

TRADUÇÃO COMENTADA DO CLÁSSICO ARTIGO QUE LANÇA A IDEIA DO DIAGRAMA BIOCLIMÁTICO DO EDIFÍCIO

Aloísio Leoni Schmid (1)

(1) Dr.-Ing., Eng. Mecânico, Professor do PPGCEC, aloisio.schmid@gmail.com, UFPR-DAU, C.P. 19011, 81531-980 Curitiba, PR, tel. (41) 3361 3069

RESUMO

Este artigo se propõe apresentar a tradução crítica - grifada e comentada em notas de tradutor, no rodapé - de um importante artigo por Givoni (1992), (Conforto, análise do clima e diretrizes para projeto de edificações) em que é lançada a ideia do diagrama bioclimático do edifício. A tradução tem alguns motivos principais: o diagrama é aplicado de forma generalizada mas sem considerar que as edificações brasileiras são leves ou muito leves. Ainda, considera-se existir clima temperado. (Segue a tradução do abstract original.) Este artigo discute questões de normas de conforto térmico, incluindo a zona de conforto da ASHRAE (Soc. Americana de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado), técnicas de análise gráfica de dados climáticos, assim como usos dos diagramas bioclimáticos na formulação de estratégias de projeto, em especial para climas quentes. Discute-se a problemática de aplicar os diagramas bioclimáticos de Olgyay e as normas de conforto térmico da ASHRAE para edifícios não condicionados, especialmente em países quentes e em desenvolvimento. Neste artigo descreve-se pela primeira vez diagramas bioclimáticos revisados. Discute-se os limites da aplicabilidade de diferentes estratégias e sistemas de refrigeração passiva em diferentes climas. As estratégias são baseadas nas temperaturas internas e externas que se pode obter com diferentes estratégias e incluem ventilação “de conforto” diurna, o uso da massa estrutural para armazenamento térmico juntamente com a ventilação noturna, e a refrigeração evaporativa direta e indireta.

Palavras-chave: conforto térmico, diagrama bioclimático, países em desenvolvimento.

ABSTRACT

The present paper presents a commented, Portuguese translation of a seminal article by Givoni (1992), with the title “Comfort, climate analysis and building design guidelines” which proposes the building bioclimatic chart. The translation was motivated by the fact that the diagram is widely used in Brazil although, first, buildings here are lightweight; and, second, a temperate climate zone is comprised in the country. (Next, the article abstract is reproduced). The paper discusses issues of thermal comfort standards, including the ASHRAE comfort zone, techniques of graphical climate data analysis, as well as the uses of building bioclimatic charts in the formulation of building design guidelines, especially for hot climates. The problematics of applying the Olgyay bioclimatic charts and the ASHRAE comfort standards for unconditioned buildings, especially in developing hot countries, are discussed. Revised building bioclimatic charts are described for the first time in this paper. The boundaries of applicability of various building design strategies and passive cooling systems in different climates are discussed. These strategies are based on the expected indoor temperatures achievable with the different strategies and include daytime "comfort" ventilation, the utilization of the structural mass for thermal storage in conjunction with nocturnal ventilation, and direct and indirect evaporative cooling.

Keywords: thermal comfort, building bioclimatic chart, developing countries.

1. CONFORTO, ANÁLISE CLIMÁTICA E DIAGRAMAS BIOCLIMÁTICOS

A análise de dados climáticos, voltada para a formulação de princípios de projeto de edifícios, frequentemente envolve a apresentação de padrões anuais dos principais fatores climáticos que afetam o conforto humano e o desempenho térmico de edifícios em diferentes formas, como padrões mensais gráficos da temperatura, umidade, velocidade do vento, nebulosidade etc. locais, assim como diagramas bioclimáticos (GIVONI, 1976; OLGYAY, 1963).

Diagramas bioclimáticos facilitam a análise das características climáticas de um dado local do ponto de vista do conforto humano, na medida que apresentam num diagrama psicrométrico a combinação de temperatura e umidade em qualquer momento. Eles também podem especificar princípios de projeto de edifícios para maximizar condições de conforto quando o interior do edifício não é condicionado mecanicamente. Todos estes diagramas são estruturados ao redor da “zona de conforto” e se referem a ela.

A “zona de conforto” é definida como a faixa de condições climáticas dentro da qual a maioria das pessoas não sentiria desconforto térmico, seja por calor ou frio.

1.1 Normas existentes de conforto:

A zona de conforto da ASHRAE (1985) é traçada sobre um diagrama psicrométrico convencional. Especifica os contornos de temperatura do ar e umidade, para pessoas sedentárias, dentro dos quais o sistema mecânico tem de manter o clima interior. Foi construída principalmente para uso em edifícios de escritórios com ar condicionado mas também é utilizada para avaliação do clima interior em edificações residenciais. Esta zona de conforto é também usada extensivamente como a base para se estruturar diagramas bioclimáticos.

A zona de conforto da ASHRAE (1985) se estende entre dois níveis fixos de conteúdo de vapor, sabidamente 4 e 12 g/kg. Diferentes faixas de temperatura são dadas na última versão para o verão, quando os edifícios são resfriados, e para o inverno, quando os edifícios são aquecidos, para se levar em conta mudanças em “hábitos sazonais de vestuário” e para aumentar a conservação de energia.

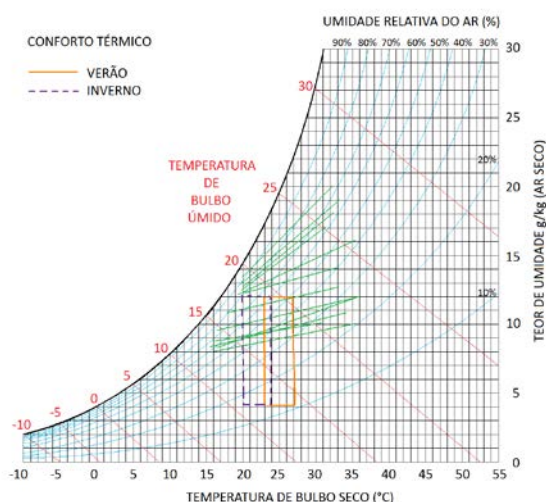


Figura 1 - A zona de conforto da ASHRAE, plotada conjuntamente com as temperaturas extremas em Colima México (clima quente e úmido).

O limite máximo de temperatura diminui levemente e linearmente com umidade mais alta (entre os limites de umidade acima) e aumenta com uma velocidade do ar maior.

Para condições de ar parado (0,15 m/s no inverno e 0,25 m/s no verão) o limite máximo da ASHRAE para temperatura aceitável no verão é de 26°C com conteúdo de umidade de 12g/kg e se estende até 27° para 4 g/kg. Os limites completos das zonas de conforto para verão e inverno são como assinalado na figura 15 no capítulo de conforto do 1985 ASHRAE Fundamentals Handbook (1985).

Com maiores velocidades do ar, o limite máximo de temperatura é elevado em 1 °C para um aumento de 0,275 m/s, até a temperatura de 28°C com uma velocidade do ar de 0,8 m/s, que é a maior velocidade do ar permitida. O limite máximo de umidade aceitável não é afetado de forma alguma pela maior velocidade do ar na norma ASHRAE.

2. COMENTÁRIOS À APLICABILIDADE DA ZONA DE CONFORTO DA ASHRAE

Alguns problemas existem, na opinião do autor¹, quando estes padrões de conforto são usados para avaliar as condições de edifícios não condicionados artificialmente. Uma questão concerne aos limites das condições climáticas aceitáveis em edifícios que não são condicionados. Outro problema concerne à aplicação dos limites de velocidade do ar e umidade da ASHRAE em localidades quentes e úmidas, levando em conta as expectativas de climatização e conforto dos habitantes em tais lugares e o papel das velocidades do ar mais altas no aumento do conforto sob umidades altas.

¹ Essa discussão é extensa. A **Energy and buildings**, v. 34, 2002, foi dedicada ao questionamento de limites impostos até aquele período (PEDRINI, 2015)

2.1. Condições aceitáveis em edifícios sem ar condicionado

O clima interior em edifícios não condicionados responde às variações no clima externo² e os habitantes usualmente experimentam uma variação climática diurna maior que em edifícios artificialmente condicionados. Por exemplo, temperaturas interiores variando de 20°C pela manhã a 26°C à tarde em dias de verão são comuns em edifícios não condicionados. A velocidade do ar interna em edifícios com ventilação cruzada é frequentemente ao redor de 2m/s. Pessoas vivendo em edifícios não condicionados, naturalmente ventilados usualmente aceitam uma tal faixa mais larga de temperaturas e velocidades do ar como algo normal (ver seção 5.1).

Esta diferença entre as condições interiores aceitáveis em edifícios condicionados artificialmente e aqueles não condicionados deveria ainda estar refletida nos diagramas que especificam limites para as condições aceitáveis de clima interior para edifícios não condicionados e nos limites de aplicabilidade de várias estratégias de projeto de edifícios e de sistemas de refrigeração “passiva”.³

É razoável pressupor que pessoas vivendo em países quentes e em desenvolvimento⁴, vivendo na maior parte em edifícios não condicionados, estão acostumadas a, e iriam tolerar maiores temperaturas e/ou umidades (HUMPHREYS, 1975; MILNE & GIVONI, 1979; TANABE, 1988). O problema associado com a aplicação das normas de conforto da ASHRAE em lugares quentes e úmidos pode ser ilustrado ao se traçar sobre um diagrama psicrométrico as condições climáticas de uma cidade de clima quente e úmido, não tão severo (Colima, México), juntamente com a zona de conforto da ASHRAE, como na figura 1.

Pode ser visto das linhas 6-10 na Fig.1 que de junho a outubro (a estação chuvosa em Colima) mesmo as temperaturas mínimas seriam consideradas pela zona de conforto da ASHRAE como desconfortáveis, sugerindo que o ar condicionado é necessário de forma contínua, noite e dia, em todo o verão. Em visita à Universidade de Colima, em conversas com membros da Faculdade, foi mencionado que quase nenhum edifício residencial da cidade é condicionado e que fins de noite e também inícios das manhãs são tidos como confortáveis, tanto fora como dentro, ou mesmo um tanto frios, refletindo, aparentemente, sua aclimação ao clima local.

Pesquisa sobre o efeito da aclimação e padrão de vida nas sensações de conforto e expectativas em edifícios residenciais em países quentes em desenvolvimento é limitada, embora alguns estudos possam ser mencionados (HUMPHREYS, 1975; TANABE, 1988; NICOL, 1974; WEBB, 1959). Estes estudos sugerem que há um aumento real na temperatura que as pessoas consideram aceitável quando a média anual da temperatura local é mais alta. Humphreys (1975), resumindo estudos prévios de conforto em diferentes países, derivou uma fórmula correlacionando as temperaturas “neutras” observadas em diferentes estudos com a temperatura média do ar no local durante o período experimental de cada estudo T_m .

$$T_n = 2.6 + 0.831 T_m (\text{°C}) \quad (1)^5$$

O autor desconhece estudos tratando da relação entre aclimação ao clima quente e úmido e a resposta subjetiva à alta umidade, em especial o desconforto causado pelo estado molhado da pele. Além da questão da umidade, o assunto da velocidade aceitável do ar em edifícios não condicionados merece atenção especial. Uma velocidade do ar mais alta é o “remédio” mais comum à alta temperatura, e especialmente à alta umidade. O limite da ASHRAE de 0,8m/s parece portanto ser muito restritivo quando aplicado à provisão de conforto em edifícios residenciais não condicionados em países com verões quentes.

Os efeitos da aclimação e expectativas de conforto deveriam ser levados em conta em especial quando diagramas de conforto e diretrizes de projeto de edifícios são feitos para, e aplicados em países moderadamente ou extremamente quentes e em desenvolvimento.

3. OS DIAGRAMAS BIOCLIMÁTICOS DE OLGYAY

Olgay (1963) foi o primeiro a desenvolver um diagrama bioclimático, a “carta bioclimática” (Fig. 2(a)). O diagrama tem a umidade relativa como abscissa e temperatura como ordenada. As faixas de conforto para

² e do próprio edifício, que pode variar muito mais (PEDRINI, 2015).

³ N.T. Givoni inicia fala, em seus gráficos, das condições internas que, na zona de conforto, são iguais às externas. Posteriormente, vai delimitando nos gráficos diferentes condições externas que, de acordo com a estratégia de projeto utilizada, produzem, nos interiores, condições dentro da zona de conforto.

⁴ N.T. essa delimitação se baseia em indicadores econômicos que, hoje, não se aplicam sem especiais cuidados metodológicos.

⁵ N.T. observe-se que a pesquisa que originou tal fórmula foi feita em locais mais quentes que os até então considerados pelos pesquisadores.

condições de ar estagnado, para verão e inverno, são traçadas no diagrama. As temperaturas abaixo do limite inferior da faixa de conforto são definidas como condições “subaquecidas” e acima como “sobreaquecidas”. A habilidade de estender a faixa de conforto de verão às temperaturas e umidades maiores com aumento do vento, e a habilidade de baixar a temperatura do ar pela evaporação da água, são também traçados no diagrama. Para condições subaquecidas, o diagrama especifica a quantidade desejável de radiação de ondas longas de superfícies interiores para aumentar a temperatura média radiante do ambiente. *Loops* médios diurnos das condições de temperatura e umidade para cada mês, numa dada localidade, podem ser traçados no diagrama bio-climático, assim fornecendo um diagnóstico da extensão das condições subaquecidas, confortáveis e superaquecidas do ambiente naquele local.

Outro diagrama de conforto que foi desenvolvido por Olgay é a “Programação de necessidades climáticas” (Fig.2(b)). Nesse diagrama a abcissa assinala os meses do ano e a ordenada, as horas do dia. As horas de nascer e pôr do sol, para cada mês, são também traçadas nesse diagrama. Para qualquer localidade, os períodos superaquecido, confortável e subaquecido, como determinado das curvas de condições climáticas anuais no diagrama bio-climático, podem ser assinaladas na programação de necessidades climáticas. Para os períodos subaquecidos, a quantidade de radiação de ondas longas que pode garantir a sensação de conforto pode ser transferida do diagrama bio-climático para a programação de necessidades climáticas. Para o período superaquecido, os meses e horas em que o sombreamento é necessário ou quando o vento é necessário para garantir o conforto podem ser também traçados (Figs. 2(a) e 2(b) – para Phoenix, Arizona, adaptados da ref. 2).

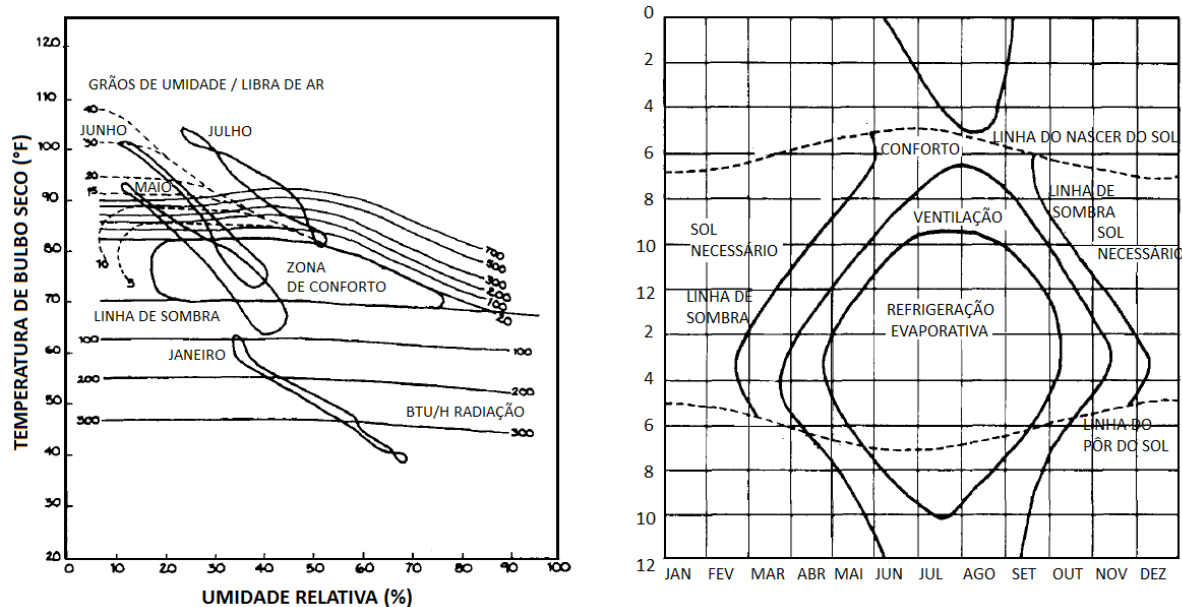


Figura 2 – os diagramas bioclimáticos de Olgay para Phoenix, Arizona. À esquerda, diagrama bioclimático. À direita, tabela horária de necessidades climáticas.

O diagrama bio-climático e a programação de necessidades climáticas são estritamente aplicáveis a condições externas, somente. Entretanto, Olgay fez o comentário de que em sua experiência, as temperaturas interiores são muito próximas do nível exterior. Assim, ele sugeriu que esses diagramas poderiam ser usados também como diretrizes, isto é, para se definir se a ventilação é ou não recomendável. Isto pode constituir razoável aproximação em edifícios leves em regiões úmidas como o leste dos EUA, onde Olgay viveu e onde os edifícios residenciais são muitas vezes naturalmente ventilados durante o verão através de janelas abertas, embora usualmente protegidas por telas.

No entanto, como observado por Givoni (1974), a temperatura interior em edifícios não condicionados, especialmente em edifícios de alta massa em regiões quentes e áridas, pode ser muito diferente das condições exteriores. A temperatura máxima diurna para o ar interior pode ser significativamente inferior (em até 7 ou 8 K) à máxima exterior, em especial se o edifício for ventilado durante a noite. À noite, a temperatura interior é usualmente mais alta que no exterior (GIVONI, 1982). Diretrizes baseadas nas condições exteriores não podem ser corretas se a real temperatura interior é considerada.

A discussão a seguir ilustra a probabilidade de diretrizes inadequadas resultarem do uso da programação de necessidades climáticas em regiões quentes e áridas. Numa região com temperatura máxima

ao redor de 35°C, umidade baixa e temperatura mínima ao redor de 17°C (típica de muitas regiões áridas), as diretrizes derivadas da Carta bioclimática e da programação de necessidades climáticas seriam: ventilar o edifício durante o dia. Durante as últimas horas da noite, os diagramas sugerem que o aquecimento radiante (e janelas fechadas para minimizar ventilação) seriam desejáveis porque a temperatura exterior, durante a noite, é abaixo do limite inferior da zona de conforto especificada nos diagramas (21°C).

Na realidade, sob as condições climáticas acima, num edifício de alta massa, bem projetado para uma região árida, a temperatura interior durante parte do máximo exterior pode ser de apenas 27°C (GIVONI, 1974; *ibid.*, s/d), como se sabe, dentro da zona de conforto do verão em regiões quentes e secas para pessoas aclimatadas ao clima quente. As temperaturas interiores noturnas podem ser em torno de 22°C, de modo que não há necessidade de aquecimento extra. A ventilação durante o dia, como é sugerido pelos diagramas de Olgay (1963), iria elevar a temperatura interior e resultar em armazenamento de calor na massa do edifício. Este calor armazenado será liberado no espaço interior durante a noite, quando o vento usualmente persiste, aumentando a probabilidade de desconforto térmico.

Uma melhor alternativa à ventilação diurna nesse clima seria fechar o edifício durante o dia e ventilá-lo somente durante a noite (quando o diagrama bioclimático na verdade iria sugerir necessidade de aquecimento), assim assegurando temperaturas interiores confortáveis noite e dia.

Diagramas alternativos, delineando possibilidades de conforto térmico interior por meios arquitetônicos usando energias “naturais” são descritos a seguir.

4. OS DIAGRAMAS BIOCLIMÁTICOS DO EDIFÍCIO

O diagrama bioclimático do edifício (BBCC) foi desenvolvido por Givoni (1976) para tratar os problemas associados com os diagramas de Olgay discutidos anteriormente. É baseado na temperatura interior nos edifícios (esperada sobre a base da experiência ou de cálculos) ao invés das temperaturas exteriores⁶. Foi, mais tarde, expandido por Milne e Givoni (1979). Pesquisa recente forneceu mais informação e uma melhor base científica para a demarcação das condições climáticas sob as quais diferentes estratégias de projeto para conforto, no verão, podem ser aplicadas. Esta informação, incluindo argumentos quantitativos sobre os quais se baseiam os novos limites sugeridos das diversas estratégias de projeto, é apresentada pela primeira vez neste artigo.

4.1 Efeitos da aclimação e padrão de moradia

Os contornos da zona de conforto e as diferentes estratégias de projeto para assegurar o conforto interior, demarcadas no diagrama BBCC, são baseados nas temperaturas interiores esperadas em edifícios sem condicionamento mecânico do ar, adequadamente projetados para o local em que são construídos.

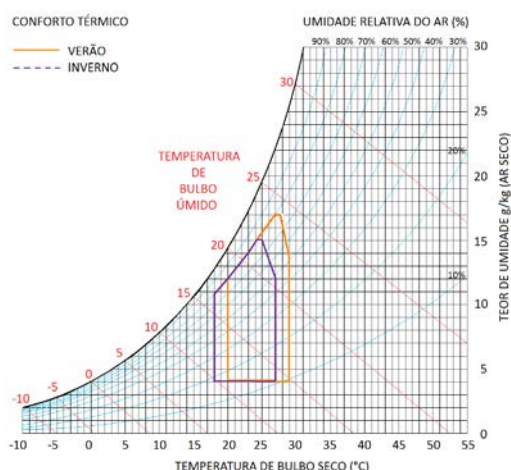


Figura 3 – Contornos para a zona de conforto para condições de ar parado, para verão e para inverno, para clima temperado e clima quente

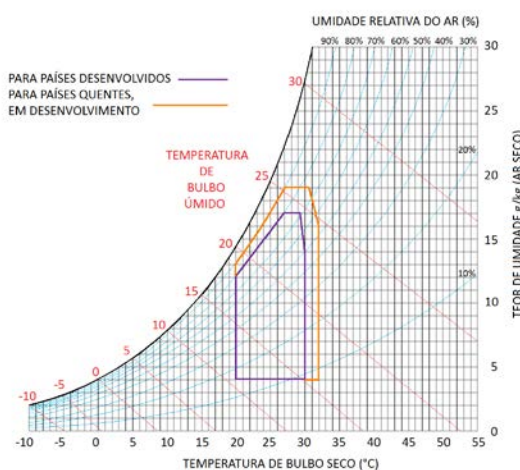


Figura 4 - Contornos da zona de conforto para edifícios ventilados

⁶ N.T. essa afirmação pode soar confusa. Os contornos representam condições externas que, combinadas com determinadas estratégias dos edifícios, produzem condições termicamente confortáveis nos interiores.

Os contornos originais de conforto do BBCC (GIVONI, 1963) foram baseados em pesquisa conduzida nos EUA, Europa e Israel. Pode se assumir que os limites superiores de temperatura e umidade aceitáveis seriam mais altos para indivíduos vivendo em países em desenvolvimento e aclimatados a condições quentes e úmidas. A extensão desses limites para a aplicação em países em desenvolvimento é sugerida na versão presente dos diagramas, considerando os dados obtidos em estudos feitos em países quentes (HUMPHREYS, 1975; MILNE E GIVONI, 1979; TANABE, 1988; WEBB, 1959).

4.2 Demarcação gráfica de estratégias de projeto

Graficamente, o BBCC difere do diagrama de Olgyay pelo fato de ser traçado sobre um diagrama psicrométrico convencional, como o diagrama ASHRAE. Diagramas parciais apresentam separadamente os contornos climáticos para aplicabilidade de diferentes alternativas passivas aplicáveis em diferentes climas. O BBCC sugere contornos das condições climáticas dentro dos quais diversas estratégias de projeto de edifícios e sistemas de refrigeração naturais fornecem conforto nos interiores.

Estas opções de refrigeração incluem a) - ventilação diurna; b) elevada massa, com ou sem ventilação noturna; c) refrigeração evaporativa direta; e d) refrigeração evaporativa indireta (por piscinas nas coberturas).

Discussão detalhada dos processos físicos, detalhes de projeto e desempenho esperado dos diversos sistemas de refrigeração natural são apresentados em outro local (GIVONI, s/d).

4.3 Condições aceitáveis na ausência de vento

A Fig. 3 mostra os contornos da faixa de condições aceitáveis para o ar na ausência de vento, sugeridos pelo autor, qual demarcado no BBCC. Diferentes contornos são marcados para o clima temperado (países desenvolvidos) e para o clima quente (países em desenvolvimento).

Os contornos de temperatura para umidades baixas e médias são independentes do nível de umidade porque nessa faixa de umidade ele não afeta o conforto de pessoas sedentárias com trajes regulares. Em umidades altas, os efeitos de temperatura e umidade são interrelacionados e o limite superior de temperatura diminui com uma alta umidade.

As faixas sugeridas de condições aceitáveis sem vento, para pessoas vivendo em países desenvolvidos, são de 18 a 25°C no inverno e 20 a 27°C no verão. Os limites superiores de temperatura são aplicáveis em níveis baixos de umidade, abaixo de um conteúdo de vapor de 10 e 12 g/kg, respectivamente, para pessoas vivendo em países desenvolvidos e em países quentes e em desenvolvimento. Sob altas umidades, o limite superior de temperatura diminui progressivamente. O limite superior de umidade, em termos de umidade absoluta, é de 15g/kg. Para pessoas vivendo em países quentes e em desenvolvimento, o autor sugere a elevação de 2°C no limite superior de temperatura e de 2 g/kg no limite superior da umidade absoluta, considerando a aclimação que resulta de se viver em edifícios sem condicionamento térmico artificial num clima quente.

4.4 A provisão de conforto mediante ventilação

Há duas maneiras pelas quais a ventilação pode melhorar o conforto. Uma é um efeito direto, em que uma velocidade mais alta do ar, ao se abrir janelas para deixar o vento entrar, aumenta a sensação de resfriamento pelas pessoas. A outra é uma maneira indireta: ventilar o edifício somente à noite e com isto refrigerar a massa interior do edifício. Durante o dia seguinte, a massa refrigerada reduz a taxa de aumento da temperatura interior. Esta estratégia é chamada resfriamento convectivo noturno.⁷

Do ponto de vista do projeto de edifício, estas duas opções pedem diferentes detalhes. Uma discussão detalhada dessas duas estratégias é apresentada em Givoni (s/d, ref.[7]).

4.5 Aumento do conforto através de ventilação diurna

A estratégia mais simples para aumento do conforto, quando a temperatura interior sob ar sem vento for percebida como muito alta, é através da ventilação diurna: fornecer conforto através de velocidades mais

⁷ N.T. Nos edifícios de escritório usuais no Brasil, que não se diferenciam substancialmente daqueles encontrados nos EUA ou Europa, faz enorme diferença a presença de revestimentos (carpete ou forro) de caráter termicamente isolante, impedindo o armazenamento de calor nas lajes.

altas do ar. O fluxo de ar exterior através do edifício estende os limites superiores de temperatura e umidade aceitáveis. No entanto, quando um edifício recebe ventilação cruzada durante o dia, a temperatura do ar interior e as superfícies seguem de perto a temperatura ambiente (N.T. exterior). Portanto, há uma questão a considerar na aplicação de ventilação diurna somente quando o conforto no interior puder ser experimentado sob a temperatura exterior, sob uma velocidade aceitável do ar interior.

A figura 4 mostra os contornos da temperatura e da umidade exteriores dentro dos quais o conforto interior pode ser atingido por ventilação natural durante o dia e com velocidade do ar ao redor de 2 m/s (uma brisa muito leve). A base para esses contornos é discutida na seção 5.1. Diretrizes de projeto de edifícios para ventilação de conforto são discutidas em diversos livros e artigos, como por ex., Givoni (1976); Givoni (s/d) e Chandra & Houston (1983).

4.6 Estratégia de conforto da refrigeração convectiva noturna

A refrigeração convectiva noturna se refere ao caso em que um edifício de elevada massa é ventilado somente durante a noite e as aberturas são fechadas durante o dia. Desta maneira, a massa estrutural do edifício é refrigerada por convecção durante a noite e é capaz de absorver o calor que penetra o edifício durante o dia com somente uma pequena elevação da temperatura interior. Sob tais condições, é possível rebaixar as temperaturas interiores médias diurnas abaixo da média exterior, como demonstrado na Fig. 5 (GIVONI, s/d).

4.6.1 Aplicabilidade climática da refrigeração convectiva noturna

O potencial para baixar a temperatura interior diurna abaixo do nível exterior é proporcional à faixa de temperatura exterior diurna (GIVONI, 1982). A faixa exterior, por sua vez, aumenta quando a umidade é mais baixa (GIVONI, 1976). Uma redução significativa da temperatura interior diurna abaixo do máximo exterior pode ser obtida somente em edifícios de elevada massa sob efetivo controle solar (N.T. conceitos não estabelecidos em termos quantitativos). Para um edifício de elevada massa, e bem isolado, fechado durante o dia e ventilado somente durante a noite, uma queda no máximo interior abaixo do máximo exterior de cerca de 45-55% da amplitude exterior é possível.

À noite, as temperaturas interiores são mais altas que as exteriores. A Fig.6 mostra os contornos climáticos, em termos das temperaturas exteriores diurnas máximas, sob os quais a refrigeração convectiva noturna é aplicável.

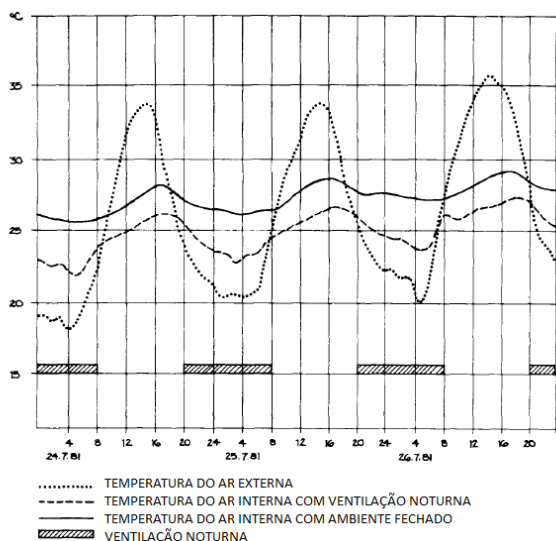


Figura 5 - temperaturas internas e externas em um edifício em Negev (Israel)

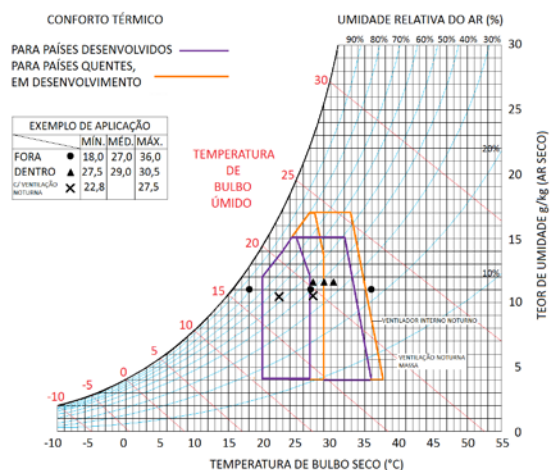


Figura 6 –Contornos de condições climáticas sob as quais se utiliza refrigeração noturna convectiva pode manter aceitáveis as temperaturas diurnas

A Fig. 6 mostra os contornos climáticos, em termos de temperaturas exteriores máximas diárias, sob os quais a refrigeração convectiva noturna é aplicável. O limite de temperatura é reduzido se a umidade for mais alta (GIVONI, 1976). O aumento da velocidade do ar por ventiladores interiores⁸ pode estender a faixa de conforto interior, sem elevar a temperatura interior. Um procedimento simples para estimar as temperaturas esperadas máximas e mínimas para os interiores em edifícios de elevada massa, seja fechados

⁸ N.T. não por ventilação cruzada ou por efeito chaminé.

todo o tempo ou ventilados durante a noite, é apresentado na seção 5.2. A Fig. 6 contém um exemplo numérico tabulado da aplicação desse procedimento. A refrigeração convectiva é aplicável principalmente em regiões áridas e desérticas onde a temperatura máxima é abaixo de cerca de 36°C. Em regiões desérticas com temperaturas diurnas acima de 36°C, a ventilação noturna somente não iria manter a temperatura interior diurna num nível aceitável e outros sistemas passivos de refrigeração deveriam ser aplicados durante as horas quentes, tais como a refrigeração evaporativa (como discutido abaixo) ou condicionamento do ar por compressão ou absorção⁹. Mas mesmo nesse caso a aplicação da refrigeração convectiva noturna pode reduzir significativamente o comprimento dos períodos e duração do tempo em que sistemas de refrigeração adicionais serão necessários.

Como um princípio geral, pode se estimar que em regiões áridas e desérticas, com uma amplitude de temperatura diurna de verão de 15 a 20K, a redução esperada da temperatura interior máxima pode ser ao redor de 6 a 8 K abaixo do máximo exterior. Em dias muito quentes, que usualmente têm uma amplitude diurna maior, a queda de temperatura interior, durante o período da máxima exterior, pode ser de até 10K.

4.7 Refrigeração evaporativa

A energia consumida no processo de evaporação da água pode ser utilizada em duas diferentes maneiras para refrigerar edifícios. Uma delas é pela refrigeração evaporativa direta do ar exterior, que então é introduzido no edifício. A temperatura do ar interior é rebaixada e seu conteúdo de vapor de água é elevado, seguindo uma temperatura de bulbo úmido constante. A segunda é indireta: o telhado do edifício pode ser refrigerado evaporativamente tendo uma piscina sombreada sobre o telhado, e o forro atua como um elemento passivo de refrigeração, que é muito efetivo, sobre o espaço subjacente.¹⁰

4.7.1. Refrigeração evaporativa direta

A refrigeração evaporativa direta do ar pode ser realizada ou por sistemas mecânicos (Swamp Coolers ou Desert Coolers) ou por meios passivos, tais como a torre de refrigeração de Cunningham e Thompson (1986). Na refrigeração evaporativa direta, a temperatura do ar é reduzida em 70 a 80% da depressão da temperatura de bulbo úmido, precisamente a diferença entre a temperatura de bulbo seco e a de bulbo úmido. Assim, o critério climático para a aplicabilidade da refrigeração evaporativa é a temperatura de bulbo úmido ambiente, e uma grande depressão dela, característica de um clima quente e seco.

A refrigeração evaporativa envolve altas taxas de troca de ar com o exterior, devido à alta umidade do ar refrigerado. Como um resultado dessa alta taxa, as temperaturas interiores do ar e das superfícies são governadas principalmente pela temperatura do ar refrigerado. Temperaturas típicas do ar interior num edifício bem isolado são somente 1 a 2°C acima do ar que sai do refrigerador evaporativo.

Por exemplo, Cunningham e Thompson (1986) mediram temperaturas do ar saindo de uma torre de evaporação e a temperatura do ar interior num edifício leve refrigerado por tal sistema. Com temperatura exterior máxima de 40,5°C e uma temperatura de bulbo seco de 21,3°C, e com cerca de 30 trocas de ar por hora (GIVONI, 1991), a temperatura do ar saindo da torre era de 23,8°C, e a média da temperatura interior do ar era de 24,6°C. Em edifícios de elevada massa, com uma flutuação de temperatura menor e um atraso térmico maior, a temperatura interior durante as horas mais quentes seria ainda mais próxima da temperatura do ar refrigerado.

Considerando os efeitos opostos no conforto causados pela alta umidade do ar interior e pela mais alta velocidade do ar associada com a refrigeração evaporativa direta, sugere-se que esta deva ser usada, em países em desenvolvimento, somente onde e quando o máximo da temperatura de bulbo úmido no verão for em torno de 22°C e a temperatura de bulbo seco for, no máximo, 42°C. Sob tais condições, a temperatura do ar que sai do sistema evaporativo seria de cerca de 25 a 27°C e a temperatura média do ar interior seria de 27 a 29°C. Em países quentes e secos, em desenvolvimento, considerando a aclimação, os limites sugeridos são de 24°C (temperatura de bulbo úmido) e 44°C (temperatura de bulbo seco). Tais contornos são delineados na figura 7.

4.7.2 Refrigeração evaporativa indireta através de piscinas na cobertura

A refrigeração evaporativa pode ser passiva e indireta, por exemplo, através de uma piscina¹¹ sombreada sobre um telhado não isolado¹². O telhado deveria ser, certamente, isolado¹³ durante o inverno. Detalhes

⁹ N.T. rigorosamente, não se trata de sistemas passivos.

¹⁰ N.T. poderiam ser citados, também, a borrifação de água sobre o telhado, por exemplo, ou sistema de gotejamento, e ainda coberturas verdes.

¹¹ N.T. ou melhor, um espelho de água.

¹² N.T. termicamente.

¹³ N.T. termicamente.

sobre possíveis soluções de projeto para o isolamento de piscinas de cobertura são apresentados em Givoni (s/d). um modelo matemático para o cálculo das temperaturas internas de um edifício refrigerado por uma piscina na cobertura são apresentados na ref. 9.

A temperatura da água na piscina segue de perto a média da temperatura de bulbo úmido no ambiente, com alguma elevação e flutuação que dependem da profundidade da água na piscina. O teto, refrigerado pela condução de calor para a água, atua como um painel de refrigeração radiante e convectiva para o espaço subjacente. Assim, a temperatura do ar interior, assim como a temperatura radiante, podem ser baixadas sem que se eleve o grau de umidade no interior. Com uma piscina sobre um telhado condutivo, a troca de calor entre o forro refrigerado e o espaço interior subjacente é maximizada, permitindo refrigeração satisfatória mesmo com uma pequena diferença de 2 a 3K entre o ar interior e as temperaturas do teto (GIVONI, 1982; GIVONI, s/d). Em regiões secas, a amplitude diurna da temperatura de bulbo úmido é de 5 a 6K. Como as temperaturas da água e do teto, no caso de um telhado condutivo, seguem a temperatura de bulbo úmido média diurna, aquelas estão frequentemente abaixo da máxima temperatura de bulbo úmido. Como a umidade interior não é elevada pela refrigeração evaporativa indireta e a velocidade do ar interior pode ser aumentada por ventiladores internos, é possível aplicar a refrigeração por piscina no telhado em locais onde a máxima TBU é mais alta, em cerca de 2°C, que os limites de aplicabilidade para a refrigeração evaporativa direta, como se sabe, em países em desenvolvimento, uma TBU de 24°C e uma TBS de 44°C. A razão é que um maior ganho térmico através de paredes menos isoladas pode ser assumido em países em desenvolvimento, contrabalançando o efeito da aclimação. Em consequência, os limites de aplicabilidade para países quentes em desenvolvimento, como marcado na Fig. 7, também são uma TBU máxima de 24°C e uma TBS máxima de 44°C¹⁴.

4.8 As formas completas dos diagramas bioclimáticos

A Fig.8 mostra as diferentes estratégias de projeto e contornos para as abordagens passivas, sugeridas para países desenvolvidos. A Fig.9 mostra os mesmos dados para países quentes em desenvolvimento. Tais figuras também mostram as condições climáticas sob as quais mais de uma estratégia pode ser aplicada.

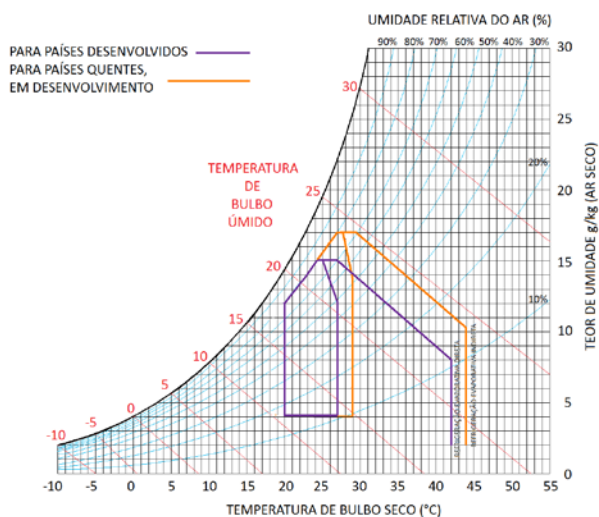


Figura 7 - Contornos das condições climáticas em que refrigeração evaporativa direta e indireta (piscina na cobertura) são aplicáveis.

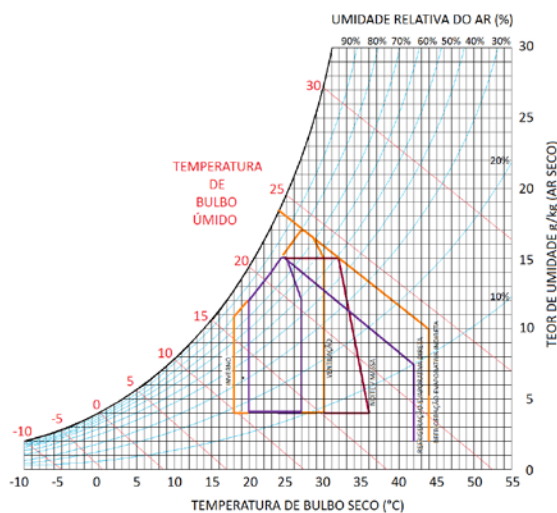


Figura 8 - Diferentes estratégias e contornos do aquecimento solar passivo e refrigeração natural de países desenvolvidos

5. DADOS E ARRAZOADO DE APOIO

Esta seção fornece argumentos adicionais e informação quantitativa para os contornos sugeridos da zona de conforto e para as estratégias de ventilação noturna e refrigeração evaporativa, como demarcado nos diagramas bioclimáticos do edifício.

¹⁴ N.T. mediante umidade relativa de 15% somente.

5.1. A zona de conforto: extensão da zona de conforto por maiores velocidades do ar

O novo diagrama da temperatura efetiva (ASHRAE, 1985) mostra um deslocamento do limite superior da sensação de conforto de 27 para 29,7°C, quando a velocidade do ar aumenta de 0,1 a 1,5 m/s. Num estudo de Wu (1988), a temperatura de 90°F (32,2°C) com TBU de 69°F (10,5°C)¹⁵ foi considerada confortável com velocidade do ar de 1,5 m/s. Tanabe (1988) estudou as reações com relação ao conforto de indivíduos japoneses sujeitos a diferentes velocidades ao ar, até 1,6 m/s e sob temperaturas de 27°C a 31°C com umidade relativa do ar de 50%. A velocidade preferencial para o ar a 31°C¹⁶ era de 1,6 m/s Tanabe também cita um estudo de McIntyre (1978), no qual os indivíduos foram autorizados a regular a velocidade de ventiladores de teto: os indivíduos aumentaram a velocidade do ar até 2m/s sob uma temperatura de 30°C. Numa pesquisa fisiológica abrangente (GIVONI, 1963), os efeitos da velocidade do ar sobre o conforto e sensação geral de agradabilidade foram monitorados até uma velocidade de 4 m/s. Numa temperatura do ar de 30°C e uma velocidade de 2m/s, os indivíduos estavam confortáveis, sem notar o vento excessivo. Portanto, sugere-se que com uma velocidade do ar interior de 2m/s, a zona de conforto poderia ser estendida até cerca de 30°C nos países desenvolvidos. Para pessoas aclimatadas ao clima quente em países em desenvolvimento, o limite superior de temperatura sugerido com uma velocidade do ar de 2m/s seria mais alto, de 32°C.

5.2 Refrigeração convectiva noturna

Um edifício pode manter temperaturas diurnas abaixo do nível externo somente se tem suficiente massa térmica e resistência térmica, e é protegido contra a radiação solar que é absorvida e o penetra. Em tal edifício, a temperatura diurna tem oscilação muito pequena, e a temperatura diurna é inferior àquela verificada no exterior.

O potencial climático para se baixar a temperatura interior existe principalmente em regiões com grandes amplitudes da temperatura diurna na estação de verão. Revisando a distribuição de amplitudes em diferentes regiões do planeta, Givoni (1976) encontrou uma relação quantitativa entre a pressão de vapor (vp)¹⁷ e as amplitudes diurnas (AD) caracterizando as diferentes regiões, a saber:

$$AD (K) = 26 - 0,83 \text{ vp (mm Hg)} \quad (2)$$

Então, por ex., num deserto muito seco com uma pressão de vapor, no verão, de cerca de 7 a 8 mm Hg, a amplitude térmica diurna esperada seria de 20K, e em regiões secas com uma pressão de vapor de cerca de 12 mm Hg, a amplitude térmica esperada seria de cerca de 16K, enquanto numa região úmida com pressão de vapor de 22 mm Hg a amplitude esperada seria de somente 8K. Deveria ser notado, no entanto, que esta é somente uma relação estatística e em qualquer localidade dada a amplitude térmica real deveria ser considerada¹⁸.

A flutuação da temperatura interior num edifício de elevada massa e bem isolado, com mínimo aquecimento pela radiação solar, é de cerca de 10 a 20% da amplitude térmica exterior. Como foi medido em estudos experimentais conduzidos no Technion em Haifa (GIVONI, 1976) e no Institute for Desert Research em Sede Boquer, Israel (GIVONI, 1982) a temperatura interior média em tais edifícios, quando fechados dia e noite, seria de cerca de 1 a 2 °C sobre a média exterior (média da máxima e da mínima) devido a alguma radiação solar absorvida, e geração interna de calor. Assim, admitindo a elevação média da temperatura interior em 1,5°C, temos:

$$T_m(\text{int}) = 1,5 + T_m(\text{ext}) \quad (3)^{19}$$

Portanto, para uma oscilação interior AD de 15% da amplitude térmica exterior, é possível estimar a máxima e a mínima interiores, $T_{\text{max}}(\text{in})$ e $T_{\text{min}}(\text{in})$ de edifícios fechados dia e noite, usando a fórmula seguinte:

$$T_{\text{max}}(\text{in}) = T_m(\text{in}) + 1,5 + 0,075 \text{ DT} \quad (4)$$

$$T_{\text{min}}(\text{in}) = T_m(\text{in}) + 1,5 - 0,075 \text{ DT} \quad (5)$$

A ventilação de um edifício de elevada massa, bem isolado, abaixa tanto a temperatura interior

¹⁵N.T. na verdade, são 20,5°C a 30% de umidade relativa.

¹⁶N.T. provavelmente fatores culturais e até prosaicos influenciam tal escolha.

¹⁷ N.T. é a mesma coisa, em termos práticos, que a umidade absoluta.

¹⁸N.T. a variação temporal, num clima temperado, pode ser relevante também; maior parte do território brasileiro apresenta duas estações bem definidas, úmida e seca.

¹⁹ N.T. em geral, é arriscado admitir um valor fixo.

noturna como a temperatura interior diurna no dia seguinte. Do ponto de vista do conforto, a redução da temperatura interior máxima pela ventilação noturna (seu efeito residual) é o fator mais importante. Foi demonstrado num extensivo estudo do Institute for Desert Research em Israel (GIVONI, s/d), exemplificado na Fig.5, que a temperatura interior mínima de um edifício de elevada massa, $T_{min}(vent)$, pode ser baixada por ventilação noturna, abaixo do nível de um edifício não-ventilado, $T_{min}(no-vent)$, em cerca de metade da diferença entre a temperatura mínima do edifício não ventilado e o mínimo exterior, $T_a(min)$, portanto:

$$T_{min}(vent) = T_{min}(no-vent) - 0,5[T_{min}(no-vent)-T_a(min)] \quad (6)^{20}$$

A queda na temperatura interior de um edifício noturnamente ventilado, $T_{max}(vent)$, abaixo da máxima de um edifício não ventilado, $T_{max}(no-vent)$, é menor: cerca de metade da queda na temperatura mínima. Assim:

$$T_m(vent) = T_{max}(no-vent) - 0,25(T_m(no-vent) - T_a(max)) \quad (7)^{21}$$

Tais procedimentos para estimar as temperaturas mínima e a máxima interiores de edifícios refrigerados por ventilação noturna são aplicáveis a edifícios de massa média a elevada, com cores externas claras e protegidos da penetração da radiação solar através das janelas. Admite-se que as condições exteriores sejam estavelmente periódicas, isto é, cerca das mesmas mínimas e máximas temperaturas repetidas dia após dia. Durante os períodos de aumento das temperaturas exteriores, isto é, onda de calor que permanece por diversos dias, a taxa de elevação da temperatura interior é menor que aquela verificada no exterior, mesmo num edifício intermediário em massa (como monitorado por Wu (1990)) e especialmente num edifício de elevada massa. Como um resultado, as temperaturas interiores durante o período de onda de calor serão algo inferiores àquelas previstas pelas fórmulas acima, e durante um período de queda das temperaturas exteriores, as temperaturas interiores serão tão altas quanto aquelas previstas. Consequentemente, as médias das máximas mensais poderão ser usadas como dado de entrada ao se estimar os contornos climáticos para a aplicação da ventilação noturna.²²

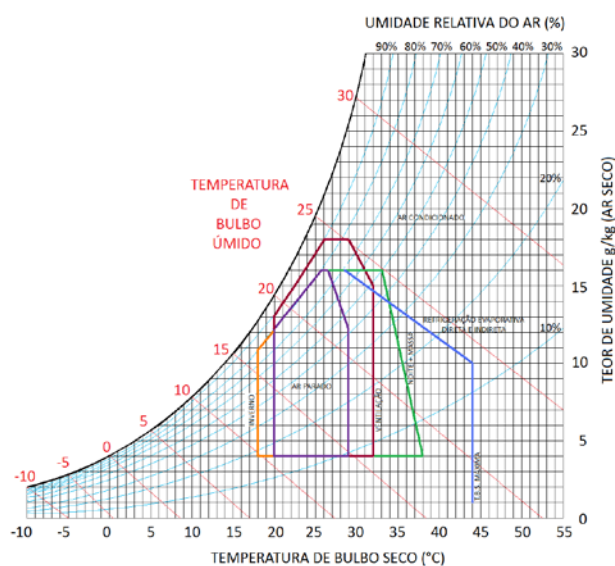


Figura 9 - Diferentes estratégias e contornos para aquecimento solar passivo e refrigeração natural países quentes em desenvolvimento

Embora não seja desejável ventilação diurna com ar exterior quente em edifícios refrigerados por ventilação noturna, o limite de conforto interior pode ser estendido mediante ventiladores internos (por ex., de teto) a cerca de 30°C em países desenvolvidos e cerca de 32°C em países quentes em desenvolvimento. Dessa maneira, o limite superior do conforto é estendido sem aquecimento do interior do edifício pela ventilação diurna.

Considerando as relações entre pressão de vapor ambiente e amplitude térmica exterior no verão, e entre a temperatura máxima interior e a amplitude térmica exterior, descritas acima, os diagramas bioclimáticos do edifício especificam as máximas exteriores sob as quais o conforto interior pode ser mantido num edifício bem projetado, como função da pressão de vapor no ambiente²³.

Isto é apresentado na Fig. 6, juntamente com um exemplo de cálculos simplificados (eq.(4) a (7)) que

²⁰ N.T. esta observação deve ser relativizada, pois em edifícios em que, nos interiores, se utiliza revestimento com materiais termicamente isolantes – carpete, piso em madeira e, principalmente, forros de absorção acústica como papelão aglomerado, o efeito da ventilação noturna não será quase aproveitado.

²¹ N.T era de se esperar, pois a mínima interior acontece durante a manhã e simultaneamente à ventilação do interior do edifício, e a máxima acontece durante o final do dia, mais afastada no tempo da operação de ventilação.

²²N.T. preocupação predominante do autor é o desconforto sob clima quente.

²³N.T. no ambiente = exterior.

produzem uma estimativa das temperaturas interiores. Neste exemplo, assume-se que a mínima, a máxima e a média sejam 18, 36 e 27 °C respectivamente. A temperatura média interior é elevada pela radiação solar e pela geração interna de calor a 29°C. A oscilação de temperatura interior num edifício de elevada massa fechado dia e noite, de cerca de 17% da oscilação exterior, é 3K, resultando em mínima e máxima de 27,5 e 30,5°C respectivamente. A ventilação noturna abaixa as temperaturas mínima e máxima, de acordo com as eq. (4) e (5), a 22,8 e 27,5°C, respectivamente.

5.3 Refrigeração evaporativa

Como a resposta das temperaturas interiores a mudanças nas condições exteriores num edifício refrigerado pela refrigeração evaporativa direta é quase instantânea, a temperatura exterior do ar hora a hora e a TBU são as “forças propulsoras” relevantes na avaliação da aplicabilidade desse sistema de refrigeração e das condições esperadas para o interior. A “força propulsora” que controla as temperaturas interiores num edifício refrigerado por uma piscina no telhado é a temperatura da água na piscina, que segue a TBU ambiente. Com suficiente profundidade da água, por ex., mais de 20cm, a amplitude da temperatura da água é, antes, pequena, de modo que a temperatura da água durante as horas mais quentes do dia fica abaixo da TBU ambiente. Tal fator, somado ao fato que o conteúdo em vapor no interior não é elevado pela piscina no telhado, permite uso da refrigeração evaporativa indireta além dos limites da aplicabilidade da refrigeração evaporativa direta.

Um modelo matemático para prever as temperaturas mínima e máxima interiores de um edifício refrigerado por uma piscina no telhado foi desenvolvido por Givoni (1982). Um modelo matemático prevendo o desempenho de uma torre de refrigeração passiva também foi desenvolvido (1991).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em acréscimo à tradução do artigo de Givoni (1992), cumpre fazer algumas considerações. O artigo procurava mostrar que a zona de conforto da ASHRAE, se tinha a pretensão de um caráter universal, referia-se a uma realidade climática específica e à condição particular de dispor de condicionamento mecânico de ar. O diagrama bioclimático do edifício, pelo seu poder de síntese e apelo visual, tornou-se uma ferramenta muito popular entre pesquisadores e projetistas, no Brasil. Há de se advertir, no entanto, que tal diagrama também foi construído sobre uma perspectiva específica, aquela dos países quentes e secos, representados principalmente por Israel, cujas construções tradicionais se valem de altos valores de capacidade térmica, de aberturas reduzidas e profundas, sem fechamento de vidro (que causa efeito-estufa) e acopladas com o solo. É uma certamente mais ampla que a da ASHRAE à época, mas ainda assim não é capaz de abarcar todas as outras situações que ocorrem no mundo, a começar pela realidade climática, arquitetônica e cultural brasileira.

Considere-se, primeiramente, que no Brasil se representam o clima tropical úmido e seco, além do clima temperado.

Depois, que a prática de construção inclui construções tradicionais, leves de madeira (comuns tanto entre os colonizadores italianos e alemães do Sul, como entre a população ribeirinha da Amazônia) e construções mais urbanas e mais recentes, de capacidade térmica média, de alvenaria de tijolos furados, telhas leves e aberturas envidraçadas (contrariando a prática anterior à vinda da Família Real portuguesa de fechar aberturas com muxarabis). A influência do Movimento Moderno se faz sentir no uso de largas janelas, de concreto armado e pilotis, afastando enfaticamente a realidade das edificações urbanas daquela realidade considerada por Givoni (1992).

Tal autor se voltou, aparentemente, para edificações residenciais; no entanto, não faz tal delimitação de forma clara. Recomendações sobre ventilação mecânica à noite possivelmente consideram a ausência de pessoas na edificação, ou no recinto ventilado, já que os valores de ventilação considerados para efetiva troca de calor entre as paredes internas pesadas e o ar são provavelmente acima dos limites toleráveis para o sono.

Em especial, demanda consideração a faixa do diagrama bioclimático que se situa à esquerda da zona de conforto, para cujos limites Givoni (1992) não oferece qualquer explicação.

Finalmente, alerta-se para a necessidade de se prosseguir o entendimento das edificações mais usuais no Brasil e sua representação mais realista no diagrama bioclimático.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings* 18 (1992), pp. 11-23
- GIVONI, B. Comfort, Climate Analysis and Building Design Guidelines. *Energy & Buildings* 18, pp. 11-23 (1992).
- GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture**. Applied Science Publishers, London, 2ª. Ed. (1976).
- OLGYAY, V. **Design With Climate**, Princeton University Press (1963).
- American Society of Heating, Ventilation, Air Conditioning Engineers – ASHRAE. Physiological principles for comfort and health, ASHRAE Fundamentals Handbook, Cap. 8 (1985).
- HUMPHREYS, M.A. **Field studies of thermal comfort compared and applied**, Current Paper CP76/75, Building Research Establishment, Garston, Watford, UK.
- MILNE, M. and GIVONI, B. Architectural design based on climate, in D. Watson (ed.), **Energy Conservation Through Building Design**, McGraw-Hill, New York, Cap. 6. (1979).
- TANABE, S. I. **Thermal Comfort Requirement in Japan**, Waseda University, Tokyo, Japan (1988).
- NICOL, J. F. An analysis of some observations of thermal comfort in Roorkee, India and Baghdad, Iraq, **Ann. Hum.Biol.**, 1, pp. 411-426(1974).
- WEBB, G.W. An analysis of some observations of thermal comfort in an equatorial climate, **Br. J. Indust. Med.**, 16, pp. 297-310 (1959).
- GIVONI, B. Passive indirect evaporative cooling by shaded roof ponds -- a mathematical model, **Proc. PLEA First Int.Conf.**, Bermuda, Pergamon, Oxford, pp. 13/1-13/7 (1982).
- GIVONI, B. Performance and applicability of passive cooling system, to be published in **Energy Build**.
- GIVONI, B. **Evaluation of the effect of climate on man: development of a new thermal index**, Ph.D. Thesis, School of Medicine, University of Jerusalem, Israel (1963).
- CHANDRA, S. FAIRY, P. and HOUSTON, M. **A Handbook for Designing Ventilated Buildings**, Florida Solar Energy Center, Cape Canaveral, FL (1983).
- CUNNINGHAM, W.A. and THOMPSON, T.L., Passive cooling with a natural draft cooling tower in combination with a solar chimney, **Proc. Conf. Passive and Low Energy Architecture (PLEA)**, Pecs, Hungary (1986).
- GIVONI, B., Modelling a passive evaporative cooling tower, **Proc. World Solar Congress**, Denver, CO, August, Pergamon, Oxford, pp. 3067-3071 (1991).
- WU, H. **The potential use and application of oscillating fans in extending the summer comfort envelope**, Research Rep. Environmental Testing Laboratory, Arizona State University, Tempe, AZ (1988).
- MCINTYRE, D.A. Preferred air speeds for comfort in warm conditions, **ASHRAE Trans.**, 84, pp. 264-277 (1978).
- WU, H. **Moisture up-take and energy efficiency associated with the use of evaporative coolers**, Research Rep., Environmental Testing Laboratory, Arizona State University, Tempe, AZ (1990).
- PEDRINI, A. Comunicação pessoal (2015).