



ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO EM ESPAÇOS ABERTOS PARTE 1: REVISÃO HISTÓRICA

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

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

RESUMO

Este artigo revisa as pesquisas sobre conforto térmico em espaços externos, especificamente os modelos numéricos e os parâmetros propostos por diversos autores através de metodologia de balanço térmico e pesquisas empíricas. As primeiras pesquisas realizadas são ilustradas pelos trabalhos empíricos de Houghten (1923), Vernon & Warner (1932), McAriel (1947) e Missenard (1948), originalmente divulgadas na forma de nomogramas. Na seqüência, são apresentadas as equações e os parâmetros dos seguintes trabalhos empíricos: Siple & Passel (1945), Belding & Hatch (1955), Yaglou (1957), Webb (1960) e Masterton & Richardson (1979). São considerados então os índices das pesquisas baseadas em modelos de balanço térmico: Gagge (1967), Givoni (1969), Jendritzky (1979), Domínguez (1992b) e Brown & Gillespie (1995). Por fim, apresenta-se o modelo adaptativo proposto por Aroztegui (1995). O artigo “Índices de Conforto Térmico em Espaços Abertos. Parte 2: Estado da Arte” apresenta as pesquisas mais recentes e significativas publicadas nos últimos dez anos: Blazejczyk (1996), Höppe (1999), Pickup & Dear (1999), Givoni & Noguchi (2000), Bluestein & Oszcewski (2002), Jendritzky (2003) e ISB (2004). A contribuição destes artigos em conjunto é fornecer uma revisão histórica sucinta e o atual estado da arte nas pesquisas de conforto térmico em espaços abertos, apresentando equações e parâmetros propostos e, ainda, uma breve discussão e possíveis novas abordagens.

ABSTRACT

This paper reviews the researches in outdoor thermal comfort, specifically the numerical models and parameters proposed by several authors through thermal balance methodology and empirical researches. The first experiences made are illustrated by the empirical work of Houghten (1923), Vernon & Warner (1932), McAriel (1947) and Missenard (1948), originally published as nomograms. In the sequence, the equations and parameters of the following empirical works are presented: Siple & Passel (1945), Belding & Hatch (1955), Yaglou (1957), Webb (1960) and Masterton & Richardson (1979). So, the researches based on thermal balance model are presented: Gagge (1967), Givoni (1969), Jendritzky (1979), Domínguez (1992) and Brown & Gillespie (1995). Last, the adaptative model of Aroztegui (1995) is presented. The paper “Outdoor thermal comfort indexes. Part 2: State-of-the-art” presents the latest researches published in the last ten years: Blazejczyk (1996), Höppe (1999), Pickup & Dear (1999), Givoni & Noguchi (2000), Bluestein & Oszcewski (2002), Jendritzky (2003) and ISB (2004). As a whole, these two papers present a summarized historical review and the current state-of-the-art in outdoor thermal comfort researches, presenting the equations and parameters proposed and yet a brief discussion and possible new approaches.

1. INTRODUÇÃO

Hipócrates, em 400 a.C., já havia descrito qualitativamente as principais variáveis que influem no conforto térmico: temperatura, umidade, ventos e radiação (WEBB, 1959; citado por 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. No início do século XIX, na Europa, têm-se então os primeiros estudos relacionados a estresse térmico, motivados pelos problemas de saúde de mineradores e trabalhadores da indústria têxtil (KOENIGSBERGER et al., 1977, citado por ARAÚJO, 1996). 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. Desta 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. Focando a carência de divulgação das pesquisas voltadas para ambientes externos em nosso país, este artigo irá apresentar, historicamente, os trabalhos de pesquisa mais relevantes para o estudo do conforto térmico nestes ambientes.

2. PRIMEIROS ÍNDICES

HOUGHTEN et al. (1923), a partir de estudos em laboratório da ASHVE, propõem a Temperatura Efetiva (Effective Temperature - ET), determinada através da 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.

VERNON & WARNER (1932) propõem a Nova Temperatura Efetiva (New Effective Temperature - ET*) através da substituição da temperatura de bulbo seco pela temperatura de globo, para consideração dos efeitos da radiação. Este índice foi adotado pela ASHRAE, em 1967, com a nomenclatura de Temperatura Efetiva Corrigida.

MCARIEL et al. (1947) desenvolvem o índice de taxa de suor prevista para quatro horas (Predictable Four Hour Sweat Rate - P4SR), baseado em experimentos em que se avaliavam as respostas fisiológicas em um período de quatro horas sob determinada condição climática. Este índice considera a temperatura de globo, a temperatura de bulbo úmido, a velocidade do vento, a taxa metabólica e dois padrões de vestimentas.

MISSENARD (1948) a partir de experimentos similares ao de Houghten, mas com períodos de exposição de maior duração, propõe a Temperatura Resultante (Resultant Temperature - RT). Segundo GIVONI (1963, citado por GIVONI, 1969), este índice apresenta resultados mais coerentes, com as respostas fisiológicas observadas em laboratório, do que os de Temperatura Efetiva.

Estes quatro índices recém apresentados são utilizados a partir de nomogramas, sendo que as equações que deram origem a eles não foram originalmente publicadas.

3. 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. O equipamento utilizado consistia em cilindros plásticos preenchidos com água, expostos aos ventos em diferentes temperaturas. Observou-se então o tempo necessário para congelar a água, em intervalos de temperatura de -9 °C a -56 °C e velocidades do vento de 0 m/s a 12 m/s. 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. Contudo, a equação parabólica era válida apenas para valores de velocidade do vento menores que 22,3m/s, uma vez que a partir deste ponto tinha-se a inflexão da

curva. Desta forma, os resultados não deveriam ser extrapolados para além deste valor. A equação proposta é:

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

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

4. 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 tanto realizam quatro suposições fisiológicas: (1) o total de trocas no corpo equivale ao suor requerido para evaporação: $E_{rsw} = M + R + C$; (2) o esforço fisiológico imposto por determinado estresse térmico é determinado pela relação E_{rsw} / E_{max} ; (3) a temperatura da pele mantém-se constante durante o estresse térmico: $t_{sk} = 35^\circ\text{C}$; (4) a capacidade máxima de sudação de um indivíduo médio durante um período de 8 horas é aproximadamente 1L/h, o equivalente a 2400 Btu/h ou 390 W/m² para um homem padrão de 75 kg e 1,70m. 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_{rsw} = suor requerido para evaporação, em Btu/h; E_{max} = potencial de perda de calor por evaporação, em Btu/h; 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_{rsw} e E_{max} em W, adota-se o maior valor entre:

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

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: Heat Stress Index (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)

Tabela 2: Respostas fisiológicas do trabalhador, para exposição de 8 horas, na faixa de equilíbrio térmico do HSI, BELDING & HATCH (1955, citado por PARSONS, 1993)

HSI	Classificação
0	nenhuma resposta
10 a 30	resposta leve e moderada ao calor; a atividade intelectual diminui, bem como a eficiência em trabalhos físicos pesados
40 a 60	resposta severa ao calor envolvendo ameaça à saúde de indivíduo não aclimatado; diminuição de eficiência de trabalhos físicos, exames médicos pré-admissionais são importantes
70 a 90	resposta muito severa ao calor, somente pequena porcentagem da população está qualificada para este trabalho
100	máxima resposta tolerada diariamente por homens jovens, aclimatados e adaptados

5. 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:

$$WBGT = 0,7 \cdot t_{nwb} + 0,3 \cdot t_g \quad [Eq.05]$$

onde: WBGT = temperatura de globo e de bulbo úmido, em °C; t_g = temperatura de globo, em °C; t_{nwb} = temperatura de bulbo úmido natural, em °C

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

$$WBGT = 0,7 \cdot t_{nwb} + 0,2 \cdot t_g + 0,1 t_{ar} \quad [Eq.06]$$

onde: t_{ar} = temperatura do ar, em °C

6. ÍNDICE EQUATORIAL DE CONFORTO: EQUATORIAL COMFORT (EC)

WEBB (1960, citado por SANTAMOURIS & ASIMAKOPOULOS, 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. Este índice aplica-se para condições onde a temperatura de bulbo úmido (t_{wb}) seja maior que 25 °C e a temperatura do ar seja igual à temperatura radiante média. A equação experimental proposta pelo autor é:

$$EC = 0,574 \cdot t_{ar} + 0,2033 \cdot p_v - 1,8 \cdot v^{0,5} + 42 \quad [Eq.07]$$

onde: EC = índice equatorial de conforto, em °C; t_{ar} = temperatura do ar, em °C; p_{ar} = pressão parcial de vapor de água do ar, em mmHg; v = velocidade do ar, em m/s

7. NOVA TEMPERATURA EFETIVA PADRÃO: NEW STANDARD EFFECTIVE TEMPERATURE (SET*)

GAGGE (1967) propõe uma nova determinação para a temperatura efetiva padrão (SET). A nova temperatura efetiva padrão (SET*) de um dado ambiente pode 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 de referência são equivalentes em termos de esforço fisiológico e conforto térmico, porque a temperatura da pele e fração de pele coberta por suor regulatório estão altamente correlacionados com o desconforto subjetivo em ambientes frios e quentes respectivamente. O clima do ambiente de referência é assim estabelecido: temperatura radiante média igual à temperatura do ar: $t_{rm} = t_{ar}$; velocidade do ar: $v = 0,15$ m/s; umidade relativa: $ur = 50\%$. Os parâmetros do indivíduo no ambiente de referência, são assim estabelecidos: metabolismo $M = 1,2$ met (indivíduo em pé e parado); resistência térmica da roupa $I_{clo} = 0,9$ clo.

Para a determinação da nova temperatura efetiva padrão (SET*), é necessária a utilização de um modelo de dois nós da termo-regulação do corpo humano, como o proposto por GAGGE et al. (1986), procedendo-se conforme as seguintes etapas: (1) cálculo das condições térmicas do corpo, temperatura da pele (t_{sk}) e fração de pele coberta por suor regulatório (w), através de modelagem termo fisiológico de dois nós do corpo humano, para uma dada combinação de parâmetros meteorológicos e individuais; (2) entrada dos valores encontrados de temperatura da pele (t_{sk}) e fração de pele coberta por suor regulatório (w) no mesmo modelo utilizado, resolvendo o sistema de equações para achar a temperatura do ar (t_{ar}), considerando $t_{rm} = t_{ar}$ $v = 0,15$ m/s; $ur = 0,5$; $M = 1,2$ met; $I_{clo} = 0,6$ clo; (3) a temperatura do ar encontrada é a nova temperatura efetiva padrão (SET*).

8. 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, propõe-se ainda uma equação para consideração da radiação solar (R_c). Assim, já consideradas estas adaptações, as equações para cada mecanismo de troca são:

$$W = 0,2 (M - 100) \quad [\text{Eq.08}]$$

onde: M = metabolismo, em kcal/h; W = trabalho mecânico, em kcal/h

$$C' = \alpha \cdot v^{0,3} \cdot (t_g - 35) \quad [\text{Eq.09}]$$

onde: C' = trocas convectivas e radiativas de onda longa, em kcal/h; α = coeficiente de troca convectiva da roupa (ITS), adimensional; v = velocidade do ar, em m/s; t_g = temperatura de globo, em °C

$$R_c = I_n \cdot K_{pe} \cdot K_{cl} \cdot [1 - a (v^{0,2} - 0,88)] \quad [\text{Eq.10}]$$

onde: R_c = trocas radiantes de onda curta, em kcal/h; I_n = radiação solar normal, em kcal/h; K_{pe} = coeficiente dependente do terreno e da postura do indivíduo (ITS), adimensional; K_{cl} = coeficiente dependente da roupa (ITS), adimensional; a = coeficiente de absorção de radiação solar da roupa (ITS), adimensional

$$E_{rsw} = (M - W) \pm C \quad [\text{Eq.11}]$$

onde: E_{rsw} = perda requerida por evaporação, em kcal/h

$$E_{max} = p \cdot v^{0,3} \cdot (p_{sk} - p_v) \quad [\text{Eq.12}]$$

onde: E_{max} = perda por evaporação máxima possível, em kcal/h; p = coeficiente de troca evaporativa da roupa (ITS), adimensional; p_{sk} = pressão de vapor na pele a 35 °C, em mmHg (adota-se $p_{sk}=42$ mmHg); p_v = pressão de vapor do ar, em mmHg

A equação geral que fornece os valores do índice é:

$$ITS = [(M - W) \pm C + R_c] \cdot \exp [0,6 \cdot (E_{rsw} / E_{max} - 0,12)] \quad [\text{Eq.13}]$$

onde: ITS = índice de estresse térmico, adimensional

Segundo o autor (p. 91-2) os coeficientes de roupa (α , K_{cl} , a , p) são 15,8; 1,0; 0,35; 31,6 para indivíduo com traje de banho e chapéu e 13,0; 0,5; 0,52; 20,5 para indivíduo com roupas leves de verão. O coeficiente de terreno e de postura (K_{pe}) é, para indivíduo sentado de costas para o sol, 0,386 (deserto) ou 0,379 (floresta) e, para indivíduo de pé de costas para o sol, 0,306 (deserto) e 0,266 (floresta).

9. 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:

$$HU = t_{ar} + (5/9) \cdot (p_v - 10) \quad [\text{Eq.14}]$$

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

$$p_v = 6,11 \cdot \exp \{ 5417,7530 \cdot [(1/273,16) - (1/t_o)] \} \quad [\text{Eq.15}]$$

onde: t_o = temperatura do ponto de orvalho, em K.

O valor 5417,7530 é uma constante baseada no peso molecular da água, no calor latente de vaporização da água e na constante universal dos gases. A pressão parcial de vapor de água no ar pode genericamente ser calculada por:

$$p_v = 6,112 \cdot 10^{7,5 \cdot t_{ar} / (237,7 + t_{ar})} \cdot ur/100 \quad [\text{Eq.15}]$$

onde: ur = umidade relativa do ar, em %

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.

Tabela 3: 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

Segundo a entidade citada, a situação de golpe térmico é caracterizada pela interrupção da sudorese, com elevação da temperatura corpórea. Os conseqüentes sintomas são pele quente e seca, podendo levar a delírios, convulsões e morte.

10. MODELO CLIMÁTICO DE MICHEL: KLIMA MICHEL MODEL (KMM)

JENDRITZKY & NÜBLER (1981) relatam a proposição do Modelo Climático de Michel, originalmente proposto por JENDRITZKY et al. (1979). Este 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 onda longa e curta, considerando-os no valor de temperatura radiante média.

Para o modelo climático de Michel são necessárias: temperatura do ar (t_{ar}) e temperatura do ponto de orvalho (t_{orv}) a 2m do solo, velocidade do ar (v_{ar}) e altura acima do solo do anemômetro, e ainda informações relativas à nebulosidade, a saber: quantidade total de nuvens (N), quantidade de nuvens em níveis baixo e médio (Nh) e tipos de nuvens nos níveis baixo, médio e alto, através de dados sinóticos FM 12 da Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization - WMO).

Com relação às variáveis relacionadas ao indivíduo, realizou-se uma padronização, de onde vem o nome do modelo. Michel é um nome alemão típico e comum, fazendo referência ao que Jendritzky chama de alemão médio para efeito de estudos: sexo masculino, 35 anos, 1,75m, 75 kg, andando a 4 km/h em superfície plana (metabolismo de 172,5 W ou 2,3 met). Com relação ao tipo de roupa, consideram-se seletivamente valores entre 0,5 e 1,75 clo, referente respectivamente a roupas de verão e inverno para os alemães.

A partir destas 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 acabam sendo não coerentes com as respostas subjetivas encontradas.

11. 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 qual se iniciou em dezembro de 1987, finalizando-se em abril de 1992 com a inauguração oficial do evento. O objetivo principal era encontrar soluções técnicas e economicamente viáveis que permitissem melhorar as condições de conforto nos referidos espaços abertos.

O trabalho de pesquisa foi desenvolvido em caráter multidisciplinar sob a coordenação do Grupo de Termotecnia do Departamento de Engenharia Energética e Mecânica de Fluidos da Universidade de Sevilha e sob a supervisão do Departamento Técnico da Expo. Contou ainda com o apoio financeiro e a colaboração da Direção Geral da Indústria, Energia e Minas da Junta de Andaluzia e do Instituto de Energias Renováveis do CIEMAT, entidade ligada ao Ministério da Indústria, Comércio e Turismo.

Os resultados da pesquisa e da posterior avaliação foram divulgados respectivamente através de dois relatórios elaborados pelo referido Grupo de Termotecnia (DOMÍNGUEZ et al. 1992a e 1992b).

Com relação à avaliação do projeto dos espaços abertos da Expo de Sevilha, DOMÍNGUEZ et al. (1992a) 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. Segundo os critérios dos autores, todo o suor secretado deve ser evaporado para que a situação seja de conforto.

Tabela 4: Critério de níveis de sudação para avaliação de espaços externos, DOMÍNGUEZ et al. (1992a, p. 24-5)

Nível de sudação recomendado	Caráter do espaço externo
< 90 g/h	Zonas de passagem (média intensidade de condicionamento)
< 60 g/h	Zonas de permanência (alta intensidade de condicionamento)

12. FÓRMULA DE CONFORTO: COMFORT FORMULA (COMFA)

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

$$B = M' + R_{abs} - R_{emit} - C - E_{sk} \quad [Eq.16]$$

onde: B = saldo energético do balanço, em W/m²; M' = metabolismo de aquecimento, em W/m²; R_{abs} = radiação absorvida, em W/m²; R_{emit} = radiação emitida, em W/m²; C = troca de calor por convecção, em W/m²; E_{sk} = perda de calor latente pela pele, em W/m²

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

$$M' = (1 - f_{res}) \cdot M \quad [Eq.17]$$

$$f_{res} = 0,15 - 0,0173 \cdot p_{v,tar} - 0,0014 \cdot t_{ar} \quad [Eq.18]$$

onde: M = metabolismo, W/m²; f_{res} = fator de respiração, adimensional; p_{v,tar} = pressão de saturação de vapor de água a t_{ar}, em kPa; t_{ar} = temperatura do ar, em °C

Verificam-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 a radiação solar e terrestre absorvida pelo corpo e a radiação emitida pelo corpo. Com relação a esta, a formulação pode ser encontrada em

BROWN & GILLESPIE (1995, p. 172). Com relação àquela os autores apontam possibilidades distintas: (a) medição da radiação solar absorvida in loco, (b) cálculo de radiação absorvida a partir de dados de estações meteorológicas próximas, (c) estimativa da radiação absorvida através de equações matemáticas. A descrição completa destas pode ser localizada na obra já referida (p. 175-84). As formulações das trocas convectivas e evaporativas são também apresentadas (p. 171-2). Os autores apresentam ainda formulação para estimar a velocidade do ar a partir de dados de estação meteorológica (p. 185-6).

Brown & Gillespie determinam níveis de conforto relacionados a faixas de valores de saldo energético do balanço térmico. Estes valores e níveis de conforto são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Índice de COMFA, Brown & Gillespie (1995, p. 173).

Saldo energético (B) em W/m ²	Interpretação
B < -150	Prefere-se muito mais calor
-150 < B < -50	Prefere-se mais calor
- 50 < B < 50	Prefere-se como está
50 < B < 150	Prefere-se mais frio
150 < B	Prefere-se muito mais frio

13. TEMPERATURA NEUTRA EXTERIOR (T_{NE})

AROZTEGUI (1995) propõe a Temperatura Neutra Exterior (T_{ne}), a partir do trabalho de HUMPHREYS (1975). Este propõe a Temperatura Neutra (T_n), 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 onde a velocidade do ar é baixa e a temperatura radiante média (T_{rm}) é próxima à temperatura do ar. Assim, tem-se:

$$T_n = 17,6 + 0,31 \cdot t_{mm} \quad [\text{Eq.19}]$$

onde: T_n = Temperatura Neutra, em °C; t_{mm} = temperatura média mensal, em °C

A equação acima é válida para valores entre 18,5 °C e 28,5 °C e para indivíduos em atividade sedentária com roupas leves. Para outras atividades pode-se adotar as seguintes correções: trabalho leve (M=210W): -2 °C; trabalho moderado (M=300W): -4,5 °C; trabalho pesado (M=400W): -7 °C.

AROZTEGUI (1995) propõe a Temperatura Neutra Exterior (T_{ne}), definida com base nas mesmas variáveis que compõem a Temperatura Neutra interna incorporando variáveis relativas à radiação solar e à velocidade do vento.

Com relação a estas variáveis, o autor coloca que a primeira, em teoria, deve reunir não apenas a radiação direta do sol, mas também o aspecto do céu e as reflexões do entorno. Com relação à segunda, coloca que é afetada no espaço e no tempo por acidentes aleatórios no nível do pedestre. Assim, afirma que estas variáveis são de difícil apreciação, sendo, dessa forma, necessário aceitar determinadas simplificações. Baseando-se ainda no Índice de Stress Térmico (I.T.S.) de GIVONI (1969), o autor propõe uma equação empírica que considera as variáveis características do exterior com relação à temperatura neutra interior. Para uma taxa de sudorese em atividade sedentária e adotando-se condições médias para as características do indivíduo (roupas 0,8 clo) e do entorno (umidade relativa entre 35% e 65%), foi determinada a equação da temperatura neutra exterior:

$$T_{ne} = 3,6 + 0,31 t_{mm} + \{100 + 0,1 R_{dn} [1 - 0,52 (v^{0,2} - 0,88)]\} / 11,6 v^{0,3} \quad [\text{Eq.20}]$$

onde: T_{ne} = Temperatura Neutra Exterior, em °C; t_{mm} = temperatura média mensal, em °C; R_{dn} = radiação solar direta normal, em W/m²; v = velocidade do ar, em m/s.

14. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os trabalhos empíricos de Temperatura Efetiva (ET) de HOUGHTEN et al. (1923), de Nova Temperatura Efetiva (ET*) de VERNON & WARNER (1932), e de Temperatura Resultante (RT) de MISSENAARD (1948) representam as primeiras tentativas para estabelecimento de um índice genérico para predição de conforto através de uma escala de sensação térmica. O Índice de taxa de suor prevista para quatro horas MCARIEL et al. (1947) constituiu-se numa tentativa de prever o estresse térmico em situações de trabalho mais extremas. Estes índices foram divulgados na forma de nomogramas visando facilitar seu uso. Já 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 (1989) e a norma nacional NR 15 (1978) são baseadas neste trabalho.

O Índice de temperatura resfriada pelo vento (WCI) de SIPLE & PASSEL (1945, citados por WILLIAMSON, 2003), o Índice equatorial de conforto (EC) de WEBB (1960, citado por SANTAMOURIS & ASIMAKOPOULOS, 1996) e o Humidex de MASTERTON & 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 & 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 deste índice são dados em temperatura equivalente de sensação térmica. O Modelo Climático de Michel (KMM) de JENDRIZKY et al. (1979; citado por 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 PPD de Fanger. Os critérios para níveis de sudação em espaços externos da Expo de Sevilha de DOMÍNGUEZ et al. (1992a) são também estabelecidos a partir de modelo analítico teórico. Utiliza-se metodologia semelhante à da norma internacional ISO 7933 (1989), mas adotando-se critérios que satisfizessem a necessidades específicas. A Fórmula de Conforto (COMFA) de BROWN & 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 um determinado clima. Esta abordagem é bastante recente nos estudos de espaços externos, mas já está desenvolvida para espaços internos climatizados ou naturalmente ventilados (DE DEAR et al. 1997).

Com relação a estes 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 obter 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.

No artigo “Índices de Conforto Térmico em Espaços Abertos. Parte 2: Estado da Arte” são apresentadas as pesquisas mais recentes e significativas publicadas nos últimos dez anos: BLAZEJCZYK (1996), HÖPPE (1999), PICKUP & DEAR (1999), GIVONI & NOGUCHI (2000), BLUESTEIN & OSCZEWSKI (2002), JENDRITZKY (2003) e ISB (2004). Serão verificados, então, o emprego de índices empíricos para situações específicas, o refinamento dos modelos analíticos e a tentativa da Sociedade Internacional de Biometeorologia em determinar um índice termo-climático universal.

15. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, V. (1996) Índices e zonas de conforto térmico. Trabalho Programado. São Paulo: Fau/Usp.
- BELDING, H. S.; HATCH, T. F. (1955) "Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strain". *Heating, Piping, Air Conditioning*, 27, p.129-42.
- BROWN, Robert D.; GILLESPIE, Terry J. (1995) *Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency*. New York: John Wiley & Sons.
- DE DEAR, R.; BRAGER, G.; COOPER, D. (1997) *Developing an adaptative model of thermal comfort and preference*. Sydney: ASHRAE. (Ashrae Final Report Rp-884).
- DOMINGUEZ et al. (1992a) *Control climático en espacios abiertos: el proyecto Expo'92*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- _____. (1992b) *Control climático en espacios abiertos: evaluación del proyecto Expo'92*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- FANGER, P. O. (1970) "Thermal Comfort – Analysis And Applications in Environmental Engineering". McGraw-Hill Book Company. New York.
- GAGGE, A. P.; FOBELETS, A. P.; BERGLUND, L. G. (1986) "A standard predictive index of human response to the thermal environment". *ASHRAE Trans*, 92, p. 709-31.
- GAGGE, A. P.; STOLWIJK J. A. J. ; HARDY, J. D. (1967) "Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures". *Environ. Res.*, 1, p. 1-20.
- GIVONI, B. (1969) *Man, climate and architecture*. New York: John Wiley & Sons.
- GIVONI, B; NOGUCHI, Mikiko. (2000) "Issues in outdoor comfort research". in: *Passive And Low Energy Architecture, PLEA 2000*. Cambridge: J&J, p. 562–5.
- HUMPHREYS, M. (1975) "Field studies of thermal comfort compared and applied". BRE Current Paper, 75/76, Londres. UK.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (1989) *ISO 7243*. Hot environments: estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Genève: ISO.
- _____. (1989) *ISO 7933*. Hot environments: analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate. Genève: ISO.
- JENDRITZKY, G. (1991) "Selected questions of topical interest in human bioclimatology". *International Journal of Biometeorology*, 35(3), p. 139-50.
- JENDRITZKY, G. et al. (1979) *Klimatologische Probleme – ein einfaches Verfahren zur Vorhersage der Wärmebelastung*, in *Zeitschrift für angewandte Bäder und Klimaheilkunde*. Freiburg.
- JENDRITZKY, Gerd; NÜBLER, W. (1981) "A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms". *Arch. Meteor. Geophys. Bioclimatol. Serial B* 29, p. 313-26.
- MASTERTON, J. M.; RICHARDSON, F. A. (1979). "Humidex: a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity". Environment Canada, CLI 1-79. Ontario, Downsview: Atmospheric Environment Service.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO. NR-15, de 8 de julho de 1978. "Atividades e operações insalubres". Disponível em: <http://www.toxikon.com.br/nr15.html>. Acesso em: 03 jan. 2005.
- PARSONS, A. T. (1993). *Human Thermal Environments*. Taylor & Francis.
- SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. (ed.). (1996) *Passive cooling of buildings*. London: J&J.
- SIPLE, P. A.; PASSEL C. F. (1945) "Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures". in: *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89(1), p.177-99.
- WEBB, C. (1960) "Thermal discomfort in an equatorial climate – A monogram for the equatorial comfort index". *Journal of the IHVE*, 27, p.10.
- WILLIAMSON, S. P. (coord.). (2003) "Report on wind chill temperature and extreme heat indices: evaluation and improvement projects". Washington: The Office for Meteorological Services and Supporting Research.
- YAGLOU, C. P.; MINARD, D. (1957). "Control of heat casualties at military training centers". *A.M.A. Archives of Industrial Health*, 16, p. 302-16.

16. AGRADECIMENTO

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