



PROCEDIMENTO PARA A AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE NOVAS EDIFICAÇÕES NO CONSUMO ENERGÉTICO DO ENTORNO

Rafael Silva BRANDÃO (1); Márcia Peinado ALUCCI (1)

(1) LABAUT, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo/ USP. Rua do Lago, 876 - CEP. 05508-900-
Cx. Postal: 615223 - CEP 05498-970, Fone: (11) 3091-4681 (r 215), Fax: (11) 3091-4539
e-mail: rafael.brandao@superig.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um procedimento para a previsão do impacto de uma nova edificação no acesso ao sol e à luz natural da vizinhança. Para isso, o problema foi dividido em três partes interdependentes, modeladas separadamente: a fonte, a interface e o uso final da energia. Em um meio urbano, a fonte de recursos e energia e o sol, cuja energia é mediada pelas edificações no entorno, ou seja, pela cidade em si, podendo ou não atingir o usuário final. Este é definido pelo conjunto de sistemas da edificação ou pelo usuário do espaço interno, cujo conforto é o objetivo final do processo. O procedimento pode ser aplicado para avaliar o efeito das edificações no consumo de energia dos vizinhos, permitindo estabelecer novos critérios de ocupação nas legislações urbanas.

ABSTRACT

This paper presents a procedure to evaluate the impact of new buildings on its surroundings' solar and daylight access. In order to do so, the problem was divided in three interdependent parts that have been modeled separately: the source, the interface and the final use of the energy. In this case, the energy sources are the sun and the sky, whose resources are received by the final user through the city itself. The final user concept is related to the building systems and to its user, whose comfort is the final goal. The procedure can be applied to evaluate the effect of buildings on energy consumption of its neighbors, allowing the establishment of new occupation criteria in urban legislation.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta um procedimento para a previsão do impacto de uma nova edificação no acesso ao sol e à luz natural da vizinhança.

.A radiação solar pode ser aproveitada pela edificação de forma pró-ativa ou passiva. Na primeira forma, tem-se a energia fotovoltaica, que pode vir a se tornar acessível dentro de algum tempo e os aquecedores de água a energia solar, que já são uma realidade, podendo eliminar o gasto com o chuveiro elétrico. Dentre os usos passivos, aponta-se para a possibilidade do uso da energia solar para climatização interna, controlando a ventilação ou aquecendo o edifício. No caso da iluminação natural, não só o sol, mas também a abóbada celeste servem como fonte de luz, contando com uma eficiência luminosa maior que a das lâmpadas mais eficientes.

O tratamento desta questão somente na escala do edifício não é suficiente, uma vez que o entorno tem grande impacto no seu aproveitamento destes recursos. RIBEIRO & MELLO (1996) colocam a necessidade de garantir o acesso ao sol nas edificações, controlando o sombreamento dos prédios vizinhos que venham a prejudicar o seu desempenho.

Para analisar esta questão, o problema foi dividido em três partes interdependentes, modeladas separadamente: a fonte, a interface e o uso final da energia. Em um meio urbano, a fonte de recursos e energia é o ambiente, que é mediada pelas edificações no entorno, ou seja, pela cidade em si, podendo ou não permitir o acesso do usuário final a este recurso, e o uso final é feito pelos sistemas da edificação ou pelo usuário do espaço interno, cujo conforto é o objetivo final do processo (Figura 1).

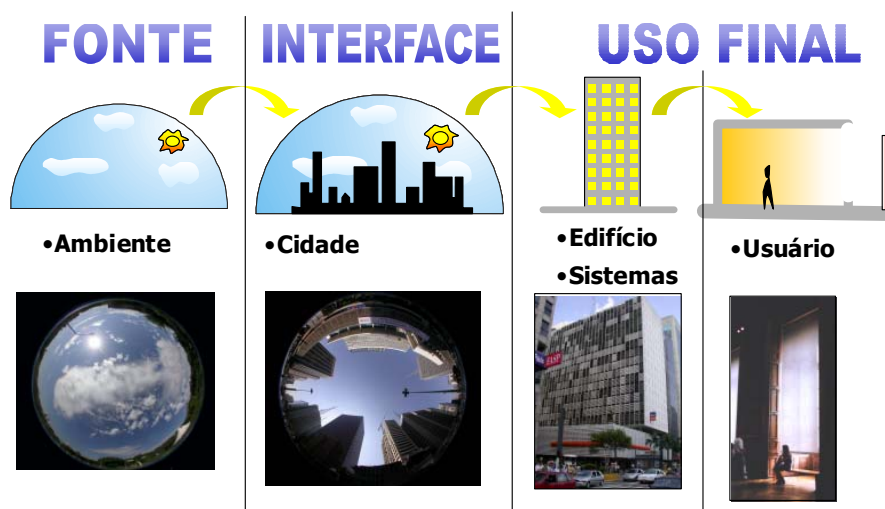


Figura 1 – Esquema de relações Fonte-Cidade-Edifício-Usuário

Sendo o céu e o Sol as duas fontes de energia com as quais se irá trabalhar, torna-se fundamental avaliar a sua contribuição real de energia para o ponto, pessoa ou edifício estudado. Elementos que se interponham entre o sol e o céu e o ponto analisado são definidos como sendo *obstruções*, que podem ser naturais ou não. Nesse trabalho, foram tratadas somente as obstruções causadas pelas edificações.

Ao obstruírem parte do céu estas edificações impedirão as trocas radiativas de onda longa e onda curta com aquela zona da abóbada. Desse modo será menor o ganho por radiação difusa de onda curta e também menor a perda por radiação onda longa, já que a superfície externa da edificação tende a estar a uma temperatura maior do que o fundo de céu. Caso o sol passe por aquela zona em algum período, esta edificação também provocará obstrução da radiação direta, denominada *sombreamento*. Nesse caso a redução dos ganhos de radiação, e conseqüentemente de carga térmica, será significativa.

O uso final representa a outra ponta do sistema, onde a energia solar é convertida em energia útil sob a forma de luz, calor ou eletricidade. O foco é o ser humano, cujas relações com o meio são intermediadas pela edificação e pelos sistemas de captação de energia solar, sendo seu conforto determinado pelo objeto construído que o envolve. Os critérios gerados, assim, estão vinculados ao desempenho conjunto dos sistemas da edificação que permitem alcançar o maior nível de conforto para o usuário a um menor custo energético.

A variável utilizada para descrevê-los foi o consumo comparativo de energia, por ser a única comum a todos os sistemas (ALUCCI, 1992) e por se converter facilmente em medida de desconforto. Assim pode-se comparar não só desempenho térmico com o luminoso, mas com os sistemas pró-ativos, permitindo uma análise completa do desempenho da edificação.

2. MODELAGEM DA FONTE

2.1 Modelagem matemática do céu

Sendo consideradas aqui principalmente as trocas radiativas, a fonte primária da energia é o Sol, sendo que sua radiação atinge a Terra de forma direta e de forma difusa, a partir da sua passagem pela atmosfera terrestre (BEHLING & BEHLING, 1996).

Foi feita a avaliação da disponibilidade de radiação solar, da sua composição (porcentagem do fluxo dentro do espectro visível) e distribuição pela abóbada. Para tanto foram utilizados dados medidos pela

estação do Grupo de Micrometeorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, situada na sede do IAG e pela Estação Meteorológica do Departamento de Ciências Atmosféricas, situada no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (antigo Parque do Estado), bairro da Água Funda, capital, SP e registrada junto à Organização Meteorológica Mundial sob o número 83004. As falhas nos dados foram completadas através de um modelo de cálculo (DUFFIE & BECKMAN, 1980) que apresentou boa correlação com os dados medidos. (BRANDÃO, 2004).

A partir destes dados é possível estimar a quantidade de luz incidente, utilizando-se modelos de eficácia luminosa. Adotou-se o modelo de Littlefair apresentado por VARTIANIEN (2000). Os resultados destes cálculos para a cidade de São Paulo podem ser vistos em BRANDÃO (2004).

A distribuição da radiação e da luz pela abóbada celeste também foi avaliada por modelos matemáticos. O céu foi dividido em 145 zonas de acordo com KENDRICK (1989), sendo calculada a iluminância e a radiância no ponto central de cada zona de acordo com IGAWA & NAKAMURA (2001) e BRUNGER & HOOPER (1993).

2.2 Cálculo da irradiância e iluminância em uma superfície

A contribuição de cada zona para a iluminância e irradiância de um determinado ponto P localizado no plano horizontal ou inclinado é dado pela lei do cosseno (IES, 1998):

$$E = (\Phi / d^2) \cdot \cos \theta_{z\text{sup}} \quad (\text{lux ou W/m}^2) \quad [\text{Equ. 1}]$$

Onde **E** é a irradiância ou iluminância no ponto P; Φ é a intensidade do fluxo radiante ou luminoso (W/m^2 ou lm/m^2); **d** é a distância em metros (**m**) e $\theta_{z\text{sup}}$ é o ângulo de incidência do fluxo em relação à normal da superfície.

Como a abóbada celeste é uma construção hipotética de raio unitário e tem-se o valor de luminância e radiância, essa equação é convertida em:

$$E_{vz} = L_{vz} \cos \xi_{z\text{-sup}} \quad (\text{lux}) \quad [\text{Equ. 2}]$$

$$G_{vz} = R_{vz} \cos \xi_{z\text{-sup}} \quad (\text{W/m}^2) \quad [\text{Equ. 3}]$$

Onde E_{vz} e G_{vz} são a iluminância ou irradiância no ponto devido à zona z_i (**lux** ou W/m^2); L_{vz} e R_{vz} são a luminância ou radiância da zona z_i (cd/m^2 ou W/m^2) e $\xi_{z\text{-sup}}$ é o ângulo com que a radiação ou luz vinda daquela zona incide na superfície estudada ($^\circ$).

O ângulo de incidência de cada zona com uma superfície de inclinação β_{sup} e de azimute γ_{sup} é:

$$\xi_{z\text{-sup}} = \cos \xi_z \cdot \cos \beta_{\text{sup}} + \sin \xi_z \cdot \cos \beta_{\text{sup}} \cdot \cos (\gamma_z - \gamma_{\text{sup}}) \quad (^\circ) \quad [\text{Equ. 4}]$$

No caso das trocas com fundo de céu, basta saber qual é o Fator de Visão de Céu (**FVC**), ou seja, o somatório do produto da área das zonas do céu que estão desobstruídas (A_z dado em KENDRICK (1989)) e o ângulo que cada área forma com a normal da superfície ($\xi_{z\text{-s}}$). Desse modo:

$$\text{FVC} = \sum A_z \cos \xi_{z\text{-s}} \quad (-) \quad [\text{Equ. 5}]$$

Com estas informações é possível dimensionar todas as trocas térmicas que a edificação realiza com o céu, sejam por onda curta (ganho) ou por onda longa (perda).

3. MODELAGEM DA OBSTRUÇÃO

3.1 Definição de obstrução

É importante observar que a obstrução depende do ponto que está sendo estudado. Ela está relacionada à relação entre a altura e largura do objeto obstrutor e à distância que ele se encontra do ponto a ser

avaliado. Desse modo, a obstrução causada pelo objeto é definida por ângulos verticais (θ_v) e horizontais (θ_h), medidos em relação ao horizonte e ao norte, respectivamente. Nesse trabalho, desprezou-se a componente refletida da radiação, embora ela possa ser incorporada no modelo

Observa-se que sempre que a altitude do centro de uma zona do céu for menor que o ângulo de obstrução vertical ($\xi_z \leq \theta_v$) E o azimute da zona estiver entre os ângulos de obstrução horizontal inicial e final ($\theta_{hi} \leq \gamma_z \leq \theta_{hi}$) esta zona estará obstruída pelo elemento em questão.

Neste trabalho, a obstrução é o novo edifício a ser construído, cujo impacto no entorno deseja-se avaliar. O ponto de referência foi colocado no limite do terreno, por representar esse ponto a pior condição de exposição do vizinho. À medida que se adentra o terreno o ângulo de obstrução diminui.

Para se avaliar o efeito da obstrução de forma analítica é necessário imaginar o terreno em um espaço cartesiano, onde as posições são determinadas pelas coordenadas x , y e z medidas em metros (m). O eixo das abscissas (x) está orientado no sentido leste-oeste e as ordenadas no sentido norte-sul. A origem ($0,0,0$) pode ser marcada num ponto arbitrário, mas recomenda-se que ela esteja ou no ponto de modo que só existam valores positivos, ou que seja um dos vértices do terreno.

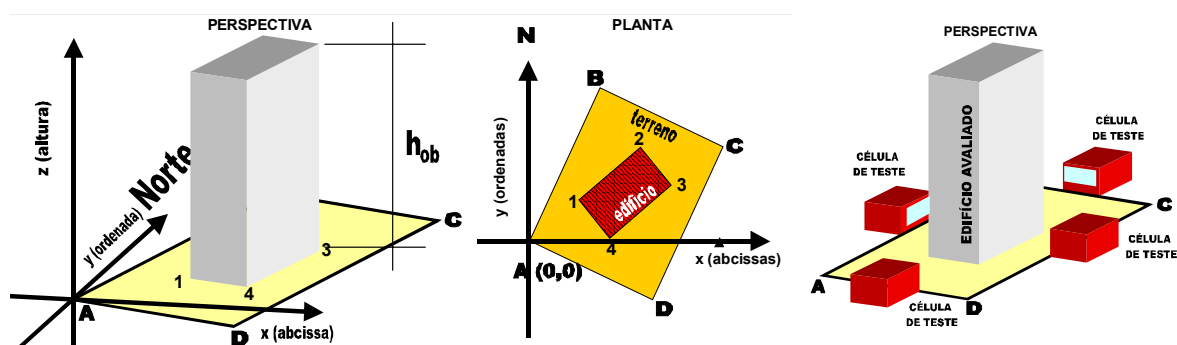


Figura 2 – Terreno no plano cartesiano, esquema de vértices

São atribuídas coordenadas aos vértices do terreno. A princípio, serão utilizados apenas terrenos e edifícios com quatro lados. Desse modo o terreno é definido pelos vértices **A**, **B**, **C** e **D**. A edificação também é localizada da mesma maneira, através dos vértices **1**, **2**, **3** e **4** (ver Figura 2).

Cada segmento, de **AB** a **DA** e de **12** a **41**, pertence a uma reta, definida por uma equação com o formato:

$$y = a_{seg} \cdot x + b_{seg} \quad (m) \quad [\text{Equ. 6}]$$

Onde a_{seg} e b_{seg} são os coeficientes para a reta de cada segmento (a_{12} e b_{12} se referem ao segmento **12**, a_{23} e b_{23} se referem ao segmento **23** e assim por diante). Para exemplo de cálculo, será utilizado o segmento **12**. As demais equações são encontradas de forma análoga como abaixo:

$$a_{12} = (x_2 - x_1) / (y_2 - y_1) \quad (-) \quad [\text{Equ. 7}]$$

$$b_{12} = y_1 - a_{12} \cdot x_1 \quad (-) \quad [\text{Equ. 8}]$$

É necessário apenas determinar as equações que contêm os segmentos que formam o prédio. Deve-se então tomar um ponto de referência para verificar a obstrução. Como exemplo, tomou-se uma célula de teste localizada no ponto médio do segmento **AB** (x_{Mseg} , y_{Mseg}). São então traçados raios partindo desse ponto, na direção do azimute central de cada uma das 145 zonas do céu (Figura 3).

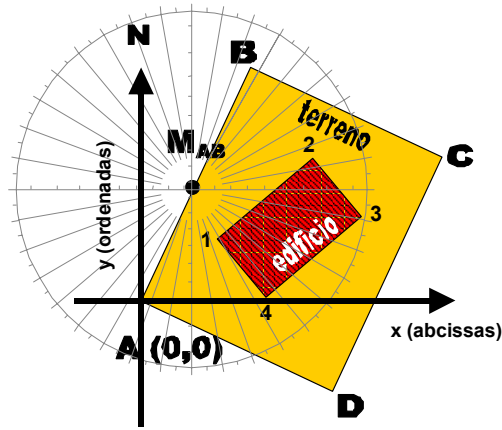


Figura 3 – Esquema dos raios partindo do ponto médio

Os coeficientes da equação dos raios são calculados por:

$$a_{z1-MAB} = \text{tg } \gamma_{z1} \quad (-) \quad [\text{Equ. 9}]$$

$$b_{z1-MAB} = y_{MAB} - a_{z1-MAB} \cdot x_{MAB} \quad (-) \quad [\text{Equ. 10}]$$

Cada raio intersecta as retas do edifício, definida a partir dos coeficientes encontrados na [Equ. 9] e na [Equ. 10], a não ser que sejam paralelas. Determina-se então o ponto de intersecção.

$$x_{z1-MAB/12} = (b_{z1-MAB/12} - b_{12}) / (a_{12} - a_{z1-MAB/12}) \quad (m) \quad [\text{Equ. 11}]$$

$$y_{z1-MAB/12} = a_{12} \cdot x_{z1-MAB/12} - b_{12} \quad (m) \quad [\text{Equ. 12}]$$

O ângulo de obstrução vertical daquela face sobre a zona é dado por:

$$\theta_{v \ z1-MAB/12} = \arctan \{ h_{ob} / [(x_{z1-MAB/12} - x_{MAB})^2 + (y_{z1-MAB/12} - y_{MAB})^2]^{0.5} \} \quad (^\circ) \quad [\text{Equ. 13}]$$

Onde h_{ob} é a altura do edifício em relação ao ponto estudado em metros (m), conforme a Figura 2.

Uma zona do céu estará obstruída por uma edificação se atender a **TODAS** as seguintes condições: **(1)** $x_1 \leq x_{z1-MAB/12} \leq x_2$; **(2)** $y_1 \leq y_{z1-MAB/12} \leq y_2$ e **(3)** $\theta_{v \ z1-MAB/12} \geq \gamma_{z1}$.

Como as equações de zonas com azimutes complementares são iguais é necessário observar a direção do raio. Por isso criou-se mais um critério. Sempre que o cosseno do azimute ($\cos \gamma_{z1}$) da zona for positivo, soma-se 0,005 a x_{MAB} e quando ele for negativo subtrai-se o mesmo valor. Se $x_{MAB} \leq x_{z1-MAB/12} \pm 0,005$ então a zona está realmente obstruída pela edificação, caso contrário, a zona de azimute complementar é que estará.

4. MODELAGEM DO USO FINAL

4.1 Modelagem matemática para cálculo de consumo de iluminação

Para se determinar os níveis internos de iluminação natural, propõe-se a utilização da fórmula de Frühling (HOPKINSON, LONGMORE & PETERSON, 1966) que consiste em:

$$\text{FLD}_{\text{médio}} = F \cdot T \cdot L \cdot J \cdot A_j / A_p \cdot 100\% \quad (\%) \quad [\text{Equ. 14}]$$

Onde $FLD_{\text{médio}}$ é o fator de luz diurna médio do ambiente; F é um fator de janela; TL é a transmissão luminosa do vidro; J é um coeficiente de utilização e A_j/A_p é a relação entre a área de envidraçado e a área do plano de referência, no caso, área de piso.

Sabe-se que a utilização do FLD médio pode ser controversa, visto que oculta grandes discrepâncias nos valores máximos e mínimos. No entanto, observa-se que a qualidade da distribuição interna de iluminâncias está diretamente relacionada variáveis de projeto, sendo responsabilidade do arquiteto assegurar uma boa distribuição de luz no ambiente, sem grandes contrastes.

O fator de janela (F) representa a relação entre a iluminância vertical média proveniente do céu no plano da janela e a iluminância existente sobre o plano horizontal desobstruído. F é função basicamente da orientação da janela, do nível de obstrução e da distribuição de luminâncias no céu. Adotando-se a distribuição de luminâncias para céu encoberto proposta pela CIE(1996), onde a luminância de no zênite é três vezes a do horizonte, chega-se a um valor de F da ordem de 0,39.

Nesse estudo, propõe-se trabalhar diretamente com radiação incidente no plano vertical que contém a abertura, já ponderado o efeito da obstrução. Assim, é possível retirar o fator F da equação e relacionar o $FLD_{\text{médio}}$ diretamente com a iluminância incidente no plano vertical orientado.

O coeficiente de utilização (J), por sua vez, representa quociente do fluxo atingindo o plano de referência pelo fluxo total entrando pela janela. Frühling verificou experimentalmente que os valores de J para diversos sistemas de iluminação natural verticais, testados em ambientes com diferentes razões de aspecto e refletância de superfície, situam-se na faixa entre 0,2 e 0,5, mas propôs um coeficiente único de 0,4. Esse valor foi revisto para confirmar sua confiabilidade e para considerar reflexão interna nula. Desse modo, considera-se que o ambiente recebe apenas a componente de céu, garantindo o nível médio para o pior caso.

Para o estudo do valor de J foram feitas diversas simulações no *software Daylight* (FRAME & BIRCH, 1991). O *software* fornece as curvas de distribuição do FLD , além do valor médio para o ambiente. Para se contemplar o maior número de variações possível, foram variadas a área do ambiente, a relação A_j/A_p , a razão de aspecto da janela e a razão de aspecto do ambiente.

A partir dos valores de FLD médios calculados, fez-se o processo inverso da equação de Frühling. Os valores de J encontrados estão situados entre 0,36 e 0,85, com um valor médio de 0,49 e desvio padrão de 0,10. Isso significa que o valor de 0,4 estabelecido por Frühling se mostra adequado para lidar com situações onde os níveis mínimos são o problema.

Assim, para que não haja necessidade de complementação com iluminação artificial nos ambientes, utilizando-se como mínimo os 500 lux da norma NBR5413, multiplicados por 0,6 (redução prevista pela norma alemã para luz natural), com $J = 0,4$ e relação A_j/A_p como 1/6, conforme previsto na maioria dos códigos de obra, tem-se que a iluminância vertical mínima na fachada deve ser de **5400 lux**. O consumo de luz artificial complementar é dado, segundo ALUCCI (1992), pela equação:

$$CEE_i = \text{Pot} \times t_o \times A_p \quad (\text{Wh}) \quad [\text{Equ. 15}]$$

Onde CEE_i é o consumo de energia do sistema de iluminação artificial em Watts-hora (**Wh**); **Pot** é a potência instalada do sistema de iluminação em **W**¹; **t_o** é o tempo de ocupação em horas (**h**) e A_p é a área do ambiente em **m²**.

Neste trabalho, assume-se que o sistema de iluminação artificial é ligado quando a iluminação natural é insuficiente e que é imediatamente desligada caso os níveis voltem a ser satisfatórios, o que se aplicaria somente a sistemas automatizados do tipo “on/off”. No entanto, observa-se que o consumo de energia aqui é calculado somente como medida de desconforto e por esse raciocínio, a simplificação feita torna-se aceitável.

¹ ALUCCI (1992) sugere um valor de 40 W/m² de potência instalada, mas hoje em dia consegue-se, com projetos eficientes, os mesmos valores de iluminância com potências entre 10 e 12 W/m².

O tempo de ocupação é o período de utilização do sistema artificial e compreende todas as horas em que os níveis de iluminância médios do ambiente tenham ficado abaixo do nível de referência dado pela norma. Caso o cálculo seja feito hora a hora, o tempo de ocupação será sempre igual a uma hora quando o nível de iluminância médio exceder o nível de referência e zero quando ocorrer o contrário.

4.2 Modelagem matemática para cálculos de condicionamento térmico

Devido à necessidade de um modelo simplificado, o regime adotado para cálculo foi o permanente. Considerou-se também que o nível de precisão destes modelos é adequado para os objetivos deste trabalho. O modelo apresentado é uma adaptação de FROTA & SCHIFFER (1995).

Para uma edificação não condicionada artificialmente, a diferença instantânea entre a temperatura interna e a externa (ΔT_{inst}), desconsiderando-se a inércia da edificação, é dada pela equação abaixo:

$$\Delta T_{inst} = Q/q \quad (^\circ\text{C}) \quad [\text{Equ. 16}]$$

Onde Q representa normalmente os ganhos térmicos devido à radiação solar e às cargas internas e q representa as perdas por ventilação e por diferença de temperatura. Observa-se que Q pode ser tornar-se negativo com a troca de radiação de onda longa com o fundo de céu. O valor de Q é dado por:

$$Q = Q_{SO} + Q_{ST} + Q_{OL} + Q_I \quad (\text{W}) \quad [\text{Equ. 17}]$$

Onde Q_{SO} são os ganhos por radiação de onda curta proveniente do sol pelos componentes opacos da edificação; Q_{ST} são os ganhos por radiação de onda curta proveniente do sol pelos componentes transparentes ou aberturas livres; Q_{OL} são os ganhos ou perdas em trocas por radiação de onda longa com o fundo de céu e Q_I são as cargas internas do ambiente.

Os ganhos solares por radiação de onda curta em superfícies opacas é dado pelo somatório dos ganhos de todas as superfícies expostas à radiação solar na vertical e na horizontal. No caso de superfícies heterogêneas em área, é possível fazer o cálculo do ganho de cada componente e somá-los ao final.

$$Q_{SO} = \sum G_{gsup} \cdot U_{sup} \cdot \alpha_{sup} \cdot Rse \cdot A_{sup} \quad (\text{W}) \quad [\text{Equ. 18}]$$

Onde: G_{gsup} é a irradiância na superfície, calculado a partir de um somatório da [Equ. 3] para cada zona do céu, em W/m^2 ; U_{sup} é a condutividade térmica do componente, dado em $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; α_{sup} é o coeficiente de absorção da superfície para radiação de onda curta; Rse é o coeficiente de resistência térmica superficial do elemento (0,06) e A_{sup} é a área da superfície (m^2).

Para fechamentos transparentes aplica-se o mesmo procedimento, mas substitui-se o fator $U \cdot \alpha \cdot Rse$ pelo fator solar (S_{tr}) do vidro utilizado. Assim:

$$Q_{ST} = \sum G_{gsup} \cdot S_{tr} \cdot A_{sup} \quad (\text{W}) \quad [\text{Equ. 19}]$$

As trocas com o fundo de céu são tratadas de maneira análoga às trocas por onda curta, substituindo-se a irradiância (G_{gsup}) pelo fluxo de radiação de onda longa para o fundo de céu ($\Phi_{céu}$) e o coeficiente de absorção da superfície para radiação de onda curta (α_{sup}) pela emissividade da superfície (ϵ_{sup}).

$$Q_{OL} = \sum \Phi_{céu} \cdot U_{sup} \cdot \epsilon_{sup} \cdot Rse \cdot A_{sup} \quad (\text{W}) \quad [\text{Equ. 20}]$$

O fluxo de radiação de onda longa para o fundo de céu é calculado pela equação abaixo

$$\Phi_{céu} = \sigma (\epsilon_s \cdot (T_{ir} + 273)^4 - \epsilon_{céu} \cdot (T_e + 273)^4) \cdot FVC_{sup} \quad (\text{W}) \quad [\text{Equ. 21}]$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann: $5,9997 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_{ir} é a temperatura interna real do ambiente ($^\circ\text{C}$); $\epsilon_{céu}$ é calculada pelo modelo proposto em GIVONI (1994) (-); T_e é a temperatura instantânea do ar externo ($^\circ\text{C}$) e FVC_{sup} é o fator de visão de céu, calculado na equação [Equ. 5] (-).

A carga interna (Q_i) é determinada de acordo com a ocupação interna, pessoas e equipamentos, tendo valor variável de edifício para edifício.

O coeficiente de perda (q) na [Equ. 18] é dado pela equação:

$$q = q_c + q_v \quad (\text{W}/^\circ\text{C}) \quad [\text{Equ. 22}]$$

Onde q_c e q_v são o fluxo de perda por condução e ventilação, calculados pelas equações:

$$q_c = \sum U_{\text{sup}} \cdot A_{\text{sup}} \quad (\text{W}/^\circ\text{C}) \quad [\text{Equ. 23}]$$

$$q_v = 0,35 \cdot N \cdot V \quad (\text{W}/^\circ\text{C}) \quad [\text{Equ. 24}]$$

Onde N é o número de renovações de ar no ambiente e V é o volume do ambiente.

A temperatura interna, caso não fosse considerada a inércia ($T_{i \text{ inst}}$), seria dada pela equação:

$$T_{i \text{ inst}} = T_e + \Delta T_{i \text{ inst}} \quad (^\circ\text{C}) \quad [\text{Equ. 25}]$$

Caso a edificação tivesse inércia infinita, na ausência de cargas térmicas internas e solares, a temperatura interna (T_{im}) seria igual à média externa. Considerando-se a existência dessas cargas, a temperatura interna sofreria um acréscimo, dado pelo somatório dos ganhos dividido pelo somatório das perdas (Q_m/q_m) no período analisado.

$$T_{im} = T_{em} + Q_m/q_m \quad (^\circ\text{C}) \quad [\text{Equ. 26}]$$

Onde T_{im} é a temperatura interna caso o edifício tivesse inércia próxima à infinita; T_{em} é a temperatura média externa no período de 24 horas; Q_m é o ganho médio de calor em um período de 24 horas e q_m é a perda média de calor no mesmo período.

A temperatura interna suposta da edificação (T_i) seria dada por uma média entre $T_{i \text{ inst}}$ e T_{im} , ponderada por um Fator de Inércia² (m), que é indicativo da inércia da edificação, sendo $m = 0$ para inércia nula e $m = 1$ para inércia infinita. Assim:

$$T_i = m \cdot T_{im} + (1 - m) \cdot T_{i \text{ inst}} \quad (^\circ\text{C}) \quad [\text{Equ. 27}]$$

O consumo de energia elétrica para refrigeração do ar é dado pela equação:

$$CEE_{AC} = 3,6 \cdot CER/E_{AC} \quad (\text{Wh}) \quad [\text{Equ. 28}]$$

Onde CEE_{AC} é o consumo de energia do sistema condicionamento artificial em Watts-hora (**Wh**); CER é a carga de energia de refrigeração em **W**; E_{AC} é a eficiência do sistema de ar condicionado em **kJ/W**.³

O método para o cálculo de carga de refrigeração (**CER**) é adaptado de ALUCCI (1992) e de RORIZ (2001). Estes autores propõem a seguinte equação para o cálculo:

$$CER = q \cdot Gh_R \quad (\text{W}) \quad [\text{Equ. 29}]$$

Onde q é o coeficiente de perda calculado na [Equ. 22] e Gh_R é o número de Graus-hora. Grau-hora de refrigeração, segundo RORIZ (2001) é o excesso da temperatura exterior acima de um certo valor denominado “Temperatura de Base”. Desse modo:

² Este fator de inércia é análogo ao amortecimento proposto por Croiset (ver Frota & Schiffer, 1995). O seu cálculo depende da área de superfície pesada e da resistência térmica do material.

³ A eficiência de sistemas de ar condicionado varia bastante. Na classificação do INMETRO (2003) os mais eficientes (categoria A) encontram-se na faixa de 10,36 kJ/W.

$$Gh_R = T_e - T_b \quad (^\circ\text{C}) \quad [\text{Equ. 30}]$$

Os autores sugerem que o balanço de ganhos e perdas internos seja subtraído da temperatura de conforto considerada para se encontrar T_b . No entanto, observou-se a importância de se considerar o efeito da inércia da edificação, que reduz as variações das temperaturas internas. Deste modo, calcula-se o número de Graus-hora não em relação à temperatura externa e sim em relação à temperatura interna suposta (T_i). A temperatura de base é a temperatura neutra calculada pela média das temperaturas dos últimos 30 dias (T_{n30}) acrescida de uma variação de tolerância (v_{tl}).

$$Gh_R = T_i - (T_{n30} + v_{tl}) \quad (^\circ\text{C}) \quad [\text{Equ. 31}]$$

O cálculo do consumo de aquecimento é feito de maneira análoga, com duas diferenças. A primeira é que o limite de tolerância é subtraído da temperatura neutra ao invés de adicionado e a segunda que, como os valores de T_i serão menores que os de T_b , para o cálculo de graus-hora de aquecimento (Gh_A) deve-se inverter a equação. A carga de aquecimento (CEA) é calculada da mesma maneira, mas essa carga não é dividida pela eficiência, visto que os aquecedores elétricos têm capacidade de converter praticamente toda a energia em calor.

O cálculo do consumo pode ser feito para cada horário, sendo o consumo total a soma do consumo de todas as horas do ano. É possível, deste modo, avaliar simultaneamente o efeito da obstrução no consumo de luz artificial, aquecimento de ambientes e ar condicionado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A questão do acesso ao sol e à luz natural vem sendo trabalhada desde as origens da cidade, mas ganhou caráter científico a partir da primeira metade do século XX. Ela está intimamente ligada ao aproveitamento eficiente dos recursos naturais. Embora já se tenha produzido uma bibliografia considerável, em vários locais e com abordagens diferentes, o que se observa é que a maior parte dos estudos foi feita em países de clima frio e latitude elevada. Nestes locais, o sol é não só desejável, mas necessário, praticamente durante todo o ano. Ali, ele funciona como fonte de luz, calor e energia e a disponibilidade de radiação solar é relativamente pequena, se comparada com caso brasileiro. As baixas alturas solares resultam em ângulos de obstrução muito restritivos e incompatíveis com a cultura do mercado imobiliário brasileiro que tem buscado cada vez mais a verticalização e o adensamento, sendo impossível uma apropriação direta destes estudos. No caso das cidades brasileiras, a maioria de clima quente, torna-se necessário ainda avaliar o real interesse da incidência solar nas edificações, visto que isto pode acarretar cargas térmicas indesejáveis. O sol, desse modo, se transforma de fonte de energia em fonte de gastos energéticos, que devem ser melhor avaliados.

Essa questão constituiu o principal desafio do trabalho. A solução proposta por ALUCCI (1992), usando o consumo energético como variável comum, apresentou resultados satisfatórios, embora tenha demandado cálculos que não podem ser realizados sem auxílio computacional. No entanto, observa-se que o estabelecimento do procedimento apresentado neste artigo é o primeiro passo para considerar o aspecto solar na determinação das densidades e dos recuos permitidos na legislação urbana.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALUCCI, Márcia Peinado (1992). *Conforto térmico, conforto luminoso e conservação de energia elétrica: Procedimentos para desenvolvimento e avaliação de projetos de edificações*. 1992. 225 f. (Tese de Doutorado, Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (1991). *NBR 5413: Iluminância de interiores*. ABNT. Rio de Janeiro.
- BEHLING, Sophia; BEHLING, Stefan. (1996). *Sol Power: the evolution of solar architecture*. Pretzel-Verlag. Munich, New York. 240 p.

- BRUNGER, Alfred; HOOPER, Frank (1993). Anisotropic sky radiance model based on narrow field of view measurements of short-wave radiance. *Solar Energy*: Pergamon. v. 51, n.1, p. 53-64.
- BRANDÃO, Rafael Silva (2004). *Acesso ao sol e à luz natural: avaliação do impacto de novas edificações no desempenho térmico, luminoso e energético do seu entorno*. 2004, 156 f. (Dissertação de Mestrado, Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Paulo.
- DUFFIE, Jonh A.; BECKMAN, William A. (1980) *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley-Interscience. New York. 762 p.
- FRAME, Ian, BIRCH, Sheila (2003). *Daylight Software*. Anglia Polytechnic. Londres. 1991. Available in <<http://www.usp.br/fau/deptecnologia/docs/conforto.html>> Cited in: 05 out. 2003.
- FROTA, Anésia; SCHIFFER, Sueli (1995). *Manual de conforto térmico*. 2a ed. Nobel. São Paulo. 243p.
- GIVONI, Baruch (1994). *Passive and low energy cooling of buildings*. John Wiley & Sons. New York. 263 p.
- HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. (1975) *Iluminação Natural*. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. 776 p.
- IGAWAA, Norio; NAKAMURA, Hiroshi. (2001) All Sky Model as a standard sky for the simulation of daylight environment. *Building and Environment*: Pergamon, v. 36, p. 763-770, 2001.
- ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. (1998) *Lighting Handbook; Reference & Application*. 8 ed. IES of North America. New York. 1998.
- KENDRICK, J. D. (Ed.), (1989) *Guide to recommended practice of daylight measurement*. CIE. Vienna.
- KNOWLES, Ralph; BERRY, Richard. (1980) *Solar envelope concepts; moderate density building applications*. University of Southern California. Los Angeles. 135 p.
- RIBEIRO, Maurício Andrés; MELLO, Hygina Bruzzi de. (1996) *Arquitetura e Energia. Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*, PUC-MG. Belo Horizonte. n. 4, 63-96.
- RORIZ, Maurício. (2001) Consumo de energia no condicionamento térmico de edificações.; um método de avaliação. ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO,6, São Pedro, 2001. *Anais...* ANTAC,. São Pedro. (CD-ROM)
- VARTIAINEN, Eero. (2000) A comparison of luminous efficacy model with illuminance and irradiance measurements. *Renewable Energy*: Pergamon. v. 20, p. 265-277.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, especialmente ao Laboratório de Micrometeorologia e à Estação Meteorológica, pelo fornecimento de dados climáticos e ao CNPq pelo financiamento desta pesquisa.