada pelo vento (WCI), de Siple e Passel (1945), o índice equatorial de conforto (EC), de Webb (1960), e o Humidex, de Masterton e Richardson (1979), consideram de forma simplificada apenas algumas variáveis visando responder a determinadas situações específicas.

O índice de estresse térmico por calor (HSI), de Belding e Hatch (1955), citado por Givoni (1969), e o índice de estresse térmico (ITS) de Givoni (1969) são os primeiros índices embasados em modelos analíticos, que consideram separadamente

os diversos processos de trocas térmicas. Contudo, para a determinação analítica das trocas, são empregadas equações experimentais. Já a nova temperatura efetiva padrão (SET*), de Gagge (1967), é obtida também através de modelo analítico de balanço térmico, mas, neste caso, o cálculo das trocas é feito principalmente a partir de modelo teórico. Este índice apresenta modelagem de dois nós do corpo humano, considerando as trocas entre o core central e a região periférica do corpo e desta com o ambiente externo. Os valores desse índice são dados em temperatura equivalente de sensação térmica. O Modelo Climático de Michel (KMM), de Jendritzky *et al.* (1979 *apud* JENDRITZKY; NÜBLER, 1981), também é baseado em balanço térmico. Contudo, seu modelo é mais simples, de apenas um nó, considerando apenas as trocas entre o corpo como um todo e o ambiente externo, baseando-se nos trabalhos de Fanger (1970) e adaptando-o para situações externas. O índice utilizado por Jendritzky apresenta ainda as mesmas escalas de valor de PMV e de PPD de Fanger. Os critérios para níveis de sudação em espaços externos da Expo de Sevilha de Domínguez *et al.* (1992) são também estabelecidos a partir de modelo analítico teórico. Utiliza-se metodologia semelhante à da norma internacional ISO 7933 (1989b), mas adotam-se critérios que satisfaçam necessidades específicas. A Fórmula de Conforto (COMFA) de Brown e Gillespie (1995) é mais um modelo analítico de balanço térmico. É constituído apenas por um nó e com escala de valores simplificada.

A Temperatura Neutra Exterior (T_{ne}), de Aroztegui (1995), é uma abordagem diferenciada baseada no modelo adaptativo de Humphreys (1975), focando-se experimentalmente a adaptação dos indivíduos a determinado clima. Essa abordagem é bastante recente nos estudos de espaços externos, mas já está desenvolvida para espaços internos climatizados ou naturalmente ventilados, conforme pode ser verificado em De Dear *et al.* (1997).

Com relação a esses dezesseis índices apresentados, pode-se colocar que, historicamente, a intenção inicial era a determinação empírica de um índice válido universalmente. Os estudos realizados ao longo do século XX demonstram que os índices empíricos apresentam respostas significativas, mas apenas às situações específicas em que foram determinados. As tentativas de se obterem respostas mais universais acabam convergindo para modelos analíticos, que trazem ainda a vantagem de possibilitar uma avaliação específica das diversas trocas térmicas operantes, facilitando a determinação das necessidades de intervenção nos ambientes externos. Há, por fim, ainda a abordagem adaptativa, que traz a

característica de se considerar enfaticamente a adaptação ao clima. Através desses estudos, observa-se que índices empíricos respondem significativamente às situações específicas em que foram determinados. Quando há intenção de se obterem respostas universais, a tendência é a utilização de modelos analíticos. Com relação aos últimos dez anos de pesquisas, considerando o atual estado da arte, confirma-se essa tendência. Verifica-se o emprego de índices empíricos para situações específicas, o refinamento dos modelos analíticos e a tentativa da SIB em determinar um índice termoclimático universal.

O trabalho empírico de Givoni e Noguchi (2000), propondo o índice de sensação térmica (TS), é desenvolvido a partir de experimentos realizados pela Fujita Corporation em um parque da cidade de Yokohama, no Japão. O índice proposto, por ser gerado a partir da correlação direta dos valores encontrados na pesquisa em específico, apresenta respostas significativas apenas para a situação em análise ou bastante similar. As pesquisas experimentais de Bluestein e Oszcewski (2002), que levaram à determinação da nova temperatura resfriada pelo vento (NWCT), também correlacionam variáveis visando atender a necessidades específicas. O índice considera apenas duas variáveis, sendo válido apenas para temperaturas do ar inferiores a 10 °C e velocidades do ar superiores a 4,8 km/h. Os trabalhos do projeto RUROS, apresentados por Nikolopoulou (2004), têm por objetivo fornecer ferramentas para o desenvolvimento das etapas iniciais de projeto de espaços abertos. A autora coloca, do ponto de vista do projeto, que é interessante desenvolver modelos simples que utilizem dados já disponíveis. Assim, estabelecem-se correlações específicas com dados de estações meteorológicas, permitindo avaliações baseadas em dados preexistentes.

Por outro lado, têm-se os trabalhos com modelos analíticos, que pretendem fornecer respostas universais. Blazejczyk (1996) propõe o modelo MENEX, de apenas um nó, mas que fornece uma série de índices – carga térmica (HL), estímulo devido à intensidade de radiação solar (R'), esforço fisiológico (PhS), suor aparente (SP) – que, analisados em conjunto, fornece uma avaliação térmica e fisiológica dos processos em ação. Höpfe (1999), com o Modelo de Munique (MEMI), de dois nós, busca uma descrição mais apurada das trocas termofisiológicas. Com a temperatura equivalente fisiológica (PET), o autor propõe um índice de temperatura equivalente à sensação térmica do indivíduo, em vez de fornecer uma série de índices que dependam de escalas predefinidas. Essa característica de se utilizar uma escala de temperatura de sensação térmica retoma

os primeiros índices do século passado, que visavam fornecer uma resposta à questão do conforto térmico que fosse de fácil compreensão. O modelo de dois nós de Gagge (1967), que propõe como índice a nova temperatura efetiva padrão (SET*), já faz uso desse princípio. É exatamente a partir dos trabalhos desse autor que Pickup e Dear (1999) propõem a temperatura efetiva padrão externa (OUT-SET*), considerando a radiação através de um modelo próprio (OUT-MRT). Jendritzky (2003) revisa seu Modelo de Michel (KMM), também considerando a radiação a partir de modelo específico de Matzarakis (2000) e, abandonando o PMV de Fanger, propõe a nova temperatura percebida (PT*), a partir dos estudos de Staiger *et al.* (1998) e também de Gagge *et al.* (1986).

Apesar de Gagge (1967) ter proposto um modelo de dois nós originalmente com índice baseado em temperatura equivalente de sensação térmica, em Gagge *et al.* (1986), temos uma adaptação do modelo com a proposição do PMV*. Essa adaptação se deu devido à grande aceitação do índice PMV, de Fanger (1970), para a avaliação de ambientes internos condicionados artificialmente. Curiosamente, para a avaliação de ambientes externos, parece ser uma tendência a adoção não de escalas predeterminadas, mas de temperaturas representativas de sensação térmica. Podemos observar esse fato a partir dos trabalhos de Höpfe (1999), Pickup e Dear (1999) e Jendritzky (2003), baseados exatamente nos trabalhos de Gagge.

A tendência em utilizar temperaturas equivalentes de sensação térmica é confirmada pelos trabalhos em andamento da Comissão 6 da ISB (2004): os valores de saída do índice termoclimático universal (UTCI) serão padronizados em unidades de temperatura. Contudo, haverá escalas de conforto e de alerta de perigo estabelecidas regionalmente, uma vez que se reconhece que a adaptação e a aclimação são aspectos importantes na interpretação do conforto e no estabelecimento de critérios de perigo.

Panorama brasileiro

Considerando os trabalhos desenvolvidos em nosso país, observa-se que o campo de pesquisa é crescente. Contudo, a maior parte dos trabalhos publicados foca as relações entre microclima e meio urbano (forma e materiais constituintes, incluindo-se aqui também a vegetação e corpos de água), poucos deles concentrados especificamente na relação entre microclima e usuário, relação essa que é o objeto de estudo do presente trabalho. Consideramos aqui 21 trabalhos, publicados nos últimos dez anos nos principais eventos científicos e revistas nacionais da área. Esses trabalhos focam

especificamente a relação entre microclima e usuário, visando ressaltar a contribuição de cada um deles para o tema em desenvolvimento.

Ameur (1999) realiza estudo teórico sobre aplicabilidade do PMV em espaços externos. Conclui que ele é válido apenas para situações restritas, sem radiação solar direta e, mesmo na sombra, apenas dentro de determinados limites de velocidade do vento. Katzschner *et al.* (1999) estudam o conforto térmico em áreas urbanas de Salvador utilizando não apenas o PMV, mas também correlacionando este com o PET e o SET, e ressaltando que os valores utilizados foram todos estabelecidos para pessoas européias. Lois e Labaki (2001) realizam revisão teórica das pesquisas de conforto térmico em espaços externos, dando ênfase para os seguintes modelos e índices: ITS, KMM, MEMI, PET, Tne e TS. Concluem colocando que esperam contribuir “para as pesquisas que estão se iniciando no Brasil sobre conforto térmico em espaços urbanos externos”.

Mendonça e Assis (2001, 2003) realizam estudo de caso no Bairro Floresta, em Belo Horizonte. O trabalho centra-se principalmente na questão entre ambiente e forma urbana. Para a avaliação de resultados, sugerem o emprego do Diagrama Climático de Givoni, que, segundo as autoras, é “um índice de conforto gerado para interiores”. O mesmo é comumente empregado para diretrizes em etapas iniciais de projeto de ambientes internos.

Costa e Araújo (2002) realizam, durante quatro dias de verão, a aplicação de oitenta questionários em bairros de Natal, medindo às 6h e às 13h, a temperatura, a umidade e a velocidade do ar. Para análise dos resultados utilizam o PET e o SET, concluindo que o primeiro apresentou resultados mais condizentes com a realidade em questão. As mesmas autoras (2003) apresentam resultados específicos para o Bairro de Petrópolis, dando ênfase ao levantamento empírico. Concluem que, quando comparado a estações meteorológicas, o bairro é mais quente e menos ventilado, e a maioria dos usuários sente-se desconfortável.

Araújo e Caram (2004), com base nos dados de Costa (2003), apresentam estudo para o Bairro da Ribeira, em Natal. São consideradas as variáveis temperatura, umidade e velocidade do ar. Não se apresenta avaliação conjunta através de algum índice, mas nas considerações finais aponta-se que o trabalho está em andamento. Silva e Corbella (2004) apresentam também trabalho em andamento a partir de estudo de caso realizado em Copacabana, no Rio de Janeiro, com coleta de grande quantidade de variáveis ambientais e aplicação de “enquetes sensoriais”. Concluem os

autores que “talvez o aspecto mais importante diga respeito às enquetes sensoriais, sobretudo em função da heterogeneidade dos usuários locais”, indicando a necessidade de desenvolvimento dos procedimentos utilizados para tal fim.

Costa e Araújo (2004) relatam novos resultados de seus trabalhos (2002, 2003), apresentando, com base nos estudos realizados no Bairro de Petrópolis em Natal, valores referenciais de PMV, PET e SET, e, ainda, indicação de faixa de conforto (24,2-30,4 °C; 67-89%). Ainda segundo as autoras, “em se tratando de velocidade do vento é impreciso se determinar um intervalo significativo já que os dados variaram enormemente (de 0,14m/s a 2,99m/s)”. Alucci e Monteiro (2004) apresentam resultados de investigação teórica acerca das condições de estresse térmico de usuários para diferentes situações ambientais. Para avaliação, são utilizados os índices SWreq, HL e SP. Os autores concluem apresentando as situações-limite teoricamente aceitáveis, em termos fisiológicos, e não de conforto, para diversas cidades brasileiras.

Torres e Barbirato (2004) divulgam resultados de pesquisa realizada em três áreas externas de conjuntos habitacionais de Maceió. Foram levantadas variáveis ambientais e aplicados sessenta questionários. Os autores indicam a área que apresentou melhores resultados, ressaltando o fato de que ela é a menos freqüentada, apontando para a problemática da falta de diversidade de atividades ofertadas. Katzschner (2005) utiliza dados obtidos para Salvador e João Pessoa, e por meio da utilização do índice PET discute resultados anteriormente divulgados, apontando para um abrandamento das condições de conforto, em contraposição às análises anteriores. Ananian *et al.* (2005) realizam estudo para espaço externo em Bauru, SP, com levantamento de variáveis ambientais e aplicação do índice PMV, não sendo realizada nenhuma ressalva quanto às limitações deste.

Monteiro e Alucci (2005) apresentam procedimento para quantificação de variáveis ambientais e subjetivas em espaços abertos. Os mesmos autores (MONTEIRO; ALUCCI, 2006a) apresentam estudo comparativo com dados preliminares obtidos e proposta de calibração de modelos preditivos (MONTEIRO; ALUCCI, 2006b). Alucci e Monteiro (2006) utilizam esses resultados e, por meio do HL calibrado, realizam avaliação de espaços abertos sombreados ou não. Apontam ainda para a necessidade de estabelecimento de base empírica em diversos domínios climáticos brasileiros para a melhor adequação do modelo utilizado.

Borges e Labaki (2006), através de medições e entrevistas, estudam três espaços externos de Campinas, SP, comparando o índice PMV e as sensações e preferências dos usuários dessas áreas. Concluem que há diversidade térmica em relação às três áreas analisadas, indicando a existência de microclimas diferenciados e de variações de efeito psicológico nas sensações térmicas.

Costa e Araújo (2006) apresentam novos resultados de sua pesquisa (2004), com faixas-limite distintas para verão (27,3-31,3 °C; 65-81%) e inverno (23,2-29,4 °C; 70-92%), baseando-se em medições microclimáticas e 171 entrevistas realizadas no Bairro de Petrópolis em Natal. Concluem que a definição de faixas-limite através de análise estatística e pesquisa de campo por meio de entrevistas é uma metodologia possível, embora deva ser suficiente e cuidadosamente abrangente em virtude da multiplicidade de variáveis envolvidas.

Como consideração final acerca do panorama brasileiro, verifica-se que, entre os trabalhos existentes, nenhum desenvolve modelagem própria para avaliação efetiva da ambiência térmica sob a perspectiva do usuário. As contribuições mais efetivas dizem respeito a calibrações e novas

interpretações para modelos preexistentes e análises estatísticas, sendo os resultados encontrados dificilmente extrapolados para outras situações. É necessário o estabelecimento de uma base empírica mais significativa, e ainda a possibilidade de interpretação cruzada dos dados obtidos em diferentes pesquisas, para um adequado mapeamento das relações entre microclimas e usuários nas diferentes regiões do país. O item que se segue propõe uma classificação sumária dos modelos e índices levantados internacionalmente, visando a uma uniformização de discursos e posterior desenvolvimento de pesquisa comparativa, criando-se, assim, um denominador comum entre os diversos estudos nacionais já realizados e a serem realizados.

Proposição de classificação de modelos e índices

É proposta aqui uma classificação do material apresentado, por meio de conceitos modelares e modais. Consideraram-se, ainda, os respectivos índices dos modelos, segundo o critério de interpretação apresentado, conforme pode ser depreendido das Tabelas 1 e 2.

Objeto de predição	Esforço fisiológico	
	Indutivo	Dedutivo
Método predominante		
Modelos	WCT (WCTI), WBGT, Humidex (HU), NWCT (NWCTI, Ft) HSI, ITS	Vogt, ($S_{w_{req},w}$, S) Sevilha, ($S_{w_{req}}$) 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
		- $S_{w_{req},w}$, S ⁽¹⁾ , $S_{w_{req}}$, ⁽¹⁾ HL, PhS, R' ⁽¹⁾ , SP ⁽¹⁾

Índices que consideram apenas exposição a situações térmicas: (1) quentes; (2) frias.

Tabela 1 - Proposta de classificação dos modelos de esforço fisiológico

Objeto de predição	Sensação térmica				
	Indutivo			Dedutivo	
Método predominante					
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	Parâmetros				
	Analogia	Fisiológicos		Qualitativos	Qualitativos
Índices	ET*		Tne	SET*	S'
	CET*	-	TS	STI	ECI, PSI
	OT		ASV	PET	STE
					PMV PPD

Tabela 2 - Proposta de classificação dos modelos de sensação térmica

Os modelos foram, assim, 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.

Os índices foram classificados segundo o seu principal critério interpretativo. Dessa forma, os índices considerados baseiam-se predominantemente em um dos dois seguintes critérios: analogia ou parametrização. Quando a interpretação é realizada por 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 denominados porque a escala de valores é determinada efetivamente pelo parâmetro ou relação de parâmetros fisiológicos.

Considerações finais

Considerando a discussão realizada e a síntese proposta pela classificação, talvez seja esta a direção das pesquisas futuras: desenvolver, por um lado, modelos analíticos universais representativos dos processos termofisiológicos e, por outro, calibrações particulares que satisfaçam os processos de adaptação e aclimatação. Talvez já seja possível também vislumbrar o desenvolvimento de modelos analíticos transientes, capazes de considerar os processos térmicos e fisiológicos, inclusive de adaptação e aclimatação, deixando para a calibração apenas o trabalho, não menor, de correlação com as preferências de sensação térmica.

Com base no recém-exposto, artigo subsequente, a ser oportunamente publicado, apresentará estudos empíricos que se utilizaram do material levantado, das discussões realizadas e da classificação proposta como suporte teórico e base secundária para a realização de quantificação de variáveis para análise termofisiológica em espaços abertos, permitindo-se assim o fornecimento de instrumental para a constituição de bases empíricas para a avaliação dos resultados fornecidos pelos diversos modelos preditivos e, ainda, para a proposição de calibração desses modelos.

Referências

- ALUCCI, M.; MONTEIRO, L. Estresse térmico dos usuários em espaços externos. In: NUTAU 2004. **Anais...** São Paulo: NUTAU, 2004.
- ALUCCI, M.; MONTEIRO, L. Modelagem termo-fisiológica para avaliação de espaços sombreados por membranas têxteis. In: NUTAU 2006. **Anais...** São Paulo: NUTAU, 2006.
- AMEUR, K. Validation of a thermal comfort index for public outspaces. In: ENCAC, 5., ELACAC, 2. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 1999.
- ANANIAN, P. *et al.* Avaliação quanto ao desempenho térmico de equipamento urbano no calçadão de Bauru. In: ENCAC, 8., ELACAC, 4. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005.
- ARAÚJO, B.; CARAM, R. Análise ambiental: estudo bioclimático urbano em centro histórico. In: ENTAC, 10., CLACS, 1. **Anais...** São Paulo, ANTAC, 2004.
- ARAÚJO, V. **Índices e zonas de conforto térmico.** Trabalho Programado. São Paulo: FAUUSP, 1996.
- ARZTEGUI, M. Cuantificación del impacto de las sombras de los edificios. In: ENCAC, 3., ELACAC, 1. **Anais...** Gramado: ANTAC, 1995.
- ASHRAE. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.** Atlanta, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1967.
- BELDING, H.; HATCH, T. Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strain. **Heating, Piping, Air Conditioning**, n. 27, p. 129-42, 1955.
- BLAZEJCZYK, Krzysztof. Climatological-and-physiological model of the human heat balance outdoor and its applications in bioclimatological studies in different scales. **Zeszyty IGIPZ PAN**, v.28, p.27-58, 1996.
- BLAZEJCZYK, Krzysztof. Assessment of recreational potential of bioclimate based on the human heat balance. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON CLIMATE, TOURISM AND RECREATION, 1., 2001, Halkidiki, Greece. **Proceedings...** ISB, 2001. p. 133-152.
- BLAZEJCZYK, Krzysztof. **Menex 2002.** Disponível em: <<http://www.igipz.pan.pl/klimat/blaz/menex.htm>>. Acesso em: 24 abr. 2004.
- BLUESTEIN, M.; OSCZEWSKI, R. Wind chill and the development of frostbite in the face. In: CONF. ON BIOMET. AND AEROBIOLOGY, 15., Kansas City, MO. **Preprints...** Amer. Meteor. Soc., 2002. p. 168-171.
- BORGES, M.; LABAKI, L. Conforto térmico em espaços externos: preferência dos usuários e índices de conforto. In: COTEDI 2005. **Memórias...** México: UAM, 2006
- BRASIL. **NR-15 - Atividades e operações insalubres.** Brasília: Ministério do Trabalho, 1978.
- BROWN, R. D.; GILLESPIE, T. J. **Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency.** New York: John Wiley & Sons, 1995.
- COSTA, A. **A influência da forma de ocupação do solo urbano no microclima: uma fração do bairro de Petrópolis em Natal-RN.** 2003. Dissertação (Mestrado) - UFRN, Natal, 2003.
- COSTA, A.; ARAÚJO, V. Em busca da sustentabilidade para espaços urbanos. In: NUTAU 2002. **Anais...** São Paulo: NUTAU, 2002.
- COSTA, A.; ARAÚJO, V. Estudo do conforto térmico em ambientes externos: o caso de Petrópolis em Natal/RN. In: ENCAC, 7., COTEDI, 2. **Anais...** Curitiba: ANTAC, 2003.
- COSTA, A.; ARAÚJO, V. A perspectiva do usuário sobre o conforto térmico em espaços abertos. NUTAU 2004. **Anais...** São Paulo: NUTAU, 2004.
- COSTA, A.; ARAÚJO, V. Contribuição para a definição de faixas-limite de conforto térmico para ambientes externos. In: ENTAC, 11. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2006.
- DEAR, R.; PICKUP, J. An outdoor thermal comfort index: applications. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BIOMETEOROLOGY, 15., 1999, Sydney. **Proceedings...** Geneve: WMO, 2000. p. 285-290.
- DEAR, R.; BRAGER, G. **Developing an adaptative model of thermal comfort and preference.** Sydney: ASHRAE, 1997.
- DOMINGUEZ *et al.* **Control climático en espacios abiertos.** Sevilla: Universidad de Sevilla, 1992.
- FANGER, P. **Thermal confort.** New York: McGraw-Hill, 1970.

- GAGGE, A. *et al.* A standard predictive index of human response to the thermal environment. **ASHRAE Trans**, 92, p. 709-731, 1986.
- GAGGE, A. *et al.* Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. **Environ. Res.**, n. 1, p. 1-20, 1967.
- GIVONI, Baruch. **Estimation of the effect of the climate on man: development of a new thermal index**. Research Report to UNESCO. Haifa: Building Research Station, 1963.
- GIVONI, Baruch. **Man, climate and architecture**. New York: J. 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, 2002. p. 562-565.
- GIVONI, Baruch; NOGUCHI, Mikiko. Outdoor comfort research issues. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 1, p. 77-86, 2003.
- GLICKMAN, N. Physiological examination of the effective temperature index. **ASHVE Trans.**, v.56, p.51-56, 1950.
- HOUGHTEN *et al.* Determining lines of equal comfort. **ASHVE Trans.**, v.29, p.163-169, 1923.
- HÖPPE, Peter. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 661-665, 2002.
- HÖPPE, Peter. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. In: **MOVING THERMAL COMFORT STANDARDS INTO THE 21ST CENTURY**, 2001, Windsor, UK. **Proceedings...** Oxford Brookes, 2001. p. 368-75.
- HÖPPE, Peter. The physiological equivalent temperature: a universal index for the assessment of the thermal environment. **International Journal of Biometeorology**, n. 43, p. 71-5, 1999.
- HUMPHREYS, M. Field studies of thermal comfort compared and applied. **BRE Current Paper**, Londres, UK, n. 75-76, 1975.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 7243**. Hot environments: estimation of the heat stress on working man. Genève: ISO, 1989a.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 7933**. Hot environments: analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate. Genève: ISO, 1989b.
- JENDRITZKY, G. Selected questions of topical interest in human bioclimatology. **International Journal of Biometeorology**, v. 35, n. 3, p. 139-150, 1991.
- ISB. **Guidelines for ISB Commissions and Study Groups**. Oklahoma, ISB, 2004. Disponível em: <<http://www.biometeorology.org/study.htm>>. Acesso em: 9 out. 2004.
- ISB Commission 6. **Guidelines for ISB Commission**. Oklahoma, 2004.
- ISB Commission 6. **Report for 2003**. Genève, 2003.
- ISB Commission 6. **Meeting Report**, June 7-8. Freiburg, 2001.
- JENDRITZKY, Gerd. Perceived temperature: Klima-Michel-model. **The Development of Heat Stress Watch Warning Systems**. Freiburg, May 3, 2003. Disponível em: <www.gees.bham.ac.uk/research/phewe/freiburg>. Acesso em: 9 out. 2004.
- JENDRITZKY, Gerd *et al.* Looking for a universal thermal climate index: UTCI for outdoor applications. In: **MOVING THERMAL COMFORT STANDARDS INTO THE 21ST CENTURY**, 2001, Windsor, UK. **Proceedings...** Oxford Brookes, 2001. p. 353-367.
- 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 analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. **Arch. Meteor. Geophys. Bioclimatol.**, Serial B 29, p. 313-26, 1981.
- KATZSCHNER, L. The contribution of urban climate studies to a new urbanity. In: ENCAC, 8., ELACAC, 4. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005.
- KATZSCHNER, L. *et al.* Urban climate study of Salvador: thermal comfort pattern. In: ENCAC, 5., ELACAC, 2. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 1999.
- LOIS, E.; LABAKI, L. Conforto térmico em espaços externos: uma revisão. In: ENCAC, 6., ELACAC, 3. **Anais...** São Pedro: ANTAC, 2001.
- MASTERTON, J.; RICHARDSON, F. Humidex: a method of quantifying human discomfort.

- Environment Canada**, CLI 1-79. Ontario, Downsview: Atmospheric Environment Service, 1979.
- MATZARAKIS, A. *et al.* Estimation and calculation of the mean radiant temperature within urban structures. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BIOMETEOROLOGY, 15., 1999, Sydney. **Proceedings...** Genève: WMO, 2000. p. 273-278.
- MCARIEL *et al.* The prediction of the physiological effect of warm and hot environments. **Med. Res. Council**, v. 47, p.391, 1947.
- MENDONÇA, R.; ASSIS, E. Conforto térmico urbano: estudo de caso do Bairro Floresta, Belo Horizonte. In: ENCAC, 6., ELACAC, 3. **Anais...** São Pedro: ANTAC, 2001.
- MENDONÇA, R.; ASSIS, E. Conforto térmico urbano: estudo de caso do Bairro Floresta, Belo Horizonte. **Ambiente Construído**, Porto Alegre: ANTAC, 2003. p. 45-63.
- MISSENARD, A. Equivalences thermiques des ambiances; equivalences de passage; equivalences de séjour. **Chaleurs et Industrie**, Juillet-Août, 1948.
- MONTEIRO, L.; ALUCCI, M. Procedimentos para quantificação de variáveis para análise termofisiológica. In: ENCAC, 8., ELACAC, 4. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005.
- MONTEIRO, L.; ALUCCI, M. Verificação comparativa experimental da aplicabilidade de diferentes modelos preditivos de conforto térmico em ambientes externos. In: ENTAC, 11. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2006a.
- MONTEIRO, L.; ALUCCI, M. Proposta de calibração de modelos preditivos para avaliação térmica de conforto em espaços externos na cidade de São Paulo. In: NUTAU 2006. **Anais...** São Paulo: NUTAU, 2006b.
- PARSONS, A. T. **Human thermal environments**. London: Taylor & Francis, 1993.
- PICKUP, J.; DEAR, R. An outdoor thermal comfort index: the model and its assumptions. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BIOMETEOROLOGY, 15., 1999, Sydney. **Proceedings...** Genève: WMO, 1999. p. 279-284.
- POTTER, J.; DEAR, R. Field study to calibrate an outdoor thermal comfort index. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BIOMETEOROLOGY, 15., 1999, Sydney. **Proceedings...** Genève: WMO, 1999. p. 315-320.
- SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. **Passive cooling of buildings**. London: J&J, 1996.
- SILVA, C.; CORBELLA, O. Conforto ambiental urbano: apropriação e análise de dados microclimáticos. In: ENTAC, 10., CLACS, 1. **Anais...** São Paulo, ANTAC, 2004.
- SIPLE, P.; PASSEL, C. Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 89, n. 1, p. 177-199, 1945.
- SMITH, F. E. Indices of of heat stress. **Med. Res. Council**, Memo n.29, 1958.
- STAIGER *et al.* Gefühlte Temperatur. Die physiologisch gerechte Bewertung von Wärmebelastung und Kältestress beim Aufenthalt im Freien in der Maßzahl Grad Celsius. **Annalen der Meteorologie**, v.33, p.100-107, 1998.
- TORRES, S.; BARBIRATO, G. Qualidade bioclimática de espaços públicos urbanos: um estudo de caso em conjuntos habitacionais de Maceió – AL. In: NUTAU 2004. **Anais...** São Paulo: NUTAU, 2004.
- VERNON, H. M.; WARNER, C. G. The influence of the humidity of the air on capacity for work at high temperatures. **J. Hyg.**, v.32, p.431-462, 1932
- VOGT *et al.* A thermal environment in physiologically significant terms. **Arch. Meteor. Geophys. Bioclimatol.** v.29, p. 313-326, 1981.
- WEBB, C. Thermal discomfort in an equatorial climate. **Journal IHVE**, n. 27, p. 10, 1960.
- WILLIAMSON, S. **Report on wind chill temperature and extreme heat indices: evaluation and improvement projects**. Washington: OFCMS, 2003.
- YAGLOU, C.; MINARD, D. Control of heat casualties at military training centers. A.M.A. **Archives of Industrial Health**, n. 16, p. 302-316, 1957.

Agradecimento

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro.