

TECNOLOGIAS APROPRIADAS E O CONFORTO AMBIENTAL

Eduardo Krüger

1. INTRODUÇÃO

Desde seus primórdios, construir teve como função criar uma proteção contra as intempéries e contra invasores. Esta função primitiva tinha como objetivo separar o conjunto material e espiritual, que constitui a vida do homem, da influência direta e da inclemência da natureza (PUPPO & PUPPO, 1979).

A busca por um abrigo, entretanto, não seguiu necessariamente um processo racional. Até mesmo no mundo dos insetos, observa-se certa complexidade e coordenação em tocas, como, por exemplo, no caso das colmeias de abelhas, que conservam o calor em seu interior, praticamente sem alterações, ao longo do ano. Outros exemplos podem ser notados na natureza. A atmosfera que envolve nosso planeta pode ser vista como uma fachada inteligente, que impede a entrada de radiação danosa e permite a entrada de luz e calor, essenciais à vida humana. A distribuição de energia das zonas quentes para as frias se dá através de ventos e correntes, em um sistema fechado, guiado pelo Sol, utilizando diversas formas de absorver e reter calor. Árvores também são um interessante exemplo de um sistema natural perfeitamente adequado às condições existentes. Uma árvore consegue atingir grandes resultados com um mínimo de recursos próprios, através da luz, da água, do ar e dos alimentos. Para que ela consiga garantir sua sobrevivência, deve-se adaptar perfeitamente ao local onde está inserida. Suas folhas podem ser vistas, numa analogia, como um elemento de fachada. Sendo um órgão de geração da fotossíntese, a folha serve não apenas para a absorção de dióxido de carbono, mas também para a retenção de luz solar.

Na arquitetura tradicional (vernacular), a adaptação aos elementos externos imediatos, como a disponibilidade de materiais e as características climáticas, desenvolveu-se juntamente com o conhecimento de técnicas construtivas através do processo de tentativa e erro. As bases da denominada Arquitetura Bioclimática remontam a Vitruvius, na Roma Antiga, com o seu tratado *De Architectura*, um compêndio de dez livros de enorme influência sobre as mentes de diversos arquitetos posteriores a ele, datado de aproximadamente 31 a 27 A.C.. Enquanto que o livro I se refere à formação do arquiteto e das aptidões necessárias para exercer essa profissão, o livro II oferece um histórico e um excuro sobre a natureza dos materiais, os livros III, IV, V e VII discorrem sobre aspectos decorativos e de desenho de templos e prédios públicos e os livros VIII, IX e X tratam de temas de engenharia como a construção de moinhos e outros engenhos mecânicos, o livro VI trata a relação do clima e da arquitetura (LANDELS, 1978).

Os edifícios privados estarão bem dispostos, se desde o princípio se tem em conta o clima dos lugares onde se constrói, pois não há dúvida que devem ser distintos os edifícios que se faz no Egito dos que se faz na Espanha [...].
(Vitruvius - Livro VI)

Dada a importância da relação entre os elementos climáticos e a arquitetura, faz-se então necessário estipular os padrões ótimos de habitabilidade no ambiente interno, no que se refere às condições biotérmicas, lumínicas, acústicas e respiratórias (PUPPO & PUPPO, op. cit.). Desta forma, uma vez definidas as exigências do meio interno, é possível projetar de modo consciente.

Basicamente, divide-se o conforto ambiental em conforto térmico, lumínico, sonoro e ergonômico. Contudo, em locais de clima predominantemente tropical, como é o caso do Brasil, posicionam-se as condições de conforto térmico em primeiro plano em relação às demais. Neste artigo, pretende-se apresentar um panorama histórico sobre a área de investigação do conforto térmico. Serão discutidos tanto aspectos fisiológicos do ser humano, quanto aspectos do clima e da edificação, explicitando a interdependência desses três fatores numa área puramente multidisciplinar. Por fim, é apresentada a arquitetura bioclimática e a climatização natural, importantes estratégias para a geração de tecnologias apropriadas na habitação.

2. A PROCURA PELO ABRIGO

A procura por um abrigo deu-se de forma rudimentar já na era das cavernas. Por um conjunto de fatores, tais como a necessidade de defesa contra tribos invasoras e animais selvagens e de proteção face aos elementos climáticos, o homem primitivo procurou abrigo nas cavernas. O aspecto nômádico das comunidades não criava condições para a formação de um abrigo permanente, mas a necessidade de manter constante a temperatura de seu corpo, contribuiu certamente para que o homem, animal homeotérmico, procurasse por uma proteção. Com o sedentarismo, inicia-se a evolução das técnicas construtivas paralelamente ao desenvolvimento das primeiras sociedades.

O processo intuitivo de adequação ao clima é então revestido da razão, com as contribuições de alguns gregos renomados como Aristóteles, Xenofonte e Hipócrates e principalmente através dos escritos de Vitruvius.

A partir daí, entretanto, a evolução da arquitetura não segue puramente os preceitos vitruvianos. Ironicamente, o próprio Império Romano pode ser visto como um dos primeiros exportadores de tecnologia, usando de mesmas técnicas construtivas em locais de características diversas. Isso também é verificado na Renascença, com a disseminação de palácios de características idênticas em regiões tão diferentes como a Lombardia ou Londres, em forte contraste com a variedade de edificações tradicionais observada numa área pequena como a Toscana ou a Costa do Mar Negro (MARKUS & MORRIS, 1980).

Com o advento da Revolução Industrial, a introdução de novos materiais na construção civil como o vidro e o aço favorecem a criação de um estilo internacional, em que tendências arquitetônicas passam a ser difundidas de forma global. Quanto às desvantagens térmicas de, por exemplo, um prédio com fachadas de vidro, estas podiam ser contornadas através de sistemas de condicionamento artificial. Em 1970, FANGER ainda imagina um futuro descrito também por R. Buckminster Fuller (PUPPO & PUPPO, op. cit.), no qual gigantescas redomas de vidro criariam artificialmente as condições climáticas de áreas urbanas inteiras. Em uma escala um pouco menor, isso já é verificado nos modernos shoppings centers climatizados, em substituição às tradicionais ruas de comércio, ao ar livre.

A crise do petróleo de 1973, entretanto, mostrou a necessidade de se conservar recursos energéticos, o que significava voltar os olhos para a arquitetura tradicional. A arquitetura ecológica passou a ser almejada, como parte de um movimento maior que procura agredir menos o meio ambiente, com vistas a garantir o bem-estar das gerações futuras. Enquanto que o estudo do conforto térmico, até então, estava atrelado à otimização de sistemas de climatização artificial, é no contexto ambiental que a arquitetura bioclimática alcança sua maior relevância.

3. CONFORTO TÉRMICO

Os primeiros estudos relacionados aos parâmetros definidores da sensação de conforto térmico datam do século XIX. Com a Revolução Industrial, o aumento do número de acidentes e doenças geradas na indústria têxtil, na mineração e na metalurgia foram responsáveis pelas primeiras investigações no assunto, tendo como objetivo não exatamente a saúde do trabalhador, mas o aumento da produtividade industrial. Heberden, em 1826, foi um dos primeiros cientistas que relacionou a sensação de conforto a outros fatores, além da temperatura do ar. O primeiro estudo de alguma relevância, entretanto, é de Haldane e data de 1905.

Através de pesquisas empíricas, a sistematização dos conhecimentos nesta nova área de investigação iniciou-se com o trabalho de Houghton e Yaglou, como parte de diversos estudos para a ASHVE (American Society for Heating and Ventilation Engineers). O objetivo, neste caso, era otimizar as condições de operação de condicionadores de ar. Pesquisas analíticas surgiram com Winslow, Herrington e Gagge, em 1937.

Nos anos sessenta, os irmãos Olgyay (OLGYAY, 1963) foram os primeiros a criar um procedimento sistemático que possibilitou uma adaptação de uma edificação às necessidades humanas com relação às condições climáticas. O método proposto faz uso de uma Carta Bioclimática (Figura 1), onde é mostrada a zona de conforto humano em relação a temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, radiação solar e resfriamento por evaporação (GIVONI, 1976). Aplicando o método de Olgyay, o projetista, ao realizar uma análise climática do local onde pretende construir, pode visualizar as principais dificuldades (de desconforto por calor ou frio) a serem contornadas através de um projeto adequado.

Em 1970, FANGER realiza uma importante contribuição na área de investigação relacionada aos estudos fisiológicos da sensação de conforto. O trabalho está voltado à aplicação de parâmetros de conforto na indústria de ar-condicionado. Os estudos foram realizados quando o impacto do primeiro choque de petróleo ainda não havia ocorrido na arquitetura e o condicionamento artificial não era visto de forma negativa. No entanto, já há a visão da área como necessariamente inter e multidisciplinar. No prefácio de sua obra de referência *Thermal Comfort* (FANGER, 1970), são citadas as diversas disciplinas envolvidas no estudo do conforto térmico: transferência de calor e massa, fisiologia e psicofísica, ergonomia, biometeorologia, arquitetura e engenharia têxtil.

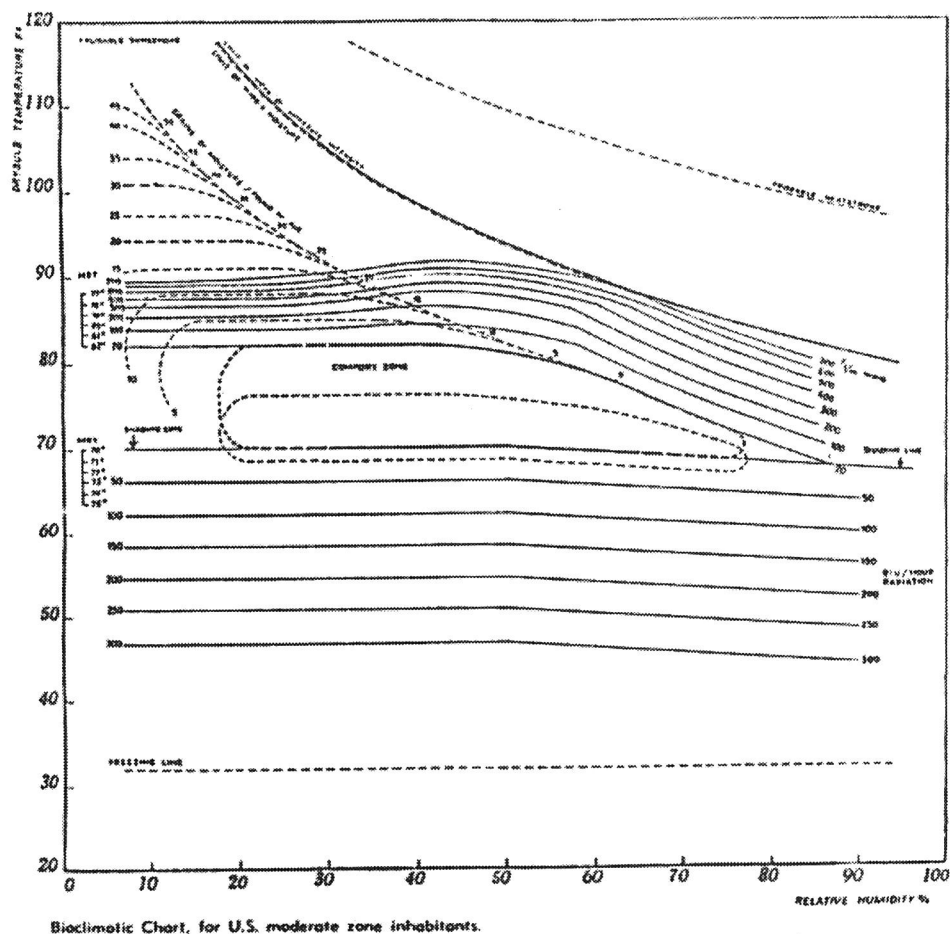


Figura 1: Diagrama Bioclimático de Olgyay (1963), com a zona de conforto (pontilhada), temperatura do ar na ordenada e umidade relativa na abcissa

Na segunda edição de *Man, Climate and Architecture*, GIVONI (1976), em plena crise energética, ressaltava a importância da conservação de energia e de recursos naturais na arquitetura e a obra torna-se uma referência para arquitetos, engenheiros e projetistas preocupados com novos caminhos para a arquitetura. O denominado método de Givoni faz uso de um “diagrama bioclimático da edificação”, facilitando a análise climática e de alternativas de projeto. O método de Givoni, apesar de ter sofrido algumas alterações, é até hoje adotado em avaliações de desempenho térmico em edificações e é o método utilizado na elaboração da Norma de Conforto Térmico (RORIZ et al., 1999), que, futuramente, poderá vir a ser uma importante ferramenta para arquitetos, engenheiros e projetistas no Brasil.

4. ASPECTOS OBJETIVOS E SUBJETIVOS DA SENSÇÃO DE CONFORTO

A sensação de conforto térmico é definida como “o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico” (ASHRAE, 1981). Essa própria definição indica que a sensação de conforto depende tanto de aspectos físicos do ambiente (o ambiente térmico) como também de aspectos subjetivos (o estado de espírito).

A base do entendimento dos aspectos físicos (objetivos) da sensação de conforto térmico relaciona-se aos processos de troca de calor: condução (troca de calor por contato entre sólidos: o corpo e algum objeto do meio), convecção (troca de calor através de movimentos de ar), radiação (troca de calor por radiação eletromagnética) e evaporação (perda de calor por evaporação da água: perdas por suor). É através desses quatro processos que ocorrem os ganhos e as perdas de calor entre o corpo e o meio. Assim, são os fatores climáticos de temperatura, umidade e movimento de ar e radiação (solar ou proveniente de superfícies aquecidas) que agirão através dos processos de troca de calor, provocando a sensação de conforto térmico. Além deles, entretanto, há que se considerar ainda os processos fisiológicos que ocorrem no organismo humano.

Sendo o homem animal homeotérmico, processos fisiológicos deverão controlar as perdas e os ganhos de calor, equilibrando e mantendo praticamente constante a temperatura do corpo. Basicamente são três processos fisiológicos que ocorrem no organismo: o metabolismo, o controle da quantidade e distribuição do sangue e a transpiração.

O metabolismo é responsável pela geração de energia para o funcionamento do corpo. Há uma forma contínua de metabolismo, responsável pela manutenção da vida, denominada metabolismo basal e uma segunda forma, o metabolismo muscular, que varia de acordo com a atividade física realizada. Como o organismo humano pode ser visto como uma máquina térmica de baixa eficiência, toda geração de energia (transformação de oxigênio e alimentos) ocorrerá acompanhada de produção de calor (Tab. 1).

Tab.1: *Taxas metabólicas para atividades diversas (GIVONI, 1976)*

Atividade	Taxa metabólica (W)
metabolismo basal	70-80
atividade leve	120-140
atividade industrial	400-550

Quando o calor gerado pelo metabolismo é excessivo, o organismo faz uso da dilatação dos vasos sangüíneos na superfície da pele (vasodilatação) e da produção de suor para aumentar as perdas de calor. Por outro lado, quando as perdas são maiores que os ganhos, os vasos sangüíneos contraem-se (vasoconstrição) e ao tremer, o corpo ativa o metabolismo muscular, aumentando a produção de calor. Esses processos dependerão em parte da aclimação do indivíduo, que poderá durar cerca de seis meses em climas quentes e 21 dias em climas frios (SZOKOLAY, 1985). Neste sentido, há alguns trabalhos acerca da aclimação em países em desenvolvimento (HUMPHREYS, 1992; TANABE, 1988; NICOL, 1974 e WEBB, 1959), citados em GIVONI (1992).

Esses processos variarão também em função de fatores individuais. A geração de calor pelo metabolismo depende, por exemplo, da idade, sexo e peso do indivíduo.

Além dos processos fisiológicos, existem também os de natureza psicológica. Neste sentido, foi criada na metade do século XIX a área de investigação Psicofísica, com as contribuições de Weber e Fechner (SZOKOLAY, *op. cit.*), que investigaram a relação entre fenômenos físicos e suas consequências psicológicas.

5. DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO

Basicamente pode-se considerar a grande gama de fatores que influem na condição de conforto através de duas formas: empírica ou analiticamente. Empiricamente, a análise das condições de conforto é de natureza estatística enquanto que, analiticamente, procura-se considerar os fenômenos de troca de calor e criar algoritmos aproximados das reações do corpo humano.

A condição primordial para o conforto humano é a manutenção da temperatura do organismo em torno de um valor constante de 37°C, com os limites situando-se entre 35 e 40°C. A temperatura da superfície da pele sofre alguma variação em torno desses valores (Tab. 2). Esses valores são uma medida de conforto, que deverá ser atingido através de vestimentas adequadas (a segunda pele) e do ambiente térmico (também denominado terceira pele), e estabelecem limites para a temperatura ambiente.

Tab.2: *Temperaturas-limite para o corpo humano (SZOKOLAY, 1985)*

Temperatura do corpo	Temperatura da pele	Consequência fisiológica
42		morte
	45	
40		suor, vasodilatação
37	31-34	conforto
35		
	10	
25		tremores, vasoconstrição

A condição de equilíbrio térmico entre o corpo e o meio é fundamental, embora não suficiente, para a obtenção de conforto. Usualmente, considera-se a equação do balanço térmico para a verificação dessa condição (Eq. 1).

$$M \pm C_c \pm C_v \pm R - E = 0 \quad (\text{Eq. 1})$$

A equação do balanço térmico contém os ganhos pelo metabolismo (basal e muscular) (M), os ganhos ou perdas por condução (Cc), convecção (Cv) e radiação (R) e as perdas que venham a ocorrer por evaporação (E). O equilíbrio térmico existe quando a soma dos ganhos e perdas de calor é nula. Complementarmente à situação de equilíbrio térmico, alguns autores consideram o limiar do suor como sintoma de estresse térmico (SZOKOLAY, 1985).

Definido o método a ser seguido, seja este empírico ou analítico, o passo seguinte seria o estabelecimento dos índices térmicos, no qual há a combinação de diversos fatores climáticos. Neste sentido, há uma infinidade de índices de conforto térmico, que são utilizados sob a forma de nomogramas ou dispostos sobre a carta psicrométrica.

6. ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA

Com o conhecimento das condições climáticas que definem a região e tendo em vista as condições de conforto a serem atingidas no interior da edificação, o projetista deverá então definir o projeto que mais se adeque às condições vigentes. Dentro do enfoque de tecnologias apropriadas, a adoção de medidas passivas para obtenção do conforto no ambiente construído, ou seja, fazer uso de uma Arquitetura Bioclimática, vem a ser o grande desafio no projetar consciente.

Há alguma flexibilidade na escolha do procedimento a ser adotado para o projeto, que variará em função do grau de precisão almejado. Pode-se partir de uma definição conceitual do projeto ou até mesmo de uma simulação computacional. Neste caso, o método a ser seguido poderá compreender as seguintes etapas:

- *Avaliação climática, através da plotagem de médias horárias, mensais ou sazonais da temperatura e umidade do ar no diagrama bioclimático de Givoni (Figura 2), onde estão associadas temperatura e umidade relativa e onde se identifica a zona de conforto;*
- *“Leitura” no diagrama bioclimático das principais estratégias para a obtenção de conforto térmico;*
- *Modelagem do projeto original para testes através de um programa de simulação térmica de ambientes;*
- *Testagem de alternativas de projeto;*
- *Plotagem dos resultados no diagrama bioclimático e verificação do grau de conforto obtido através de melhorias no projeto original.*

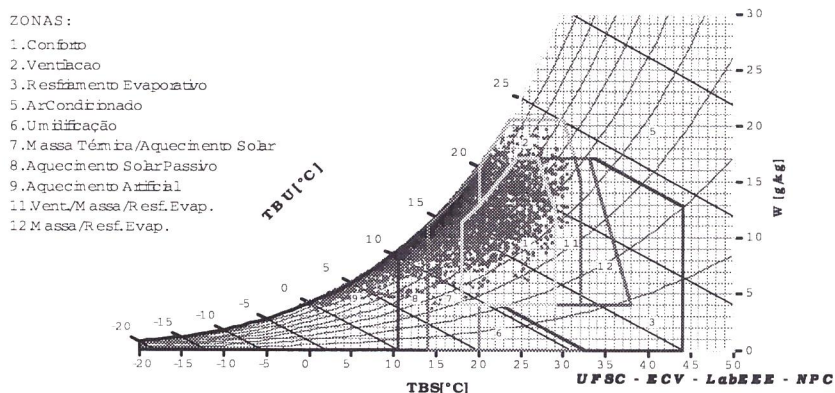


Figura 2: Diagrama bioclimático com a divisão em zonas: Avaliação Bioclimática para Curitiba através da plotagem de dados horários de um ano estatístico (o TRY) na Carta Psicrométrica

Segundo a estratégia a ser seguida, o projetista poderá fazer uso de diversas medidas passivas. Algumas das principais estratégias do condicionamento natural serão tratadas a seguir (WATSON & LABS, 1983).

Diminuição da Condução de Calor Através do Envelope

Através dessa medida, procura-se reduzir a condução de calor através do envelope (paredes, piso e cobertura). Pode-se fazer uso de isolantes térmicos ou de materiais de construção de menor condutividade térmica, reduzindo-se assim o fluxo de calor através dos mesmos.

Utilização da Inércia Térmica dos Materiais

A capacidade de armazenar o calor e retê-lo durante certo tempo depende da massa e do calor específico, propriedade física que varia em função do material empregado. Onde há boa amplitude diária da temperatura do ar, é possível reter o calor no interior dos elementos constituintes do envelope, possibilitando perdas de calor quando a temperatura externa se resfria, e assim, diminuir o fluxo de calor para o interior, no verão. Através de paredes de boa inércia térmica, pode-se também armazenar o calor interno por mais tempo no inverno.

Redução de Infiltrações

Medida tipicamente de inverno, tem por objetivo minimizar infiltrações através de frestas em janelas ou em junções em paredes, pisos ou coberturas.

Controle da Radiação Solar Incidente

Os raios solares, após penetrarem no ambiente através de aberturas da edificação, aquecem as superfícies, que irradiam calor (radiação de onda longa). Na presença de vidro nas aberturas, o calor armazenado não irradia para o exterior, ocorrendo o chamado efeito estufa. Este efeito pode ser aproveitado no inverno e evitado no verão. Influirão no processo: tamanho, orientação e tipo das aberturas, bem como a existência ou não de elementos de sombreamento (cortinas, beirais, brises) e de vegetação junto às aberturas. Nos elementos opacos em contato com o exterior (paredes e cobertura), o projetista pode fazer uso da cor: paredes claras refletem e paredes escuras absorvem a radiação solar. O uso de vegetação adequada pode oferecer vantagens de sombreamento no verão, permitindo a passagem dos raios solares no inverno (árvores caducas), ao mesmo tempo que favorece a formação de um microclima agradável em torno da edificação.

Favorecimento da Ventilação

A ventilação pode preencher três funções distintas: favorecer a higienização do ar interno; promover as perdas de calor na superfície da pele (através do suor e do aumento das perdas por convecção); e resfriar a estrutura, aumentando as perdas por convecção das superfícies internas da edificação, o que interfere também nas trocas de calor por radiação (uso da ventilação noturna: *nocturnal convective cooling*). Para que isso seja possível, é necessária uma concepção adequada das aberturas, havendo uma adequação do tamanho e posicionamento das mesmas em função do vento dominante. Assim, na definição das aberturas, tanto o perfil dos ventos locais quanto a orientação solar devem ser levados em conta.

Favorecimento do Resfriamento Evaporativo

Medida passiva indicada para regiões áridas, já que o decorrente aumento da umidade relativa do ar é em geral indesejável no trópico-úmido. Através dessa estratégia, permite-se que haja uma perda de calor das superfícies aquecidas quando em contato com a água, ao favorecer-se as perdas de calor por evaporação (a perda de calor decorrente da evaporação de um grama de água é de cerca de 0.58 kcal ou 0.67 Wh). Há duas técnicas básicas para o resfriamento evaporativo: método direto (resfriamento do ar externo) e método indireto (resfriamento da estrutura). Ambos podem ser obtidos através de instalações externas, como fontes d'água ou com o uso de lâminas d'água sobre a cobertura e minicascatas junto às paredes externas, possibilitando a redução das temperaturas do envelope.

Favorecimento do Resfriamento por Irradiação

Medida passiva também indicada para regiões áridas, onde há grandes amplitudes diárias da temperatura externa. O céu limpo à noite permite a irradiação do calor absorvido durante o dia. Duas formas básicas são possíveis para o resfriamento por irradiação: irradiação direta, com permanência dos usuários em ambiente abertos (sobre a cobertura, por exemplo); e irradiação indireta (a própria cobertura irradia calor para o céu).

Favorecimento do Resfriamento pela Inércia Térmica do Solo

Medida passiva que utiliza a inércia térmica do solo (a capacidade do solo de reter o calor) para dissipar o calor absorvido ou armazená-lo. Neste sentido, uma técnica interessante é a utilização de dutos subterrâneos sob a forma de serpentina, onde o ar no interior dos dutos pode ser resfriado e guiado (por ventiladores ou por simples convecção) para o interior da edificação, num sistema natural de condicionamento de ar.

7. CONCLUSÃO

Uma análise da situação atual nos mostra que, como em diversas áreas onde a ação do homem se faz presente, também no construir se verifica um distanciamento da natureza. Construir é, por si só, um ato irreversível de agressão ao meio natural (KRÜGER, 1998). A arquitetura assume uma faceta alienada quando se torna cega às particularidades do entorno. Considerando a crise energética, verificada de forma global em todo o planeta, o projetar consciente deve antever potenciais impactos futuros como, por exemplo, no consumo de energia, além de proporcionar o bem-estar do usuário.

Neste sentido, a Arquitetura Bioclimática e a área inter e multidisciplinar do Conforto Ambiental devem ser de conhecimento de projetistas, arquitetos e engenheiros. Basicamente, o que se propõe é um retorno à função primordial da arquitetura: proporcionar um abrigo ao usuário. Desta forma, pretende-se dar um novo rumo a uma arquitetura que se tornou alienada e alienante, na qual tanto o projeto é tratado sem atenção às particularidades do clima e da região, como o usuário utiliza a edificação alheio às condições externas, usando de climatização e iluminação artificiais e de meios de controle automático desses sistemas, com conseqüentes gastos energéticos (os chamados edifícios inteligentes).

O vínculo com o conceito de tecnologia apropriada torna-se, assim, visível: procura-se adotar soluções locais para problemas locais, específicos das condições climáticas existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: ANSI/ASHRAE Standard, 1981.
- FANGER, P.O. *Thermal Comfort*. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- GIVONI, B. Comfort, Climate Analysis and Building Design Guidelines. In: *Energy and Buildings*, Vol. 18, 1992.
- GIVONI, B. *Man, Climate and Architecture*. Barking, Essex, England: Applied Science Publishers, 1976.
- KRÜGER, Eduardo. *Analyse von Bausystemen im sozialen Wohnungsbau Brasiliens*. Hannover: Technische Universität Hannover, 1998. (Tese de Doutorado)
- LANDELS, J.G. *Engineering in the Ancient World*. Los Angeles: University of California Press, 1978.
- MARKUS, T.A. & MORRIS, E.N. *Buildings, Climate and Energy*. London: Pitman, 1980.
- OLGYAY, V. *Design with Climate*. N.J.: Princeton University Press, 1963.
- PUPPO, E. & PUPPO, G. *Acondicionamiento Natural y Arquitectura - Ecología en Arquitectura*. Barcelona: Marcombo Boixareu, 1979.
- RORIZ, M.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Uma proposta de norma técnica sobre desempenho térmico de habitações populares. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 1999, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: ANTAC, 1999.1 CD.
- SZOKOLAY, S.V. Thermal Comfort and Passive Design. In: *Advances in Solar Energy - an Annual Review of Research and Development*, Vol. 2, 1985.
- WATSON, Donald & LABS, Kenneth. *Climatic Building Design. Energy-efficient buildings: principles and practices*. New York: McGraw-Hill, 1983.