

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
Centro Tecnológico - CT
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGE
Tópicos avançados em Conforto térmico – Prof. Roberto Lamberts

Ventilação natural e conforto térmico em climas quentes

Christhina Cândido

Florianópolis, Dezembro de 2006.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	3
1. CONFORTO TÉRMICO	6
2. VENTILAÇÃO E CONFORTO	11
2.1.1. Conforto térmico em ambientes climatizados naturalmente: interfaces com a teoria adaptativa	13
2.1.2. Características do fluxo de ar e conforto	17
2.1.2.1. Velocidade do ar e conforto	17
2.1.2.1.1. Velocidade do ar e as zonas de conforto	20
2.1.2.2. Percepção do fluxo de ar e conforto.....	26
2.1.2.2.1. Distribuição do fluxo de ar nos ambientes e o usuário	28
2.1.3. Estratégias de aproveitamento da ventilação natural.....	31
2.1.3.1. Ventilação cruzada	31
2.1.3.2. Ventilação noturna.....	32
CONCLUSÕES.....	35
REFERENCIAL DOCUMENTAL	38
APÊNDICE	44
1. Câmaras climáticas	44
2. Túneis de vento	45
3. Equipamentos de medição utilizados em experimentos físicos	46
3.1. Anemômetros	46
3.2. Laser Doppler	46
4. Simulação computacional.....	48
4.1. Modelos zonais e multizonais	48
4.2. Dinâmica dos fluidos computadorizada – CFD	48

INTRODUÇÃO

Segundo a ASHRAE Standard 55-92, o conforto térmico é assim definido: “Conforto térmico é a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”. Ou seja, a condição de conforto é algo *subjetivo* (DE DEAR, 1998; HUMPHREYS, NICOL, 2003; RORIZ, 2003).

Para definir esta sensação e quais os parâmetros que influenciam os usuários, muitos estudos têm sido desenvolvidos. Pode-se separar os estudos de conforto térmico em duas correntes. A primeira, fortemente influenciada pelos estudos realizados por Fanger (1972) em câmaras climáticas, é chamada de “analítica” e sugere que os limites de conforto podem ser universais. Tais conclusões foram amplamente aceitas e empregados inclusive em normas como a ISO 7730¹ (1992) e a ASHRAE 55² (1994), (RORIZ, 2003).

A segunda corrente é a chamada de “adaptativa” e considera que ocorre alguma mudança ambiental que resulte em desconforto, os usuários dos ambientes agem no sentido de re-estabelecer as condições de conforto. Nesse sentido os usuários podem trocar as roupas, abrir ou fechar janelas, acionar ventiladores, etc (RORIZ, 2003). Tais estudos indicam três categorias de adaptação térmica: os ajustes de comportamento, os ajustes fisiológicos (aclimação) e as reações psicológicas (expectativa), (DE DEAR, 1998; HUMPHREYS, NICOL, 2003).

Embora as duas vertentes tenham resultado em um conhecimento consolidado em constante evolução na área acadêmica, autores concordam que os aspectos relativos à influência da ventilação natural no conforto térmico dos usuários se constituem em campo aberto na área (DE DEAR, 1998; HUMPHREYS, NICOL, 2002).

¹ ISO 7730 (1992) – *Ambientes térmicos moderados - Determinação dos índices PMV e PPD e especificações das condições para conforto térmico*. Esta norma propõe um método de determinação da sensação térmica e o grau de desconforto das pessoas expostas a ambientes térmicos moderados e especifica condições térmicas aceitáveis para o conforto (LAMBERTS, XAVIER, 2002).

² ASHRAE 55 (1994) - *Ambientes Térmicos - Condições para ocupação humana*. Esta norma americana especifica condições ambientais aceitáveis para a saúde das pessoas sujeitas a pressões atmosféricas equivalentes a altitudes superiores a 3,00m, em ambientes internos projetados para ocupação humana por períodos não inferiores a 15 minutos (LAMBERTS, XAVIER, 2002).

Em edificações de localizadas em regiões quentes e úmidas, as tipologias arquitetônicas poderiam favorecer o aproveitamento dos ventos regionais, minimizando assim os gastos com energia para climatização dos mesmos (BASTIDE *et al*, 2006). Entretanto, esta constatação não parece ser incorporada nos projetos arquitetônicos, resultando em edificações com baixa qualidade ambiental dos espaços internos e que dispõem dos sistemas de condicionamento artificial para corrigir este problema.

Por outro lado, a concepção de edifícios que desconsideram as características climáticas regionais contribui fortemente para o aumento do aporte energético para proporcionar ambientes termicamente confortáveis (BASTIDE *et al*, 2006). Tais edificações também não apresentam identidade ou qualquer traço de regionalismo, Figura 1.



Figura 1 - A uniformização da linguagem arquitetônica afasta a incorporação das características climáticas e culturais do lugar onde estão inseridos, contribuindo para o maior consumo de energia: (a) edifício de escritórios em Maceió/AL; (b) São Paulo.

Fonte: (a) A autora (2005); (b) www.arcoweb.com.br, acessado em 20/03/2005.

Segundo Gratia e de Herde (2004), a grande permanência dos ocupantes estimula a preocupação com a qualidade do ambiente. Os ocupantes vêm exigindo um ambiente mais saudável e estimulante que é geralmente provido por meios mecânicos de refrigeração. Entretanto, a ventilação natural, se bem explorada, pode suprir tais expectativas com eficiência em boa parte do tempo de ocupação. Em tais ambientes, as pessoas preferem ter o controle da iluminação e da ventilação, o que pode exigir um projeto de condicionamento diferenciado ou o condicionamento natural.

A flexibilidade preferida pelos usuários, muitas vezes, é incompatível com os dispositivos de refrigeração adotados, pois estes desconsideram a adaptação do indivíduo ao ambiente. Tais dispositivos determinam as condições de temperatura e iluminação baseado em dados numéricos dos sistemas de condicionamento e iluminação, podendo gerar desconforto para os usuários.

Por outro lado, os usuários destes ambientes parecem se adaptar às mudanças da temperatura durante o período de trabalho, desde que ocorra um incremento na ventilação (GRATIA; DE HERDE, 2004), aceitando em torno de 2°C acima das temperaturas apontadas como confortáveis (NICOL, 2004).

Este trabalho trata de uma revisão bibliográfica de estudos relacionados ao conforto térmico e ventilação natural em edificações localizadas em climas quentes. Encontra-se dividido em duas partes. A primeira trata da relação entre a ventilação natural e o conforto térmico em edificações no clima quente e úmido. A segunda parte é dedicada às estratégias de aproveitamento da ventilação natural em edificações no clima quente e úmido. Por fim são apresentadas as conclusões resultantes do desenvolvimento do trabalho.

1. CONFORTO TÉRMICO

Várias pesquisas já foram desenvolvidas com o intuito de definir quais os limites de temperatura considerados “confortáveis” pelos usuários em diversas partes do mundo, destacando-se a base de dados da ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), que contém mais de 20.000 votos individuais de conforto e dados ambientais correspondentes (HUMPHREYS, NICOL, 2002).

Alguns autores utilizam as pesquisas de campo como evidência da aclimação dos indivíduos às condições térmicas típicas de cada local, destacando-se os estudos de Humphreys no Paquistão (NICOL, 2001), os quais fundamentaram as bases do modelo adaptativo. Outra abordagem utilizada é a realização de estudos em câmaras climatizadas. Nos anos 70, Fanger realizou estudos desse tipo que serviram de base para a formulação de uma teoria de conforto térmico bastante difundida: a teoria do balanço térmico, ou modelo do PMV/PPD.

Análises estatísticas realizadas por Fanger (1970), indicam as preferências das pessoas em relação às condições térmicas. Tal trabalho resultou no Voto Médio Previsto – PMV e na Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas – PPD.

O PMV relaciona o voto médio de um grande número de pessoas com a escala de sensações, chamada de escala sétima. O índice varia entre muito quente e muito frio, +3 a -3, sendo o zero o valor atribuído ao neutro. Associado ao PMV, o PPD é utilizado para indicar o percentual de pessoas insatisfeitas de acordo com o seu desejo por ambiente mais quente, mais frio ou até mesmo sem mudança nenhuma.

A associação do isolamento térmico das roupas e da atividade física desempenhada são indicados com itens de grande relevância nos estudos de conforto, necessitando, portanto, ser considerada. O isolamento térmico proveniente de diferentes tipos de roupas pode ser expresso em *clo* e a taxas

de metabolismo produzidas pelo desenvolvimento de atividades é indicada em *met.*

Para o clima quente e úmido, a associação entre a vestimenta e a atividade se constitui em item de importância nos estudos de conforto térmico. Nessas condições, ocorre a necessidade e intensificar as trocas convectivas e evaporativas entre a pele e o ar, que pode acontecer pelo uso de roupas leves e intensificação da ventilação natural. Na tentativa de classificação do conforto térmico, índices, tabelas, gráficos vêm sendo propostos por diversos autores (FANGER, 2001; NICOL; HUMPHREYS, 2002). Entretanto, tais itens vêm sendo questionados por diversos autores, principalmente quando ocorre associação com a velocidade do ar (DE DEAR, 1998; HUMPHREYS, NICOL, 2002).

Estudos indicam a necessidade de se considerar ampliações no uso da temperatura neutra para se caracterizar a temperatura de conforto dos usuários. A temperatura neutra pode ser definida como a temperatura na qual o indivíduo não deseja nem mais calor, nem mais frio no ambiente onde esteja inserido (FANGER, 2001). Do ponto de vista fisiológico, esta definição pode ser considerada satisfatória, visto que os indivíduos podem indicar um estado confortável de acordo com a temperatura corporal como um todo (TANABE, 1988).

Entretanto, o conceito de neutralidade térmica parece não considerar, adequadamente, outras questões de influência na condição de conforto dos usuários. Dependendo das condições de exposição do indivíduo, este pode indicar desconforto por exposição a um campo assimétrico de temperatura, por exemplo (LAMBERTS, XAVIER, 2002).

A combinação dos dados relacionados à temperatura, umidade, radiação e velocidade do ar são largamente utilizadas para estabelecer condições de conforto e de agradabilidade dos usuários. Tais valores quando interligados, são transformados em cartas bioclimáticas, gráficos psicrométricos, entre outros, resultando em zonas de conforto.

Utilizando cartas, gráficos, diagramas, pode-se identificar a necessidade de insolação ou sombreamento nos diversos períodos do ano, assim como a necessidade de ventilação abundante ou de estanqueidade em relação aos ventos incidentes. Pode-se verificar o potencial de uso de elevada massa térmica nos edifícios ou a necessidade de se obter construções leves.

Uma análise cuidadosa do diagrama pode sugerir padrões arquitetônicos mais adequados a um determinado local, da mesma forma que facilita a identificação daqueles que deveriam ser evitados. Quando essa análise é realizada, criteriosamente, nas etapas iniciais da elaboração dos projetos arquitetônicos, a sua influência no partido de projeto é significativa, uma vez que o 'ajuste' de um projeto mal concebido é muitas vezes mais difícil do que aquele aplicado a um outro projeto que adotou uma tipologia construtiva mais adequada ao clima do local onde será implantado o edifício.

A temperatura efetiva expressa o efeito combinado da temperatura do ar, umidade relativa, radiação e movimento do ar que proporcionam mesma sensação térmica (KOENIGSBERGER *et al*, 1974). Quando há ventilação a sensação térmica é de uma temperatura ambiental diferente da real (temperatura efetiva). Por exemplo, quando se tem uma temperatura de bulbo seco de 28°C, uma temperatura de bulbo úmido de 25°C, e se a velocidade do ar for de 0,5 m/s a temperatura efetiva será de 25,5°C, isto é, o indivíduo terá a sensação de uma temperatura do ar de 25,5°C (BARBIRATO, 2005).

Nota-se a variabilidade das zonas de conforto, para diferentes combinações dos itens descritos anteriormente, indicando a importância de se considerar as condições dinâmicas em que os indivíduos são expostos constantemente durante o desempenho das suas atividades. Índices rígidos, muitas vezes estabelecidos em normas de conforto não respondem à margem de flexibilidade que pode ocorrer na utilização real dos ambientes pelos usuários (FONTAIN, BRAGER, DE DEAR, 1996).

Reforçando esta tese, encontram-se os estudos que avaliam a capacidade de adaptação do indivíduo ao contexto climático vivenciado pelo mesmo. A capacidade adaptativa pode ser definida como uma "aclimação

fisiológica” dos indivíduos ao contexto climático a que estão expostos (DE DEAR, 2002). Tal adaptação refere-se à *termoregulação* fisiológica do indivíduo que permite a sua exposição a condições diferenciadas de temperatura, sem, no entanto, resultar em desconforto. Essa capacidade permite uma ampliação da zona de conforto tradicionalmente proposta (NICOL; HUMPHREYS, 2002).

Pesquisas de Humpheys e Nicol (2002) sugerem que o PMV tende a superestimar a sensação de calor para velocidades do ar até 0,20m/s. Por outro lado, subestima, de acordo com os dados coletados com os usuários, a capacidade de resfriamento quando ocorre um incremento da velocidade do ar (NICOL *et al*, 1995). A revisão proposta pelos estudos que relacionam a capacidade adaptativa sugere a modificação da equação proposta para o PMV, resultando no *PMV new* (NICOL; HUMPHREYS, 2002).

O princípio da adaptação ao ambiente térmico extensivamente foi estudado e documentado (NICOL *et al*, 1995, BRAGER; DE DEAR, 1998, 2000; de DEAR; BRAGER, 1998, RIJAL *et al*, 2002). Os estudos que relacionam o princípio da capacidade adaptativa associam o comportamento dos usuários em relação ao ambiente com as respostas dadas pelos mesmos em entrevistas.

A adaptação pode ser associada a dois itens importantes. O primeiro relaciona-se ao comportamento do usuário durante a execução das atividades, onde o mesmo adequa a envolvente de acordo com as preferências particulares, como o tipo de roupa. O segundo item pode ser atribuído à tecnologia disponível para modificar as condições do ambientes que influenciam nas variáveis de temperatura, umidade, velocidade do ar e temperatura radiante. Isso pode ocorrer pelo uso de ventiladores, abertura de janelas, entre outros aspectos.

Os aspectos relacionados ao comportamento e tecnologia disponível remetem à discussão da influência das características culturais e das expectativas dos indivíduos e sua influência no faixa de conforto considerada pelos mesmos.

Entretanto, estudos sugerem a necessidade de se considerar aspectos que vão além do impacto e da resposta fisiológica no indivíduo, considerando-se as questões psicológicas. Considerando-se que conforto pode ser definido como a condição mental que expressa satisfação com o ambiente (ASHRAE, 1992), tal condição engloba aspectos subjetivos diferentes daqueles expressos numericamente. Conforto é um estado da mente e não uma condição exclusivamente fisiológica (FONTAIN, BRAGER, DE DEAR, 1996).

Esta linha de raciocínio indica que, para o futuro dos estudos de conforto, os valores estabelecidos como faixa de conforto devem ser bastante flexibilizados. Os experimentos devem considerar as características climáticas, a aclimação e as expectativas individuais. Dessa forma, sugere-se que os “novos” parâmetros de conforto podem ser mais identitários que matemáticos, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de maior interface com a realidade local.

2. VENTILAÇÃO E CONFORTO

A ventilação nos espaços arquitetônicos pode ser produzida por meios mecânicos (ventiladores, exaustores, etc), também conhecida como ventilação mecânica, e meios naturais, conhecida como ventilação natural. Essa última pode ser produzida por diferença de pressão estática ou dinâmica nas paredes que separam os espaços internos e externos de uma edificação em função de diferenças de densidades (temperatura); também conhecida como ventilação por efeito chaminé. O outro meio natural é aquele onde o movimento do ar ocorre em função das pressões dinâmicas produzidas pelo vento ao atingir as edificações, e é mais conhecida como ventilação natural devida à ação dos ventos. Esses dois processos serão abordados nessa seção.

A ventilação natural pode ser usada com três finalidades complementares:

- manter a qualidade do ar nos ambientes internos;
- remover a carga térmica adquirida pela edificação, em decorrência dos ganhos de calor externos e internos;
- promover o resfriamento fisiológico dos usuários.

A manutenção da qualidade do ar nos ambientes internos é obtida através da adequada renovação do ar desses ambientes, de maneira a remover as impurezas eventualmente existentes e manter os níveis de oxigênio em patamares apropriados. Essa qualidade do ar pode ser obtida com pequenas taxas de renovação do ar das construções, conforme determina a NBR 15.220-3: 2005 (ABNT, 2005).

Uma das finalidades da ventilação é resfriar o edifício em si, retirando a carga térmica absorvida pelas construções em decorrência da exposição do edifício à radiação solar, assim como dos ganhos térmicos produzidos no interior das edificações devido à presença dos usuários, existência de equipamentos elétricos, de iluminação artificial, etc. Nesses casos, altas taxas de ventilação podem propiciar temperaturas internas muito próximas das

externas, removendo a carga térmica dos ambientes internos (GANDEMER, 1989).

O terceiro objetivo da ventilação é o resfriamento fisiológico. Refere-se ao efeito refrescante provocado pela evaporação do suor da pele e pelas trocas de calor por convecção, que ocorrem quando o fluxo de ar entra em contato com o corpo humano (ASHLEY, SHERMAN, 1984). A intensidade desse resfriamento é função da velocidade do vento e da temperatura do ar, mas também depende da turbulência do fluxo de ar e de sua umidade relativa. O resfriamento fisiológico é particularmente importante em regiões com elevada umidade do ar, pois “a pele úmida é freqüentemente a principal causa de desconforto” (GIVONI, 1991).

No sentido de entender o impacto e a relação da ventilação natural e o conforto térmico dos usuários diversos estudos têm sido desenvolvidos com diferentes tipos de metodologias propostas (TANABE; KIMURA 1994; ARENS *et al*, 1984, 1986; DE DEAR; BRAGER; COOPER, 1997; NICOL, 2004).

Entre os principais métodos de investigação aplicados estão medições e associações com os índices de conforto (numéricos e analíticos), simulações em câmaras climáticas, medições e entrevistas com os usuários em ambientes reais. Em tais pesquisas constata-se busca por valores da velocidade do ar aceitável, impacto do incremento da velocidade e a resposta do usuário, relação entre as zonas de conforto consolidadas na literatura e os climas quentes, entre outros. Mais recentemente os estudos têm se voltado para investigações em ambientes transientes, aperfeiçoamento de estratégias e sistemas de ventilação, entre outros.

As pesquisas em câmaras climatizadas, são aquelas realizadas no interior de ambientes totalmente controlados pelo pesquisador, onde tanto as variáveis ambientais como as variáveis pessoais ou subjetivas são manipuladas a fim de se encontrar a melhor combinação possível entre elas a fim de fornecer uma situação confortável.

As pesquisas de campo são aquelas realizadas em ambientes reais, com as pessoas desempenhando suas atividades rotineiras. Neste tipo de

pesquisas, o pesquisador não interfere nas variáveis ambientais e pessoais, onde as pessoas expressam suas sensações e preferências térmicas em escalas apropriadas (LAMBERTS, XAVIER, 2002). Diversos experimentos têm sido desenvolvidos em tais protótipos e os resultados serviram para o estabelecimento de índices empregados na área (TANABE, 1978; TOFTUM, LANGKILDE, FANGER, 2004).

2.1.1. Conforto térmico em ambientes climatizados naturalmente: interfaces com a teoria adaptativa

Baseado em dados coletados em muitos estudos de campo, Humphreys e Nicol (1998) propuseram um modelo adaptável do conforto. Demonstraram que a ventilação dos ambientes pode ser considerada um ponto chave para o conforto térmico em climas quentes e úmidos.

A análise dos dados mostra que os ocupantes dos edifícios naturalmente ventilados preferem temperaturas que oscilam próximo da amplitude térmica diária e sazonal, acompanhando as características climáticas do local (de DEAR; BRAGER, 2002), Figura 2. Observou-se que a temperatura preferida pelos usuários está bem próxima da externa, principalmente nas edificações naturalmente ventiladas (NICOL *et al*, 1999; MCCARTNEY; NICOL, 2002). Nicol e Humphreys (1973) sugeriram que tal efeito poderia ser visto como a combinação entre a sensação térmica dos usuários, em decorrência do incremento da ventilação, e do comportamento dos processos de termoregulação dos mesmos.

As mesmas conclusões foram relatadas dos vários estudos de campo da área de conforto (WEBB, 1959; NICOL, 1973; HUMPHREYS 1975; BUSCH 1992; NICOL *et al*, 1999; de DEAR; BRAGER, 2002). Em consequência de tais estudos, encontrou-se que a temperatura de conforto em edifícios naturalmente ventilados é função da temperatura externa, e pode ser predito por equações lineares.

Brager e de Dear (2002) definem os edifícios condicionados ar como “uma edificação selada com aberturas destinadas ao insuflamento de ar que fornecem a possibilidade mínima de regulação, induzindo a opção mínima de

abertura por parte dos usuários". Os edifícios naturalmente ventilados são definidos como edifícios“ com janelas e ventiladores direcionáveis e reguláveis, que permitem diversos graus de adaptação por parte do usuário”.

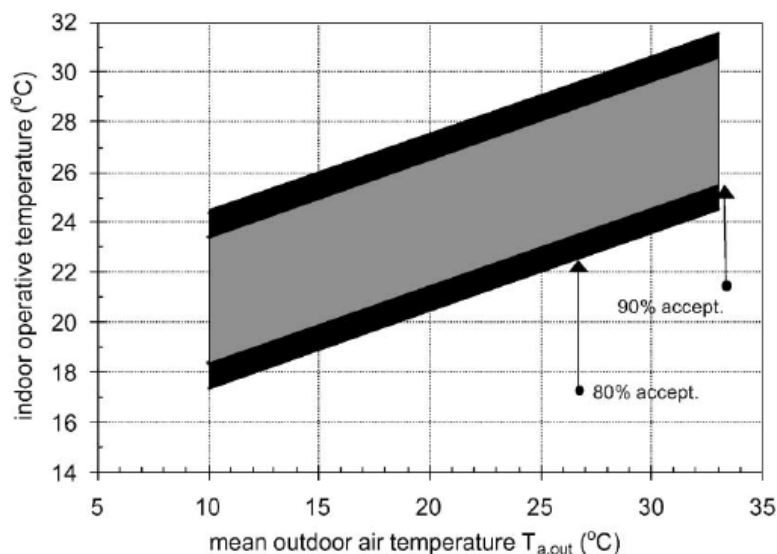


Figura 2 – Modelo adaptativo proposto por de Dear e Brager para ambientes naturalmente ventilados. Fonte: de DEAR; BRAGER, 2002.

No sentido e entender o impacto do uso de ventilação natural na temperatura neutra, diversos trabalhos foram desenvolvidos. O Quadro 1 indica o tipo de resfriamento utilizado (natural ou artificial) e a temperatura neutra dos usuários.

Year	Researcher	Building	Location	Neutral temperature of subjects
1990	J.F. Busch	Office	Bangkok, Thailand	24.5 °C (ET) for AC buildings 28.5 °C (ET) for NV buildings
1991	R.J. De Dear, K.G. Leow et al.	Residential and office	Singapore	24.2 °C (to) for AC buildings 28.5 °C (to) for NV buildings
1994	R.J. De Dear, M.E. Fountain	AC Office	Townsville, Australia	24.2 °C (to) in the dry season 24.6 °C (to) in the wet season
1998	T.H. Karyono	Office	Jakarta, Indonesia	26.7 °C (to) for AC buildings
1998	W. T. Chan et al.	Office	Hong Kong	23.5 °C (to) for AC buildings
1998	A.G. Kwok	Classrooms	Hawaii, USA	26.8 °C (to) for AC classrooms 27.4 °C (to) for NV classrooms
2003	N.H. Wong et al.	Classrooms	Singapore	28.8 °C (to) for NV classrooms

Quadro 1 – temperaturas neutras obtidas em pesquisas desenvolvidas em climas quentes. Fonte: Rwang *et al*, 2006.

McCartney e Nicol (2002) sugeriram, por outro lado, que utilizar a oscilação da temperatura externa diária e sazonal é um meio mais eficiente

para prever o comportamento interno, acompanhando as mudanças do clima do local.

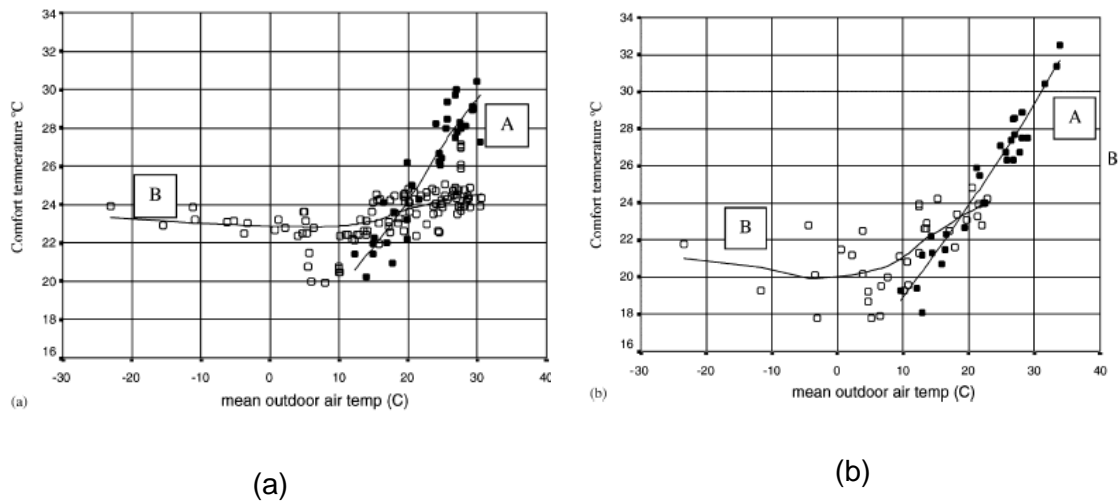


Figura 3 - Temperatura de conforto em função da variação da temperatura externa em edifícios com *free-running* (A) e aquecimento ou resfriamento (B): valores obtidos com os dados da ASHRAE (a) e em estudos de Humphreys (b). Fonte: NICOL; HUMPHREYS, 2002.

Klitsikas *et al* (1995) analisaram as condições de conforto em edifícios de escritório em Atenas, durante verão. Observaram que quase sempre o valor teórico de PMV é mais elevado ou igual do que o voto térmico medido junto aos usuários. Resultados semelhantes foram encontrados por Mallick (1994) em Bangladesh, Hien e Tanamas (2002) na Singapura e Lin Borong *et al* (2003) na China.

O estudo desenvolvido por van der Linden *et al* (2006) confirmam a variação da temperatura de conforto ao longo do ano, sugerindo a adaptação sazonal por parte dos usuários. Os autores analisaram o desempenho de duas tipologias de edificação. A primeira, chamada de Alpha, corresponde aos edifícios com o uso de ventilação natural, com aberturas reguláveis por parte do usuário. A segunda tipologia, chamada de Beta, corresponde aos edifícios sem utilização de ventilação e aberturas, com envelope selado. Observa-se que a temperatura máxima de conforto considerada pelos usuários é superior na edificação com o emprego da ventilação natural em relação à tipologia que

não faz uso dessa estratégia, Figura 4. van Hoof e Hensen (2007) obtiveram resultados semelhantes.

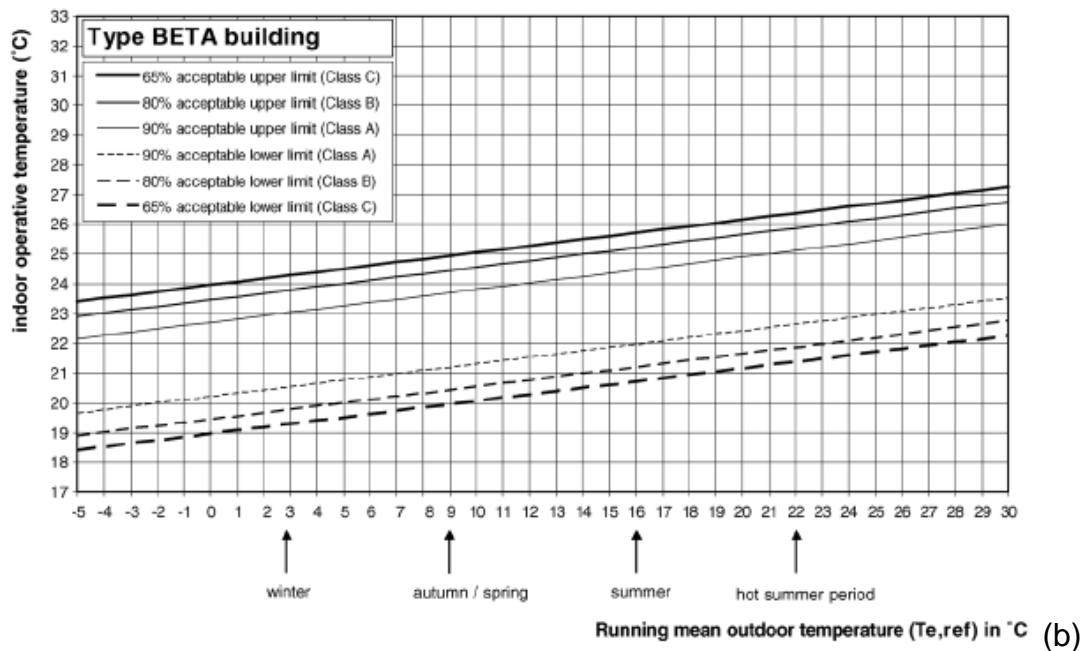
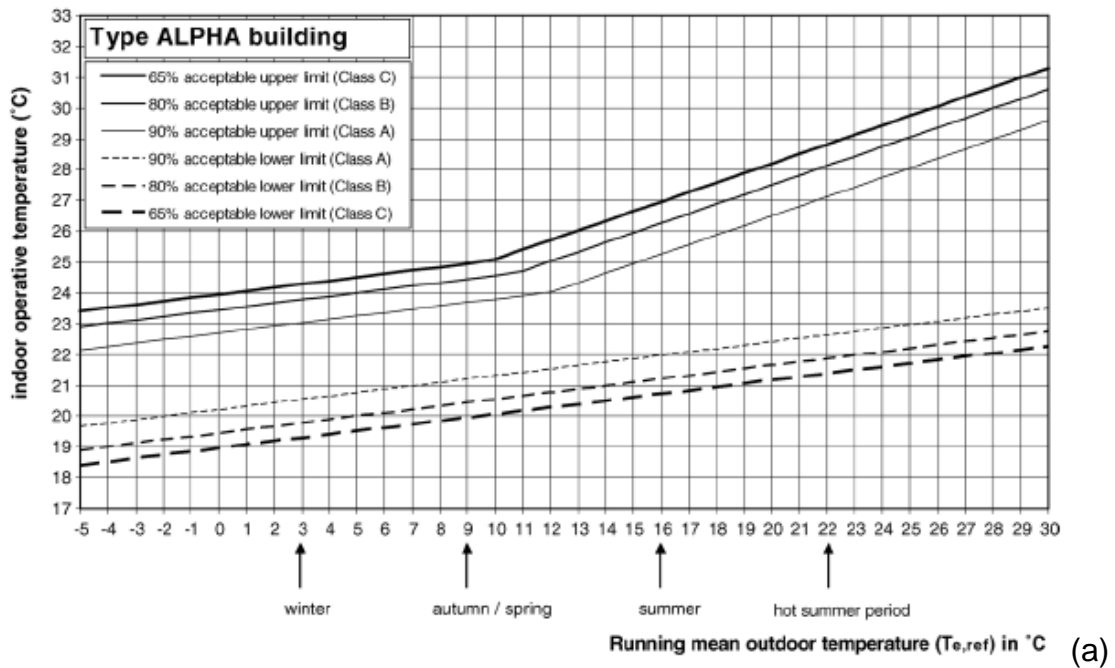


Figura 4 – Gráficos da temperatura aceita para usuários de ambientes com ventilação (a) e sem o uso dessa estratégia (b). Fonte: van der Linden *et al* , 2006.

Observa-se que a sensação térmica dos usuários tem uma escala maior que difere da encontrada para ambientes estáveis, ou seja, em condições de climatização artificial. Desta forma, o modelo do PMV necessita

de correções quando utilizados em ambientes para ambientes em ambientes térmicos naturalmente climatizados (SANTAMOURIS, 2006).

2.1.2. Características do fluxo de ar e conforto

A condição de conforto em ambientes ventilados naturalmente dependerá da temperatura e da velocidade do ar. As flutuações da velocidade do ar, caracterizada pela intensidade da turbulência, incrementam as correntes de ar e afeta o conforto térmico (KOSKELA *et al*, 2001). De tal forma, as características do fluxo de ar têm sido foco de trabalhos (TANABE, KIMURA 1994; ARENS *et al*, 1984, 1986; TOFFUM *et al*, 2000; GHIAUS; ALLARD, 2006; NICOL, 2004).

2.1.2.1. Velocidade do ar e conforto

Para baixas velocidades do ar o conforto térmico é tão sensível à temperatura radiante quanto à temperatura do ar. Porém, para velocidades mais altas a temperatura do ar determina a percepção do conforto, sendo a velocidade do ar de grande impacto no conforto dos usuários (SANTAMOURIS b, 2006). A velocidade do ar tem um efeito grande em condições do conforto nos edifícios. Embora muitos projetos de pesquisa sejam desenvolvidos nesta temática, é ainda uma área aberta de pesquisa científica (TANABE, KIMURA 1994; ARENS *et al*, 1984, 1986).

O *Building Research Establishment* - BRE, na Inglaterra, sugere que ajustes na temperatura de conforto precisam ser realizados para computar o efeito combinado da velocidade do ar, vestimenta e atividade física (BRE, 1979). O estudo foi desenvolvido em câmara climática, para os tipos de vestimenta e atividades indicadas no quadro e com a velocidade do ar insuflada no interior sob o controle dos pesquisadores.

Observa-se que, para indivíduos realizando trabalhos ativos onde a velocidade do ar interno seja da ordem de 1,0 m/s, podem ocorrer ajustes de até 5°C na temperatura de conforto preferida, em comparação com uma condição de calma, Quadro 2.

Vestimenta	Nível de atividade			
	Dormindo	Sentado	Em pé	Ativo
Nu	31	29	25	23
Roupa leve	29	26	21	18
Paletó e gravata	27	23	17	13
Velocidade do ar (m/s)	Ajustes aos valores acima devido ao movimento do ar			
0,2	0,5	1,0	1,0	1,5
0,4	1,0	1,5	2,0	3,0
0,7	1,5	2,0	3,0	4,0
1,0	2,0	2,5	3,5	5,0

Quadro 2 - Temperatura de conforto (em °C), e ajustes devido à vestimenta e ao nível de atividade dos indivíduos, em função da velocidade do ar. Fonte: BRE, 1979.

O Quadro 2 mostra ainda, que para trabalhos sedentários (sentados), realizados em ambiente não ventilado, a mudança da roupa executiva (paletó) para uma roupa mais leve (camisa de manga curta de algodão e calça comprida, por exemplo), aumenta a tolerância do sujeito em cerca de 3°C. Se, além desse ajuste no vestuário, existirem correntes de ar com velocidade de 1,0 m/s, o indivíduo aceitará um aumento adicional de 2,5°C, devido ao efeito refrescante produzido pelo movimento de ar.

Em outra pesquisa, comparando-se um ambiente com ar parado com outro onde havia uma corrente de ar com velocidade de 0,8 m/s, observou-se uma elevação de cerca de 2,5°C na temperatura preferida de sujeitos escandinavos, sob condições de 50% de umidade relativa. Kukreja (1978) sugere que a velocidade do ar para climas quentes deve ser entre 1 e 1,50m/s.

O efeito refrescante tem sido relatado como sendo ainda maior em outros experimentos (FLEURY, 1990; COOK, 1989). Há indicações que o movimento de ar possa produzir sensações de conforto sob temperaturas acima de 30°C e velocidades do vento aceitáveis (VILLAS BOAS, 1983; EVANS, 1980). No entanto, para temperaturas entre 33 e 37°C a velocidade do ar parece não afetar significativamente a sensação térmica (GIVONI, 2001). Nesse caso, a proximidade entre a temperatura do ar e da temperatura da pele reduz, consideravelmente, o potencial das trocas térmicas por convecção entre o corpo humano e a corrente de ar.

ARENS *et al* (1998) sugerem que indica a importância do controle do ambiente por parte do usuário. A possibilidade de diminuir ou aumentar o

insuflamento de ar parece se constituir em item de importância para os usuários. Em testes que os autores rotulam de mais conservadores, realizados, principalmente em câmaras climáticas, precisam ser ampliados para ambientes reais, em condições de uso reais. Em ambientes reais, as pessoas mudam de lugar e atividade ao longo do tempo, devido a diferentes fatores, e tal item não é considerado em pesquisas em câmaras climáticas.

Resultados de uma pesquisa dinamarquesa desenvolvida em câmara climática (TOFFUM *et al*, 2000) mostram que os usuários preferiram 28°C quando forem permitidos para selecionar seus próprios valores da velocidade do ar e 26°C quando a mesma foi fixada em 0,2 m/s.

O estudo de Zhou (2006) comparou tipos diferentes de insuflamento de ar e a resposta de preferência do usuário. A maioria dos entrevistados indicou a ventilação natural como a melhor opção para o resfriamento. O autor ainda associou os valores da velocidade e da temperatura do ar, chegando a as respostas indicadas no Quadro 3.

Ambient air temp./supply air temp. (°C)	Mean air velocity (m/s)
28.5/22.2	0.68 ± 0.11
28.5/24.2	0.86 ± 0.11
30.0/22.7	0.71 ± 0.10
30.0/25.7	1.14 ± 0.15
30.0/30.0	1.19 ± 0.18

Quadro 3 – Valores da velocidade do ar preferida associadas à temperatura do ar.

Fonte: ZHOU, 2006.

A velocidade máxima do ar considerada como aceitável pode variar entre 0,5 e 2,5 m/s de acordo com diferentes autores (GHIAUS; ALLARD, 2006; NICOL, 2004). O limite máximo é baseado em problemas práticos, tais como vôo de papéis sobre a mesa e desarranjo de penteados, ao invés de exigências fisiológicas de conforto. Em climas quentes e úmidos, é provável que o poder refrescante provocado por uma maior velocidade do ar possa compensar essas desvantagens. Hien e Tanamas (2002) relatam que o valor máximo da velocidade deve ser de 3 m/s para evitar os efeitos indesejáveis de movimentos de ar.

Em locais onde o vento é estável em direção e possui razoável velocidade (> 3.0 m/s) a ventilação proporcionada pela força do vento é a estratégia de refrigeração mais simples e eficiente (OLGYAY, 1998; DE DEAR, 2001; SANTAMOURIS, 2006 b). Entretanto, o vento pode ser indesejável quando a temperatura do ar estiver acima de 34°C (BOWEN, 1981).

É importante considerar que, quando o resfriamento por ventilação for empregado, é sensato prever algum esquema de ventilação mecânica para fazer frente aos períodos de calmaria. Eles serão usados esporadicamente e seu baixo consumo de energia propicia um sistema auxiliar altamente eficiente para complementar os processos de resfriamento passivo. Nos períodos de inverno, a ventilação pode ser indesejável, devendo-se, por isso, serem previstas formas de controle da mesma nos locais onde essa situação possa ocorrer (NICOL, 2001).

2.1.2.1.1. Velocidade do ar e as zonas de conforto

O efeito do movimento do ar no conforto térmico tem sido avaliado em diversas pesquisas (SANTAMOURIS; ASIMAKOPOULOS, 1997; DE DEAR; BRAGER; COOPER, 1997; NICOL, 2004). O movimento do ar reduz a temperatura efetiva devido à evaporação do suor da pele e às trocas convectivas entre a corrente de ar e o corpo humano (ASHLEY, SHERMAN, 1984). Por essa razão, o limite máximo da zona de conforto, estabelecido para condições sem vento, pode ser ampliado em função da velocidade do ar, Figura 5.

A variação do nível da umidade e o desconforto dos usuários observado está fortemente relacionado aos valores da velocidade do ar do ambiente quando a temperatura efetiva está próxima aos valores de conforto. Quando a temperatura encontra-se mais alta que aquela indica como confortável, o desconforto causado pela umidade é constantemente associado ao suor na superfície da pele. Entretanto, tal índice é discutido quando se considera a expectativa do indivíduo ao estar exposto a situações onde o suor é uma consequência previamente esperada pelo mesmo ao executar a sua atividade (RORIZ, 2003).

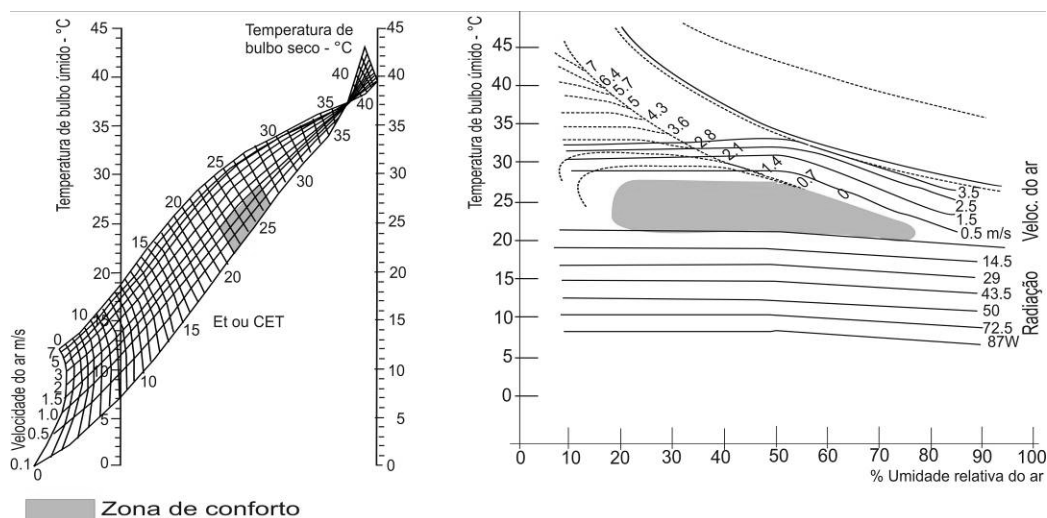


Figura 5 – Zonas de conforto representadas pelo nomograma de temperatura efetiva (à esquerda) e pela carta bioclimática (à direita). Fonte: Koenigsberger *et al.*, 1974; Izard, 1979.

Estudos de conforto térmico para regiões quentes e úmidas sugerem a necessidade de adequações nos índices de conforto térmico (DE DEAR, 2002). Um dos principais fatores de diferenciação nos índices de conforto térmico nesse tipo de clima reside nos valores de temperatura indicados pelos usuários. Tal fato é ainda mais latente quando associado ao aumento dos valores da velocidade do ar.

O potencial de aproveitamento da ventilação natural em edifícios tem sido avaliado em diversas pesquisas (NICOL, 2004; GHIAUS, ALLARD, 2006); (BASTIDE *et al*, 2006), (GRATIA; DE HERDE, 2004). No clima tropical, o movimento do ar reduz a temperatura efetiva devido à evaporação do suor da pele e às trocas convectivas entre a corrente de ar e o corpo humano (GHIAUS; ALLARD, 2006). Por essa razão, o limite máximo da zona de conforto, estabelecido para condições sem vento, pode ser ampliado em função da velocidade do ar.

Entretanto, os valores de velocidade do ar nos ambientes internos ainda são discutidos na área, principalmente para as regiões de clima quente e úmido (SANTAMOURIS a, 2006). Neste tipo de clima, estudos indicam que o aumento da velocidade do ar incrementa, sensivelmente, a sensação de

conforto dos usuários (DE DEAR, 1991; MALLINCK, 1996; SANTAMOURIS a, 2006).

A Figura 6 mostra os dados relativos à temperatura e umidade do ar para o mês de fevereiro (verão) na cidade de Recife, juntamente com a zona de conforto térmico para esse período. Observa-se que a área hachurada pode ser ampliada para cima na presença de ventilação que, com velocidades do ar acima de 0,6m/s, pode-se obter conforto térmico no período considerado (BITTENCOURT, 1993).

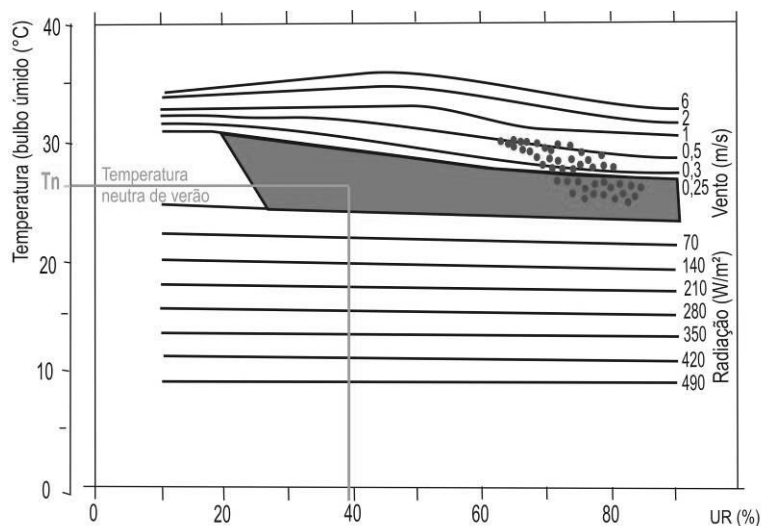


Figura 6 – Carta bioclimática para o verão de Recife/PE, considerando trabalho sedentário e roupas de verão. Fonte: BITTENCOURT, CÂNDIDO, 2005.

Estudos de Mallick (1996) com usuários de edificações localizadas em Bangadlesch sugerem a zona de conforto com maior nível de umidade e temperatura, desde que incrementado os valores da velocidade do ar, Figura 7.

Recentemente, os estudos executados principalmente em climas tropicais, (de DEAR 1991, MALLICK 1996, HIEN, TANAMAS 2002), confirmam que o aumento em velocidades do ar, especialmente em temperatura mais altas, o incremento a velocidade do ar tem impacto significativo no conforto térmico dos usuários.

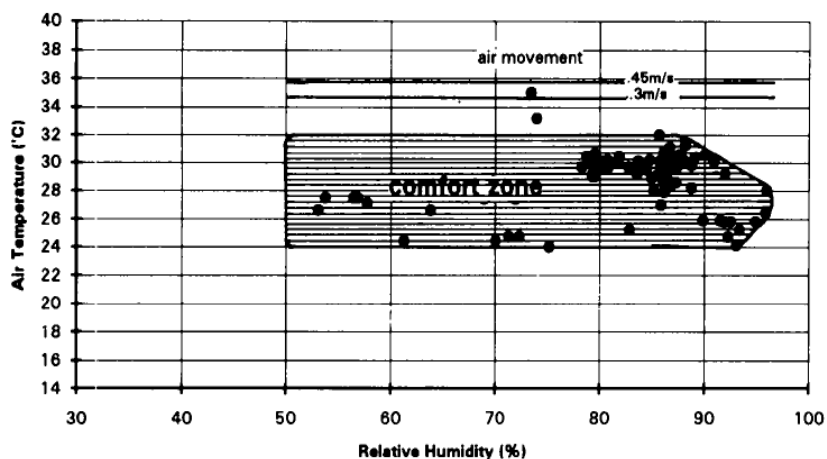


Figura 7 – Zona de conforto para o verão em Bangladesh. Fonte: MALLICK, 1996.

Um estudo desenvolvido por ARENS *et al* (1998) em câmaras de conforto indica que é possível obter conforto em condições acima de 29°C desde que a velocidade do ar seja superior a 1 m/s. tais resultados consideraram o controle da ventilação por parte dos usuários e a possibilidade de acionamento de ventiladores quando maiores velocidades do ar eram desejadas.

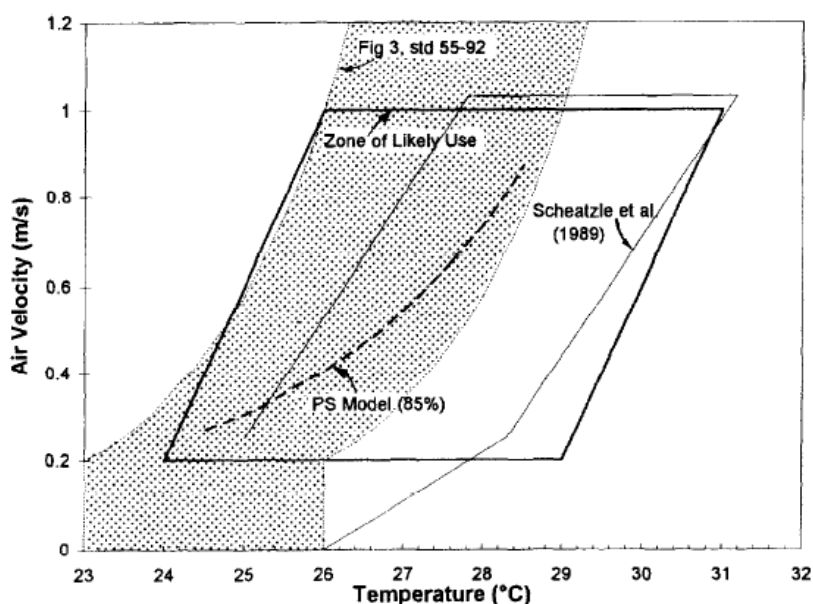


Figura 8 – Zona de conforto para o verão em Bangladesh. Fonte: ARENS et al, 1998

Segundo estudos de Nicol (2004), a utilização da ventilação pode proporcionar uma sensação térmica de até menos 4 °C em relação à

temperatura real registrada no ambiente. Para o mesmo autor, a utilização de ventiladores pode proporcionar até 2 °C a menos que a temperatura real (sensação térmica) indicando a velocidade de 0,25m/s para temperatura de até 25 °C.

Em edifícios de escritório no Paquistão, estudos indicam a manutenção da condição de conforto indicada pelos usuários para temperaturas entre 22 e 30°C, desde que a velocidade do vento esteja em 0,90m/s. A pesquisa de Totfum *et al* (2000) realizada em câmaras climáticas, sugere que os usuários podem preferir a temperatura de 28°C desde que possuam o controle da velocidade do ar.

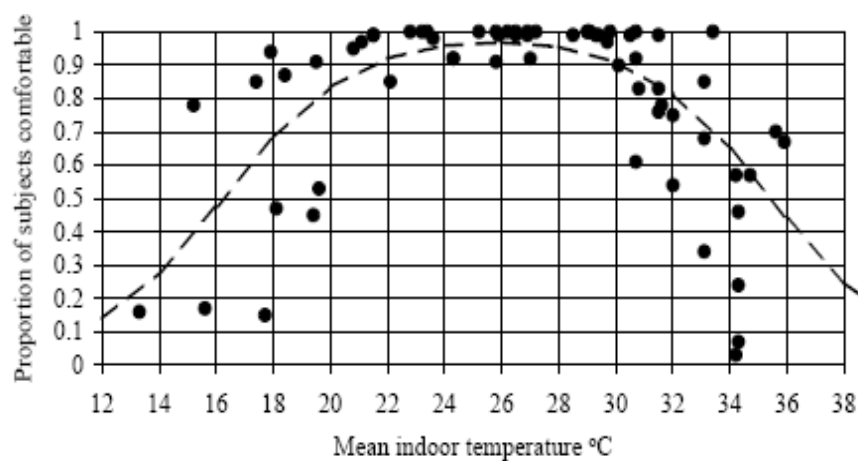


Figura 9 – Relação entre a temperatura de conforto e a velocidade do vento indicada por usuários de escritórios no Paquistão. Fonte: NICOL, 2004.

A comparação entre os valores da temperatura de conforto recomendadas pela ASHRAE, em ambientes de escritório com uso do ar-condicionado e ambientes com ventilação natural indica a maior tolerância dos usuários quando meios passivos de climatização são aplicados (GHIAUS; ALLARD, 2006), Figura 10.

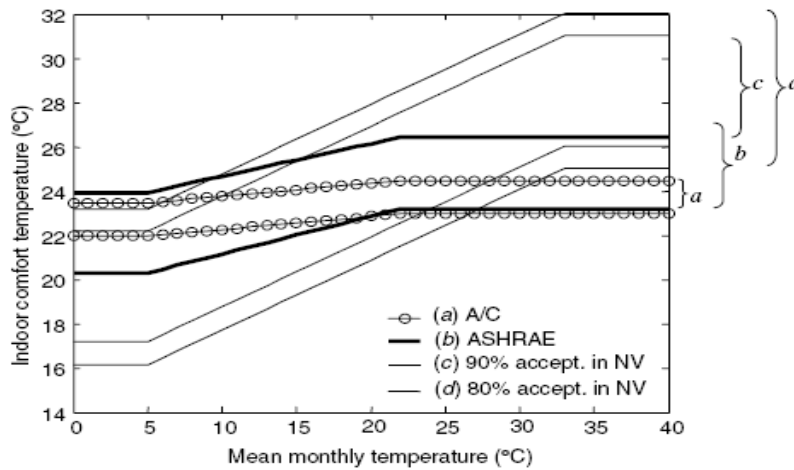


Figura 10 – Temperatura de conforto indicada pelos usuários em ambientes com uso do ar-condicionado e ventilação natural: (a) ar-condicionado; (b) ASHRAE; (c) ventilação natural, 90% aceitação; (d) ventilação natural, 80% aceitação. Fonte: GHIAUS; ALLARD, 2006.

Nicol (2004) sugere que valor de velocidade do vento interna pode ser incrementada pelo uso de ventiladores de teto, sendo estes bem aceitos pelos usuários, Figura 11. Aynsley (1999) sugere que valores de velocidade entre 2 e 4m/s dos ventiladores de teto são bem aceitos pelos usuários, comumente utilizados para incrementar o movimento do ar nos ambientes. Os algoritmos propostos pelos estudos realizados por Lv e Liu (2007) em condições de temperaturas transientes, reforçam a tese do incremento do conforto térmico quando do aumento da velocidade do ar.

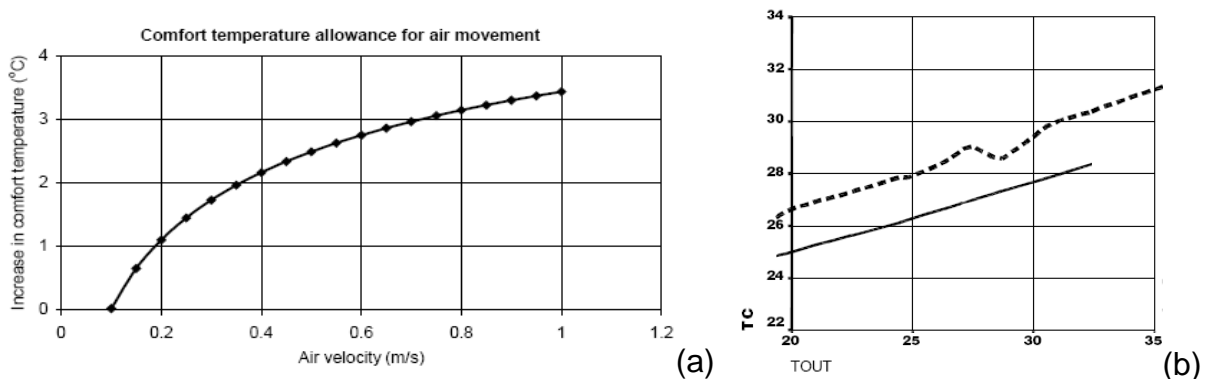


Figura 11 – (a) Incremento da temperatura de conforto para diferentes velocidades do ar; (b) Efeito da utilização de ventiladores em escritórios (a linha tracejada indica a utilização dos ventiladores e a linha cheia quando os mesmos não são acionados). Fonte: NICOL,

2.1.2.2. Percepção do fluxo de ar e conforto

O incômodo causado pela turbulência de um fluxo de ar constante pode ser verdadeiro em climas frios e temperados, onde os indivíduos não estão acostumados com um movimento de ar contínuo (FANGER *et al*, 1974), mas não reflete a realidade de regiões quentes e úmidas. Ao contrário, em tais regiões, a ventilação é um fator fundamental na determinação do conforto humano (DUTT, 1992) e velocidades do ar acima de 2,5 m/s podem ser muito bem aceitas (GIVONI, 1976).

Por outro lado, a percepção, e a conseqüente diferenciação, do movimento do ar em fluxo laminar e turbulento pelos usuários parece ainda carecer de mais estudos da área. Muitos estudos têm sido desenvolvidos neste tópic, entretanto, ainda se constitui em uma área aberta na área científica (TANABE; 1988; SANTAMOURIS, 2006 b). Estudos que associem aos valores as velocidades do vento preferidas pelos usuários e o conforto térmico dos mesmos carecem de maior aprofundamento, especialmente no clima quente e úmido.

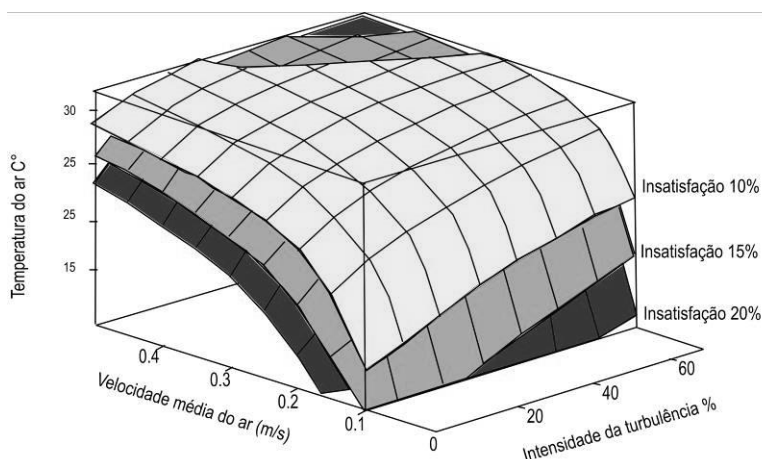


Figura 12 – Efeito da velocidade e turbulência do vento na sensação de conforto.

Fonte: FANGER *et al*, 1988.

Pode-se concluir, portanto, que alguns ajustes se fazem necessários nas zonas de conforto mais freqüentemente utilizadas pelos projetistas para considerar mais adequadamente os efeitos das variações da umidade e

velocidade do ar no conforto térmico (DREYFUS, 1960). O incremento da evaporação da pele do usuário através do aumento da velocidade do ar se constitui na estratégia mais eficiente. Tal benefício pode ser obtido, mesmo em dias de umidade alta, desde que a ventilação não seja um incômodo devido à temperatura do ar estiver mais alta que a da pele.

Estudos de Arens *et al* (1998) indicam a percepção do movimento do ar afeta o conforto térmico dos usuários, assim como o potencial de resfriamento proveniente do fluxo de ar. Por outro lado, 35% dos usuários entrevistados relataram sensação de desconforto causada pelo fluxo de ar em temperaturas acima de 30°C.

ZIN *et al* (2005) sugerem um modelo matemático, incluindo o percentual de turbulência, para calcular o desconforto térmico dos usuários. O método calcula o percentual de pessoas insatisfeitas (PPD) em função da velocidade do ar, a intensidade da turbulência e a temperatura do ar.

A pesquisa desenvolvida por Zhou (2006) mostra a relação entre a turbulência e a velocidade do ar preferida pelos usuários. No experimento desenvolvido em câmara climática na China, indicam a preferência por velocidades do ar entre 0,70 e 1,15m/s e turbulência de 0,25 a 0,40%, Figura 13.

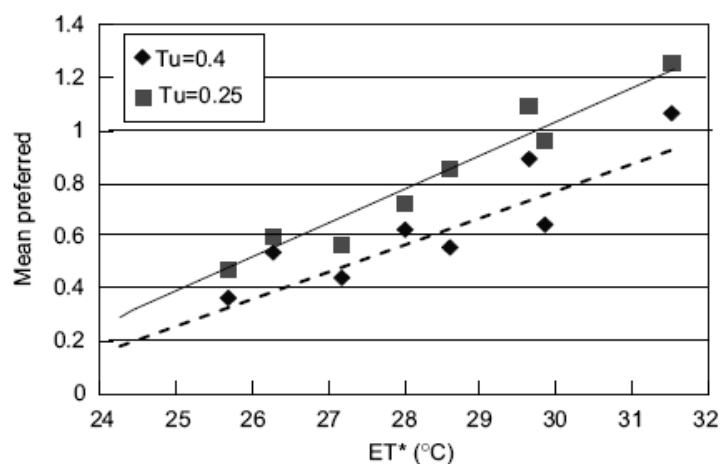


Figura 13 – Efeito da intensidade da turbulência e a velocidade do ar preferida pelo usuário. Fonte: Zhou, 2006.

2.1.2.2.1. Distribuição do fluxo de ar nos ambientes e o usuário

A velocidade do ar no interior dos ambientes tem grande influência no conforto térmico dos usuários, conforme discutido anteriormente. Complementar aos valores da velocidade no ar, a distribuição do fluxo de ar no interior dos ambientes deve ser considerada.

Em climas frios, a ocorrência de jatos de ar e a infiltração através de frestas de portas e janelas podem causar desconforto aos usuários. Nos climas quentes, este fenômeno é desejado, incrementando as trocas entre a pele e o ar. Para tal, os ambientes devem ser projetados tendo em vista a circulação e o direcionamento do fluxo de ar nos locais de permanência e execução das atividades pelos usuários.

Em relação à ventilação natural, a configuração do fluxo de ar no interior de uma construção será determinada por três fatores principais: o tamanho e a localização das aberturas de entrada do ar na parede (1), o tipo e a configuração das aberturas usadas (2) e a localização de outros componentes arquitetônicos nas proximidades das aberturas, tais como divisórias internas e painéis verticais ou horizontais adjacentes a elas (como protetores solares e marquises, por exemplo) (3). (KOENIGSBERGER *et al*, 1974; KUKREJA, 1978; OLGAY, 1998).

A decisão de se produzir uma distribuição uniforme do movimento de ar ou um jato concentrado depende dos requisitos específicos de cada projeto. Se a atividade desenvolvida em um determinado ambiente induz os usuários a permanecerem em uma localização fixa quando ocupam o espaço (como acontece em quartos, por exemplo), a concentração de jatos com velocidades maiores pode ser uma opção mais interessante, Figura 14. Contudo, em espaços onde a flexibilidade é um importante requisito, uma distribuição uniforme do fluxo de ar pode produzir resultados mais apropriados.

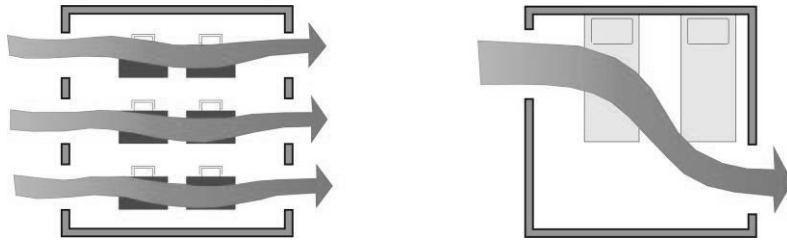


Figura 14 – A localização das aberturas pode produzir escoamentos de ar distribuídos ou concentrados no interior dos ambientes.

Dependendo da utilização do ambiente e função da ventilação, o direcionamento do fluxo de ar é diferenciado. Contudo, para o usuário, a necessidade de flexibilidade e controle das possibilidades é de fundamental importância, permitindo a utilização de acordo com a demanda do mesmo. Estudos de conforto em edificações reforçam esta tese (GHIAUS; ALLARD, 2006).

A associação entre a velocidade e a distribuição do fluxo de ar deve ser analisada sob a pena de comprometer o conforto dos usuários. A utilização exclusiva dos valores de velocidade média pode omitir a existência de zonas onde o fluxo de ar não circula em detrimento de outras onde ocorre a concentração de jatos com maiores velocidades, Figura 15.

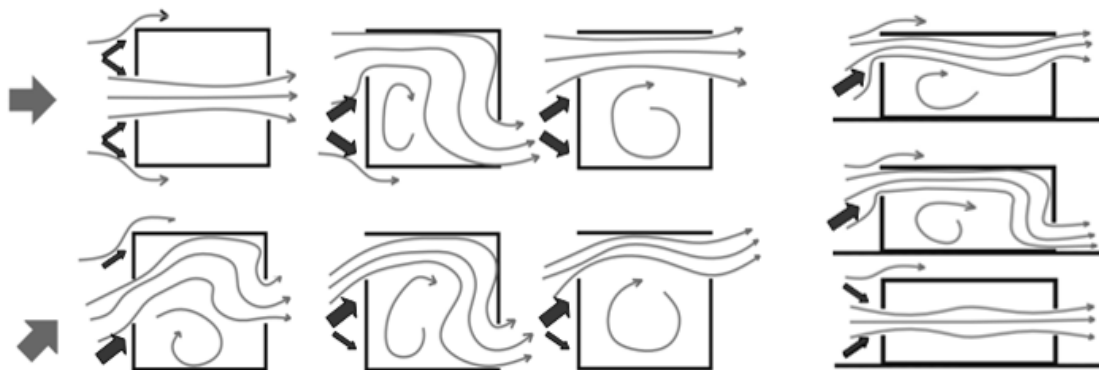


Figura 15 – Efeito da localização das aberturas em paredes opostas. Fonte: GIVONI, 1976, OLGAYAY, 1963; EVANS, 1980.

Estudos realizados em câmaras climáticas indicam a necessidade de se considerar o direcionamento do fluxo de ar para o plano de trabalho dos usuários (CHEONG *et al*, 2007). A pesquisa indica ainda que a utilização dos

valores médios da velocidade do ar pode induzir a uma análise parcial do aproveitamento da ventilação no interior dos ambientes (CHEONG *et al*, 2006).

Estudos de Bastide *et al* (2006) demonstram a importância do projeto das aberturas no aproveitamento da ventilação natural, Figura 16. O algoritmo proposto pelos autores para prever o percentual bem ventilado do ambiente pode ser útil para o projetista nos casos investigados. Dependendo da localização da abertura, a distribuição do fluxo de ar ocorre de forma mais concentrada ou mais distribuída no interior do ambiente.

Em geral, uma construção com aberturas distribuídas sobre diferentes fachadas aumentará o potencial para se obter uma adequada ventilação natural, pelo fato de produzir significantes gradientes de pressão em vários pontos da mesma. Dependendo da localização da abertura, a chamada ventilação cruzada, pode ser proporcionada, assim como diminuir a formação de zonas de estagnação do ar (BASTIDE *et al*, 2006), Figura 16.

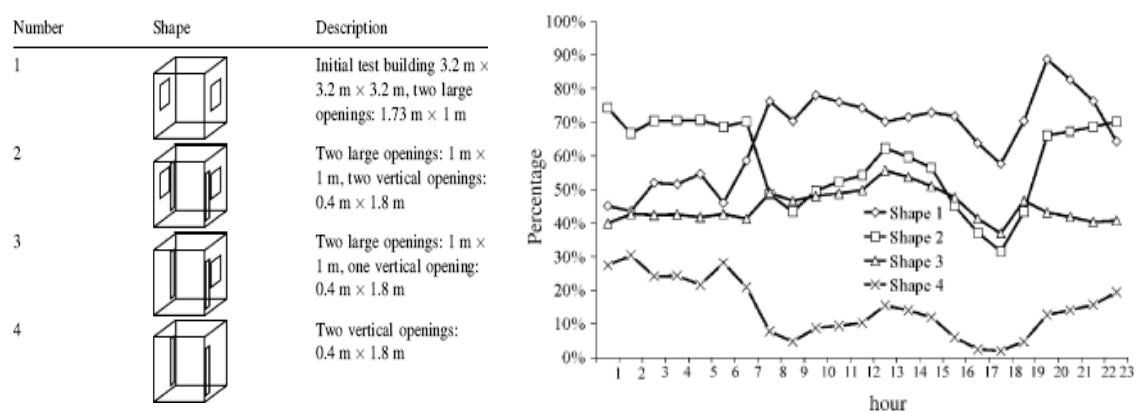


Figura 16 – Insuflamento de ar resultante de diferentes configurações de aberturas.

Fonte: BASTIDE *et al*, 2006.

Constata-se que a possibilidade de controle e direcionamento do fluxo de ar pelo usuário no interior dos ambientes é item indispensável para incrementar o conforto térmico dos mesmos. A possibilidade de acionamento de fonte complementar de fluxo de ar, tais como ventiladores, também de ser considerada em momentos de calma.

No sentido de associar os valores de velocidade e distribuição do fluxo de ar, as aberturas dos ambientes têm papel de destaque. A combinação entre

a localização, dimensão, forma e tipologia das aberturas será discutida na próxima seção, bem como a sua influência na ventilação dos ambientes.

2.1.3. Estratégias de aproveitamento da ventilação natural

Em ambientes climatizados naturalmente, o projetista deverá dispor das características climáticas locais, a fim de dispor das melhores condições de aproveitamento da ventilação natural (GEROS *et al*, 2005). Para tal, é necessário o conhecimento do comportamento dos ventos no exterior e no interior das edificações, evitando assim incorrer em erros de dimensionamento ou localização das aberturas, por exemplo. As estratégias de condicionamento natural relacionam-se ao uso da ventilação cruzada e da ventilação noturna (BASTIDE *et al*, 2006); (GEROS *et al*, 2005); (GRATIA, BRUYÈRE, DE HERDE, 2004); (GRATIA; DE HERDE, 2004). Tais estratégias são detalhadas a seguir.

2.1.3.1. Ventilação cruzada

A ventilação cruzada deve ser aproveitada para incrementar o conforto térmico dos usuários dos ambientes. Ao favorecer as trocas de calor por convecção e evaporação, contribui para o conforto térmico dos usuários e minimiza a utilização de dispositivos mecânicos de refrigeração e, conseqüentemente, para diminuir o consumo de energia nesses espaços (BASTIDE *et al*, 2006). Por outro lado, o adequado aproveitamento da ventilação cruzada contribui para a obtenção da flexibilidade requerida pelos usuários (NICOL, 1995); (GHIAUS, ALLARD, 2006); (GRATIA, BRUYÈRE, DE HERDE, 2004); (BASTIDE *et al*, 2006).

Estudos de Gratia; Bruyère; De Herde (2004) indicam o potencial de aproveitamento da ventilação cruzada em edifícios de escritórios. A comparação realizada, entre modelos computacionais de ambientes que não utilizam a ventilação cruzada, com ventilação cruzada e ventilação *single-sided*, sugere o ganho na qualidade do fluxo de ar no ambiente, Figura 17.

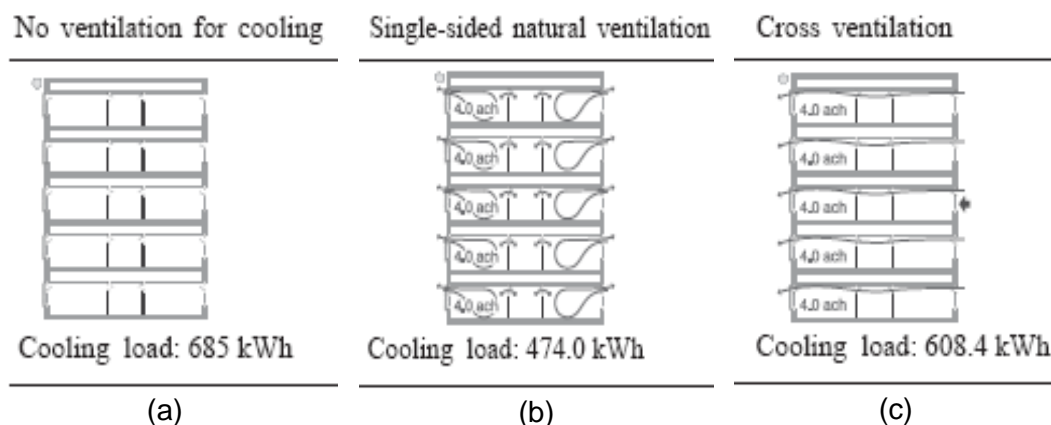


Figura 17 – Comparação entre edifícios de escritório sem o aproveitamento da ventilação natural (a) e onde esta estratégia foi aplicada (b) *single-sided* e (c) ventilação cruzada. Fonte: GRATIA; BRUYÈRE; DE HERDE, 2004.

Para o aproveitamento da ventilação cruzada, o projeto da edificação deverá primar, principalmente, pela permeabilidade à passagem dos ventos. Especial atenção deverá ser destinada ao projeto das aberturas, para otimizar o insuflamento e o direcionamento do fluxo de ar de ar no interior do ambiente, além de minimizar o impacto na velocidade do vento (GHIAUS, ALLARD, 2006). Desta forma, o tamanho, forma, localização e tipologia das esquadrias, somados aos mecanismos de direcionamento e controle do fluxo de ar pelo usuário e a as aberturas de saída devem ter atenção no projeto arquitetônico.

2.1.3.2. Ventilação noturna

A ventilação noturna é uma técnica passiva de resfriamento que consiste no insuflamento de ar no interior da edificação durante o período noturno (GEROS *et al*, 2005); (GRATIA; DE HERDE, 2004). Tal prática visa resfriar o ambiente interno durante a noite, removendo a carga térmica acumulada, proporcionando uma menor necessidade de resfriamento no início da manhã. Pode ser aproveitada tanto em edifícios que utilizam a ventilação passiva ou a ativa como estratégia de condicionamento.

Estudos desenvolvidos por Geros *et al* (2005) do aproveitamento da ventilação noturna em 10 cidades gregas indicam que o uso de tal estratégia pode contribuir para a diminuição do consumo de energia em até 90% em ambientes climatizados. Tal incremento, no entanto, dependerá, em grande

parte, das condições do entorno urbano próximo, segundo dados dos mesmos autores. A temperatura no interior dos espaços estudados diminui em torno de 4°C, minimizando a utilização do ar-condicionado na parte da manhã, Figura 18.

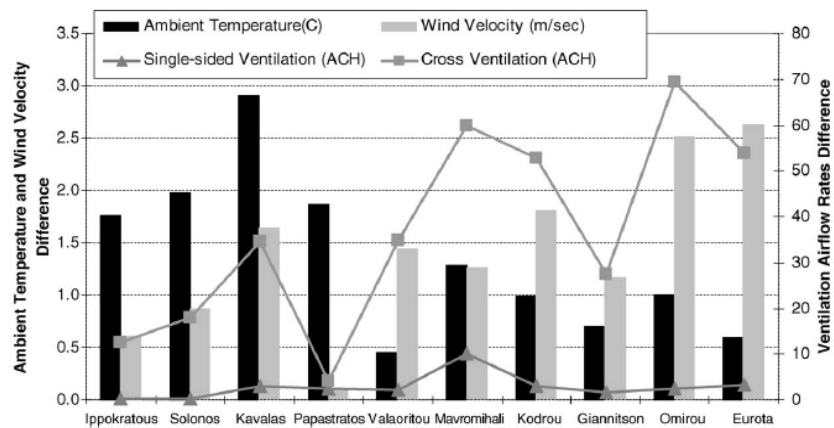


Figura 18 – Diferença de temperatura e da velocidade do vento em ambientes com utilização da ventilação cruzada e *single-sided*. Fonte: GEROS *et al*, 2005.

Para Gratia; Bruyère; De Herde (2004), o aproveitamento da ventilação noturna contribui, significativamente, para o resfriamento dos ambientes. A estratégia é otimizada quando utilizada como ventilação cruzada, aumentando o potencial de resfriamento, Figura 19.

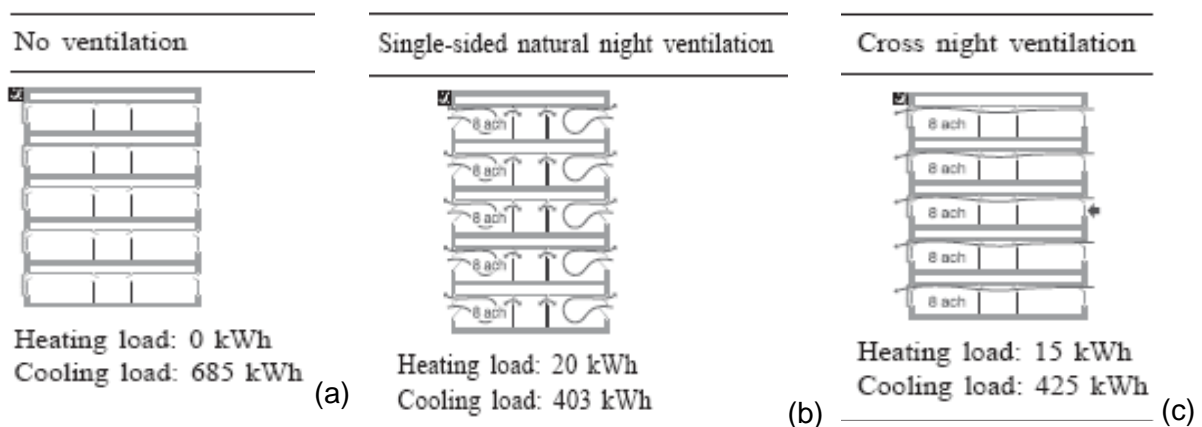


Figura 19 – Diferentes estratégias de aproveitamento da ventilação: (a) sem ventilação, (b) ventilação noturna *single-sided* e (c) ventilação noturna cruzada. Fonte: GRATIA; BRUYÈRE; DE HERDE, 2004.

A utilização da ventilação noturna dependerá (GEROS *et al*, 2005); (GRATIA; DE HERDE, 2004): da diferença de temperatura entre o ambiente

interno e externo; do conhecimento do comportamento do vento local no que concerne a direção, frequência, velocidade do vento e ocorrência de calmarias; do entorno imediato. A esses itens são somados o projeto de aberturas adequado para o insuflamento de ar no interior do ambiente e a consideração da estratégia na fase inicial de projeto.

A utilização da ventilação noturna, por outro lado, contribui para minimizar a necessidade de resfriamento nos ambientes e, conseqüentemente, para a diminuição dos gastos com energia. Gratia; Bruyère; De Herde (2004) compararam a demanda de resfriamento em ambientes com uso do ar-condicionado, ventilação *single-sided*, ventilação cruzada, ventilação noturna *single-sided* e ventilação noturna cruzada. O estudo sugere o potencial de diminuição de até 38% para ambientes onde a ventilação noturna cruzada é aplicada em relação ao modelo que utiliza ar-condicionado, considerado como modelo de referência, na demanda de resfriamento, Figura 20. Quando a ventilação noturna *single-sided* é utilizada, este valor a diminuição é da ordem de 41%.

	Cooling demand (kWh/day)	
• Standard air conditioning ("reference" building)	685	
• Single sided day ventilation for cooling	474	-31%
• Cross day ventilation for cooling	608	-11%
• Single sided night ventilation for cooling	403	-41%
• Cross night ventilation for cooling	425	-38%

Figura 20 – Comparação entre ambientes com a utilização da ventilação cruzada e *single-sided*. Fonte: GRATIA; BRUYÈRE; DE HERDE, 2004.

Entretanto, os autores apontam a importância da configuração das aberturas de entrada e saída do ar utilizada nos ambiente. Tal item dever ser, portanto, considerado pelos projetistas, podendo contribuir negativamente para o aproveitamento da estratégia escolhida (GRATIA; BRUYÈRE; DE HERDE, 2004).

CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica de estudos relacionados ao conforto térmico e ventilação natural em edificações localizadas em climas quentes.

A redução dos ganhos de calor é necessidade fundamental em climas tropicais. Em conjunto com a proteção solar, o resfriamento por ventilação aparenta ser a solução de melhor custo/benefício para o contexto de regiões quentes e úmidas. Nestas regiões, a temperatura do ar é quase sempre mais baixa que a temperatura da pele e outros processos de refrigeração apresentam sérias inconveniências.

No Brasil, assim como em outros países em desenvolvimento, o uso de aparelhos de ar condicionado não se apresenta uma alternativa concreta para a maioria das pessoas e a ventilação pode representar o único método de refrigeração viável. Além disso, o uso desses aparelhos é responsável por um alto consumo de energia nas edificações, cujos problemas de conforto térmico poderiam ser resolvidos adequadamente através da ventilação natural.

Grande parte do território brasileiro apresenta significativo potencial para alcançar boas condições de conforto térmico com velocidades do ar interno relativamente baixo (em torno de 1,0 m/s). Para proporcionar altas taxas de ventilação, as janelas em regiões quentes e úmidas deveriam ser amplas, mas sombreadas. Venezianas móveis são interessantes, pois permitem um adequado controle da incidência solar em relação à paisagem, à luz natural e ao movimento de ar. As exigências combinadas de sombreamento constante, filtro da luz natural e de ventilação permanente, criam condições ideais para o uso de elementos vazados, também conhecidos por cobogós. É necessário, entretanto, ter-se consciência de alguns problemas correlatos que podem ocorrer quando a ventilação natural é escolhida como estratégia de resfriamento. Dentre eles, se destacam os problemas acústicos, a presença de insetos e a incidência de chuvas de vento. Estes problemas podem ser equacionados se considerados nas etapas iniciais do projeto arquitetônico.

A escolha da estratégia bioclimática mais adequada (natural ou mecânica) representa apenas uma entre as várias condicionantes arquitetônicas, sobre as quais o bom senso do projetista deve determinar a melhor solução para cada caso, baseado no conhecimento do real potencial da ventilação natural e dos limites de sua aplicação.

Constata-se que um erro freqüente na avaliação da ventilação em espaços internos relaciona-se à falta de compreensão do movimento do ar em torno dos edifícios. Os projetistas, muitas vezes, não consideram, adequadamente, a inserção do edifício na malha urbana. As características relacionadas à orientação, entorno, velocidade do vento e ocorrência de calmarias devem ser estudadas pelo mesmo a fim de aproveitar o potencial da ventilação. Especialmente em edificações localizadas na malha urbana, onde a complexidade é maior, a ventilação exterior deve ser estudada. Para edifícios de escritório, o aproveitamento do potencial da estratégia de condicionamento, será vinculado à consideração do entorno, inclusive na diminuição do consumo de energia nestes espaços.

Em relação ao aproveitamento nos espaços internos, mais uma vez o conhecimento do comportamento da ventilação será de grande importância, evitando assim incorrer em erros de dimensionamento ou localização das aberturas, por exemplo. As estratégias de condicionamento natural apontadas pelos autores relacionam-se ao uso da ventilação cruzada e da ventilação noturna. No entanto, independente da estratégia escolhida, esta deve ser incorporada na fase inicial de projeto e melhorada durante o desenvolvimento do mesmo, visando otimizar as suas potencialidades. De uma maneira geral, a não realização deste processo contribui fortemente para o aumento do consumo de energia final nas edificações.

O uso da ventilação cruzada e noturna demonstra ser uma estratégia eficiente, e pouco explorada, para incrementar o conforto nos ambientes. Tal fato se deve ao potencial de resfriamento da massa edificada proporcionado pelo uso da ventilação e, conseqüentemente, a menor demanda pelo uso do ar-condicionado. Estas características positivas podem ser aproveitadas pelos projetistas visto que existe uma demanda por ambientes com condições

ambientais mais flexíveis e controláveis da parte dos usuários, especialmente quando existe grande permanência.

O projeto arquitetônico deverá contemplar também a localização, forma e dimensão das aberturas de forma a otimizar o aproveitamento da ventilação nos ambientes. Por outro lado, o adequado dimensionamento das aberturas demonstrou ser um item de grande importância para o aproveitamento da ventilação, em todos os casos, embora não tenha sido amplamente explorado pelos autores. Observa-se, portanto, a necessidade de estudos que considerem os aspectos quantitativos e qualitativos relacionados ao impacto da tipologia de esquadria na ventilação natural de espaços internos.

Por fim, observa-se que, embora a ventilação seja uma estratégia freqüentemente apontada como a mais eficiente para se obter conforto nos climas tropicais, esta não vem sendo aproveitada pelos projetistas como forma de se obter ambientes termicamente confortáveis e com maior eficiência energética. Estudos que integram a percepção dos usuários, relacionada ao valor da velocidade do vento necessária para tal devem ser aprofundados.

REFERENCIAL DOCUMENTAL

AMAI, H.; TANABE, S.; AKIMOTO, T.; GENMA, T. Thermal sensation and comfort with different task conditioning systems. **Building and Environment**, vol 42, 2007.

ARENS, E.; XU, T.; MIURA, K.; HUI, Z.; FOUNTAIN, M.; BAUMAN, F. A study of occupant cooling by personally controlled air movement. **Energy and Buildings**, vol 27, 1998.

ASHLEY, S.; SHERMAN, M. The Calculation of Natural Ventilation and Comfort. **ASHRAE Transactions**, vol.90; Part 1B, Atlanta, 1984.

AYNSLEY, R.M. A Resistance Approach to Estimating Airflow through Buildings with Large Openings Due to Wind. **ASHRAE Transactions**, Volume 94, Part 2, Ottawa, 1988.

AYNSLEY, R.M.; MELBOURNE, W.; VICKERY, B.J. Architectural Aerodynamics. **Applied Science Publishers Ltd.**, Londres, 1977.

BARBIRATO, G. **Clima e arquitetura**. Apostila da disciplina de Clima e Ambiente Urbano do Mestrado em Dinâmicas do Espaço Habitado da Universidade Federal de Alagoas, Maceió/AL, 2005.

BASTIDE, A; LAURET,P.; GARDE,F.; BOYER, H. Building energy efficiency and thermal comfort in tropical climates Presentation of a numerical approach for predicting the percentage of well-ventilated living spaces in buildings using natural ventilation. **Energy and Buildings**, vol. 38, 2006, pp. 1093-1103.

BAKER, N. **Passive and Low Energy Building Design for Tropical Island Climates**. London: Commonwealth Science Council, 1987.

BITTENCOURT, L. **Ventilation as a cooling resource for warm humid climates: An investigation on perforated block wall geometry to improve ventilation inside low-rise buildings**. Tese (Doutorado em Environment and Energy Studies). Architectural Association Graduate School, Londres, 1993.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. Maceió: EDUFAL, 2006.

BRAGER, G.; DE DEAR, R. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. **Energy and Buildings**, vol 27, 1998.

BRE - Building Research Establishment. Principles of Natural Ventilation. **BRE Digest**, n 210. BRE, Garston, 1978.

BRE - Building Research Establishment. Thermal, Visual and Acoustic Requirements in Buildings. **BRE Digest**, 226, June 1979, Garston, 1979.

BUDAIWI, I. An approach to investigate and remedy thermal-comfort problems in buildings. **Building and Environment**, vol 42, pp 2124–2131, 2007.

CHEONG, K.W.D.; YU, W.J.; KOSONEN R.; THAM, K.W.; SEKHAR, S.C. Assessment of thermal environment using a thermal manikin in a field environment chamber served by displacement ventilation system. **Building and Environment**, vol 41, 2006.

CHEONG, K.W.D.; YU, W.J.; SEKHAR, S.C.; THAM, K.W.; KOSONEN R. Local thermal sensation and comfort study in a field environment chamber served by displacement ventilation system in the tropics. **Building and Environment**, vol 42, 2007.

CHAO, C.Y.H.; WAN, M.P. Airflow and air temperature distribution in the occupied region of an underfloor ventilation system. **Building and Environment**, vol 39, 2004.

COOK, J. **The State of Passive Cooling Research**. Chapter 7 of Passive Cooling. Cook, J. (Ed.). MIT Press: Massachusetts, 1989.

CROISET, M. L'hygrothermique dans le Bâtiment, Paris. em Compte des Parametres Climatiques dans l'Habitat et Conseils Pratiques. **Report for the CSTB**, Nantes, 1972.

DASCALAKI, E. SANTAMOURIS, M., BUANT, M., BALAROS, C.A., BOSSAER, A., DUCARME, D., WOUTERS, P. Modeling large openings with COMIS. **Energy and Buildings**, vol 30, pp 105 -115, 1999.

DE DEAR, R.; BRAGER, G. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, vol 34, 2002.

DUTT, A.J.; DEAR, R.J.; KRISHNAN, P. Full Scale and Model Investigation of Natural Ventilation and Thermal Comfort in Building. In: 8^o Intern. Conf. On Wind Engineering. Ontario, July 8-12 1991, Davenport, A., Isyumov, N. King, J., Novak, M., Surry, D. and Vickery, B. (eds.) Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1992. **Proceeds...** Amsterdam: 1992.

FANGER, P. O. Human requirements in future air-conditioned environments. **International Journal of Refrigeration**, vol 24, 2001.

FANGER, P.O.; OSTERGARD, J.; OLESEN, S.; LUNDADSEN, T.H. The Effect on Man's Comfort of a Uniform Air Flow from Different Directions. **ASHRAE Transactions**. vol. 80, Part 2, New York, 1974.

FARHANIEH, B.; SATTARI, S. Development of an integrated model for airflow in building spaces. **Renewable Energy**, vol 31, 2006.

FLOURENTZOU F.; VAN DER MAAS, J.; ROULET, C.-A. Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients, **Energy and Buildings**, vol 27, 1998.

FOUNTAIN, M.; BRAGER, G.; DE DEAR, R. Expectations of indoor climate control. **Energy and Buildings**, vol 24, 1996.

GAN, G, Effective depth of fresh air distribution in rooms with single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings**, vol. 31, pp 65-73, 2000.

GAN, G., GLICKSMAN, L.R., Application of integration multi-zone model with CFD simulation to natural ventilation prediction. **Energy and Buildings**, vol. 37, pp 1049-1057, 2005.

GEROS, V.; SANTAMOURIS, M.; KARATASOU,S.; TSANGRASSOULIS, A.; PAPANIKOLAOU,N. On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment. **Energy and Buildings**, vol. 37, 2005, pp. 243-257.

GHIAUS, C.; ALLARD, F. Potential for free-cooling by ventilation. **Solar Energy**, vol 80, 2006.

GIVONI, B. Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods. **Energy and Buildings**, vol 28, 1998.

GOULART, S. LAMBERTS, R., FIRMINO, F. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. Florianópolis: NPC/UFSC, 1997.

GRATIA, E.; BRUYÈRE, I.; DE HERDE, A. How to use natural ventilation to cool narrow office buildings. **Building and Environment**, vol. 39, 2004, pp.1157-1170.

GRATIA, E.; DE HERDE, A. A simple design tool for the thermal study of dwellings. **Energy and Buildings**, vol 34, 2002.

GRATIA, E., DE HERDE, A. How to use natural ventilation to cool narrow office buildings. **Building and environment**, 2004.

GRATIA, E.; DE HERDE, A. Is day natural ventilation still possible in office buildings? **Building and Environment**, Vol. 39, 2004, pp. 399-409.

HIRANO, T., KATO, S., MURAKAMI, S., ISAKA, T., SHIRAISHI, Y., A study on a porous residential building model in hot and humid regions: Part I – the natural ventilation performance and the cooling load reduction of the building model. **Energy and Buildings**, vol 41, pp 21-32, 2005.

HUIZENGA, C.; HUI, Z.; ARENS, E. A study of occupant cooling by personally controlled air movement. **Building and environment**, vol 36, pp 691-699, 2001.

HUMPHREYS, M.; NICOL, F. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. **Energy and Buildings**, vol 34, 2002.

KARIMIPANAH, T.; AWB, H.B.; SANDBERG, M.; BLOMQUIST, C. Investigation of air quality, comfort parameters and effectiveness for two floor-level air supply systems in classrooms. **Building and environment**, vol 42, 2007.

KOENIGSBERGER, O., T. G. INGERSOL, A. MAYHEW, S. V. SZOKOLAY. **Manual of Tropical Housing and Building. Part I: Climatic Design**, London: Longman, 1974.

KOSKELA, H.; HEIKKINEN, J.; NIEMELA, E; HAUTALAMPI, T. Turbulence correction for thermal comfort calculation. **Building and environment**, vol 36, 2001.

KUKREJA, C.P., **Tropical Architecture**. Nova Dheli: Ed. Tata McGraw-Hill, 1978.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. **Conforto térmico e stress térmico**. Apostila da disciplina de Conforto Ambiental. Florianópolis, 2002.

LI, Y., DELSANTE, A., SYMONS, J. Prediction of natural ventilation in buildings with large openings. **Building and Environment**, n.35, pp 191-206, 2000.

LIN, Z.; DENG, S. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—Developing a thermal comfort model for sleeping environments. **Building and Environment**, vol 42, 2007.

LIN Z.; CHOW, T.T.; TSANG, C.F. Effect of door opening on the performance of displacement ventilation in a typical office building. **Building and Environment**, vol 42, 2007.

LIN Z.; CHOW, T.T.; Fong, K.F., Wang, Q., Li, Y. Comparison of performances of displacement and mixing ventilations. Part I: thermal comfort. **International Journal of Refrigeration**, vol 28, 2005.

MALLICK, F. H. Thermal comfort and building design in the tropical climates. **Energy and Buildings**, vol 23, 1996.

NICOL, F. Adaptive thermal comfort standards in the hot–humid tropics. **Energy and Buildings**, vol 36, 2004.

NICOL, F.; HUMPHREYS, M. Maximum temperatures in European office buildings to avoid heat discomfort. **Energy and Buildings**, 2006.

NICOL, F.; HUMPHREYS, M. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, vol 34, 2002.

NICOL, F.; HUMPHREYS, M.; SYKES, O.; ROAF, S. **Standards for thermal comfort**. Chapman&Hall: London, 1995.

NICOL, F., PARSONS, K. Special issue on thermal comfort standards. **Energy and Buildings**, vol 34, 2002.

PRIANTO, E.; DEPECKER, P. Optimization of architectural design elements in tropical humid region with thermal comfort approach. **Energy and Buildings**, vol 35, 2003.

PRIANTO, E.; DEPECKER, P. Characteristic of airflow as the effect of balcony, opening design and internal division on indoor velocity A case study of traditional dwelling in urban living quarter in tropical humid region. **Energy and Buildings**, vol 34, 2002.

OLGYAY, V. **Arquitectura y clima Manual de Diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Editorais Gustavo Gili: Barcelona, 1998.

RAJA, A. I.; NICOL, J.F.; MCCARTNEY, K.J. Natural ventilated buildings: Use of controls for changing indoor climate. **Renewable Energy**, vol 15, 1998.

RORIZ, M. Flutuações horárias dos limites de conforto térmico: uma hipótese de modelo adaptativo. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Curitiba: 2003.

RUTMAN, E.; INARD, C.; BAILLY, A.; ALLARD, F. A global approach of indoor environment in an air-conditioned office room. **Building and Environment**. vol 40, 2005.

SANTAMOURIS, M., ASIMAKOPOULOS, D., **Passive cooling of buildings**. James & James: London, 1997.

SANTAMOURIS, M. (a) Natural ventilation in urban areas. **Ventilation Information Paper**, nº 4, Air Infiltration and Ventilation Centre: Belgium, março de 2004.

SANTAMOURIS, M. (b) Night ventilation techniques. **Ventilation Information Paper**, nº 4, Air Infiltration and Ventilation Centre: Belgium, março de 2004.

SANTAMOURIS, M. (a) Use of earth to air heat exchanges for cooling. **Ventilation Information Paper**, nº 11. Air Infiltration and Ventilation Centre: Belgium, janeiro de 2004.

SANTAMOURIS, M. (b) Adaptative thermal comfort and ventilation. **Ventilation Information Paper**, Air Infiltration and Ventilation Centre, nº 12. Air Infiltration and Ventilation Centre: Belgium, junho de 2004.

TANABE, S. **Thermal comfort requirements in Japan**. Tese de doutorado, Waseda University, 1988.

TOFTUM, J.; LANGKILDE, G.; FANGER, P. O. New indoor environment chambers and field experiment offices for research on human comfort, health and productivity at moderate energy expenditure. **Energy and Buildings**, vol 36, 2004.

VAN DER LINDEN, A.C.; BOERSTRA, A.C.; RAUE, A.K.; KURVERS, S.R.; DE DEAR, R. Adaptive temperature limits: A new guideline in The Netherlands A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate. **Energy and Buildings**, vol 38, 2006.

VAN HOOFF, J.; HENSEN, J.L.M. Quantifying the relevance of adaptive thermal comfort models in moderate thermal climate zones. **Building and Environment**, vol 42, 2007.

YU, W.J.; CHEONG, K.W.D.; THAM, K.W.; SEKHAR, S.C.; KOSONEN, R. Thermal effect of temperature gradient in a field environment chamber served by displacement ventilation system in the tropics. **Building and Environment**, vol 42, 2007.

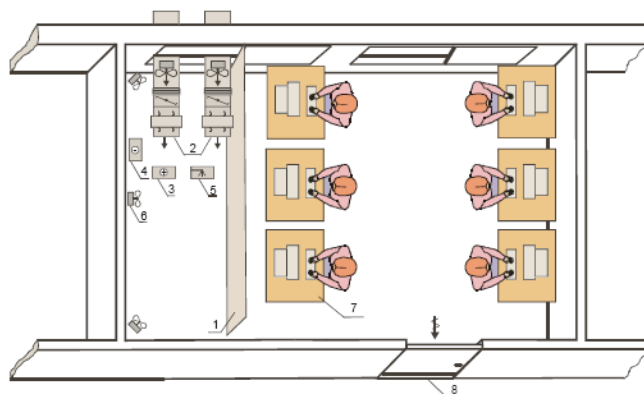
ZHIYONG, W. Dynamic evaluation of thermal comfort environment of air-conditioned buildings. **Building and Environment**, vol 41, 2006.

APÊNDICE

Os experimentos físicos podem ser realizados em túneis de vento ou medições em ambientes reais. Os experimentos são realizados com o auxílio de equipamentos que permitam visualizar o fluxo de ar (máquinas de fumaça), estimar as taxas de renovação do ar (decaimento de CO, transmissores de pressão) e mensurar a velocidade do vento (anemômetros, termoanemômetros), entre outros. No segundo caso, as simulações são geralmente desenvolvidas em programas de dinâmica dos fluidos computadorizada (CFD).

1. Câmaras climáticas

As pesquisas em câmaras climatizadas, são aquelas realizadas no interior de ambientes totalmente controlados pelo pesquisador, onde tanto as variáveis ambientais como as variáveis pessoais ou subjetivas são manipuladas a fim de se encontrar a melhor combinação possível entre elas a fim de fornecer uma situação confortável.



3. Plan of experimental field office #12. (1): partition, (2): outdoor air supply fan with damper and silencer, (3): electric heater, (4): air-conditioning (5): humidifier, (6): mixing fan, (7): workstation, and (8): ventilation exhaust.

Figura 21 – Esquema de uma câmara climática. Fonte: TOFTUM, LANGKILDE, FANGER, 2004.

As pesquisas de campo são aquelas realizadas em ambientes reais, com as pessoas desempenhando suas atividades rotineiras. Neste tipo de pesquisas, o pesquisador não interfere nas variáveis ambientais e pessoais, onde as pessoas expressam suas sensações e preferências térmicas em

escalas apropriadas (LAMBERTS, XAVIER, 2002). Diversos experimentos têm sido desenvolvidos em tais protótipos e os resultados serviram para o estabelecimento de índices empregados na área (TANABE, 1978; TOFTUM, LANGKILDE, FANGER, 2004).

2. Túneis de vento

Os experimentos físicos podem ser realizados em túneis de vento ou medições em ambientes reais. Os experimentos são realizados com o auxílio de equipamentos que permitam visualizar o fluxo de ar (máquinas de fumaça), estimar as taxas de renovação do ar (decaimento de CO, transmissores de pressão) e mensurar a velocidade do vento (anemômetros, termoanemômetros), entre outros. No segundo caso, as simulações são geralmente desenvolvidas em programas de dinâmica dos fluidos computadorizada (CFD).

Os túneis de vento são estruturas tridimensionais, com dimensões variáveis, dotadas de uma hélice que gera o fluxo de ar. No interior da estrutura são inseridos os protótipos investigados, sendo estes construídos em materiais e escalas diversificadas, figura 22.



Figura 22 – Túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Fonte:

<http://www.arcoweb.com.br/tecnologia/tecnologia65.asp>, acesso em 04/09/2006.

Para facilitar a visualização do fluxo de ar, geralmente são inseridas fitas de tecido, bolas de isopor, areia, fumaça, ou outros artifícios que contribuam para o entendimento do comportamento do fluido.

A velocidade do escoamento é obtida a partir do tubo estático de Pitot. Neste equipamento, a diferença entre as pressões total e estática, chamada pressão dinâmica, é convertida, geralmente por um transdutor de pressão. Tal valor é utilizado para o cálculo da velocidade do vento no interior do túnel por meio da equação de Bernoulli.

3. Equipamentos de medição utilizados em experimentos físicos

3.1. Anemômetros

Os anemômetros são instrumentos de medição utilizados para registrar a velocidade do vento nos experimentos. Podem ser omnidirecionais ou unidirecionais. O primeiro tipo registra a velocidade do vento com sensibilidade independente da direção do fluxo de ar, tais como o anemômetro de esfera aquecida, ultrasônico e a laser. O segundo tipo registra a velocidade do vento em uma determinada direção predominante do fluxo de ar, sendo os anemômetros de pás ou copos e de fio quente os exemplos desta tipologia.

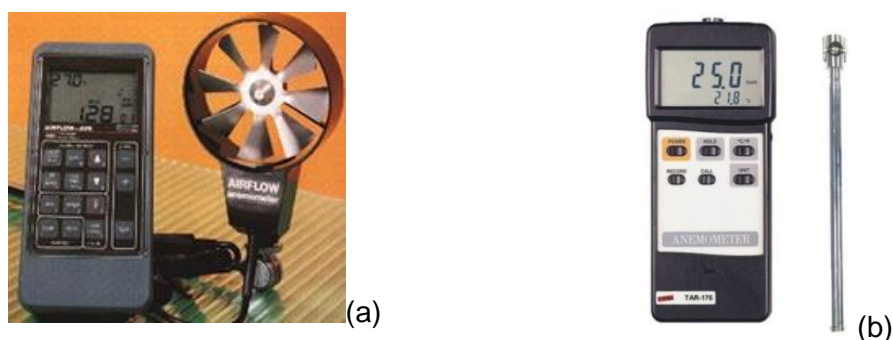


Figura 23 - Anemômetro de pás (a) e de fio quente (termoanemômetro) (b) para o registro da velocidade do vento. Fonte: www.vectus.com.br, acesso em 02/09/2006.

A escolha do tipo de medidor a ser utilizado, depende da precisão e do tipo de experimento realizado. Nos casos de medição do vento no interior de ambientes arquitetônicos, os anemômetros de pás e de fio quente são os mais empregados.

3.2. Laser Doppler

O fluxo de ar pode também ser medido por instrumentos mais avançados de sensibilidade direcional, tais como anemômetros do tipo laser-

doppler, velocímetros de imagem de partículas e anemômetros ultrasônicos. (KOSKELA *et al*, 2001). Tais instrumentos são geralmente empregados para medições da direção e velocidade do fluxo de ar. Servem para medições que exigem maior precisão tanto em laboratório quanto em medições de campo.

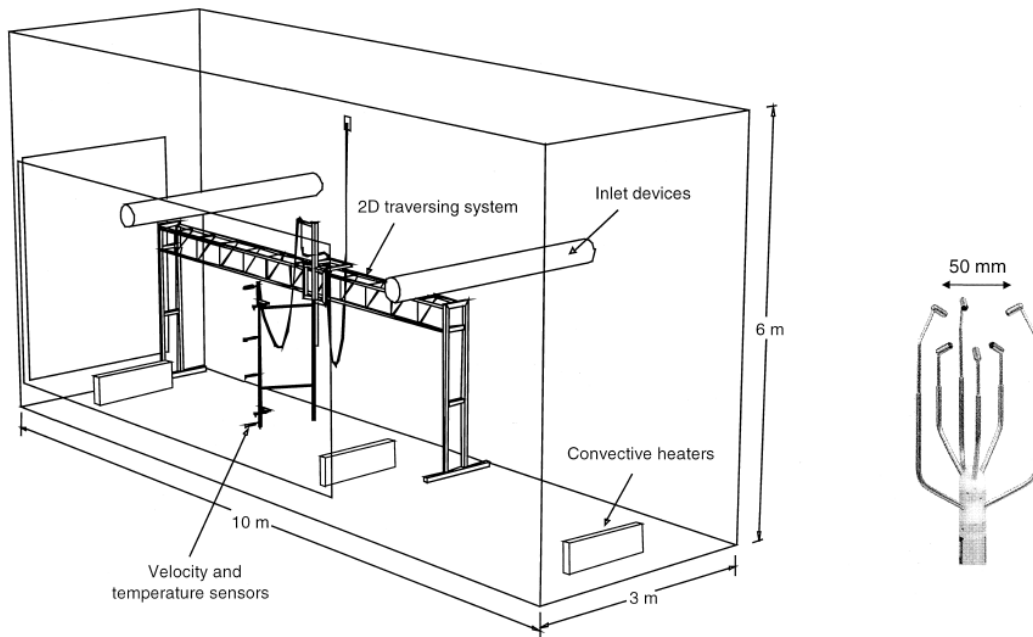


Figura 24 – Esquema de uma sala de testes com o uso do anemômetro ultrasônico e detalhe do equipamento. Fonte: KOSKELA *et al* (2001).

Os resultados são obtidos por três pares de sensores ultrasônicos, com distância de 50mm entre eles. Os valores resultam de um escaneamento dos valores da velocidade do fluxo de ar, turbulência, sentido do fluxo de ar. Podem ser visualizados sob a forma de vetores ou manchas de cor, Figura 25.

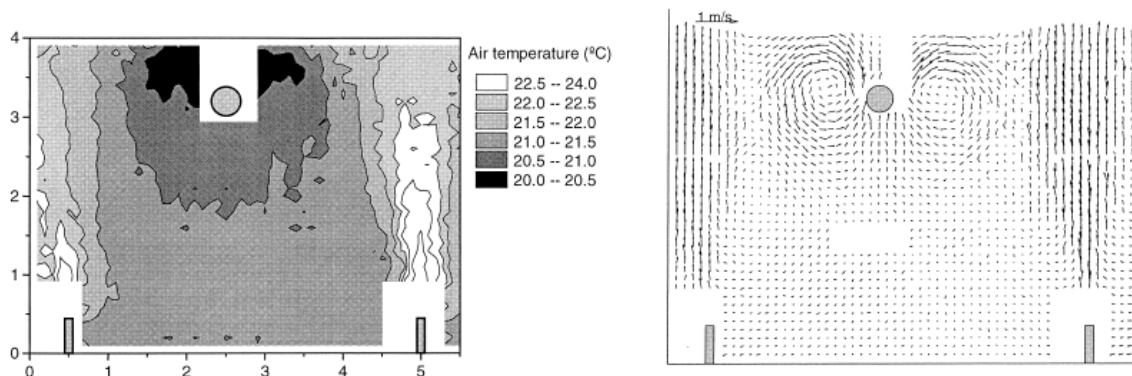


Figura 25 – Visualização dos valores da velocidade do ar com o anemômetro ultrasônico. Fonte: KOSKELA *et al* (2001).

4. Simulação computacional

4.1. Modelos zonais e multizonais

Os métodos zonais constituem-se em sistemas de nós que representam os ambientes de uma edificação. O comportamento do fluido no interior dos ambientes é calculado por equações não-lineares, considerando a edificação como uma rede. Os ambientes são representados como zonas interligadas por meio de nós.

Tais métodos são considerados mais precisos que os simplificados, apresentados anteriormente, e possuem a vantagem da possibilidade de integração com os programas de desempenho térmico.

4.2. Dinâmica dos fluidos computadorizada – CFD

Os programas de simulação geralmente se baseiam na dinâmica dos fluidos computadorizada (*CFD*), que surgiu como ferramenta alternativa aos tradicionais túneis de vento nos estudos de ventilação natural nas edificações. A técnica da dinâmica dos fluidos computadorizada vem sendo desenvolvida e utilizada para fins de investigação do comportamento da ventilação há duas décadas e possui bom potencial para as pesquisas relacionadas a este assunto (CHOW, 2003).

O uso de simuladores computacionais podem ser aplicados em análises de conforto térmico, entretanto, sua acuracidade dependerá do domínio do pesquisador das variáveis envolvidas no processo, principalmente quando associados ao comportamento do fluxo de ar e a temperatura (KOSKELA *et al*, 2001). Tal processo, em que pese a inevitável simplificação do fenômeno real, permite uma comparação mais precisa entre os modelos considerados, uma vez que os demais parâmetros envolvidos na ventilação natural podem ser mantidos exatamente iguais em todos os modelos investigados.

A visão integrada dos aspectos relacionados às taxas de renovação de ar e a sua distribuição no interior dos ambientes é um aspecto ainda pouco explorado, podendo ser obtida pelos métodos multizonal e CFD (*Dinâmica dos*

Fluidos Computadorizada) (SANTAMOURIS; ASSIMAKOPOULOS, 1997). Tais itens são fortemente influenciados pelo tamanho, forma e localização das aberturas (KUKREJA, 1978; KOENIGSBERGER *et al*, 1974). Tais técnicas são de grande importância para estudar o comportamento da ventilação natural no interior das edificações e entender os aspectos relativos à velocidade e distribuição do fluxo de ar no interior das mesmas.

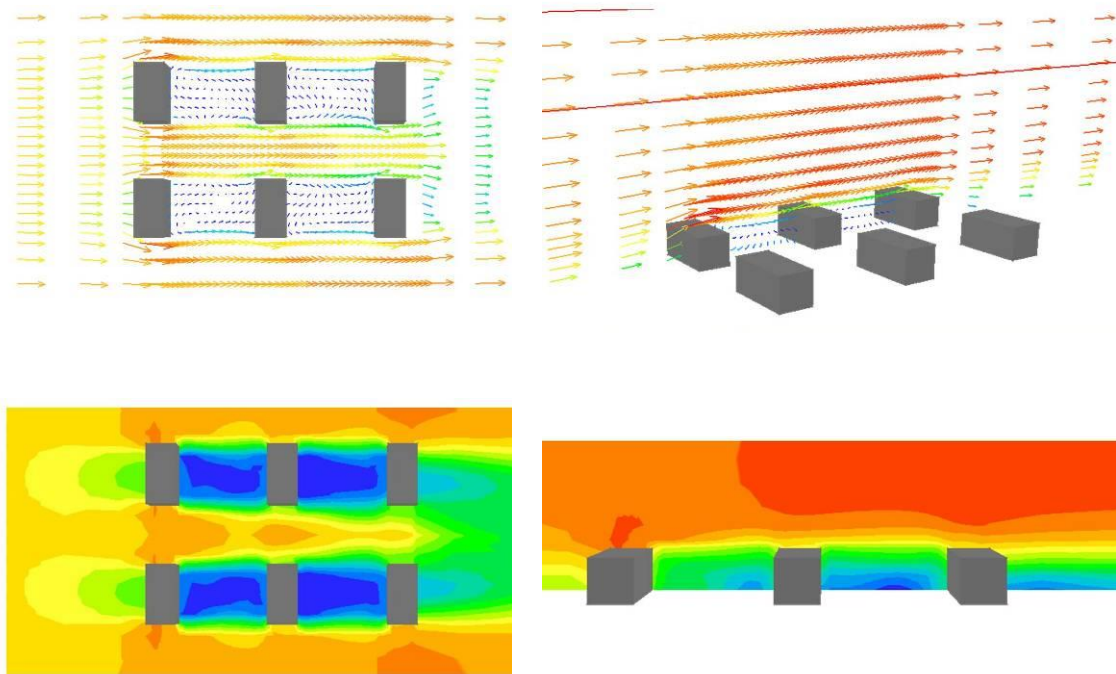


Figura 26 - Modelos em CFD permitem a observação da direção e da velocidade do vento através de vetores. A visualização dos resultados permite identificar os campos de velocidade do vento e o comportamento do fluxo de ar no interior das edificações.