



ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO: REVISÃO E PROPOSTA PARA O CLIMA QUENTE E ÚMIDO DE NATAL-RN

**Glênio Leilson Ferreira Lima (1); Alexandre Gomes de Oliveira (2);
Aldomar Pedrini (3); Virgínia M. D. Araújo (4)**

(1) (2) (3) (4) Laboratório de Conforto Ambiental / DARQ / CT / Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Campus Lagoa Nova, 59072-970 – Natal/RN, Tel.: (84) 215-3722

(1) e-mail: gleniolima@yahoo.com.br ; (2) e-mail: alx_go@yahoo.com

(3) e-mail: apedrini@ufnet.br ;(4) e-mail: virginia@ufnet.br

RESUMO

Os estudos acerca dos índices de conforto térmico apresentam inúmeras divergências e questionamentos. O ponto comum destas discussões é o consenso de que as normas internacionais de conforto térmico, como a ISO 7730, e alguns critérios de conforto térmico precisam ser revistos. Dentro deste contexto, o artigo traz uma revisão dos principais índices de conforto térmico em conjunto com uma discussão da aplicabilidade da zona de conforto de Givoni (1992) e de alguns modelos adaptativos para o clima quente e úmido de Natal-RN. As análises mostraram a importância da determinação dos limites de umidade e velocidade do ar para climas quentes, bem como a consideração do tipo de uso da edificação. Por fim, foram identificadas situações de aplicabilidade desses índices como critério de avaliação de conforto térmico de edificações naturalmente ventiladas em Natal-RN.

ABSTRACT

Studies concerning thermal comfort had shown strengths and weaknesses of different modeling approaches. There is a common sense that international thermal standards, such as ISO 7730, and some thermal comfort criteria must be reviewed. This article reviews the most important thermal indexes and analyzes the applicability of the Givoni's index (1992) and some adaptive models to the warm humid climate of Natal-RN. The analyses indicated the importance of humid and air velocity limits to warm climates, as well as the consideration of building occupancy pattern. At last, were identified situations of applicability of such indexes as criterium to evaluate the thermal comfort in naturally ventilated buildings in Natal-RN.

1. INTRODUÇÃO

Esse artigo traz uma revisão dos principais índices de conforto térmico e discute a aplicabilidade destes no clima tropical, especificamente o quente e úmido da cidade de Natal-RN. A importância do tema tem sido levantada há mais de uma década por pesquisadores do Laboratório de Conforto Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN (ARAÚJO, 2001) e os resultados têm sido compatíveis com as discussões da literatura científica e confirmam a complexidade do assunto.

Em 2002, o periódico "Energy and Building" publicou uma edição especial voltada principalmente à revisão da norma internacional de conforto térmico ISO 7730, considerando também as contribuições de recentes pesquisas relacionadas aos modelos adaptativos de conforto e a norma norte-americana ASHRAE-55. As principais críticas recaem sobre a utilização dos índices adotados nessas normas em edificações naturalmente ventiladas situadas em locais de clima quente com altas taxas de umidade.

Os índices de conforto térmico buscam primordialmente determinar condições ambientais (zonas e condições de conforto térmico) sob as quais os usuários de uma edificação estarão em estado de bem-estar. A definição dessa condição no projeto e operação de edificações implica não só no estabelecimento de um ambiente confortável termicamente, como também na forma que a energia será utilizada. Nesse sentido, o presente artigo busca discutir a seleção de um índice de conforto térmico a ser usado na avaliação do desempenho térmico e energético de edificações para a cidade de Natal-RN e que possa auxiliar o desenvolvimento de recomendações de projetos bioclimáticos para edificações, à exemplo da norma de desempenho térmico da ABNT (2003).

2. ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO

Ao longo do século XX foram desenvolvidos diversos índices de conforto térmico, sendo basicamente classificados em empíricos ou analíticos (AULICIEMS e SZOKOLAY, 1997) (ARAÚJO, 2001). A Tabela 1 apresenta os principais índices.

Tabela 1 Principais índices, empíricos e analíticos, de conforto térmico.

TIPO	ANO	ÍNDICE	SIGLA	AUTOR
ÍNDICES ANALÍTICOS	1945	Razão de Aceitação Térmica	RAT	US - Quartmaster General-EUA
	1947	Taxa de Sudação Prevista em 4 Horas	TSP4	McArdle
	1955	Índice de Esforço Térmico	IET	Belding e Hatch
	1958	Índice de Tensão Térmica	ITT	Lee
	1963	Índice de Tensão Relativa	ITR	Lee e Henschel
	1963	Índice de Fadiga Térmica	IFT	Givoni
	1969	Índice de Sensação Térmica	IST	Gagge
	1971	Nova Temperatura Efetiva	TE*	Gagge
	1972	Voto Médio Estimado	PMV	Fanger
	1976	Temperatura Subjetiva	TS	McIntyre
	1977	Temperatura Efetiva Padrão	TEP	Nishi e Gagge
ÍNDICES EMPÍRICOS	1923	Temperatura Efetiva	TE	Houghten e Yaglou
	1932	Temperatura Efetiva Corrigida	TEC	Vernon e Warner
	1932	Temperatura Equivalente	TEq	Dufton
	1936	Calor Equivalente	CE	Bedford
	1937	Temperatura Operativa	TO	Winslow, Herrington e Gagge
	1948	Temperatura Resultante	TR	Missenard
	1957	Temperatura de Globo de Bulbo Úmido	TGBU	Yaglou e Minard
	1960	Índice de Conforto Equatorial	ICE	Webb
	1987	Índice de Verão Tropical	IVT	C. B. Research Institute - Índia

Alguns desses índices apresentam representações gráficas que correlacionam parâmetros ambientais para demarcação da zona de conforto térmico. O primeiro a propor uma zona de conforto térmico foi Olgay (1963) que através da carta bioclimática correlacionou a temperatura de bulbo seco, a umidade relativa, a velocidade do ar e a radiação térmica.

As pesquisas para determinação desses índices divergem sob duas abordagens: o modelo de balanço térmico e o modelo adaptativo. A abordagem baseada no modelo de balanço térmico do corpo humano consiste em explicar o conforto térmico das pessoas através da aplicação da física e fisiologia nas trocas de calor existente entre o corpo e o entorno. Para isso são desenvolvidos modelos térmicos que representam de forma empírica as trocas de calor entre o corpo e o ambiente. Os índices baseados nesse modelo são originados a partir de pesquisas realizadas em ambientes fechados com condições climáticas estáveis, assumindo-se que o índice representa as respostas das pessoas em condições variáveis da vida diária (NICOL e HUMPHREYS, 2002). Embora haja diversos modelos térmicos do corpo humano com

diferentes níveis de complexidade e de representatividade, o mais utilizado continua sendo o modelo proposto por Fanger em sua equação de balanço térmico que está relacionada ao conforto térmico através do índice PMV (JONES, 2002).

A abordagem do modelo adaptativo busca estimar as condições de conforto das pessoas através de pesquisas em campo, em situações reais, no ambiente construído. Esta abordagem sugere que as pessoas são mais tolerantes às variações de temperatura em virtude do caráter “adaptativo” que elas assumem no momento em que se adaptam as condições ambientais, ou seja, se uma mudança ocorre para gerar desconforto, as pessoas reagem de forma a restabelecê-lo (NICOL e HUMPHREYS, 2002).

A afirmação de Fanger (2002b) que as preferências térmicas são as mesmas para todos os seres humanos não importando a localização geográfica ou clima têm gerado polêmica. Outras pesquisas demonstram diferenças entre os experimentos desenvolvidos com pessoas em ambientes reais daqueles estimados em laboratório, sugerindo o peso da componente geográfica (AULICIEMS e SZOKOLAY, 1997). Os principais índices e zonas de conforto térmico identificados na literatura científica são descritos a seguir.

2.1 Temperatura Efetiva (TE)

O índice de Temperatura Efetiva foi utilizado por mais de 50 anos e sua importância hoje é, sobretudo, histórica. Conforme Auliciems e Szokolay (1997), este foi desenvolvido por Houghten e Yaglou na American Society of Heating and Ventilation Engineers (ASHVE), na cidade de Pittsburgh, em 1923, sendo definido como a sensação equivalente à da temperatura da atmosfera saturada e parada, sem radiação térmica. A TE correlaciona os efeitos da temperatura do ar seco e umidade, embora superestime o efeito da umidade, especialmente em baixas temperaturas. O índice foi desenvolvido a partir de pesquisas laboratoriais e é representado na carta psicrométrica através de “linhas de igual conforto”.

2.2 Temperatura Efetiva Corrigida (TEC)

De acordo com Auliciems e Szokolay (1997), Vernon e Warner substituíram a temperatura de bulbo seco pela temperatura de globo do nomograma introduzido pela ASHVAE, em 1932, o qual considerava a influência da velocidade do ar sobre o conforto. Dessa forma, estariam incluindo os efeitos da radiação térmica. O novo modelo chamado de Temperatura Efetiva Corrigida foi difundido por Koenigsberger *et al.* (1974) e possui escala idêntica ao índice anterior, incluindo-se a temperatura de globo. Em virtude da influência da vestimenta sobre os efeitos da radiação e da velocidade do ar, foram produzidos dois nomogramas: um para pessoas usando vestimentas com resistência de 1clo e outro para pessoas com pouca roupa.

2.3 Nova Temperatura Efetiva (TE*)

Segundo Auliciems e Szokolay (1997), a nova temperatura efetiva (TE*) foi desenvolvida por Gagge *et al.* em 1974, utilizando o modelo térmico que considera primeiramente a transferência de calor do centro do corpo para a pele e, em seguida, da pele para o ambiente. O índice é definido como a temperatura de bulbo seco de um recinto fechado com 50% de umidade relativa no qual se produziria a mesma troca de calor por radiação, convecção e evaporação do ambiente. As linhas da TE* coincidem com os valores da temperatura de bulbo seco (TBS) na curva de 50% de umidade relativa e a radiação é considerada com o uso da temperatura operativa na escala horizontal em vez da TBS (AULICIEMS e SZOKOLAY, 1997).

2.4 Temperatura Efetiva Padrão (TEP)

A Temperatura Efetiva Padrão (TEP) foi desenvolvida a partir do índice Nova Temperatura Efetiva (TE*) por Nishi e Gagge em 1977, podendo ser aplicada em várias situações, mesmo sob condições não uniformes de pressão atmosférica. A definição desse novo índice considera um ambiente controlado, similar a um real, ao nível do mar, com 50% de umidade relativa, pessoas em atividade sedentária (1,1 met) e resistência das vestimentas de 0,6 clo. Szokolay (2004) adota esse índice em conjunto com a equação do modelo adaptativo de Auliciems (AULICIEMS e SZOKOLAY, 1997) para definir a zona de conforto no gráfico psicrométrico.

2.5 Zona de Conforto Térmico de Givoni

A Zona de Conforto de Givoni (1969) foi desenvolvida a partir de pesquisas realizadas em Israel, EUA e Europa, considerando as expectativas de temperatura interna em edificações sem ar-condicionado. A zona de conforto é demarcada no gráfico psicrométrico, com diferenciação para países desenvolvidos e países em desenvolvimento de clima quente. Também são demarcadas zonas de estratégias bioclimáticas para o controle das condições de conforto térmico no ambiente interno, como: ventilação diurna, massa térmica com e sem ventilação noturna e resfriamento evaporativo direto e indireto, este último através de aberturas na coberta.

Os limites adotados na zona de conforto para países desenvolvidos, com ar parado e pessoas em atividade sedentária, são de 18 a 25°C no inverno e 20 a 27°C no verão para temperatura de bulbo seco (TBS). Quanto à umidade absoluta, os limites são fixados entre 4g/kg e 12g/kg para umidade relativa em torno de 50% e aumenta até 15 g/kg para umidade relativa em torno de 80%.

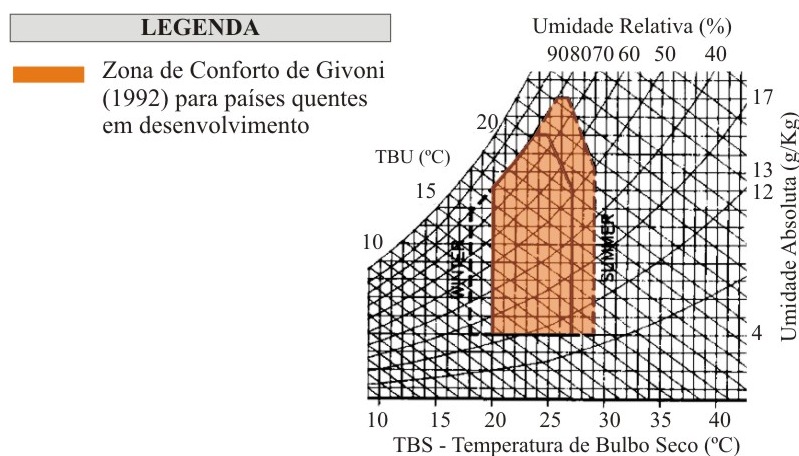


Figura 1 Detalhe da zona de conforto para países quentes em desenvolvimento (GIVONI, 1992)

Considerando os fatores de aclimação e vivência em ambientes sem condicionamento artificial, Givoni (1992) sugere que para países em desenvolvimento de clima quente esses limites podem ser estendidos em 2°C na TBS e em 2g/kg de umidade absoluta. Portanto, estabelece-se uma zona de conforto com limites entre 20-29°C de TBS e de 17g/kg de umidade absoluta no limite superior (Figura 1) (GIVONI, 1992).

2.6 O índice PMV/PPD de Fanger

A partir de estudos realizados na Europa e EUA em ambientes fechados, Fanger apresentou em 1972 uma equação que correlaciona a sensação térmica com quatro variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade) e duas variáveis pessoais (vestimenta e atividade metabólica). A estimativa de conforto térmico é feita através dos parâmetros voto médio estimado (PMV) e porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD). A grande vantagem desse índice é a flexibilidade e a abrangência das principais variáveis que influenciam a sensação térmica, além de apresentar bons resultados quando aplicado em edificações climatizadas artificialmente tanto em clima quente quanto frio (FANGER e TOFTUM, 2002a). Embora esse índice seja usado há mais de trinta anos, sua aplicação em edificações naturalmente ventiladas em climas tropicais tem sido bastante questionada por limitar a temperatura de conforto em 30°C e a velocidade interna do ar em 1m/s, situações comuns em países de clima quente, além de estimar uma sensação térmica mais quente do que seus ocupantes sentem.

Atualmente, existe o consenso entre pesquisadores de que as condições de conforto térmico, estimadas por normas como a ISO 7730 e ASHRAE 55 que se baseiam no modelo de Fanger, não se aplicam adequadamente para regiões de clima tropical. Outro problema é a necessidade desse modelo, baseado em dados de pesquisas realizadas nos anos sessenta, de incorporar os vários estudos sobre o tema que vêm sendo desenvolvidos desde então (NICOL, 2002).

2.7 Modelo Reformulado do PMV por Fanger e Toftum

Reconhecendo as críticas feitas ao índice PMV, Fanger e Toftum (2002a) desenvolveram um fator de correção a ser aplicado sobre esse índice, passando a chamá-lo de modelo reformulado do PMV. Estes autores argumentam que as diferenças encontradas entre a sensação térmica em uma situação real e a estimada pelo índice ocorrem em função das expectativas de seus ocupantes. Normalmente estes têm vivido em ambientes internos e externos quentes através de gerações e estariam mais adaptados a ambientes com temperaturas mais elevadas.

Fanger e Toftum (2002a) explicam as falhas do índice PMV através de dois aspectos principais: o fator de expectativa (e) e a taxa de metabolismo (m). O fator de expectativa (e) é indicado para compensar a capacidade de adaptação desenvolvida pelas pessoas que passam a julgar menos desconfortáveis ambientes com temperaturas mais elevadas. Os valores do fator de expectativa (e) podem variar de 0,5 a 1,0 e estes devem ser multiplicados pelo PMV encontrado. O fator de expectativa (e) será de 0,5 para climas quentes durante todo o ano, sem ou com poucas edificações condicionadas artificialmente na região, de 0,7 se existirem muitas edificações climatizadas artificialmente na região e 1,0 para prédios com ar condicionado. Quanto mais baixa a expectativa maior é a aceitação por ambientes mais quentes.

Com relação à taxa de metabolismo (m), acredita-se que os indivíduos em climas quentes tendem a realizar suas atividades em menor intensidade como forma de adequar-se às condições ambientais, diminuindo, assim, a produção de calor. Os autores observam que o modelo atual é bem flexível, podendo estimar a temperatura de neutralidade entre 10°C e 35°C, dependendo das outras cinco variáveis e que o modelo apresenta bons resultados mesmo sob as pequenas variações comuns em ambientes internos.

Nicol (2004a) reconhece que o balanço térmico em ambientes condicionados passivamente é mais complexo, pois seus ocupantes podem interagir com a edificação ou com o ambiente através de diferentes oportunidades de adaptação, como abrir uma janela, fechar uma cortina, trocar as roupas, mudar a atividade, a postura, ligar um ventilador, entre outros. Essa interação viabilizará alcançar a temperatura de conforto térmico e, por isso, deveria ser considerada no índice PMV ou em qualquer outro índice térmico.

2.8 Modelos adaptativos de Conforto

Os modelos adaptativos de conforto são representados por equações lineares que descrevem a temperatura interna de projeto ou uma variação aceitável para as condições climáticas de um determinado lugar, podendo ainda considerar o sistema de condicionamento artificial da edificação (MUI e CHAN, 2003). Várias destas equações adotam a temperatura de neutralidade, diretamente relacionada à temperatura externa média mensal, como referência para identificar os limites da faixa de conforto. Em termos conceituais, trata-se de uma temperatura onde o menor estresse térmico é relatado pelos usuários ao experimentarem diferentes temperaturas do ar, por um período de aproximadamente um mês, vestindo roupas de suas escolhas e realizando atividades sedentárias (AULICIEMS e SZOKOLAY, 1997). Diante da complexidade que os processos de termo-regulação envolvem, esses modelos são considerados como uma “caixa preta” onde as pessoas estariam livres para se adaptar às condições ambientais internas. Por isso, as equações são aproximações da situação real (BRAGER e DE DEAR, 1998; NICOL, 2004a).

As principais críticas aos modelos adaptativos recaem principalmente sobre a qualidade dos dados coletados e a desconsideração das quatro variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante, umidade e ventos) e as duas variáveis pessoais (vestimenta e metabolismo) (FANGER e TOFTUM, 2002b). Outro problema é que a maioria desses estudos não consideraram as particularidades de edificações naturalmente ventiladas em clima quente e seco onde se observa uma grande diferença entre a temperatura interna e externa em virtude da inércia térmica das construções. Entre os modelos adaptativos destacam-se o de Humphreys e Nicol (1973), o de deDear e Brager (2002) e o de Auliciems (1981).

2.8.1 Modelo Adaptativo de Humphreys

Em 1973, Humphreys e Nicol formularam o primeiro modelo adaptativo de conforto térmico que considerava a sensação de calor como parte do sistema termo-regulatório do corpo o qual incorporaria

aspectos fisiológicos e comportamentais. Os estudos para o desenvolvimento desse modelo foram realizados principalmente em escolas e em espaços abertos. Sua equação [Eq. 1] correlaciona a temperatura de conforto (T_c) com a temperatura média mensal externa (T_o), ambos em graus Celsius.

$$T_c = 0.534 \times (T_o) + 12.9 \quad [\text{Eq. 1}]$$

2.8.2 Modelo Adaptativo de Conforto de deDear e Brager para ASHRAE 55-2004

Em sua última revisão, a norma norte-americana de conforto térmico ASHRAE 55-2004 incorporou a abordagem adaptativa em seu modelo a partir das pesquisas realizadas com o Projeto ASHRAE RP-884. O modelo adaptativo adotado de deDear e Brager (2002) é representado na Eq. 2. Os limites de conforto para edificações naturalmente ventiladas são definidos por $T_c \pm 2,5^\circ\text{C}$ para 90% de pessoas satisfeitas e $T_c \pm 3,5^\circ\text{C}$ para 80% de usuários satisfeitos, em atividades leves (1,1-1,4 met) e usando 0,7 clo no verão.

$$T_c = 0,31 \times (T_o) + 17,8 \quad [\text{Eq. 2}]$$

2.8.3 Modelo Adaptativo de Auliciems

O modelo adaptativo desenvolvido por Auliciems (1981) considera tanto as repostas fisiológicas para parâmetros internos medidos através de instrumentos quanto as expectativas dos ocupantes, baseadas em determinantes climáticos e culturais. Assim como outros trabalhos sua equação traz a temperatura de neutralidade (T_n) variando em função da temperatura média mensal externa (T_o) [Eq. 3].

$$T_n = 17.6 + 0,31 \times T_o \quad [\text{Eq. 3}]$$

3. O EFEITO DA VENTILAÇÃO E DA UMIDADE NO CLIMA QUENTE E ÚMIDO

3.1 A influência da velocidade do ar

A ventilação é um dos fatores mais importantes para a termo-regulação do ser humano, principalmente em climas quente e úmido onde a sensação de frescor gerada pelo movimento do ar ocorre através da perda de calor por convecção e pelo incremento da evaporação do suor da pele. Nicol (2004a) demonstrou que a presença do movimento do ar pode ser equivalente à redução da temperatura em até 4°C em climas quentes no norte da Índia e Iraque. Outras pesquisas apontam que a temperatura de conforto pode ser elevada em 2°C através do uso de ventiladores, confirmando que o movimento do ar pode ser um fator decisivo na determinação do conforto em climas tropicais (NICOL, 2004b).

A determinação dos limites de ventilação para uma dada condição ambiental é essencial e os limites propostos pela norma ASHRAE 55-2004 devem ser revistos. Conforme explica Olesen (2000), o limite da temperatura de conforto proposto pela norma de 26°C , para pessoas realizando atividades sedentárias em ambiente com ar parado ($< 0,2 \text{ m/s}$), poderia ser elevado além dos $28,8^\circ\text{C}$ caso fosse recomendado velocidades do ar superiores a $0,8 \text{ m/s}$. Arens *et al.* (1998) avaliaram ambientes controlados com pessoas realizando atividades sedentárias (1,0 met) e observaram que mais de 80% dos entrevistados estavam satisfeitos com ventos de até $1,4 \text{ m/s}$ a uma temperatura de bulbo seco de 31°C . Embora Auliciems e Szokolay (1997) recomendem o limite de aplicação da velocidade do ar de $1,5 \text{ m/s}$, há registros de pesquisas em que a maioria das pessoas entrevistadas se sentiam confortáveis com ventos até 2 m/s e temperatura de 30°C (GIVONI, 1994).

Quanto à ventilação para o conforto do ser humano, Givoni (1992) afirma que deve haver distinção quanto aos critérios de aceitabilidade da velocidade do ar entre edificações residenciais e de escritórios. De acordo com o autor, o limite estabelecido pela ASHRAE de $0,8 \text{ m/s}$ foi presumivelmente determinado em função dos distúrbios que velocidades superiores poderiam ocasionar em ambientes de escritório, como vôo de papéis e desconforto térmico local em virtude de geração de correntes de ar localizadas. Em

edificações residenciais naturalmente ventiladas esse limite poderia ser completamente diferente e dependeria apenas da temperatura. Givoni (1992) propõe que para velocidades do ar de até 2,0m/s o limite da temperatura de conforto térmico para países em desenvolvimento de clima quente pode ser estendido até 32°C e o limite da umidade relativa seria 90%.

O modelo adaptativo desenvolvido por Humphreys considera a influência da velocidade do ar sobre a temperatura de conforto e pode ser representada por uma função parabólica [Eq. 4] (NICOL, 2004b). A variação da temperatura de conforto é apresentada graficamente na Figura 2 e apresenta grande semelhança com aquelas incorporadas na última revisão da ASHRAE 55-2004 (NICOL, 2004b).

$$dT = 7-50/4+10v^{0.5} \quad [\text{Eq. 4}]$$

- dT: extensão da faixa de conforto (°C)

- v: velocidade do ar (m/s).

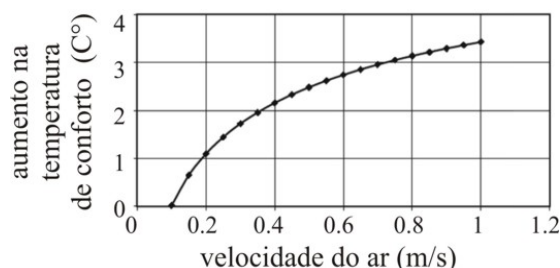


Figura 2 Aumento da temperatura de conforto térmico em função da velocidade de ar (NICOL, 2004b)

3.2 Os limites de umidade

Os critérios de definição dos limites de umidade das zonas de conforto térmico ainda são objetos de muitas críticas. A norma ASHRAE-55 vem apresentando faixas de umidade diferentes a cada nova edição, variando entre o uso da umidade relativa e da umidade absoluta para estabelecer esses limites. A última edição de 2004 sugere que não haja limite inferior de umidade e que o limite superior volte a ser o da edição de 1981, estabelecido em 12g/kg, para ambientes controlados. Para ambientes naturalmente ventilados, a norma ASHRAE 55 não fixa limites, entretanto recomenda que a definição de um limite inferior de umidade tenha como critérios questões não-térmicas, referentes principalmente à qualidade interna do ar. Há um consenso de que a umidade relativa em valores médios ou baixos possui pouco impacto sobre a zona de conforto (GIVONI, 1992).

Nicol (2004a) registra que não foi encontrada insatisfação por desconforto entre os usuários pesquisados para variações de umidade relativa de 30 a 75% e sugere que a temperatura de conforto deveria ser reduzida em 1°C para qualquer faixa de umidade relativa acima de 75%. Com relação aos efeitos da umidade absoluta na temperatura de conforto, resultados de 22 pesquisas em edificações naturalmente ventiladas indicam que esta não possui nenhum impacto significativo, corroborando de certa forma com o sugerido na ASHRAE 55-2004 (NICOL, 2004a).

4. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO DO CLIMA DE NATAL

O estudo do conforto térmico na cidade de Natal-RN conduzido por Araújo (2001) com um total de 933 alunos em escolas de nível médio, técnicas e universidades, realizando atividade sedentária e em salas de aula naturalmente ventiladas determinou uma zona de conforto com limites entre 25,1°C e 28,1°C de temperatura de bulbo seco e entre 69% e 92% de umidade relativa. A velocidade do ar não foi controlada devido às limitações experimentais, porém seu monitoramento indicou a variação entre 0,12 e 0,83m/s. Esses valores plotados no nomograma de Temperatura Efetiva Corrigida mostraram que essa zona de conforto encontra-se inscrita na zona de conforto proposta por Koenigsberger *et al.* (1974). Os resultados sugerem o uso de tal índice para Natal-RN, dependendo da proposta de análise (ARAÚJO, 2001).

Conforme representação gráfica das propriedades do ar durante as 8.760 horas do arquivo climático TRY plotados no gráfico psicrométrico (Figura 3), o clima da cidade de Natal-RN é caracterizado por elevadas

temperaturas e umidades relativas durante todo o ano (Figura 1). A demarcação da zona de conforto estabelecida por Araújo (2001) sobre a de Givoni (1992) para países em desenvolvimento de clima quente indica uma concordância entre as zonas de conforto se considerada a componente da ventilação.

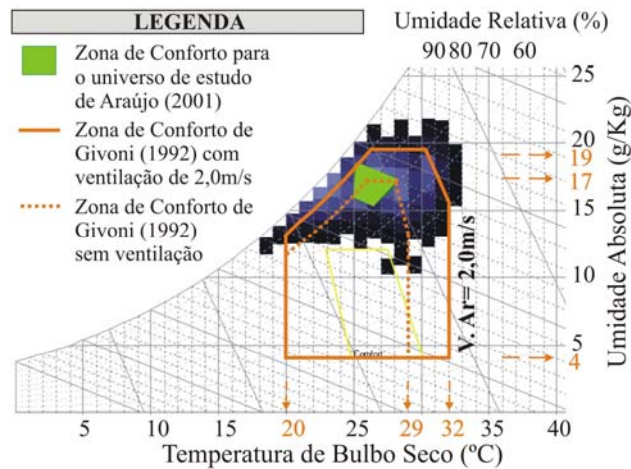


Figura 3. Zonas de conforto de Givoni (1992) e Araújo (2001) com dados do TRY de Natal-RN.

A aplicação da equação do modelo adaptativo de Humphreys [Eq. 1], através dos dados climáticos TRY da cidade de Natal, reflete uma zona de conforto com limites entre 25,6°C a 27,4°C (Figura 4). Nesse modelo, o limite superior da temperatura de conforto pode ser expandido até 31,6°C se considerado o efeito da velocidade do ar de até 2,0m/s, de acordo com a Eq. 4. Nesse caso, o limite superior se assemelha ao de 32°C sugerido por Givoni. A zona de conforto para a cidade de Natal-RN obtida através do modelo de Humphreys (Figura 4) apresenta conformidade com a de Araújo (2001), destacando-se a extensão do limite superior provocado pelo efeito da ventilação de 2,0m/s.

A demarcação no gráfico psicrométrico do modelo adaptativo de deDear e Brager (2002), para velocidade do ar próxima de zero, revela uma faixa de temperatura de conforto térmico menor do que a obtida do modelo de Humphreys, resultando no limite inferior médio de 25,2°C e superior de 26,2°C (Figura 5). Para 80% de usuários satisfeitos, o limite superior passa a 29,6°C (Figura 5). Os limites de umidade seguem as recomendações da norma ASHRAE 55-2004 para edificações naturalmente ventiladas.

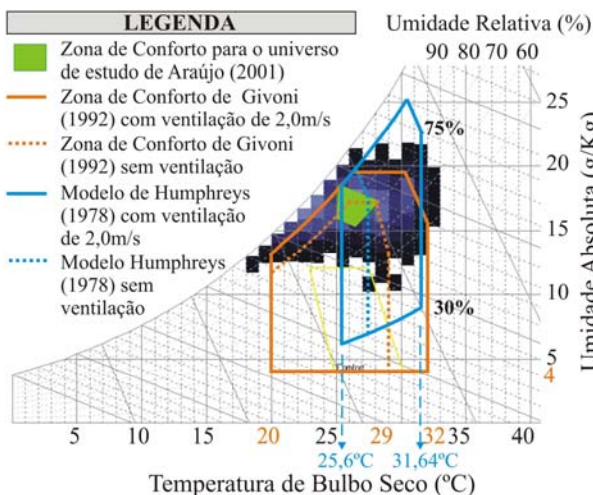


Figura 4. Zonas de conforto de Humphreys (1973), Givoni (1992) e Araújo (2001).

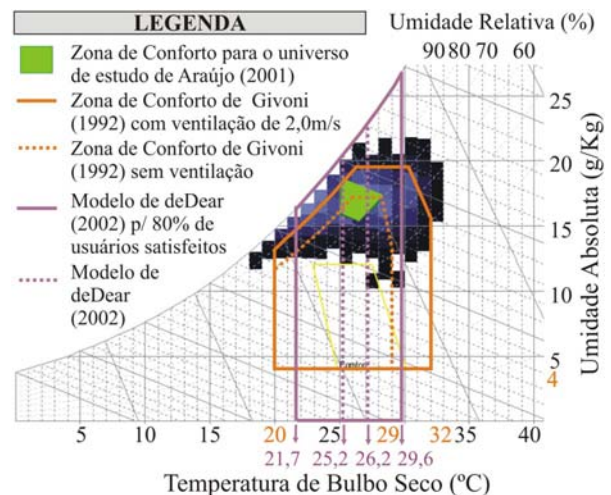


Figura 5. Zona de conforto de deDear (2002) para 80% de usuários satisfeitos, zona de conforto de Givoni (1992) e de Araújo (2001).

5. CONCLUSÕES

A indicação do uso de qualquer dos índices analisados para a cidade de Natal-RN enfrenta obstáculos dentro das próprias limitações dos modelos e escassez de dados de campo. As análises constataram que a aplicabilidade de um índice deve levar em conta o tipo de uso da edificação, considerando os limites de velocidade do ar em função do desempenho adequado das atividades desenvolvidas no local, e os limites superiores de umidade definidos nesses índices.

A possibilidade de extensão da zona de conforto de Givoni (1992) até os 32°C através do incremento da ventilação adequa-se às necessidades de conforto por representar uma situação típica. Porém, o limite inferior dessa zona precisa ser revisto em virtude da baixa ocorrência dessas temperaturas no clima de Natal-RN. Quanto à velocidade do ar, Givoni (1992) recomenda para o uso residencial uma velocidade de 2,0m/s, aumentando com isso o limite superior da temperatura de conforto. Com relação a ambientes com uso típico de escritório Givoni não indica um limite de velocidade do ar, porém este poderia ser estendido além dos 0.8 m/s estabelecidos na norma ASHRAE-55, priorizando assim o conforto térmico dos usuários.

Quanto à umidade, o principal problema para a seleção de um índice de conforto está em sua limitação superior uma vez que prevalecem as altas taxas de umidade na região. Esse ponto torna-se relevante na medida em que o arquivo climático TRY de Natal-RN apresenta uma ocorrência de umidade relativa acima dos 90% em cerca de 40% das horas do ano. Nesse caso, para edificações passíveis de ocupação durante as 24 horas do dia, a zona de conforto de Givoni (1992) é menos recomendada. Araújo (2001) definiu em sua pesquisa uma zona de conforto para a amostra pesquisada com valores de umidade relativa de até 92%, valor mais adequado à realidade local. Para edificações naturalmente ventiladas com uso diurno das 08:00 às 18:00 (como edifícios comerciais), a zona de Givoni é mais recomendada tendo em vista uma ocorrência de apenas 10% das 8760 horas do TRY com umidade relativa superior a 90%.

Quanto à zona de conforto sugerida por Koenigsberger *et al* (1975) no nomograma de Temperatura Efetiva Corrigida, as principais restrições para seu uso estão em superestimar o desconforto em altas umidades e limitar a velocidade do ar em 1,5 m/s, mostrando-se pouco adequada para edificações naturalmente ventiladas. O nomograma também apresenta uma interface restritiva quanto à leitura rápida dos valores mais simples como temperatura de bulbo seco e umidade relativa.

As zonas de conforto obtidas a partir dos modelos de Humphryes (Figura 4) e deDear (Figura 5) praticamente se sobrepõe e apresentam-se bastante limitados considerando-se uma situação de ar parado. Contudo, a zona de Humphryes para uma velocidade do ar de 2m/s tem seu limite superior de temperatura (31,6°C) mais adequado às condições de Natal-RN. Quanto a umidade, a correção da temperatura de conforto térmico a partir de valores de umidade relativa acima de 75% acaba por aumentar sua aplicabilidade. Vale ressaltar que esses modelos se comportaram de forma generalista, incorporando situações de conforto térmico em condições ambientais variadas.

Nesse sentido, é importante estimular as pesquisas que envolvem a resposta do usuário em relação ao clima quente e úmido para que se possa contribuir para um melhor entendimento da “arquitetura tropical”. Avaliações do conforto térmico em estudos relativos ao clima quente e úmido, como simulações computacionais ou medições de propriedades do ar, devem ser tratadas com cautela. Além das limitações dos métodos, a resposta e a atitude do ser humano contribuem para a incerteza dos resultados. Os modelos de determinação de conforto térmico são limitados, inclusive os “clássicos” métodos de Givoni (1992) e de Fanger (1972). Embora a maioria dos trabalhos brasileiros seja baseada nesses dois métodos é importante destacar que eles podem ser inadequados para estudos que envolvem o clima quente e úmido. Por conseqüência, nem todos os métodos e recomendações utilizados no Sul e Sudeste brasileiro são necessariamente adequados às regiões Norte e Nordeste.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e a Eletrobrás pelo suporte de infra-estrutura proporcionado ao Laboratório de Conforto Ambiental da UFRN-RN.

7. BIBLIOGRAFIA

- Abnt. Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Projeto 02:135.07-001/3. Rio de Janeiro: ABNT: 7 p. 2003.
- Araújo, V. M. D. **Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares o litoral nordestino brasileiro (o caso de Natal/RN)**. Natal: EDUFRN, v.1. 2001. 138 p.
- Arens, E., *et al.* **A study of occupancy cooling by personally controlled air movement**. Energy and Building, n.27, p.45-59. 1998.
- Auliciems, A. e S. V. Szokolay. **Thermal comfort**. Brisbane, Qld.: PLEA: Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture The University of Queensland. 1997. 64 p. (PLEA notes ; note 3.)
- Brager, G. S. e R. J. De Dear. **Thermal adaptation in the built environment: a literature review**. Energy and Buildings, v.27, p.83-96. 1998.
- De Dear, R. J. e G. S. Brager. **Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55**. Energy and Buildings, v.34, n.6, JUL, p.549-561. 2002.
- Fanger, P. O. **Thermal Comfort**. United States: Mc Graw Hill Book Company. 1972
- Fanger, P. O. e J. Toftum. **Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates**. Energy and buildings, v.34, p.533-536. 2002a.
- _____. **Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates**. Energy and Buildings, v.34, n.6, JUL, p.533-536. 2002b.
- Givoni, B. **Man, climate and architecture**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company Limited. 1969 (Architectural science series.)
- _____. **Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines**. Energy and Buildings, v.18, n.1, p.11-23. 1992.
- _____. **Passive and low energy cooling of buildings**. 1994
- Jones, B. W. **Capabilities and limitations of thermal models for use in thermal comfort standards**. Energy and Buildings, v.34, n.6, JUL, p.653-659. 2002.
- Koenigsberger, O. H., *et al.* **Manual of tropical housing and building**. London: Longman. 1974. v p.
- Mui, K. W. H. e W. T. D. Chan. **Adaptive comfort temperature model of air-conditioned building in Hong Kong**. Building and Environment, v.38, n.6, JUN, p.837-852. 2003.
- Nicol, F. **Special issue on thermal comfort standards**. Energy and buildings, v.34, n.6, p.529-685. 2002.
- _____. **Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics**. Energy and Buildings, v.36, n.7, JUL, p.628-637. 2004a.
- _____. **Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics**. Energy and buildings, v.36, p.628-637. 2004b.
- Nicol, J. F. e M. A. Humphreys. **Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings**. Energy and Building, v.34, p.563-572. 2002.
- Olesen, B. W. **Guidelines for comfort**. Ashrae Journal, v.42, n.8, AUG, p.41-46. 2000.
- Olgyay, V. **Design with climate : bioclimatic approach to architectural regionalism**. Princeton, N.J.: Princeton University Press. 1963. 190p p.
- Szokolay, S. V. **Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design**. Bullington, Great Britain: Architectural Press. 2004. 328 p.