

Rafael Silva Brandão

Acesso ao Sol e à Luz Natural:
Avaliação do impacto de novas edificações no
desempenho térmico, luminoso e energético do seu
entorno

São Paulo
2004

Rafael Silva Brandão

Acesso ao Sol e à Luz Natural:

Avaliação do impacto de novas edificações no desempenho térmico, luminoso e energético do seu entorno

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo

Orientadora: Profa. Dra. Márcia Peinado Alucci

**Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Universidade de São Paulo
Julho de 2004**

OPACO

*Noite. Certo
muitos são os astros.
Mas o edifício
barra-me a vista.*

*Quis interpretá-lo. Valeu? Hoje
Barra-me (há luar) a vista.*

*Nada escrito no céu,
Sei.
Mas queria vê-lo.
O edifício barra-me
a vista.*

*Zumbido
de besouro. Motor
arfando.
O edifício barra-me
a vista.*

*Assim ao luar é mais humilde.
Por ele é que sei do luar
Não, não me barra
a vista.
A vista se barra
a si mesma.*

(Carlos Drummond de Andrade)

Aos meus pais, Eduardo e Waldenice, pelo suporte incondicional. Não há distância que o amor não supere. Que esta conquista seja de vocês tanto quanto é minha.

Aos meus afilhados, Marina e Gustavo, para que vocês saibam que mesmo que não possamos voar, não devemos nos contentar em rastejar.

Agradecimentos

À minha orientadora Prof. Dra. Márcia Peinado Alucci, pela confiança depositada, pelas orientações e por saber conduzir um orientando tão intransigente.

À Profa. Dra. Eleonora Sad de Assis, pela formação acadêmica e de pesquisa, sem a qual eu hoje não estaria aqui. Agradeço também aos demais colegas da UFMG, Profa. Roberta Gonçalves de Souza, Prof. Eduardo Cabaleiro, Profa. Iraci Pereira e aos alunos e ex-alunos Marcela, Diana, Roxane, Rachel e Natália.

Aos meus amigos do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT) da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP) professores Anésia Frotta, Fernando Cremonesi, Joana Gonçalves e Denise Duarte e estudantes Alessandra Prata, Anna Christina Miana, Leonardo Monteiro e Norberto Moura pela troca de idéias e pelo ambiente onde amizade e trabalho se misturam tão bem.

Aos alunos da FAUUSP, em especial às “minhas” bolsistas Bruna Luz e Luciana Ferreira, pelo estímulo, pela confiança e por me darem a certeza de ter escolhido o caminho certo.

A Gustavo Pessoa, que agüentou pacientemente meus altos e baixos nessa caminhada e me mostrou o significado de uma amizade verdadeira.

Aos meus avós, irmãos, tios e primos pelos momentos de carinho e descontração, não só hoje, mais por toda a vida.

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.

Ao CNPq por ter financiado esta pesquisa.

Sumário

Lista de figuras	10
Lista de tabelas	13
Lista de símbolos e definições	14
Resumo	16
Abstract	17
Introdução	18
Objetivos da dissertação	19
Método de trabalho	19
Estrutura da dissertação	22
1. Marco teórico: ambiente e conforto	24
1.1. Breve histórico da questão ambiental	24
1.2. Discussão acerca da sustentabilidade	26
1.3. O conforto ambiental e a questão ambiental	30
1.4. Proteção do acesso ao sol e legislação urbana	33
1.5. Histórico e características	35
2. Caracterização da fonte: o sol e o céu	39
2.1. Mapeamento do céu	41
2.2. Localização do Sol	43
2.3. Cálculos de irradiância	46
2.4. Cálculos de iluminância	50
2.5. Distribuição de luminâncias e radiâncias do céu	52
2.6. Cálculo da temperatura do céu	56
3. Caracterização da obstrução	60
3.1. Definição de obstrução	60
3.2. Cálculo da obstrução	62
4. Caracterização dos usos da energia solar	65
4.1. Conforto luminoso	65
4.2. Conforto térmico	73
4.3. Efeito bactericida e psicológico	81

4.4.	Aquecimento de água	83
4.5.	Sistemas fotovoltaicos	86
4.6.	Avaliação do desempenho energético combinado	91
5.	Avaliação da obstrução: procedimentos existentes	96
5.1.	Linha sem-céu (LSC)	96
5.2.	Ângulos de obstrução	97
5.3.	Indicadores de altura permitida	99
5.4.	Iluminância vertical	103
5.5.	Modelo de Hong Kong	103
5.6.	Envelope Solar	105
5.7.	Envelope de sombreamento	106
5.8.	Método das radiações ponderadas	107
5.9.	Modelo argentino para avaliação integrada	108
5.10.	O programa PRECIs	110
5.11.	Estudo realizado para a cidade de Mogi das Cruzes, SP	113
6.	Políticas de acesso ao sol: implicações e obstáculos	119
6.1.	Inglaterra	119
6.2.	Los Angeles	120
6.3.	Mogi das cruces	121
7.	Obstrução e consumo energético: estudos exploratórios	126
7.1.	<i>Obstrução 1.0</i> : estrutura	126
7.2.	<i>Obstrução 1.0</i> : apresentação e exemplo de aplicação	130
7.3.	Estudos exploratórios	135
8.	Considerações finais e perspectivas futuras	144
9.	Bibliografia	147

Lista de Figuras

Figura 1 – Esquema de relações Fonte-Cidade-Edifício-Usuário	20
Figura 2 – Estudos de Gropius para acesso ao sol e à luz natural	36
Figura 3 – Relações Sol-Terra	39
Figura 4 – Distribuição espectral da energia solar	40
Figura 5 – Balanço energético da Terra	40
Figura 6 – Visualização da abóbada celeste em São Paulo.	41
Figura 7 – Localizando um elemento na abóbada celeste	42
Figura 8 – Exemplo de projeção da abóbada celeste	43
Figura 9 – As 145 zonas desenhadas em diferentes projeções	43
Figura 10 – Movimento da Terra em torno do Sol	44
Figura 11 – Posição do Sol ao meio-dia no Equador e no Trópico de Capricórnio, indicando influência da latitude e da declinação solar	44
Figura 12 – Movimento aparente do Sol no Equador e no Trópico de Capricórnio.	45
Figura 13 – Gráficos de correlação entre os cálculos de radiação: (a) Totais Diários, (b) Insolação, (c)Nebulosidade	49
Figura 14 – Frequência de ocorrência de horas em que a radiação excede o valor do eixo das abscissas	49
Figura 15 – Percentagem de horas em que a iluminância difusa excede o valor do eixo das abscissas	51
Figura 16 – Percentagem de horas em que a iluminância global excede o valor do eixo das abscissas	52
Figura 17 – Fotos do céu em diferentes condições de nebulosidade	52
Figura 18 – Variação da distribuição de luminâncias do céu para diferentes valores de N_{egv}	54
Figura 19 – Foto com lente “olho de peixe” indicando a obstrução no canteiro central da Av. Paulista, em frente ao Conjunto Nacional	60
Figura 20 – Exemplo de ângulos de obstrução do Edifício A em relação ao ponto P	61
Figura 21 – Mascaramento do Edifício A no ponto P, na projeção estereográfica	62
Figura 22 – Terreno no plano cartesiano, esquema de vértices	62
Figura 23 – Esquema dos raios partindo do ponto médio	63
Figura 24 – Exemplo de simulação no Daylight para área de 20m ² , 1/6 de relação A^i/A_p , razão de aspecto da janela 2:1 e razão de aspecto do ambiente 3:1	72
Figura 25 – Relação entre o FLD calculado e a relação A_p/A_p	72
Figura 26 – Esquema do balanço térmico humano	74
Figura 27 – Diagrama Bioclimático de Olgyay	74
Figura 28 – Diagrama Bioclimático de Givoni	75

Figura 29 – Relação entre T_n e T_{mm} para vários modelos de cálculo	76
Figura 30 – Fluxo de calor entre dois ambientes	77
Figura 31 – Efeito da inércia no fluxo	78
Figura 32 – Exemplo de coletor solar plano	84
Figura 33 – Exemplo de sistema de coletor solar plano	84
Figura 34 – Células fotovoltaicas cristalinas e policristalinas	87
Figura 35 – Exemplo de painel fotovoltaico fabricado no Brasil.	87
Figura 36 – Edifício 4 Times Square em Nova York com fachada fotovoltaica	88
Figura 37 – Desempenho do módulo para diferentes condições de irradiância ($T_c=45^\circ\text{C}$)	90
Figura 38 – Exemplo de demarcação de zonas passivas em um edifício	92
Figura 39 – Exemplo de Curvas LT	92
Figura 40 – Exemplo de gráfico para determinação da geometria ótima da janela	93
Figura 41 – Cálculo da linha sem céu	96
Figura 42 – Distância da linha sem céu à janela em função de $\text{tg } \theta_v$	97
Figura 43 – Cálculo do ângulo de obstrução	98
Figura 44 – Ábaco para a determinação da distância mínima entre edificações	98
Figura 45 – Modelo de envelope com recuos progressivos	99
Figura 46 – Configurações diferentes que apresentam o mesmo fator de visão de céu	100
Figura 47 – Construção dos Indicadores de Altura Permitida	100
Figura 48 – Exemplo de Indicador e visão de céu proporcionada	101
Figura 49 – Exemplo de utilização dos indicadores	102
Figura 50 – Exemplo de indicador de insolação semelhante ao da norma inglesa	103
Figura 51 – Exemplo de cálculo de UVA	104
Figura 52 – Gráfico para determinação o valor de UVA necessário de acordo com a altura da edificação	104
Figura 53 – Modelo de envelope tridimensional.	105
Figura 54 – Exemplo de envelope com curvas de nível para um a latitude de 30° e acesso ao sol entre 9h e 15h	106
Figura 55 – Exemplo das radiações ponderadas plotadas na carta solar	108
Figura 56 – Exemplo de projeção estereográfica de entorno feita no computador	108
Figura 57 – Classificação das tipologias de acordo com o critério de acesso ao sol no espaço urbano circundante e método de comparação	109
Figura 58 – Esquema teórico do PRECIs	110
Figura 59 – Modelos de radiância difusa, direta e global para o céu utilizados pelo PRECIs	111
Figura 60 – Estudo de caso para Friburgo (Perolles Site)	112

Figura 61 – Análise das obstruções máximas que permitissem uma hora de sol nas fachadas Norte, Nordeste, Leste e Sudeste	114
Figura 62 –Esquema para a definição dos recuos laterais e de fundo	115
Figura 63 – Eficiência de sistemas de luz natural para São Paulo, SP	117
Figura 64 – Estudo de ocupação de lotes de 5 x 25 m utilizando os recuos propostos	122
Figura 65 – Estudo de ocupação de lotes N - S de 40 x 50 m utilizando os recuos propostos	123
Figura 66 – Estudo de ocupação de lotes L - O de 40 x 50 m utilizando os recuos propostos	123
Figura 67 – Estudo de ocupação de lotes NO SE de 40 x 50 m utilizando os recuos propostos	123
Figura 68 – Distribuição das células de teste	126
Figura 69 – Dados do terreno a serem entrados no programa - esquema	127
Figura 70 – Fluxo de dados no programa <i>Obstrução 1.0</i>	129
Figura 71 – Planilha de entrada de dados do obstrução	130
Figura 72 – Características da célula de teste na tela 5 que calcula o consumo de ar condicionado	131
Figura 73 – Características da célula de teste na tela 7 que calcula o consumo de iluminação artificial	132
Figura 74 – Perspectiva do edifício exemplo com dados para inserção no <i>Obstrução 1.0</i>	132
Figura 75 – Exemplo do resultado final da tela 3	132
Figura 76 – Obstrução causada pelo edifício exemplo no ponto médio da janela das células de teste	133
Figura 77 – Cálculo da radiação horária incidente no dia 01/01 nas fachadas e na cobertura das células de teste com e sem obstrução	134
Figura 78 – Resultado da avaliação de impacto do edifício exemplo	134
Figura 79 – Variação do consumo de energia para variação de WWR e Q_i para célula de 6 x 6 x 3 m	136
Figura 80 – Variação do consumo de energia de acordo com variação no volume da célula de teste	137
Figura 81 – Variação do consumo de energia para variação de WWR e Q_i para célula de 3 x 3 x 3 m	137
Figura 82 – Comparação entre cálculos para as duas hipóteses de T_i	138
Figura 83 – Variação do consumo de energia para variação do Fator de Inércia para célula de 3 x 3x 3 m	139
Figura 84 – Variação do consumo de energia com a obstrução para célula de 3 x 3x 3 m	140
Figura 85 – Evolução da diferença no consumo de energia para célula de 3 x 3x 3 m	141
Figura 86 – Evolução da diferença no consumo de energia para célula de 3 x 3x 3 m, orientada NE-SO	141
Figura 87 – Variação do consumo de energia de acordo com a obstrução e a orientação da célula de teste (versão 1)	142
Figura 88 – Variação do consumo de energia de acordo com a obstrução e a orientação da célula de teste (versão 2)	142
Figura 89 – Variação do consumo de energia de acordo com a obstrução e a orientação da célula de teste (versão 3)	143

Lista de Tabelas

Tabela 1- Quadro resumo da atuação dos diversos agentes na questão ambiental brasileira	25
Tabela 2 - Consumo de eletricidade por setores no Brasil (1990)	31
Tabela 3. - Usos finais da energia nas edificações (1990)	32
Tabela 4 – Divisão do céu em 145 zonas	42
Tabela 5 – Eficácia luminosa (EL) em lm/W de acordo com as diversas bibliografias	51
Tabela 6 – Valores para os coeficientes para o modelo de céu	56
Tabela 7 – Níveis de iluminação segundo estudos que embasaram as normas atuais.	66
Tabela 8 – Níveis de iluminação artificial prescritos pelo IES e pela NBR 5413	66
Tabela 9 – Níveis de iluminação natural	67
Tabela 10 – Variáveis para simulações no Daylight	72
Tabela 11 – Características do módulo HM-70D12	90
Tabela 12 – Ângulos de obstrução dados pelos indicadores da norma inglesa	101
Tabela 13 – Fatores de ponderação segundo Aroztegui (1981)	107
Tabela 14 - Afastamento lateral e de fundo, considerando-se um afastamento mínimo de 2,00 m	116
Tabela 15 - Recuos frontais, considerando-se uma largura de via V	116
Tabela 16 – Relação entre A_p/A_j , iluminância mínima, eficiência, e ângulo de obstrução	118
Tabela 17 – Estudo para coeficiente de aproveitamento em lotes de 40x50m	124
Tabela 18 – Dados de entrada e de saída do <i>Obstrução 1.0</i> para usuários restritos e avançados	127
Tabela 19 – Dados de entrada e de saída para dados climáticos e modelagem de céu	128
Tabela 20 – Obstruções consideradas no estudo exploratório	139
Tabela 20 – Ângulos de obstrução ideais para cada orientação de fachada	143

Lista de Símbolos e Definições

Grandeza	Símbolo	Definição	Unidade
Altura angular	ξ	Ângulo formado na vertical entre um elemento e o plano do horizonte	°
Ângulo de obstrução	θ	Ângulo formado pelo edifício obstrutor na horizontal ou na vertical	°
Área da superfície	A_{sup}	Área de uma superfície, vem sempre acompanhada de um subscrito que indica a superfície	m ²
Azimute	γ	Ângulo formado na horizontal entre um elemento e o norte geográfico	°
Carga de aquecimento	CEA	Carga a ser fornecida pelo equipamento de aquecimento	W
Carga de refrigeração	CER	Carga a ser removida pelo equipamento de ar condicionado	W
Carga interna	Q_i	Carga térmica devido à ocupação da edificação, considerando-se pessoas e equipamentos	W
Carga térmica por onda longa	Q_{OL}	Carga térmica devido à troca radiativa do ar ambiente com o fundo de céu	W
Carga térmica solar	Q_S	Carga térmica decorrente da radiação solar pelos fechamentos opacos e transparentes, sejam eles verticais ou horizontais	W
Coeficiente de absorção	α	Razão entre a irradiância no componente e a radiação absorvida, função da cor e das características da superfície	-
Coeficiente de perda	q	Coeficiente de perda por convecção ou condução	W/°C
Coeficiente de utilização	J	Razão entre o fluxo incidente na fachada em que se localiza a abertura e a iluminância horizontal no plano de trabalho	-
Condutibilidade térmica	U	Capacidade do componente de transmitir calor, função dos materiais e espessuras	W/(°C.m ²)
Consumo de energia	CEE	Consumo energético de um sistema, o subscrito indica qual: iluminação artificial, ar condicionado e aquecimento	Wh
Declinação	δ	Ângulo entre o eixo de rotação da Terra e o de translação, entre - 23,5° e 23,5°	°
Eficácia luminosa	EL	Valor que multiplica a radiação solar de modo a permitir a avaliação da quantidade de luz contida nesta radiação	lm/W
Eficiência do ar condicionado	E_{AC}	Taxa de remoção de calor pelo aparelho de ar condicionado	kJ/W
Emissividade	ε	Razão entre a radiação emitida por uma superfície a uma determinada temperatura e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura	-
Fator de Inércia	m	Fator representativo da inércia do ambiente, sendo 0 para inércia nula e 1 para inércia infinita. Edificações reais nunca estarão nos extremos	-
Fator de luz diurna	FLD	Razão entre a iluminância horizontal em um ponto no interior do ambiente e a iluminância horizontal em um ponto exterior desobstruído	%
Fator solar	S_{tr}	Razão entre a radiação incidente no componente transparente e a transmitida e emitida para o interior da edificação	-
Graus-hora	Gh	É o excesso da temperatura interior acima ou abaixo de um valor denominado temperatura base, dado pela temperatura neutra mais tolerância. Pode ser de aquecimento ou de refrigeração	°C
Iluminância difusa	E_d	Luz do sol difundida pela atmosfera incidente sobre uma superfície	lux
Iluminância direta	E_D	Luz (radiação no comprimento de onda entre 380 e 780 nm) vinda diretamente do sol incidente sobre uma superfície	lux
Iluminância global	E_G	Luz solar incidente sobre uma superfície, considerando componentes direta e difusa	lux
Índice de claridade	k	Razão entre a irradiância difusa e a irradiância global em um plano horizontal	-
Índice de limpidez	k_t	Razão entre a irradiância global em plano horizontal na Terra e no topo da atmosfera	-

Grandeza	Símbolo	Definição	Unidade
Índice de nebulosidade	NI	Índica a cobertura de nuvens no céu, sendo 0 um céu completamente claro e 10 um céu totalmente encoberto	-
Irradiância difusa	G_d	Radiação do sol difundida pela atmosfera incidente sobre uma superfície	W/m²
Irradiância direta	G_D	Radiação vinda diretamente do sol incidente sobre uma superfície	W/m²
Irradiância global	G_G	Radiação solar incidente sobre uma superfície, considerando componentes direta e difusa	W/m²
Irradiância no topo da atmosfera	G_o	Radiação do sol incidente em um plano horizontal localizado no topo da atmosfera terrestre	W/m²
Latitude	ϕ	Ângulo formado entre uma linha que liga o centro da Terra ao zênite e uma linha que liga o centro da terra ao equador	°
Luminância	L	Luz emitida por uma superfície em função da sua área	cd/m²
Potência Instalada	Pot	Potência instalada do sistema de iluminação artificial	W/m²
Radiância	R	Radiação emitida por uma superfície em função da sua área	W/(sr.m²)
Resistência térmica superficial	Rse	Resistência térmica da superfície em relação às trocas convectivas, função da velocidade do vento	°C.m²/W
Temperatura de fundo de céu	$T_{céu}$	Temperatura superficial de um corpo negro que realiza trocas radiativas semelhantes às trocas com o fundo de céu	°C ou K
Temperatura interna suposta	T_{is}	Temperatura interna no ambiente caso não haja condicionamento artificial	°C
Temperatura média mensal	T_{mm}	Média de todas as temperaturas horárias dos últimos 30 dias	°C
Temperatura Neutra	T_n	Temperatura na qual o indivíduo não prefere um entorno mais frio ou quente, sendo função da temperatura média mensal, para levar em conta a aclimatação	°C
Transmissão luminosa	TL	Razão entre a iluminância incidente no componente transparente e a transmitida para o interior da edificação	-

Unidade	Símbolo
Grau	°
Esferorradiano	sr
Watt	W
Candela	cd
Lumen	lm
Metro quadrado	m ²
Kelvin	K
Graus centígrados	°C
Lux	lux
Metro	m
Joule	J

Resumo

O objeto desta pesquisa é a relação, na escala urbana, entre as relações geométricas entre duas ou mais edificações e o acesso aos recursos naturais, no caso, a luz e o sol, de modo a otimizar o conforto térmico e luminoso, bem como a eficiência energética nos edifícios urbanos em cidades de médio e grande porte.

O objetivo foi desenvolver uma ferramenta que possa ser incorporada à legislação urbana ou aos procedimentos administrativos municipais que permita avaliar o efeito de novas edificações no desempenho térmico e luminoso dos vizinhos, servindo como parâmetro para a determinação de recuos, gabaritos e densidade urbana.

Propôs-se seguir um raciocínio dedutivo, gerando uma ferramenta a partir de modelos já existentes. Para isso, o objeto de estudo foi dividido em três partes interdependentes entre si: a fonte, a interface e o uso final da energia.

Estabelecer a comparação entre a necessidade de energia solar para iluminação e aquecimento e a sua indesejabilidade como carga térmica constituiu-se no principal desafio. Utilizou-se o consumo energético como variável comum, o que respondeu adequadamente ao fim proposto.

Foi possível chegar a um ângulo de obstrução ótimo para cada orientação de fachada de acordo com o uso predominante na área. A iluminação apresentou-se como fator determinante, principalmente quando os edifícios não apresentavam cargas internas altas ou panos de vidro na fachada. O consumo ar condicionado teve peso mais significativo nas edificações com fachadas envidraçadas, sendo o seu impacto aumentado na medida em que se aumenta a carga interna. Deste modo, infere-se que só se justifica a avaliação do impacto da obstrução no desempenho térmico no caso de edificações comerciais. Caso contrário, a abordagem simplificada, levando em conta só a iluminação pode ser suficiente.

Conclui-se ainda que é possível utilizar ângulos de obstrução diferentes dependendo do uso e das características predominantes das edificações, sendo possível se atingir altas densidades, preservando o acesso dos vizinhos ao sol e à luz natural.

Abstract

This paper refers to the geometric relationship among two or more urban buildings and their access to natural resources, mainly daylight and sunlight, so that comfort and energy performance of both may be optimized.

The main goal was to develop a tool to assess the impact of new buildings on thermal and lighting performance of neighbors. This could be incorporated to the urban legislation or be used to determine setbacks, height limits and desired urban densities.

The tool is to be generated using available models, which may describe the source (sun and daylight), the interface (the city) and the final use of solar energy (building's passive and pro-active solar systems).

In order to compare solar energy needs and undesirable thermal loads, energy consumption was used as common ground, which proved to be an adequate solution to the problem.

Obstruction angles were determined for each façade orientation, given a current use for the urban area, commercial or residential. For low internal load buildings with no curtain walls, daylight proved to be the main criterion to determine the angles. Air conditioning was only critical in buildings with a high wall-window ratio, especially in those with high internal loads. This leads to the conclusion that thermal performance evaluation is only justifiable for large commercial buildings. In other cases, a simplified approach may be used, considering only daylight to determine obstruction angles and setbacks.

It was also concluded that it is possible to allow different obstruction angles for different urban areas, according to land use and desired densities. Therefore, high-density development is possible still preserving solar and daylight access rights.

O objeto desta pesquisa é a relação, na escala urbana, entre as relações geométricas entre duas ou mais edificações e o acesso aos recursos naturais, no caso, a luz e o sol, de modo a otimizar o conforto térmico e luminoso, bem como a eficiência energética nos edifícios urbanos. O aproveitamento dessa energia pode ser feito através da iluminação natural, do aquecimento solar da edificação e dos ambientes e da utilização para o aquecimento de água e para a geração de energia elétrica. A otimização desse aproveitamento deve levar em conta a carga térmica solar indesejável em situações em que o clima e/ou o uso do edifício indiquem a possibilidade stress térmico pelo calor. O edifício e a cidade foram trabalhados dentro dos conceitos de sustentabilidade e conforto ambiental melhor detalhados no capítulo 1.

Trata-se de um trabalho essencialmente para espaços urbanos de médio e grande porte, visto que o impacto de uma edificação sobre a outra depende da relação entre distância e altura entre elas. Deste modo, só se justifica tratar a questão do acesso ao sol e à luz natural em espaços onde haja edificações colocadas próximas umas às outras (densidade) e com múltiplos pavimentos, podendo lançar sombra sobre os vizinhos (verticalização). As cidades brasileiras apresentam grande disponibilidade de radiação solar que tanto pode tornar-se energia útil, caso seja devidamente convertida, como carga térmica indesejável, sendo necessário estabelecer ferramentas que permitam ao projetista avaliar o impacto da sua edificação no recebimento de radiação pelo entorno. No Brasil, também é comum uma heterogeneidade de densidades e usos no tecido urbano, tornando mais difícil controlar as interferências e estabelecer parâmetros para o acesso ao sol.

Ressalta-se também que problema inclui não só a discussão dos critérios técnicos, mas também a questão da aplicabilidade do modelo proposto e o impacto esperado na cidade e no planejamento corrente. Como deseja-se incorporar o método à legislação urbana, fazem-se necessárias algumas incursões no campo legal.

É importante observar que como o trabalho trata somente das relações geométricas das edificações, algumas hipóteses e simplificações devem ser feitas, com cuidado, especialmente em relação aos materiais e aos usos das edificações. No entanto, deve-se colocar que o aproveitamento efetivo da luz e da energia solar é dependente do projeto, estando apenas a disponibilidade do recurso garantida pela legislação.

Para um exercício teórico, optou-se pela cidade de São Paulo como estudo de caso por duas razões: a existência de períodos de stress térmico de calor e de frio, podendo-se explorar a diferença sazonal da necessidade de radiação solar, segundo o critério de conforto térmico e a facilidade de acesso aos dados climáticos e de radiação solar. No entanto, pretende-se que o resultado final possa ser extrapolado para outras situações, através da incorporação de dados locais aos modelos desenvolvidos.

OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma ferramenta que possa ser incorporada à legislação urbana ou aos procedimentos administrativos municipais que permita avaliar o efeito de novas edificações no desempenho térmico e luminoso dos vizinhos, servindo como parâmetro para a determinação de recuos, gabaritos e densidade urbana.

Serão tratadas principalmente as trocas radiativas entre edificação e meio, sendo que as trocas por convecção, embora significativas para o desempenho térmico e afetadas por novas edificações no entorno, fogem ao escopo deste trabalho, conforme definido no item anterior. Deseja-se também contribuir para a geração de uma metodologia de planejamento urbano ambientalmente consciente. Para tanto, devem-se cumprir os seguintes objetivos específicos

- Definir métodos para cálculo da disponibilidade do recurso solar, principal fonte de radiação, em cidades onde os dados para uso imediato não estejam disponíveis;
- Verificar a eficiência de procedimentos para cálculo de desempenho térmico, luminoso e energético da edificação já existentes, bem como sua precisão e aplicabilidade para o estudo proposto;
- Estabelecer critérios de integração para recomendações conflitantes, por exemplo, em relação ao uso da radiação solar como fonte de luz e de carga térmica indesejada;
- Gerar recomendações que possam ser incorporadas à legislação urbanística e ao código de obras da cidade de São Paulo, com a possibilidade de extrapolação do método para outras cidades.
- Desenvolver uma ferramenta integrada que possa ser incorporada ao dia a dia dos procedimentos de aprovação de projetos de edificações, que possa ser utilizada facilmente tanto pelo projetista quanto pelo agente fiscalizador.

MÉTODO DE TRABALHO

Devido à complexidade das questões urbanas, o planejador vê-se sempre obrigado a eleger as variáveis com as quais irá lidar, realizando seu trabalho a partir de modelos. Estes são construções conceituais, físicas ou matemáticas onde são levantadas somente as características relevantes da realidade importantes à resolução de um determinado problema, de modo a possibilitar a sua compreensão (Echenique, 1975). A escolha do que é relevante, no entanto, implica ignorar elementos que podem ter amplas repercussões no contexto geral, tornando necessária a construção de um marco teórico.

Segundo Coombs (in Echenique, 1975, p.237), “todo o conhecimento é resultado da teoria – adquirimos informação a partir de hipóteses prévias – ‘os fatos são inferências’, e assim também são os dados, as medidas e as escalas”. Na experiência socialista funcionalista do leste europeu, relatada por Delle Donne (1983), a intervenção do Estado era total e visava,

através do uso de modelos matemáticos, a criar um espaço que possibilitasse um grau de desenvolvimento ótimo, criando condições de vida favoráveis para a população. O método pressupõe que devam “ser fixados e expressos quantitativamente fatos sociais (...) que expressem as necessidades da população”. Este ponto de vista é extremamente criticado pelas abordagens marxistas (Gottdiener, 1997) por sua falta de perspectiva cultural e histórica, mas Assis (2000) coloca que a abordagem sistêmica tradicional da ciência e do meio urbano ainda é a que fornece maior capacidade de previsão especialmente dos fenômenos físicos envolvidos na questão urbana, sendo a mais adequada para estudar as questões climáticas, térmicas e de iluminação, onde parâmetros numéricos de qualidade podem ser estabelecidos.

A grande vantagem do processo analítico está em desvincular a pesquisa da demanda pela sustentabilidade social, inatingível por meios puramente técnicos, o que não significa ignorar os fenômenos sociais, sendo o meio natural visto principalmente como fonte de recursos a ser preservada (Bartelmus, 1994).

Este trabalho propôs-se a seguir um raciocínio dedutivo, gerando um modelo que possa prever o impacto de uma nova edificação na vizinhança a partir da composição de modelos já existentes. Há uma coleta de alguns dados climáticos imprescindíveis e algumas simulações para testar a validade das equações para as condições brasileiras, mas não se pretendeu reformular nenhum dos métodos estudados, indicando-se apenas a necessidade de revisão, em estudos futuros.

Para isso, o objeto de estudo foi dividido em três partes interdependentes entre si, que foram 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 (ver Figura 1).

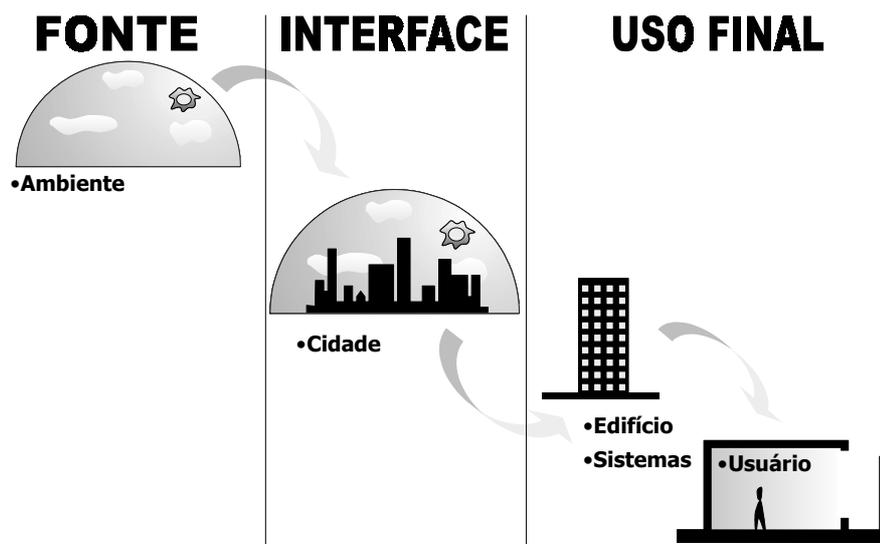


Figura 1 – Esquema de relações Fonte-Cidade-Edifício-Usuário

- *Fonte*

Como neste trabalho serão consideradas principalmente as trocas radiativas, a fonte primária da energia, no caso, 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). Assim sendo, este trabalho considerou também a própria abóbada celeste como sendo uma fonte. Observa-se que a atmosfera altera a composição espectral da radiação solar. Embora no caso dos estudos térmicos e dos sistemas pró-ativos a energia solar seja aproveitada quase que integralmente, nos estudos de iluminação interessa apenas a faixa contida entre os comprimentos de onda de 380nm a 780nm, à qual a retina humana é sensível. Foi, portanto, fundamental 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 de radiação solar foram completadas através de um modelo de cálculo que utiliza os dados horários de duração do brilho solar (Duffie & Beckman) e apresentou boa correlação com os dados medidos. A composição da radiação solar (eficácia luminosa) e a sua distribuição pela abóbada celeste também são avaliadas por modelos matemáticos (respectivamente em Vartianien, 2000a; Igawaa & Nakamura, 2001; Brunger & Hooper, 1993).

- *Uso final*

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 normalmente é o ser humano, principalmente através de índices de conforto e de uma avaliação custo-benefício para o usuário do sistema. No entanto, como as relações do ser humano com o meio são intermediadas pela edificação e pelos sistemas de captação de energia solar, seu conforto é determinado também em parte pelo objeto construído que o envolve. Isso gera um critério vinculado a um desempenho conjunto dos sistemas solares e da edificação que permita alcançar o maior nível de conforto para o usuário a um menor custo energético. Para tanto, neste trabalho, optou-se por utilizar métodos tradicionais de avaliação desse conjunto de sistemas.

A principal variável utilizada para descrevê-los foi o consumo comparativo de energia, por ser a única variável comum a todos os sistemas (Alucci, 1992) e por se converter facilmente em medida do nível de desconforto humano. Visto ainda que se trata de um trabalho na escala urbana, a grande dificuldade em modelar o usuário final foi abstrair variáveis específicas das edificações que não podem ser controladas pela legislação urbana, mas afetam o seu desempenho térmico, luminoso e energético. Sempre que possível isso foi feito e quando não foi, parâmetros médios encontrados na indústria e nos edifícios brasileiros foram utilizados. Em alguns casos, foram utilizados dados para edificações otimizadas, considerando-se que só se pode garantir o desempenho de sistemas que já estejam internamente otimizados.

- *Interface*

O entorno construído funciona como um filtro entre o usuário final (visto nesse caso como o conjunto sistemas solares/edificação/ser humano) e a fonte, intermediando as trocas radiativas entre os dois elementos, sendo esta interferência o objeto deste trabalho. Para isso, o entorno foi avaliado de acordo com o quanto ele impedia a utilização da energia solar pelo usuário, definido pela obstrução da visão do céu que ele produz. Esta obstrução afetava necessariamente o desempenho da edificação e dos sistemas, e, caso seja negativa, buscou-se estabelecer um referencial máximo de perda de desempenho admissível.

Conhecendo-se bem as partes do objeto, foram estudados procedimentos existentes para a avaliação do acesso ao sol e à luz natural, que possibilitaram a geração de uma ferramenta computacional, o *software* Obstrução 1.0, programado em *Microsoft Excel*. O programa foi então utilizado para avaliar variações nas edificações e na obstrução de modo a determinar as inter-relações entre as partes e produzir recomendações. Para tanto ele considerou uma célula de teste colocada no ponto médio de cada divisa do terreno, com a janela voltada para o edifício cujo impacto deseja-se analisar. Foi calculado o consumo de cada célula com e sem o edifício e é estabelecida a variação percentual e absoluta. Foi então feita uma totalização do consumo, dividindo-se o consumo de cada célula pela largura da sua fachada e multiplicando-se esse valor pelo comprimento do terreno naquela divisa. Deste modo, obteve-se o impacto total da edificação no desempenho termo-luminoso-energético do entorno.

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação segue aproximadamente a mesma estrutura do método utilizado para desenvolver a pesquisa, com algumas pequenas alterações.

No capítulo 1 são estabelecidas as bases teóricas do trabalho, estudando-se a relação entre os conceitos de meio ambiente, planejamento urbano e conforto ambiental. É também apresentado um breve histórico das políticas de garantia de acesso ao sol e como a preocupação com esta questão evoluiu até os dias de hoje.

No capítulo 2 é caracterizada a fonte de energia, a radiação solar, em termos quantitativos e qualitativos. Apresentam-se os modelos para representação do céu e para o cálculo da quantidade de luz e radiação disponível, bem como a contribuição de cada parte da abóbada celeste para esta disponibilidade. Por fim, são tratadas as informações relevantes para a troca de onda longa com o fundo de céu, determinando sua emissividade.

No capítulo 3 é definido o conceito de obstrução e a metodologia para determinar a influencia das edificações na visão de céu do entorno, permitindo identificar sua interferência na radiação incidente nos vizinhos.

No capítulo 4 são apresentados os usos possíveis para a energia solar: iluminação, desinfecção, efeito psicológico, influência no desempenho térmico, aquecimento de água e geração de energia. Cada um destes usos é definido e é apresentada uma modelagem matemática para avaliação de cada um deles. O maior foco é dado no desempenho térmico e

luminoso. É também proposta uma maneira de integrar todos estes usos¹ a partir de uma única variável de referência: o consumo de energia, ou a redução deste, resultante da incidência de radiação no edifício.

No capítulo 5 são mostrados os procedimentos já existentes para proteção ou avaliação do acesso ao sol em várias cidades e países, avaliando-se pontos fortes e fracos de cada um deles e a maneira como consideram a fonte, a interferência e o uso final. A avaliação destes métodos fornece base para a criação de uma ferramenta nova, que propõe uma maneira integrada de avaliar os usos da energia solar.

No capítulo 6 são apresentados estudos relacionados aos impactos que estas políticas de controle exercem na forma das edificações e na densidade urbana. São apresentadas uma avaliação prática e duas teóricas de instrumentos deste tipo, que foram ou serão efetivamente implantados. Mostram-se também as dificuldades na implementação destes instrumentos devido a fatores políticos e econômicos.

No capítulo 7 é apresentado o programa desenvolvido, algumas das premissas adotadas e o sistema de fluxo de dados dentro do *software*. São apresentados também estudos exploratórios, usados para definir as variáveis internas de uma célula de teste.

No último capítulo são apresentadas as considerações finais do trabalho, um sumário das conclusões e uma verificação do cumprimento dos objetivos propostos. São também indicados caminhos por onde a pesquisa nesta área pode seguir e possibilidades de aprofundamentos e estudos futuros.

¹ Exceto aos efeitos bacteriológicos e psicológicos, que são mais difíceis de serem mensurados.

Marco Teórico: Ambiente e Conforto

As legislações e procedimentos existentes para a proteção do acesso ao sol e à luz natural podem ser entendidos como ferramentas de planejamento urbano que controlam da geometria de novas edificações com o objetivo de garantir o desempenho dos edifícios existentes. Entendendo a radiação solar e a luz como recursos naturais, disponíveis no meio ambiente, pode-se considerar que essa ferramenta tem um caráter de proteção ambiental. Ao utilizar a legislação urbana como instrumento para a preservação do acesso a esses recursos, torna-se fundamental entender o papel que as políticas públicas semelhantes têm na formação do tecido urbano e mais ainda, no modo de vida dos seus habitantes. Busca-se aqui construir uma base teórico-conceitual, tratando da relação entre o discurso ambiental e da sustentabilidade, o planejamento urbano e o conforto ambiental.

1.1. BREVE HISTÓRICO DA QUESTÃO AMBIENTAL

O movimento ambiental tem suas origens nos Estados Unidos da década de 60, com grupos isolados que defendiam a preservação ambiental, em uma reação à destruição causada pela sociedade industrial (Viola, 1991). Apesar de ser tido como ingênuo e do enfoque excessivamente preservacionista, o movimento ganhou força da década seguinte, se disseminando pelos demais países industrializados e chegando à América Latina, Europa Oriental, União Soviética e Leste da Ásia na década de 80 (Viola, 1991).

Em 1970 o movimento ambiental perde seus contornos ingênuos a partir da formação do Clube de Roma, que recupera a lógica malthusiana de necessidade de contenção do crescimento econômico e populacional a níveis extremos para que se evite uma degradação ambiental ainda maior, a partir do relatório *Os Limites do Crescimento*. Um contraponto menos radical foi estabelecido na Conferência de Estocolmo de 1972, onde se propôs um controle mais gradual dos crescimentos econômicos e populacionais, e não sua total interrupção como o proposto pelo Clube de Roma. O Brasil participou da conferência com uma postura oposta à dominante, pois, envolvido com o milagre econômico, os representantes brasileiros defendiam uma industrialização intensa do país, sem grandes preocupações ambientais, contando com a grande disponibilidade de recursos naturais e com a capacidade do meio ambiente, ainda relativamente pouco explorado, absorver os eventuais impactos (Viola, 1991). É importante, no entanto, observar o caráter unilateral das recomendações feitas por ambos os grupos, jogando o peso da conservação do ambiente para os países menos desenvolvidos, detentores da maior parte do patrimônio ambiental, para que os mais industrializados possam manter seus níveis de produção. Tal postura pode ser vista até hoje na relutância de países como a Austrália e Estados Unidos em reduzir seus níveis de emissão de CO₂ aos padrões estabelecidos pelo Protocolo de Kyoto (Kam, 1999).

O Brasil iniciou-se timidamente na questão ambiental ainda na década de 70, quando foram criadas instituições não governamentais preocupadas com a questão e, mais tarde, as

agências ambientais governamentais, estas com o objetivo de apagar a imagem negativa deixada pela delegação brasileira na Conferência de Estocolmo. De 71 a 85, estes foram os dois principais agentes da questão ambiental, agindo basicamente com enfoque na preservação ambiental, combatendo a poluição industrial e a destruição de belezas paisagísticas por empreendimentos humanos e preservando algumas amostras de ecossistemas. Viola (1991) observa, ainda, que houve uma importação acrítica do modelo internacional, que deixou de fora questões importantes na realidade brasileira, como o controle populacional e o saneamento básico, que já haviam sido resolvidas nos países industrializados. Entre 85 e 91 a disseminação da preocupação com o ambiente transforma o movimento ambiental em multi-setorial, com várias entidades e grupos envolvidos. A Tabela 1 abaixo, feita com base em Viola (1991), mostra a atuação de cada setor envolvido nos períodos de 1971-1985 e 1986-1991.

Tabela 1- Quadro resumo da atuação dos diversos agentes na questão ambiental brasileira

(continua)

AGENTES	ATUAÇÃO	
	1971-1985	1986-1991
ONGs e Grupos ambientais	<ul style="list-style-type: none"> • Denúncia e conscientização; • Apropriação acrítica do modelo internacional, deixando de fora controle populacional e saneamento básico; • Influência limitada na formulação de políticas ambientais; • Tidas como ingênuas e tecnicamente incompetentes pelo governo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Surgem novas organizações com perfil profissional e outras, amadoras, se profissionalizam; • Buscam alternativas viáveis para a recuperação do ambiente; • Influência nas agências estatais e na Constituição de 88; • Desde 88, adotam a visão do desenvolvimento sustentável.
Agências Governamentais	<ul style="list-style-type: none"> • Socialização dos custos orienta sistema de licenciamento ambiental e controle de poluição; • Tidas como pouco severas e lentas pelas ONGs; • Trabalham com hipótese de disponibilidade infinita de recursos no Brasil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Assumem função normativa e avaliadora • Disseminam a problemática ambiental no governo; • Promovem interação entre agências e comunidade científica e entre as próprias agências; • IBAMA traz a questão do uso conservacionista de recursos.
Grupos Sócio-ambientais	-	<ul style="list-style-type: none"> • Atuam em causas sociais com impacto ambiental como seringueiros, sem terra, etc;
Instituições científicas	-	<ul style="list-style-type: none"> • Abordam a questão de forma interdisciplinar; • Proporcionam embasamento científico pras propostas elaboradas.

(conclusão)

AGENTES	ATUAÇÃO	
	1971-1985	1986-1991
Administradores	-	<ul style="list-style-type: none"> • Interessados nas oportunidades empresariais da proteção ambiental; • Financiam as ONGs profissionais.
Mercado consumidor	-	<ul style="list-style-type: none"> • Surgem com a conscientização e devem exigir atitudes ambientalmente corretas dos produtores.
Agências internacionais	-	<ul style="list-style-type: none"> • Deve reger questões que ultrapassam as fronteiras nacionais.

O marco definitivo da questão ambiental no Brasil foi a realização da UNCED 92 no Rio de Janeiro. A conferência teve repercussão internacional e consolidou a visão do desenvolvimento sustentável como a base para a elaboração de políticas relacionadas ao meio ambiente. Embora isso sugira um consenso nos meios científicos e políticos, o conceito permaneceu exageradamente amplo e dificilmente aplicável de maneira direta. No relatório *Nosso Futuro Comum* foi apontada a necessidade de “um novo tipo de desenvolvimento capaz de manter o progresso humano não apenas em alguns lugares por alguns anos, mas em todo o planeta até um futuro longínquo (ONU, 1988, p. 4).” Bartelmus (1994) apresenta outro conceito semelhante dado pela WCED em 1987 que afirma que o desenvolvimento sustentável é aquele que permite o atendimento das necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades. O esvaziamento e a inaplicabilidade destes conceitos na geração de políticas ambientais efetivas merece, portanto, maiores discussões.

1.2. DISCUSSÃO ACERCA DA SUSTENTABILIDADE

Bartelmus (1994) mostra que o conceito de sustentabilidade nasceu na própria ciência ecológica, significando o comportamento prudente de um predador que evitava caçar acima da sua necessidade e da capacidade de recuperação da população de presas e foi rapidamente apropriado pelo discurso econômico como a conduta de manter equilibrada a receita e a despesa em um determinado período de tempo. O autor chama a atenção, no entanto, para o fato de que pode haver uma grande variedade de noções de sustentabilidade diferindo de acordo com as perguntas básicas: de que, para quem, onde e quando.

Uma constante, no entanto, é que o conceito de sustentabilidade está ligado a uma noção de continuidade e, portanto, tem relação intrínseca com o período de tempo pelo qual uma atividade, processo, fenômeno, entidade ou organização consegue se manter ou sobreviver, tornando-se a grande questão então quais os processos devem ser mantidos e quais não.

Costa (2000) afirma que o atual projeto de modernidade (capitalista ocidental) encontra no desenvolvimento sustentável sua principal tradução e indica a contribuição do marxismo ecológico, que mostra a necessidade da conservação da natureza para o processo de

acumulação de capital no momento atual. O debate da sustentabilidade, deste modo, estaria mais relacionado à manutenção de uma determinada ordem social do que propriamente à preservação da natureza. Apesar da identificação entre o projeto capitalista pós-moderno e desenvolvimento sustentável, o discurso da sustentabilidade ainda pode abrigar diversas práticas e posturas ideológicas, o que vem contribuindo para o enfraquecimento do conceito através de definições exageradamente amplas, como as citadas no item 1.1 e da utilização exaustiva do termo nos meios científicos e na mídia. A indefinição do conceito estaria ligada principalmente a uma necessidade política de apropriação deste conceito, por parte de grupos de interesse, como definidor de práticas futuras e também como diferencial na atração de recursos:

“Por um lado, se a sustentabilidade é vista como algo bom, desejável, consensual, a definição que vai prevalecer vai construir autoridade para que se discriminem, em seu nome, as boas práticas das ruins. Abre-se, portanto, uma luta simbólica pelo reconhecimento da autoridade para falar em sustentabilidade” (Acselrad, 1999, p. 80).

Um exemplo disso é o tratamento dado pelos ambientalistas ao urbano. Incapazes de lidar com a questão, os ambientalistas passaram a negar a sua existência, tratando a cidade somente como uma estrutura danosa ao meio ambiente e deixando de fora da sua abordagem um processo social importante para o entendimento do problema ambiental (Costa, 2000).

Pacheco et al. (1992) já aponta que a mudança no conceito de ambiente da visão preservacionista tradicional para incluir problemas urbanos e sociais como o abastecimento, por exemplo, abre caminho para uma nova ótica de abordagem integrada. A autora defende uma visão holística tomando como base o ponto de vista dos diversos atores envolvidos e adotando práticas de gestão e de intermediação de conflitos, ao invés das práticas tradicionais de planejamento.

Uma outra abordagem interessante divide o discurso do desenvolvimento sustentável em diversas matrizes: a da eficiência, a da equidade, a da escala, a da ética e a da auto-suficiência (Acselrad, 1999). A primeira e a terceira estão relacionadas a uma racionalidade econômica, buscando ou otimizar ou conter os processos e assim viabilizar a continuidade dos mesmos e da sociedade. A segunda e a quarta na verdade tratam de uma mudança de paradigma, pois se interessam por uma justiça inviável no sistema capitalista. É de se questionar se seriam realmente discursos de sustentabilidade, tendo em comum com os demais somente a necessidade de continuidade da vida humana e tentando alterar os demais aspectos da vida social. A última já contém um forte viés ideológico, pregando a desvinculação das economias nacionais com os fluxos do mercado mundial.

Bartelmus (1994), por sua vez apresenta uma divisão própria, que pode ser tomada como complementar à de Acselrad, afirmando que “no que se refere à disponibilidade de bens relevantes para o bem-estar humano, três categorias de sustentabilidade podem ser estabelecidas de acordo com a fonte dos bens: econômica, ecológica e social (p. 64)”. O autor ainda separa a sustentabilidade em mais dois tipos: a do capital humano e a do capital natural.

A visão é obviamente voltada para a questão econômica, o que pode ser percebido pela própria terminologia. Ela se aproxima bastante do discurso tecnocêntrico, onde os mercados e a tecnologia são o ponto de partida para a elaboração do planejamento urbano e o bem-estar humano, e não o ambiente, devem ser o foco de preocupação (Tate & Mulugetta, 1998). Essa é a visão corrente nos meios que estudam o conforto ambiental tanto no edifício quanto na cidade, o que será tratado com mais profundidade no item 1.3 (Kam, 1999; Vale & Vale, 1999). O meio natural é visto como uma fonte de recursos a ser preservada, ou mais ainda, capitalizada:

“Os sistemas naturais disponibilizam recursos sem custo monetário como água, oxigênio, fluxos de nutrientes, capacidade de assimilação de dejetos e outros bens menos tangíveis. (...) Enquanto estes bens e serviços não são escassos eles não afetam a sustentabilidade da produção e do crescimento econômico, ou o bem-estar humano” (Bartelmus, 1994, p. 64).

Tate & Mulugetta (1998) mostram ainda que é importante diferenciar dois conceitos constantemente confundidos: a sustentabilidade e a otimização. Esta última está relacionada somente à produtividade do processo, à capacidade de realizá-lo com o menor consumo de capitais e recursos possível, mas não diz nada da capacidade de continuidade do processo. Há práticas que podem estar perfeitamente otimizadas e não serem sustentáveis e vice versa. Qualquer prática, por exemplo, que envolva o uso de recursos naturais não renováveis, tem sustentabilidade limitada, mesmo que esteja totalmente otimizada e eficiente.

É uma idéia interessante dividir o conceito de desenvolvimento sustentável nos diversos tipos possíveis de sustentabilidade, embora seja importante dizer que os diversos tipos estão inexoravelmente ligados entre si (Costa, 2000). A grande vantagem do processo analítico está em desvincular a pesquisa da demanda pela sustentabilidade social, especialmente no que esta está ligada às matrizes discursivas da equidade e da ética, já que não pode ser atingida por meios puramente técnicos.

“Embora a justeza das intenções seja praticamente inquestionável, a análise (e as propostas) dificilmente resiste ao crivo de abordagens mais críticas do processo, que enfatizam a assimetria das relações de poder, ou a quase impossibilidade de uma solidariedade capitalista” (Costa, 2000, p. 62).

Assumir que a sustentabilidade social, pelo menos no que se refere à defendida na matriz discursiva da equidade, é inatingível no sistema capitalista não significa ignorar os fenômenos sociais. Assis (2000) coloca que a abordagem sistêmica tradicional da ciência e do meio urbano, embora sofra diversas críticas, especialmente vindas das abordagens marxistas, ainda é a que fornece maior capacidade de previsão especialmente dos fenômenos físicos envolvidos na questão urbana, sendo a mais adequada para estudar as questões climáticas, térmicas e de iluminação. Quando, no entanto, tais estudos se transformam em propostas de planejamento, deve-se tomar cuidado para que o discurso técnico não sirva como um meio para atender aos interesses do capital privado e para que os impactos sociais sejam devidamente analisados.

Bartelmus (1994) afirma que tanto a riqueza quanto a pobreza podem gerar deterioração ambiental; a primeira pelo consumo excessivo e a segunda pelo uso inadequado de recursos naturais vulneráveis. Embora tratar dessa sustentabilidade fuja aos objetivos da pesquisa, ainda é importante também observar os processos sociais e políticos nos quais se insere o planejamento.

Este trabalho trata de apropriar o conceito de sustentabilidade para o ambiente urbano de modo consistente com as práticas que buscam o conforto térmico e luminoso na cidade e nos edifícios, sendo o foco exatamente a sustentabilidade dos fenômenos e processos urbanos. A eleição das variáveis a serem trabalhadas é fundamental, pois pode implicar ignorar elementos com amplas repercussões no contexto geral.

Moreira (1999) afirma que o conceito de ambiente urbano é fragmentado, com definições complementares que passam desde a ecologia até a sociologia. O autor define como sendo “as relações dos homens com a natureza, em aglomerações de população e atividades humanas, constituídas pela apropriação e uso do espaço construído e dos recursos naturais” (p. 108). Acselrad (1994) divide as representações urbanas em três grupos, cada qual com seu respectivo discurso de sustentabilidade: tecno-material, qualidade de vida e legitimação das políticas públicas. Neste trabalho serão tratadas somente as duas primeiras, visto que a terceira está ligada à sustentabilidade social que não é objeto de estudo deste trabalho.

A representação tecno-material apropria-se dos conceitos ecológicos e vê a cidade como uma continuidade material de fluxos e estoques. Está ligada à matriz da eficiência e ao ciclo de recursos-produção-rejeito, sendo necessária a sustentabilidade de todas as etapas deste ciclo. Parte do pressuposto que a degradação energética é inevitável e vê como única solução a otimização dos processos, confundindo, como já explicado, este conceito com o de sustentabilidade:

“O conceito de ecossistema, aplicado aos assentamentos humanos, permite visualizar com clareza os principais fluxos energéticos, de alimentos, de materiais, de informação e de pessoas que se destinam aos assentamentos humanos e que dele se originam” (Ribeiro & Mello, 1996, p. 65).

A matriz discursiva da qualidade de vida, por sua vez, relaciona a cidade com o seu papel de proporcionar adequadamente os “componentes não mercantis da existência cotidiana (...) notadamente no que se refere às implicações sanitárias” (Acselrad, 1999, p. 84). Ela evolui da representação tecno-material incorporando, além da eficiência ecoenergética, questões de identidade e significado ou de conforto térmico urbano.

Ambos os conceitos apresentam duas vantagens. A primeira delas é que eles permitem a previsão e a estruturação de propostas com bases científicas, mais especificamente bases estatísticas e matemáticas, sem a incursão em grandes erros, sendo especialmente adequadas para dimensionamentos e índices de qualidade. A segunda é permitir que a sustentabilidade seja medida, ou pelo seu tempo previsto de viabilidade, ou através de instrumentos como as Ecological Footprints, ou Pegadas Ecológicas. Este conceito americano assume que as

populações ocidentais normalmente necessitam de uma área maior do que a que efetivamente ocupam para garantir a suas existência, ou melhor, seu modo de vida (Vale & Vale, 1999).

Assim, gastos energéticos, por exemplo, são convertidos na área de represamento de água ou de extração de petróleo, permitindo avaliar a viabilidade futura do processo a partir da disponibilidade de áreas para estes fins.

No entanto, optar pela representação tecno-material significa estar atento para que as hipóteses formuladas não estejam incorretas, tomando como técnicos problemas que na verdade são políticos e que não podem ser resolvidos de outra forma. Outras limitações desta abordagem são permitir a apropriação do discurso técnico pelo capital, inviabilizar a implantação das propostas por desconhecimento da situação política ou pelo dos aspectos sociais envolvidos.

1.3. O CONFORTO AMBIENTAL E A QUESTÃO AMBIENTAL

Observa-se que o vocabulário e os argumentos do discurso ambiental, e especialmente o da sustentabilidade, vêm sendo cada vez mais incorporado no campo de conhecimento do conforto ambiental. As intersecções entre os dois campos vão realmente além do nome.

O ser humano, nesta área de estudo, é visto essencialmente sob uma ótica biológica e psicológica. Rivero (1988) aponta para a necessidade que os seres vivos têm de uma adequação física e química do seu entorno imediato à sua constituição orgânica. Essa adequação, no entanto, apresenta limites flexíveis. Olgyay (1998) coloca que a zona de conforto poderia ser definida como a zona na qual as condições térmicas não produzem efeito de incômodo. Os limites dessa zona não seriam reais, ou mesmo constantes; a partir de sua zona central ela deriva para um certo grau de tensão para só então provocar situações de desconforto efetivo. Do mesmo modo, Lamberts, Dutra & Pereira (1997) afirmam que:

“Embora o clima seja bem distinto em qualquer região da Terra, o ser humano é biologicamente parecido em todo o mundo, sendo adaptável às diferentes condições climáticas ao se utilizar de mecanismos culturais como a vestimenta, a arquitetura e a tecnologia” (p. 39).

Os autores afirmam que o advento da climatização artificial e da iluminação elétrica gerou, após o movimento modernista, uma arquitetura desvinculada das condições ambientais locais. Além dos impactos no consumo energético, que serão tratados com mais detalhes, esta postura ignora os milhões de anos de adaptação humana ao condicionamento natural. A luz natural, por exemplo, tem qualidade muito superior à artificial, sendo que a norma alemã DIN 5034 (1979) determina que os níveis de iluminância requeridos, caso se utilize a primeira, são apenas 60% dos níveis requeridos para a luz artificial. Além disso, a variabilidade da luz natural tem um importante papel na regulação dos processos biológicos, o que por si só já seria razão suficiente para que se desencorajasse o condicionamento térmico e luminoso artificial (Hopkinson, Petherbridge & Longmore, 1975)

Os estudos climáticos também vêm ganhando importância, especialmente no que diz respeito ao clima urbano, que, no caso, podem ser divididos em duas escalas: a macro-climática, onde a preocupação é com as alterações ocorridas devido à emissão de gases que provocam o chamado Efeito Estufa e a micro-climática, com alterações causadas por alterações mais pontuais, mas com seu efeito somado tão danoso quanto o aquecimento global. No primeiro caso há um interesse duplo, pois o Efeito Estufa pode causar a inadequação de edificações já projetadas levando em conta os critérios bioclimáticos e ainda porque os edifícios são grandes consumidores de energia e em países onde a matriz energética é composta essencialmente por derivados de petróleo, a eficiência energética pode levar à redução na emissão dos gases citados.

Na escala micro-climática encontram-se os estudos de conforto ambiental urbano, que relacionam a forma da cidade com o comportamento da temperatura e do vento. Katschner (1997), por exemplo, propõe uma metodologia para avaliação do impacto de construções nos canais de ventilação da cidade e conseqüentemente no escoamento da poluição do ar. Embora o estudo tenha sido desenvolvido para as cidades alemãs, é possível adaptá-lo para as condições brasileiras. Duarte (2000) gerou um índice que relaciona a proporção de áreas verdes, massa de água e densidade construídas à temperatura local, objetivando criar ferramentas acessíveis aos leigos para a manutenção da qualidade térmica da cidade e Assis (2000) relacionou a forma urbana com a formação do fenômeno de ilha de calor, o sobreaquecimento do recinto ou canyon urbano devido à redução das trocas por radiação de onda longa.

Uma última interface entre o discurso ambiental e o conforto é a busca pela eficiência energética. Goldemberg (2001) demonstra que há uma relação entre o consumo energético e o crescimento econômico. Na América Latina, no período de 1981 a 1991, houve um crescimento de 2,9% ao ano no consumo energético para sustentar um crescimento do PIB de apenas 1,8% ao ano, pois os países em desenvolvimento têm atraído as indústrias com maior demanda de energia. Ainda assim é importante ressaltar que o parque edificado brasileiro, distribuído entre os setores industrial, público, residencial e comercial, é responsável por 46% do consumo energético nacional (Tabela 2), sendo que os dois últimos setores são os principais responsáveis pelos altos índices de crescimento do consumo, segundo estudo de Brasil (1997) citado por Signor (1999).

Tabela 2 - Consumo de eletricidade por setores no Brasil (1990)

Setor	Consumo (%)
Residencial	23
Comercial	11
Público	8

Fonte: GELLER (citado por LAMBERTS, GHISI & PAPST, 2000).

A Tabela 3 indica energia consumida no setor residencial e comercial separa pelo uso final. É possível observar que dos sistemas que mais consomem, três estão relacionados ao condicionamento térmico e luminoso do ambiente interno.

Tabela 3. - Usos finais da energia nas edificações (1990)

Sistema	Uso final (%)	
	Setor Residencial	Setores comercial e público ²
Iluminação	23	44
Ar condicionado	- ³	20
Refrigeração	32	17
Aquecimento de água	26	- ⁴
Outros	18	19

Fonte: GELLER (citado por LAMBERTS, GHISI & PAPST, 2000).

Atualmente, mais de 90% da energia elétrica brasileira provem de usinas hidrelétricas, sujeitas à influência do regime de chuvas, que juntamente com a desestruturação do setor levou a um racionamento durante quase todo o ano de 2000. Além disso, Leite (1997) afirma que o aproveitamento dos recursos hidrelétricos ainda existentes é visto com reservas por organismos importantes como o Banco Mundial, exatamente devido aos impactos ambientais e sociais causados não só pelas represas, mas também pelos reservatórios, o que dificulta a expansão da oferta no ritmo necessário. É interessante observar que, embora, no Brasil, o problema do consumo de energia no parque edificado brasileiro não esteja vinculado à emissão de gases causadores do efeito estufa, devido à nossa matriz energética não contar com grande participação do petróleo como nos países desenvolvidos, ele não está desvinculado da questão ambiental.

A conservação energética é uma tendência mundial, nascida com o choque do petróleo em 1974, que provocou um súbito aumento dos preços dos combustíveis fósseis. No Brasil, uma das principais medidas tomadas nesse sentido foi a criação, em 1985, do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). No entanto, Leite (1997) afirma que só depois de 1994, com a estabilização da moeda, os benefícios da conservação começaram a ficar mais claros. Dados do PROCEL no ano de 1995 mostram que para cada real investido na conservação, 8,75 reais deixaram de ser gastos na geração de energia. Outros estudos do órgão apontam para um potencial de conservação de 11% até o ano de 2015.

As ações do PROCEL, no entanto, estão voltadas para o aumento na eficiência de equipamentos, havendo um menor número de ações no sentido de tornar melhores as próprias edificações. É possível, a partir de metodologias já desenvolvidas e ainda em estudo, reduzir o consumo energético do edifício com refrigeração, aquecimento e iluminação mantendo, ou mesmo melhorando, as condições de conforto. Goldemberg (2001) afirma que, na Suíça, códigos de construção rigorosos reduziram o consumo das edificações para a metade do que era há 20 anos. O autor ainda reforça a importância de se investir na eficiência das novas edificações, especialmente nos países em desenvolvimento, onde ainda há um grande déficit habitacional.

² O consumo desse setor foi levantado só para a cidade de São Paulo

³ O consumo de ar condicionado para edifícios residenciais está incluído na categoria outros

⁴ O consumo de água quente para edifícios comerciais e públicos está incluído na categoria outros

Dos modelos de sustentabilidade urbana apresentados por Ascelrad (1999) aproxima desta visão é o da qualidade de vida, na medida em busca-se a eficiência ecoenergética e a disponibilidade dos chamados “bens imateriais cotidianos”. O conceito de ambiente urbano mais próximo da abordagem do conforto é a de Moreira (1999). Para ele, o espaço construído é a natureza modificada pelo homem. Para tanto, o homem se apropria dos recursos naturais, modificando-os para atender às suas necessidades. Quando o espaço é construído por diversos indivíduos que passam a ocupá-lo, ele se torna um espaço urbano. O conforto ambiental agrupa técnicas para tornar este espaço o mais adequado possível ao homem, com o menor esforço de adaptação possível, com os recursos disponíveis.

1.4. PROTEÇÃO DO ACESSO AO SOL E LEGISLAÇÃO URBANA

A radiação solar pode ser aproveitada pela edificação de forma pró-ativa ou passiva (United States, 1982). Na primeira forma, tem-se a energia fotovoltaica, que Goldemberg (2001) afirma ter custo em queda, podendo vir a se tornar acessível dentro de algum tempo. Um outro exemplo de uso pró-ativo seriam os aquecedores de água a energia solar, que já são uma realidade. No caso de Belo Horizonte, o uso deste sistema vem resolver o problema do pico, eliminando o gasto com o chuveiro elétrico. Dentre os usos passivos, Ribeiro & Mello (1996) apontam 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 (Souza, 1997). O potencial de aproveitamento desta luz na edificação é muito grande, visto que ela conta com uma eficiência luminosa entre 90 e 130 lm/W, dependendo das condições do céu, enquanto as lâmpadas incandescentes chegam a 15 lm/W e as fluorescentes a 75 lm/W (Ghisi, 1997). Eficiências maiores podem ser conseguidas, mas as fontes dificilmente conseguirão reproduzir com fidelidade o espectro luminoso solar.

Observa-se ainda que a abordagem unicamente 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.

A necessidade de proteção do acesso ao sol e à luz natural, justificada acima, encontra respaldo legal na função social da propriedade. Segundo Cavallazzi (1996), “a cidade, bem social, espaço público de significação e mediação, historicamente construída impõe ao proprietário o dever de exercer o seu direito em benefício da sociedade” (p.883). Não se pode admitir que o proprietário abuse do seu direito de utilização do terreno vedando acesso dos vizinhos a elementos que não só são fundamentais na qualidade dos edifícios, mas também podem permitir economia reduzindo o consumo de energia.

Atualmente algumas legislações de uso e ocupação do solo, como a de Belo Horizonte – MG, adotaram a flexibilização de usos, partindo apenas para um controle da densidade da região e para alguns parâmetros ambientais (Belo Horizonte, 1996). O objetivo é atingir uma certa uniformidade de densidade aproveitando a infra-estrutura já disponível e evitando os chamados

vazios urbanos. No entanto, na medida em que se adotam políticas de adensamento, a verticalização passa a se tornar a alternativa mais viável, gerando os problemas de sombreamento. Os instrumentos em uso com impacto no controle de acesso ao sol são:

- **Coeficiente de aproveitamento:** coeficientes restritivos inibem construções de múltiplos andares, mas não garantem a proteção do acesso ao sol e à luz natural, pois não controlam completamente a geometria dos edifícios;
- **Afastamentos mínimos:** os afastamentos frontais na cidade dependem exclusivamente do tipo de via no qual a edificação está localizada. Já os afastamentos laterais e de fundo são determinados por uma fórmula que as relaciona com a altura do edifício. Desse modo, quanto mais alta a construção, maior o recuo; o que determina um certo ângulo de obstrução que a edificação pode ter. Este é o recurso tradicional para se preservar o acesso ao sol. Mas no caso de Belo Horizonte, não varia de acordo com a orientação do lote nem com a topografia;
- **Taxa de permeabilidade:** determina a porcentagem do terreno que deve ser deixada livre de construções ou impermeabilização. Foi criada para evitar a sobrecarga no sistema de drenagem e conseqüentes enchentes e pode ser desconsiderada, caso o construtor se proponha a fazer um sistema de drenagem. A taxa de permeabilidade não oferece garantias de acesso ao sol para as edificações vizinhas, assim como o coeficiente de aproveitamento, mas taxas altas tendem a reduzir a área edificada;
- **Transferência do direito de construir:** esta ferramenta foi criada para garantir que os proprietários de imóveis tombados não fossem prejudicados com a redução do potencial construtivo do seu terreno, podendo vender o excedente para o mercado imobiliário. O instrumento, no entanto, nunca foi colocado em prática devido a dois problemas. O primeiro é a ausência de regulamentação do mercado de potencial construtivo e a segunda as densidades relativamente altas já previstas pela legislação. De qualquer maneira, o mesmo tipo de ferramenta pode ser usado para compensar as perdas na densidade dos imóveis devido a adoção das políticas de proteção de acesso ao sol.

Algumas questões, no entanto, devem ser levadas em conta quando se está trabalhando com a legislação urbana. A primeira delas, colocada por Azevedo Netto (1996), é a influência que disposições urbanísticas podem ter no valor do terreno, ao limitar o seu aproveitamento. O problema se torna mais patente exatamente nas áreas onde há maior pressão de verticalização, exatamente onde se tem maior interesse em estudar e proteger o acesso ao sol. Em cidades onde o planejamento foi feito com base nas densidades de ocupação desejadas para as diversas áreas, torna-se ainda mais fundamental verificar o impacto da política de proteção do acesso ao sol e à luz natural proposta no potencial construtivo do terreno. Outra questão é que toda legislação municipal no Brasil passa por um processo de aprovação. Este processo pode ser entendido sob a luz das observações de Poulton (1997), que enxerga o zoneamento urbano com o um serviço prestado pelo poder público aos seus eleitores. Embora essa seja uma perspectiva desanimadora, do ponto de vista tecnocêntrico, ela é a que mais se aproxima da realidade. Ainda devem ser levados em conta os interesses dos financiadores das campanhas políticas, normalmente ligados ao mercado imobiliário. Deste modo, se parte para

uma lógica onde a proteção do acesso ao sol deve ser feita de modo a garantir a maior ocupação do terreno possível, mantendo ou ampliando os coeficientes de aproveitamento.

Um último fator a ser levado em conta: ao estabelecer parâmetros de qualidade para o espaço urbano e para as edificações, o técnico deve ter em mente a melhoria da qualidade de vida e do conforto de seus usuários. No sistema capitalista no entanto, a qualidade de vida é convertida em modo de multiplicação do capital e ao trabalhar com critérios ideais, o planejador pode na verdade estar criando um novo elemento de exclusão social, na medida em que o bem, com a sua qualidade aumentada, terá o seu valor aumentado na mesma proporção. A escolha de critérios técnicos de planejamento, portanto, deve ser a mais cuidadosa possível, tendo em vista a possibilidade de ocorrência deste fenômeno.

1.5. HISTÓRICO E CARACTERÍSTICAS

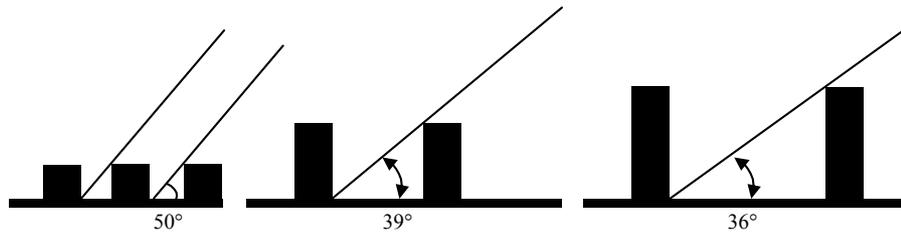
Legislações que faziam referência à proteção do acesso ao sol são antigas, aparecendo já no Império Romano. Segundo Lamberts, Dutra & Pereira (1997), o imperador Ulpiano teria criado no século II d.C. o *Heliocaminus*, o caminho do sol. Nessa época, Roma contava com uma população acima de 1 milhão de habitantes e passava por um período de expansão vertical, com a construção edifícios de 6 a 12 pavimentos de uma má qualidade ambiental que só voltou a ser vista nos piores tempos da especulação imobiliária do século XIX. Segundo Scheneider (1961) o imperador Augusto limitaria mais tarde a altura dos edifícios de 35 para 21 metros, o que permitia a construção de até 7 andares, já que o pé-direito devia ser apenas maior do que a altura de um homem. Tempos mais tarde, Nero se preocuparia com a questão da insolação nas ruas, determinando a altura máxima das edificações como duas vezes a largura da via. Não se pode determinar, no entanto, qual a base científica para a definição destes recuos

Com a redução da população urbana ocorrida na idade média, o problema do acesso ao sol deixou de se apresentar devido à extinção de seus dois fatos geradores: a alta densidade urbana e a verticalização. O estudo científico da questão foi iniciado com a preocupação sanitária nascida após a Revolução Industrial. Como Mumford (1998) afirma que “talvez a maior contribuição dada pela cidade industrial tenha sido a reação que produziu contra os seus próprios maiores descaminhos; e, para começar, a arte do saneamento ou da higiene pública” (p. 513). As reformas urbanas do século XIX, ainda que feitas principalmente com objetivos militares, levaram em conta novos requisitos de luz e ventilação. As avenidas largas foram instituídas, separando as edificações umas das outras, e restrições de altura e de ângulos redefiniram a configuração urbana de cidades como Paris, Londres, Nova York, Hong Kong e Buenos Aires (Antoine, 1946; Crompton, 1955; Ng, 2003 e De Schiller, 2001).

Os avanços estruturais da Escola de Chicago e o advento da energia elétrica permitiram novas possibilidades de crescimento vertical para as cidades, dando mais importância à questão do acesso ao sol.

Os estudos de Gropius (1930) são os primeiros a tratar cientificamente a questão. Ele observou, avaliando edificações paralelas, que, dado um ângulo de incidência, obtinham-se maiores densidades caso se construíssem edificações mais altas e espaçadas entre si. As

imagens deste estudo se tornariam importantes referências para um planejamento urbano preocupado com a iluminação natural. Um exemplo deste estudo é mostrado na Figura 2.



Fonte: Allen & Crompton (1946)

Figura 2 – Estudos de Gropius para acesso ao sol e à luz natural

As conclusões de Gropius, tiradas de March (1975) são:

- Para um dado tamanho de terreno e um dado ângulo de insolação (que Gropius assumia como sendo uma dada condição de iluminação), o número de camas (densidade populacional) aumenta com o número de pavimentos;
- Para um dado ângulo de insolação e distribuição do número de camas em blocos de apartamento paralelos com número de andares variável, o tamanho do terreno necessário é reduzido com o aumento do número de andares e
- Para um dado tamanho de terreno e um número de camas fixo e um número variável de andares, o ângulo de insolação diminui com o aumento do número de pavimentos, ou seja, a condição de iluminação natural melhora com o aumento da altura.

Mais tarde, Beckett (1942) apud March (1975), apresentou uma formulação matemática para a questão, comprovando as observações de Gropius. As relações entre qualidade da iluminação, densidade construtiva e geometria das edificações vizinhas foram então comprovada.

Faltavam ainda elementos, no entanto, para definir qual seria o que Gropius chamou de “ângulo e insolação”, ou seja, a condição de iluminação a ser preservada. Os estudos de Gropius foram recuperados e aprofundados mais tarde por Allen (1943) e serviram como base para a reavaliação da legislação urbana e dos códigos de edificação ingleses. A destruição causada pelos bombardeios na Segunda Guerra proporcionou a oportunidade perfeita para colocar em prática novas políticas de planejamento urbano. Em 1947, foi adotada a política de proteção do acesso à luz natural, a partir de um trabalho de Allen & Crompton (1947), que propôs os chamados Indicadores de Altura Permitida. Os indicadores tinham como principal vantagem sobre os ângulos de obstrução o fato de não considerarem apenas obstruções contínuas e paralelas. Foram também desenvolvidos mais tarde indicadores de insolação, visando garantir acesso ao sol nas edificações, com desenho um pouco mais complexo que os indicadores de iluminação, pois dependiam também da orientação da parede analisada e da época do ano.

Anos mais tarde, surgiu o termo “envelope solar”, a partir de estudos dos arquitetos Ralph Knowles e Richard D. Berry para a cidade americana de Los Angeles, designando um

construto espaço-temporal que indica o maior volume que uma edificação pode ocupar sem causar sombreamentos indesejáveis nos lotes vizinhos (Knowles & Berry, 1980). Como período de insolação recomendado é sugerido o período entre 9h e 15h, pois é o período que incide a maior parcela da radiação solar. Essa abordagem está principalmente voltada para o uso da energia solar em sistemas pró-ativos, conforme será explicado em detalhes nos capítulos 4 e 5.

Ao longo do tempo, a maior parte das cidades européias e americanas incorporou às suas legislações itens referentes à proteção do acesso ao sol e à luz natural. As recomendações têm maior ou menor profundidade, mas são normalmente baseadas em um dos três estudos citados acima, com pequenas variações. No entanto, estas cidades apresentam em sua maioria, clima temperado, com períodos de frio onde é desejável a incidência da radiação solar. Deste modo, torna-se mais fácil compatibilizar os requisitos térmicos com os de iluminação. Em climas tropicais, a incidência de sol pode trazer cargas térmicas elevadas em momentos em que a temperatura do ar já é alta. Isso pode significar necessidade de obstruções que prejudicariam consideravelmente a iluminação natural do ambiente, tornando os critérios incompatíveis.

Na bibliografia consultada, a única abordagem própria para países tropicais encontrada foi a de Emmanuel (1993), que ao invés de propor proteção de acesso ao sol, sugere que o planejamento urbano seja feito de modo a proporcionar sombreamento para os espaços públicos. A grande desvantagem deste sistema é ignorar a possibilidade de aproveitamento da energia solar tanto para o aquecimento de água quanto para a conversão de energia, embora do ponto de vista térmico seja a aproximação mais adequada para este tipo de clima.

A integração de exigências contrastantes é o principal obstáculo técnico à implantação de legislações relativas ao acesso ao sol e à luz natural nas cidades brasileiras. Acredita-se que este deve ser o primeiro ponto a ser superado antes que se possam discutir os problemas políticos e administrativos decorrentes deste tipo de política.

No Brasil, alguns códigos de obra e legislações urbanísticas já incorporam este tipo de preocupação. Há estudos desenvolvidos para Belo Horizonte (Assis, Valladares & Souza, 1995), Porto Alegre (Mascaró, 1996; Mascaró & Mascaró, 1994) e Florianópolis (Pereira, Silva & Turkienikz, 2001). A implementação das ferramentas e procedimentos para garantia de acesso ao sol e a luz natural na legislação, no entanto, vem sendo bastante tímida.

No período de junho a agosto de 2003 o Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo (NUTAU) foi contatado para realizar uma consultoria técnica para auxiliar a prefeitura da Mogi das Cruzes na elaboração do seu código de obras. A equipe foi coordenada pelo Prof. Dr. Geraldo Gomes Serra e as recomendações relativas à área de conforto ambiental foram desenvolvidas em conjunto pelo autor, pela Profa. Dra. Denise Duarte e pela Arqta. Ms. Alessandra Rodrigues Prata.

Este estudo apresentou como uma grande oportunidade para aplicar os conceitos desenvolvidos até então e para se elaborar uma ferramenta que realmente pudesse ser aplicada por algum tipo de instrumento legal. Caso seja aprovado, o código será inovador no cenário nacional, trazendo elementos como recuos diferenciados para as diferentes

orientações de fachada. Aspectos deste código são discutidos com mais detalhes nos itens 6 e 5.11.

2

Caracterização da Fonte: o Sol e o Céu

Como já mencionado este trabalho trata do aproveitamento da energia solar por parte da edificação. O primeiro passo, portanto, é avaliar a disponibilidade deste recurso em termos de quantidade e qualidade.

O Sol, fonte de energia primária da Terra, é uma esfera de gás com diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m. Reações nucleares entre os átomos de hidrogênio liberam grande quantidade de energia e mantêm seu interior a uma temperatura de milhões de graus e sua superfície a temperaturas próximas a 6000 K. Essa energia é transmitida pelo vácuo na forma de ondas eletromagnéticas, atingindo a Terra, que se localiza a aproximadamente $1,495 \times 10^{11}$ m de distância. Essa distância apresenta alguma variação devido ao formato elíptico da órbita terrestre em torno do Sol. (Duffie & Beckman, 1980)

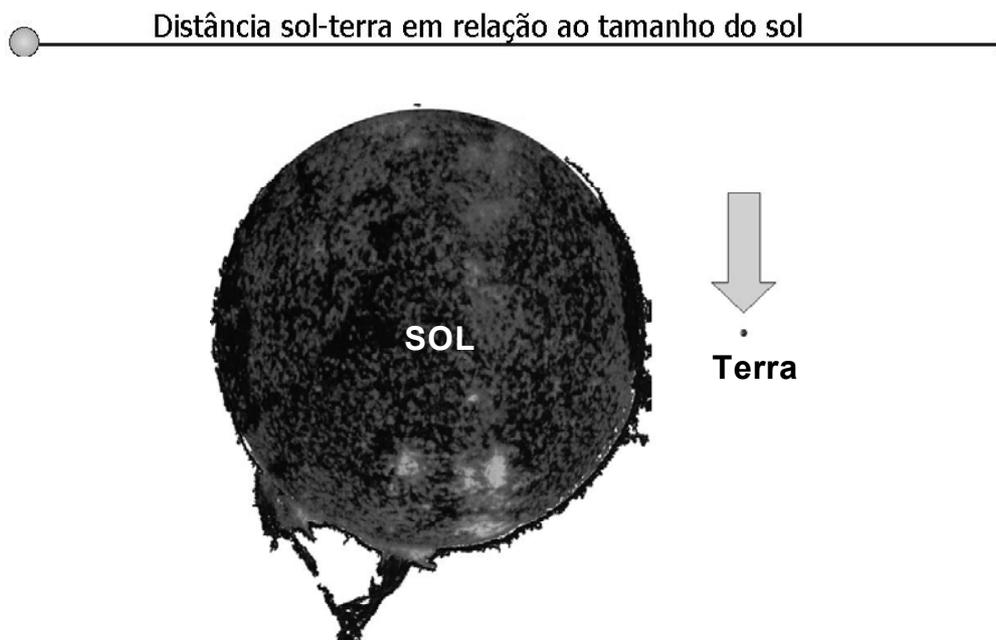
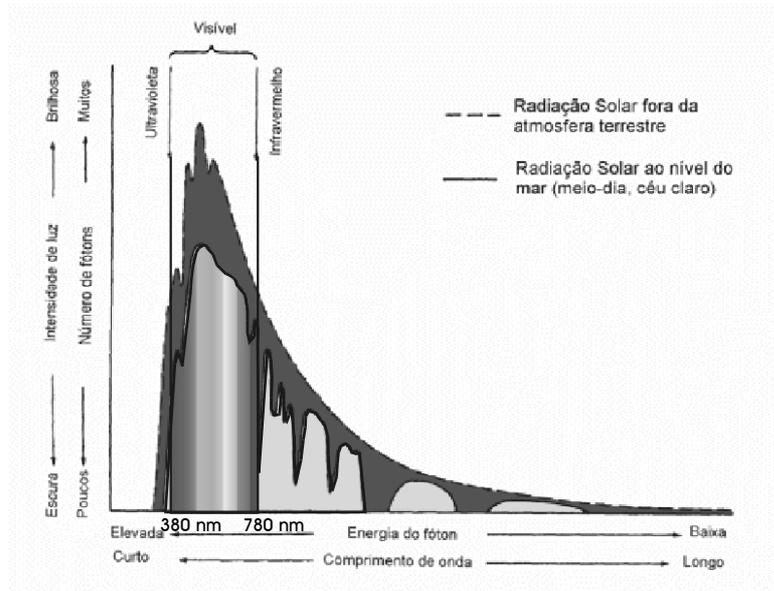


Figura 3 – Relações Sol-Terra

Observando-se a relação dimensão/distância entre os dois corpos (Figura 3) são possíveis duas conclusões. Em primeiro lugar, como a superfície do Sol é muito maior que a da Terra, a radiação solar chega à Terra na forma de um feixe raios paralelos. No entanto, ao observar-se Sol da terra tem-se a impressão de que se trata de uma fonte pontual. Isso porque devido à grande distância, ele ocupa uma parcela muito pequena do campo visual, podendo ser localizado como um ponto no céu por um observador terrestre.

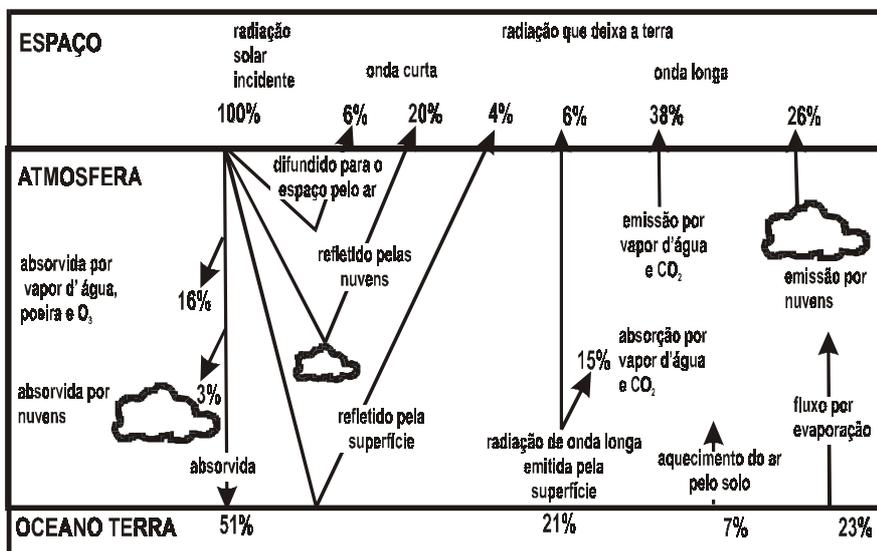
A radiação emitida pelo Sol tem distribuição espectral semelhante àquela de um corpo negro a 5762 K. Por isso, a maior parte da energia se concentra na faixa da radiação térmica de onda curta, entre 0,3 e 2,5 μm (Figura 4). Essa faixa inclui a luz, parcela do espectro magnético à qual o olho humano é sensível, entre 0,38 e 0,78 μm . (Alucci, 2004)



Fonte: Baseado em Duffie & Beckman (1986)

Figura 4 – Distribuição espectral da energia solar

O topo da atmosfera terrestre recebe, incidindo normalmente, cerca de 1367 W/m^2 , valor denominado “constante solar” ou G_{sc} (Duffie & Beckman, 1986). A atmosfera reflete e absorve parte dessa radiação, outra parte é transmitida ou difundida, atingindo o solo (Figura 5). A parte que atravessa a atmosfera denomina-se radiação direta e a parte que chega difundida pela atmosfera denomina-se radiação difusa.



Fonte: Traduzido de Santamouris (2001)

Figura 5 – Balanço energético da Terra

2.1. MAPEAMENTO DO CÉU

Para um observador em um ponto qualquer da terra, o céu toma a forma de uma esfera em cujo centro ele se encontra e sobre cuja superfície interna estão o sol, a lua e demais astros. Considerando-se que as distâncias da terra em relação a estes astros são enormes em relação às suas dimensões, considera-se a esfera celeste como tendo raio infinito, que abarque todos estes corpos. Sob os pés do observador passa um plano, tangente à curvatura terrestre que intercepta a esfera celeste definindo a linha do horizonte. Sobre este plano passa uma linha que liga o pólo norte ao pólo sul geográfico passando pelo observador, definida como o meridiano do local. Perpendicular a esse plano, ligando o centro da terra ao observador passa uma linha que cruza com a esfera celeste em dois pontos. O ponto superior é denominado Zênite e o inferior, Nadir. O ângulo que essa linha perpendicular faz com o eixo horizontal da Terra, definido pelo equador, define a latitude do local (ϕ) (Figura 6). Esse ângulo é positivo para norte e negativo para sul, sendo a latitude da cidade de São Paulo, por exemplo, $-23^{\circ} 27'$. Normalmente, o plano do horizonte só permite a visualização de metade da esfera celeste, que desse modo é chamada de abóbada celeste. (Frota, 2004).

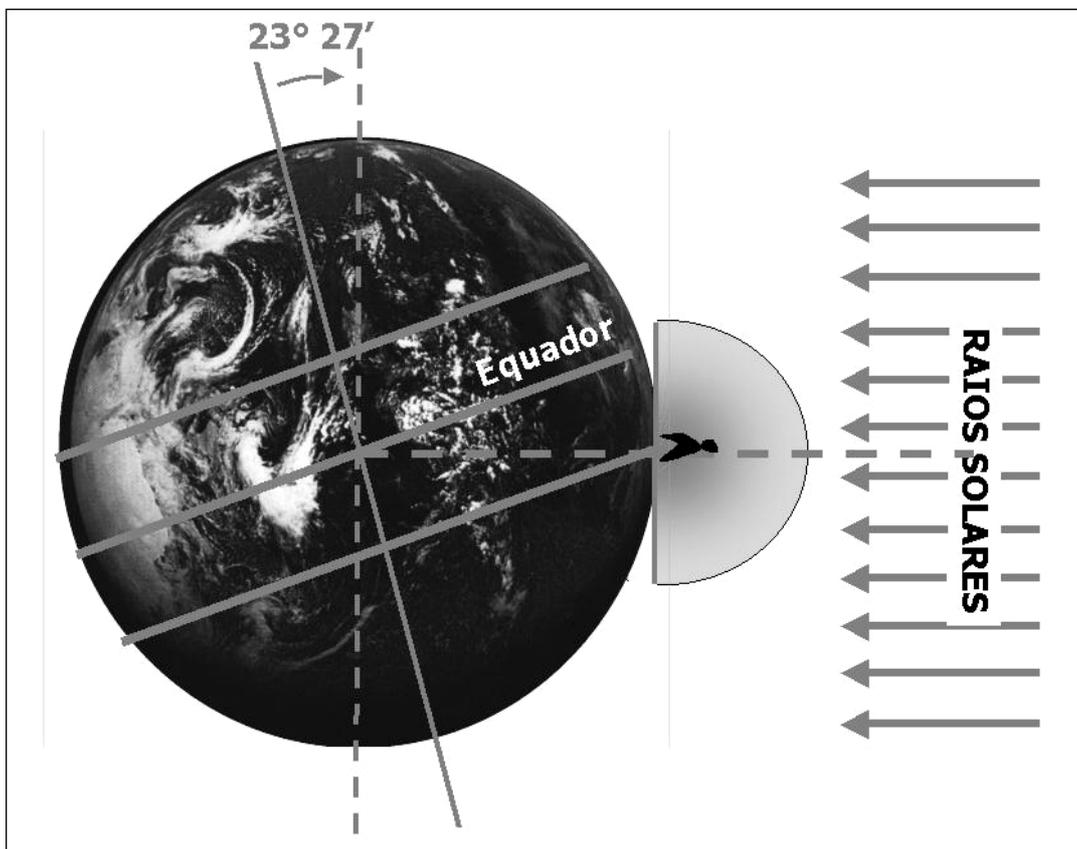


Figura 6 – Visualização da abóbada celeste em São Paulo.

Como essa esfera é adimensional, as distâncias são medidas sempre em ângulos e não em metros. Qualquer ponto na abóbada pode ser localizado com dois ângulos. Um horizontal, medido em relação ao norte geográfico, chamado azimute (γ), e um vertical, medido em relação

ao plano do horizonte, denominado altura angular ou altitude (ξ) (Figura 7). Neste trabalho os valores serão sempre fornecidos em graus ($^{\circ}$).

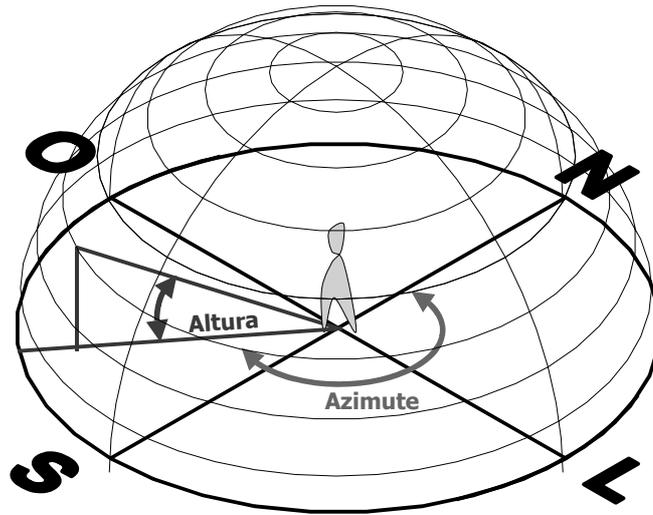


Figura 7 – Localizando um elemento na abóbada celeste

Para se estudar a distribuição da radiação e da luz no céu de forma mais eficiente, pode-se dividir o céu em zonas. Treguenza & Sharples (2003) afirmam que zonas com diâmetros de 0,2 radianos ($11,5^{\circ}$) podem ser tratadas como fontes pontuais de radiação e luz com erro insignificante. Para medições e cálculos, os autores recomendam uma divisão de 145 zonas de 12° graus de altitude, que compreendem ângulos sólidos da ordem de 0,04 esferorradianos (Tabela 4).

Tabela 4 – Divisão do céu em 145 zonas

Altitude do centro da banda ($^{\circ}$)	Número de zonas na banda	Incremento de azimute ($^{\circ}$)	Ângulo sólido (A_z) (esferorradianos)*
6	30	12	0,0435
18	30	12	0,0416
30	24	15	0,0474
42	24	15	0,0407
54	18	20	0,0429
66	12	30	0,0445
78	6	60	0,0455
90	1	360	0,0344

Quando se fala da posição do Sol refere-se à sua posição aparente na abóbada celeste. Como os demais elementos da abóbada, sua localização é dada por ângulos verticais e horizontais, marcados com um “s” subscrito: azimute solar (γ_s) e altura solar (ξ_s).

Para visualização do céu em duas dimensões, podem-se utilizar diversas projeções, apresentadas por Frota (2004), Szokolay (1996) e Bittercourt (1990).

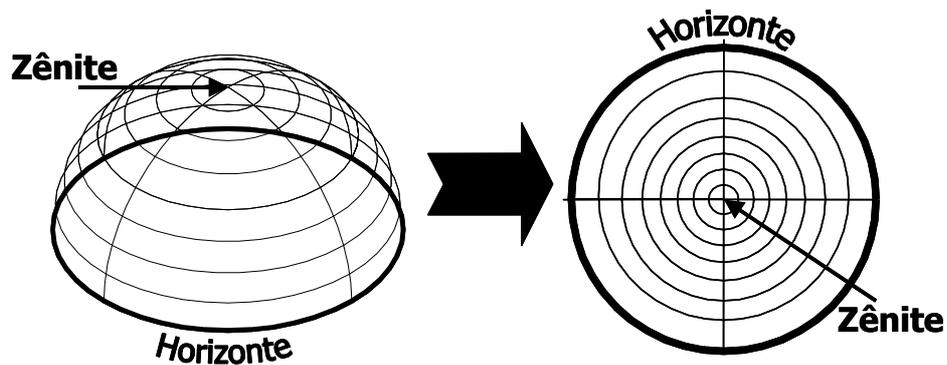


Figura 8 – Exemplo de projeção da abóbada celeste

Na Figura 9 têm-se as 145 zonas desenhadas usando-se vários tipos de projeção.

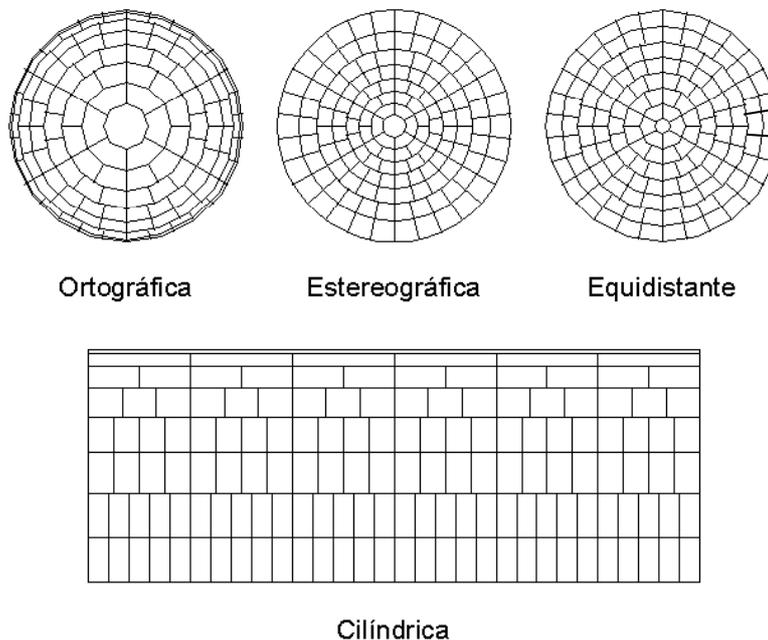
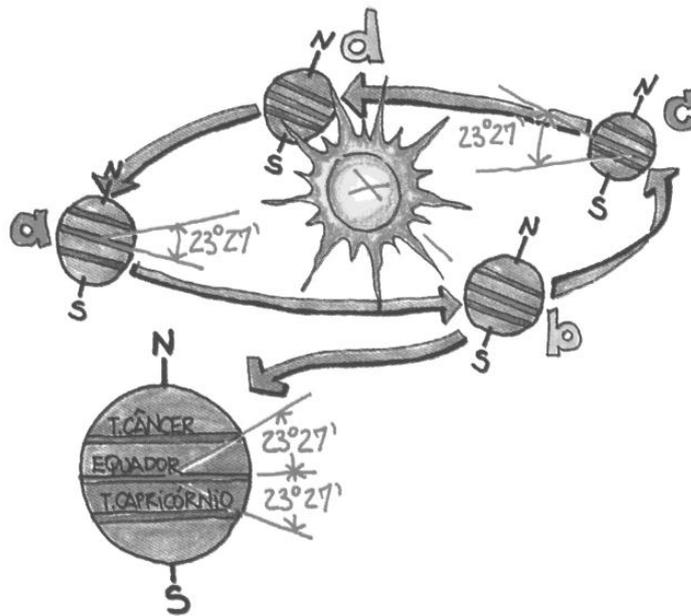


Figura 9 – As 145 zonas desenhadas em diferentes projeções

2.2. LOCALIZAÇÃO DO SOL

Quando se fala da posição do Sol refere-se à sua posição aparente na abóbada celeste. Como os demais elementos da abóbada, sua localização é dada por ângulos verticais e horizontais, marcados com um “s” subscrito: azimute solar (γ_s) e altura solar (ξ_s).

O movimento aparente do Sol é função dos movimentos de translação e rotação da Terra e da defasagem entre os eixos destes dois movimentos de $23^\circ 27'$ (ver Figura 6). O resultado desta configuração é uma variação do ângulo de incidência do sol no equador ao longo do ano, que resulta nos solstícios e equinócios e que definem as estações do ano (Figura 10).



Posição "a" - 22/06
solstício de verão no hemisfério norte
solstício de inverno no hemisfério sul

Posição "b" e "d" - 21/03 e 24/09
equinócios

Posição "c" - 22/12
solstício de inverno no hemisfério norte
solstício de verão no hemisfério sul

Fonte: Lamberts, Pereira & Dutra, 1997

Figura 10 – Movimento da Terra em torno do Sol

No equinócio, os raios incidem perpendicularmente sobre os meridianos no equador e vão se inclinando na medida em que se afasta dele. Essa inclinação é dada pela latitude do local (ϕ). No decorrer do ano, o ângulo de incidência do sol em relação ao meridiano sofre uma variação de $46^{\circ}54'$ (Figura 11).

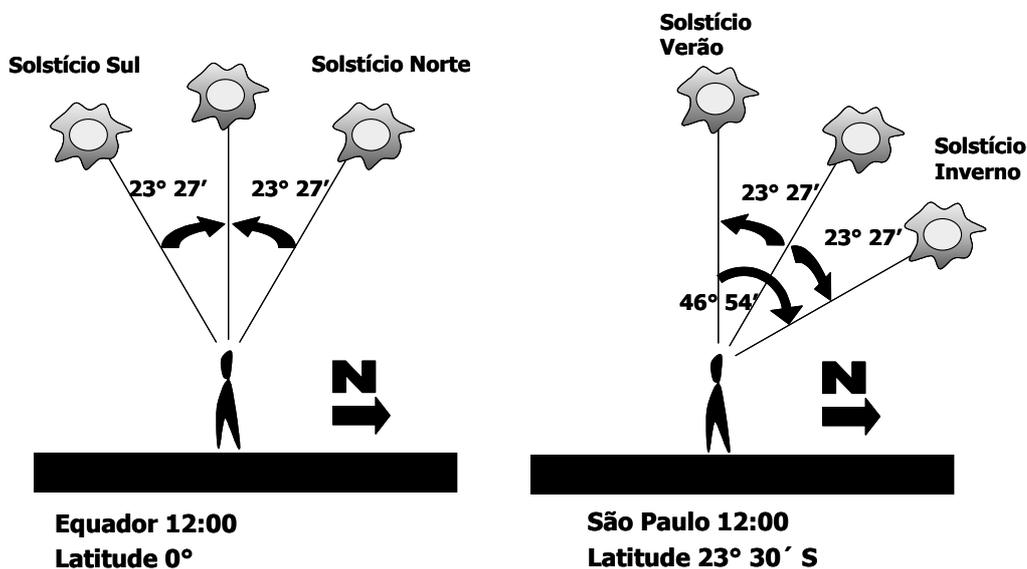


Figura 11 – Posição do Sol ao meio-dia no Equador e no Trópico de Carpicórnio, indicando influência da latitude e da declinação solar

A posição em que ele se encontra nesse intervalo é denominada declinação do sol (δ) e é calculado em **graus** pela equação adaptada do IES (1998):

$$\delta = 23,4511 \cdot \text{sen} [360 \cdot (n - 81) / 368]$$

(°) Equação 1

Onde n é o dia juliano, sendo 01/01 = 1 e 31/12 = 365.

A Figura 12 indica o movimento aparente do Sol nas latitudes 0° e $23^\circ 27'$ Sul. Os arcos leste-oeste indicam o caminho diário e os arcos norte-sul dividem os dias em horas.

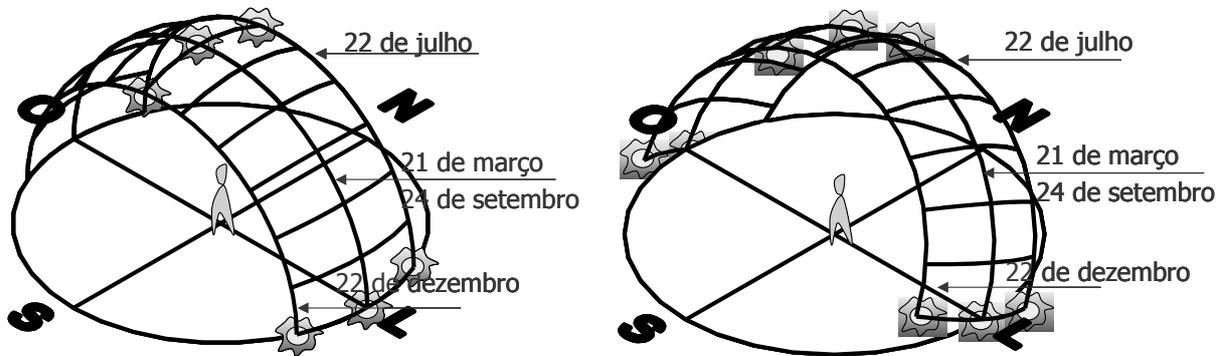


Figura 12 – Movimento aparente do Sol no Equador e no Trópico de Capricórnio.

A posição do sol em um dado momento é calculada pelas equações (CIE, 1990):

$$\xi_s = \arcsen (\text{sen } \phi \cdot \text{sen } \delta + \text{cos } \phi \cdot \text{cos } \delta \cdot \text{cos } \omega)$$

(°) Equação 2

$$\gamma_s = \arccos [(\text{cos } \phi \cdot \text{sen } \delta + \text{sen } \phi \cdot \text{cos } \delta \cdot \text{cos } \omega) / \text{cos } \xi_s]$$

(°) Equação 3

Onde:

ξ_s e γ_s são respectivamente a altura e o azimute solar (°);

δ é a declinação do sol, dada pela Equação 1;

ϕ é a latitude do local e

ω é o ângulo horário do sol em **graus** para o período em questão O ângulo solar é igual a 0° ao meio dia e aumenta 15° a cada hora, sendo negativo para a manhã e positivo para a tarde, podendo ser calculado em graus pela equação abaixo, onde t é o horário a ser calculado:

$$\omega = 15 \cdot (t - 12)$$

(°) Equação 4

A Equação 3 fornece valores de azimute iguais para as horas simétricas em relação ao meio dia (11-13, 10-14, 9-15, etc.), já que elas apresentam a mesma altura solar. Os valores obtidos pela equação, desse modo, só se aplicam para o período da tarde (12-19 h). Para o cálculo do período a manhã deve-se subtrair o valor calculado de 360° para se achar o azimute real.

2.3. CÁLCULOS DE IRRADIÂNCIA

No presente trabalho foi possível obter dados horários de radiação incidente (irradiância) em plano horizontal, junto ao Grupo de Micrometeorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (IAG-USP). No entanto, a maior parte das cidades brasileiras não conta com estes dados, sendo necessário calculá-lo a partir de dados mais facilmente mensuráveis.

Aqui foram utilizados os dados diários de irradiância solar global ($G_{\text{DIÁRIO}}$) em kJ/m^2 e os dados horários de duração do brilho solar (*sunshine hours* - **sh**) e nebulosidade (**NI**) junto à Estação Meteorológica do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo.

2.3.1. Cálculo da irradiância a partir dos totais diários de radiação

Os estudos estatísticos da distribuição temporal da radiação global diária sobre plano horizontal levaram à construção generalizada de gráficos das curvas de r_t , que é a razão entre a irradiância global horária e a irradiância global diária. O modelo assume que a distribuição de irradiâncias ao longo de dia é simétrica em relação ao meio-dia solar. Esse modelo apresenta melhor correlação para dias de céu claro e de céu encoberto onde os valores de irradiância seguem aproximadamente esta distribuição. Uma das vantagens deste modelo é que, para períodos mais longos, ele não subestima exageradamente a quantidade de radiação disponível. Collares-Pereira e Rabl (1979, citados por Duffie & Beckman, 1980) desenvolveram a seguinte equação que representa a variação de r_t ao longo do dia:

$$r_t = (\pi/24) \cdot (a + b \cdot \cos \omega) \cdot (\cos \omega - \cos \omega_s) / [\sin \omega_s - (2 \cdot \pi \cdot \omega_s / 360) \cdot \cos \omega_s] \quad (-) \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

a e **b** são dados por:

$$a = 0,409 + 0,5016 \cdot \sin (\omega_s - 60) \quad (-) \quad \text{Equação 6}$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \cdot \sin (\omega_s - 60) \quad (-) \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

ω é o ângulo horário do sol para o período em questão (no caso o ponto médio da hora para a qual o cálculo é feito) ($^\circ$) e

ω_s é o ângulo horário do por do sol determinado pela equação, calculado em função da latitude do local (ϕ) e da declinação do sol para aquele dia (δ), calculada na Equação 1:

$$\omega_s = \arcsin(-\text{tg } \phi \cdot \text{tg } \delta) \quad (^\circ) \quad \text{Equação 8}$$

Nesse caso, a irradiância global horária (G_g) em W/m^2 é dada em função da irradiância solar global diária medida ($G_{DIÁRIO}$) dada em kJ/m^2 , pela equação:

$$G_g = r_t \cdot G_{DIÁRIO} / 3600 \quad (W/m^2) \quad \text{Equação 9}$$

2.3.2. Cálculo a partir da insolação

Estando disponíveis os dados horários de insolação foi feita uma adaptação do modelo de Ångström, apresentado por Akutsu, Sato & Pedroso (1987), para a estimativa da irradiância solar global diária a partir dos dados de insolação diária. A irradiância horária (G_g) é dada pela equação:

$$G_g = G_o \cdot (a' + b' \cdot sh / SH) \quad (W/m^2) \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

a' e b' são coeficientes empíricos (-);

sh é a duração do brilho solar medida em uma hora (h);

SH é a duração máxima para aquela hora (usualmente 1, exceto para as horas próximas ao nascer e ao pôr-do-sol, quando $SH = (\omega - \omega_s) / 15$) (h) e

G_o é a radiação incidente em uma hora no topo da atmosfera sobre uma superfície horizontal em W/m^2 , calculado a partir da equação mostrada por Duffie & Beckman (1980):

$$G_o = (12/\pi) \cdot G_{sc} \cdot [1 + 0,033 \cdot \cos(360 \cdot n / 365)] \cdot [\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) / 360 + \pi^2 \cdot (\omega_2 - \omega_1) \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta / 90] \quad (W/m^2) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

G_{sc} é a constante solar ($1367 W/m^2$) e

ω_2 e ω_1 são os ângulos horários final e inicial do período estudado (no caso uma hora) ($^\circ$)

2.3.3. Cálculo a partir da nebulosidade

O cálculo da irradiância horária a partir dos dados de nebulosidade foi feito com base no modelo de Kasten e Czeplak apresentado por Muneer, Gul & Kinghorn (1998). Ele utiliza a nebulosidade (N) em oitavos de céu encoberto por nuvens (octas), sendo $N = 0$ um céu totalmente claro e $N = 8$ um céu totalmente encoberto. A equação foi adaptada para o uso do Índice de Nebulosidade (NI) que indica quantos décimos do céu estão ocupados por nuvens. A radiação global em um céu sem nuvens ($E_{eg,c}$) é dada em função do ângulo de altura solar (ξ_s) (ver Equação 2) pela equação:

$$E_{eg,c} = (910 \cdot \sin \xi_s) - 30 \quad (W/m^2) \quad \text{Equação 12}$$

A irradiância horária, considerada a atenuação pelas nuvens, é dada por:

$$G_g = E_{eg,c} \cdot [1 - 0,75 (NI/10)^{3,4}] \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equação 13}$$

2.3.4. Parcela difusa e direta

Duffie & Beckman (1980) apresentam alguns modelos para o cálculo da parcela difusa e direta da radiação global incidente. Como no caso da determinação dos valores horários a partir dos diários, não é um processo exato, visto que as correlações foram obtidas experimentalmente em outros países e podem não se aplicar bem à situação brasileira. As parcelas difusa e direta normalmente são dadas em função de um índice de limpidez (*clearness index*), que mede a relação entre a irradiância medida ou calculada e a irradiância no topo da atmosfera no mesmo período. Ele pode ser horário (k_t), diário (K_t) ou mensal (\bar{K}_t). Dos métodos pesquisados, normalmente os que trabalham com os índices horários são os que apresentam as menores divergências. Logo, para os fins deste trabalho:

$$k_t = G_g/G_o \quad (-) \quad \text{Equação 14}$$

Onde G_o é calculado a partir da Equação 11 e G_g pode ser calculado a partir das equações. 09, 10 ou 13. Uma vez calculado k_t , a irradiância difusa (G_d) pode ser obtida a partir das equações de Orgill e Hollands, apresentadas por Duffie & Beckman (1980) em W/m^2 :

$$G_d = G_g \cdot (1,0 - 0,249 \cdot k_t) \quad \text{para } k_t < 0,35 \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equação 15}$$

$$G_d = G_g \cdot (1,557 - 1,84 \cdot k_t) \quad \text{para } 0,35 < k_t < 0,75 \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equação 16}$$

$$G_d = 0,177 \cdot G_g \quad \text{para } k_t > 0,75 \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equação 17}$$

2.3.5. Comparação entre os modelos de cálculos

Observa-se que os modelos de cálculo dos itens 2.3.1 e 2.3.2 e 3.2 estão relacionados a medidas de radiação incidente no plano horizontal, enquanto o modelo do item 2.3.3 baseia-se apenas na cobertura de nuvens do céu. Como as nuvens podem variar em tipo e distribuição, este último modelo tende a contar com uma imprecisão maior. No entanto, os modelos de insolação e de nebulosidade tendem a descrever melhor a variação da radiação durante o dia, enquanto o modelo do total diário utiliza uma distribuição horária segundo uma curva padrão.

Para verificar a eficiência dos cálculos de irradiância, foi feita uma comparação entre o valor calculado e valor horário medido. A Figura 13 mostra essa correlação através de gráficos e das equações de correlação.

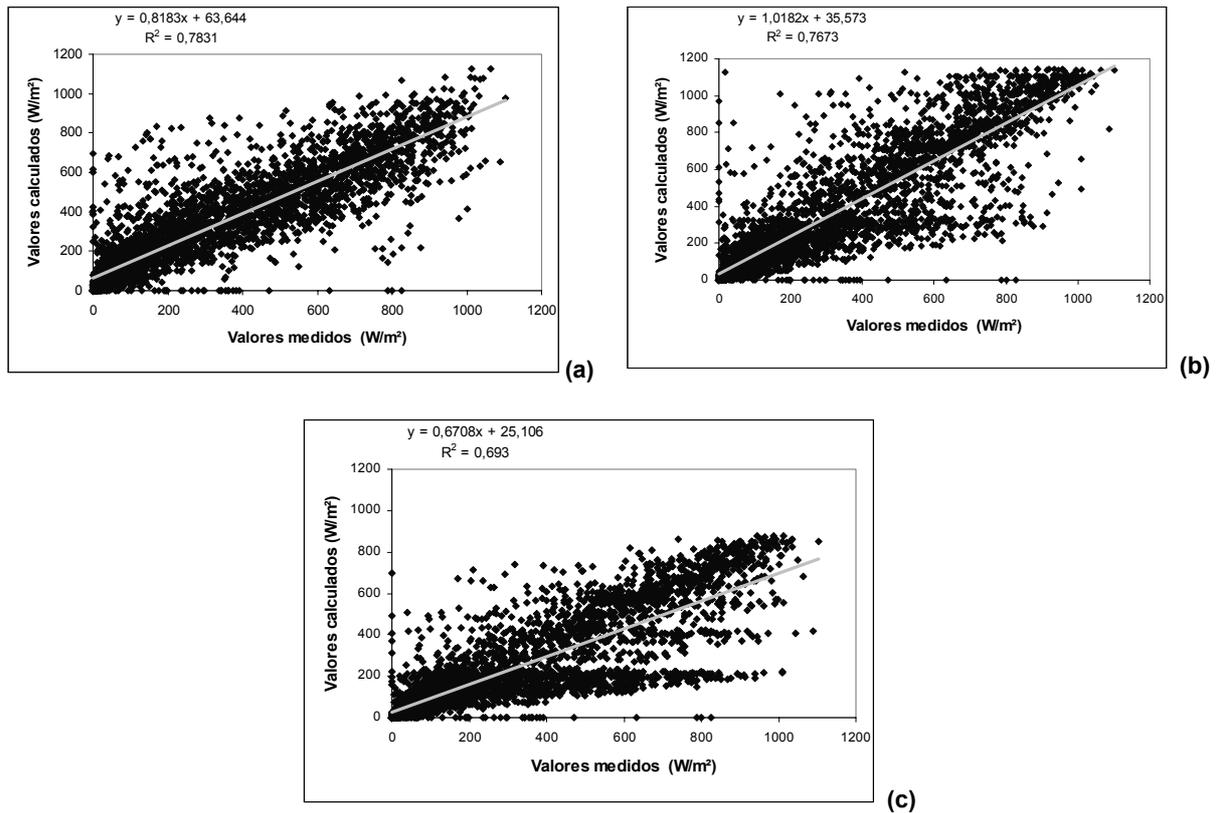


Figura 13 – Gráficos de correlação entre os cálculos de radiação: (a) Totais Diários, (b) Insolação, (c)Nebulosidade

Pelo valor de R^2 obtido pode-se perceber que o método de cálculo 1, que utiliza o total diário, apresenta-se como modelo mais adequado, embora o método 2 apresente resultados semelhantes. O método de cálculo 3 (nebulosidade) tende a subestimar a radiação disponível. Optou-se pelo método 2 pela boa correlação e pela capacidade de descrever bem as variações horárias na radiação.

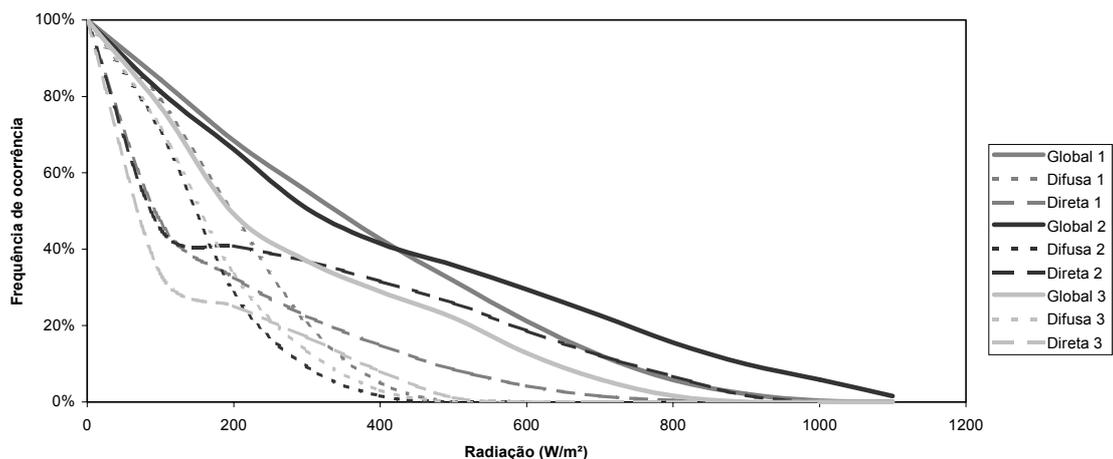


Figura 14 – Frequência de ocorrência de horas em que a radiação excede o valor do eixo das abscissas

2.4. CÁLCULOS DE ILUMINÂNCIA

Segundo Vartianinen (2000a) a eficácia luminosa, chamada por ele de **K**, mas que para ser compatibilizada com a nomenclatura deste trabalho será denominada **EL**, é definida pela razão entre o fluxo luminoso e o fluxo radiante em **lm/W**. O fluxo luminoso no caso é toda a radiação emitida na faixa visível ao olho humano, com (λ) entre 380 e 780 nm. O autor afirma que para uma luz monocromática na faixa dos 555 nm ter-se-ia uma eficácia luminosa da ordem de 683 lm/W e no caso da radiação solar que atinge a atmosfera terrestre ela estaria na faixa de 97,8 lm/W.

A eficácia luminosa da radiação global, no entanto, depende principalmente da maneira como a atmosfera absorve os raios solares. Essa absorção aumenta de acordo com a distância percorrida e é maior na faixa do infravermelho, conforme indicado na Figura 4, o que significa: 1) que a eficácia luminosa tende a se alterar com a altura solar e 2) que a eficácia luminosa da radiação solar na terra é maior do que a da radiação incidente no topo da atmosfera.

As iluminâncias difusa (**E_d**), direta (**E_D**) e global (**E_g**) em plano horizontal em **lux**, desse modo é dada pelas equações:

$$E_d = G_d \cdot EL_d \quad (\text{lux}) \quad \text{Equação 18}$$

$$E_D = G_D \cdot EL_D \quad (\text{lux}) \quad \text{Equação 19}$$

$$E_g = G_{g..} \cdot EL_g \quad \text{ou} \quad E_g = E_d + E_D \quad (\text{lux}) \quad \text{Equação 20}$$

Vartianinen (2000a) apresenta diversos modelos para o cálculo da eficácia luminosa, tendo efetuado comparações com os resultados obtidos em medições em Helsinki, na Finlândia. Destes modelos, o que apresentou melhor correlação foi o desenvolvido por Perez, que usa como parâmetros a altura solar (ξ_s , Equação 2), a probabilidade de insolação ($\pi_i = sh/SH$, Equação 10), a irradiância direta e difusa (**I_D** e **I_d**, Equações de 15 a 17) e o total de água precipitável (**W**), que não pode ser obtido para este estudo. Além disso, a validação de um modelo de eficácia luminosa para a Finlândia não necessariamente o valida para as condições brasileiras. Ainda assim, o autor apresenta dois outros modelos que podem ser utilizados, propostos por Littlefair e Chung. A vantagem de se utilizar estes modelos, e não valores pré-estabelecidos, é que eles podem acomodar a variação de eficácia entre os diversos tipos de céu, pois é difícil acreditar que um céu claro azul tenha a mesma eficácia luminosa para a radiação difusa que um céu encoberto branco.

Além do trabalho de Vartiainen foram também encontradas sugestões de eficácia luminosa em Ericksson, Gay & Morel (1986), Milne & Zurick (1998), Zain-Ahmed et al (2002) e Munner, Gul & Kihghorn (1998), apresentados na Tabela 5. Destes, apenas o último propõe uma equação para o cálculo da eficácia luminosa utilizando-se do índice de limpidez horário, **k_t**. Os demais fornecem valores pré-estabelecidos dentro de uma margem de erro aceitável, mas se aplicam melhor às condições onde foram gerados.

Tabela 5 – Eficácia luminosa (EL) em lm/W de acordo com as diversas bibliografias

	Global	Difusa	Direta
Ericksson, Gay, Morel, 1986	-	$149,0 \pm 1,0$	$107,5 \pm 0,5$
Milne & Zurick, 1998	$107 \pm 15\%$	$117 \pm 15\%$	$103 \pm 15\%$
Zain-Ahmed et al, 2002	112	120	104
Munner, Gul, Kinghorn, 1998	$136,6 - 74,5.k_t + 57,3.k_t^2$	$130,2 - 39,8.k_t + 50,0.k_t^2$	-
Littlefair ⁵	-	$115 + 29.pi$	$51,8 + 1,65.\xi_s - 0,0153.\xi_s^2$
Chung ⁶	-	$135,3 - 25,7.k_t$	$48,5 + 1,67.\xi_s - 0,0098.\xi_s^2$

Foi realizado um estudo comparativo, utilizando-se os dados de radiação medidos e os modelos de eficácia luminosa propostos por Ericksson, Gay & Morel, Zain-Ahmed et al e Munner, Gul & Kihghorn, Littlefair e Chung, para a verificação das equações propostas.

Os valores de EL_d e EL_D médios encontrados foram de 126 e 78 lm/W para Littlefair e 146 e 84lm/W para Chung. Munner não apresenta valores para EL_D , sendo considerados os valores de EL_d e EL_g como sendo, respectivamente, 120 e 134 lm/W. No entanto, a pesar da variação entre as eficiências propostas, as curvas de frequência de ocorrência foram bastante semelhantes de acordo com os diversos métodos, como pode se perceber na Figura 15 e na Figura 16.

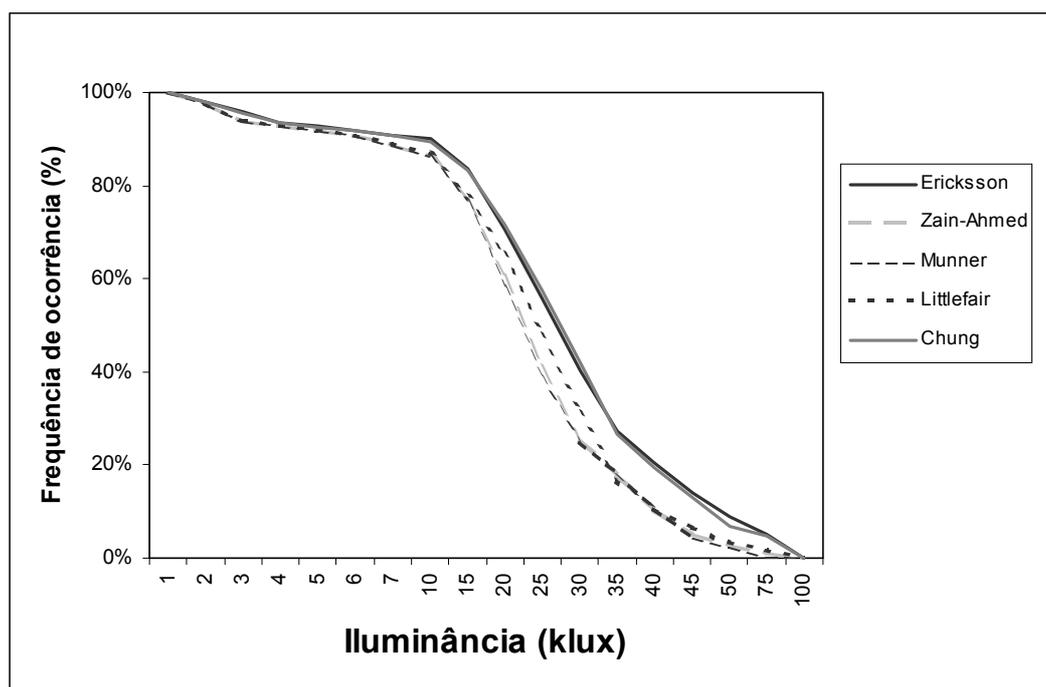


Figura 15 – Percentagem de horas em que a iluminância difusa excede o valor do eixo das abscissas

⁵ In Vartiainen, 2000a

⁶ Idem

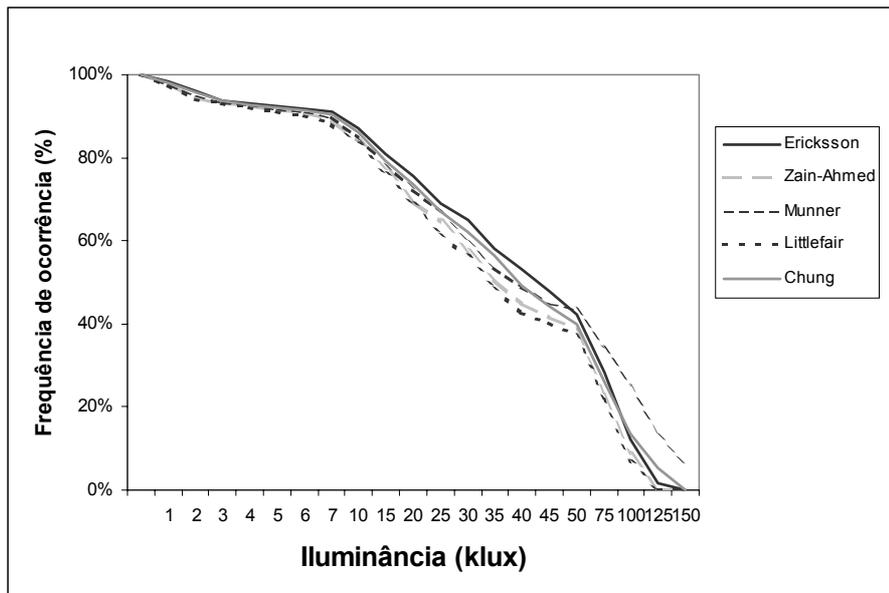


Figura 16 – Percentagem de horas em que a iluminância global excede o valor do eixo das abscissas

Para fins deste trabalho, optou-se por trabalhar com o modelo de Littlefair, pela boa aproximação com os valores medidos no trabalho malaio e pela capacidade de incorporar as diferenças de eficácia luminosa dos diversos tipos de céu.

2.5. DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS E RADIANCIAS DO CÉU

Para estudos de iluminação e carga térmica, não basta saber a irradiância horizontal, cuja modelagem foi mostrada no item acima, sendo necessário também conhecer o ângulo de incidência dessa radiação, sendo necessário caracterizar a radiação e a luz emitidas pelo sol e pelo céu⁷. No caso da radiação direta, isso é simples, pois ela vem na forma de raios paralelos com direção equivalente à direção do Sol. No caso da radiação difusa, no entanto, esta tarefa torna-se mais complexa, devido principalmente às variações devido à nebulosidade e à posição do sol.

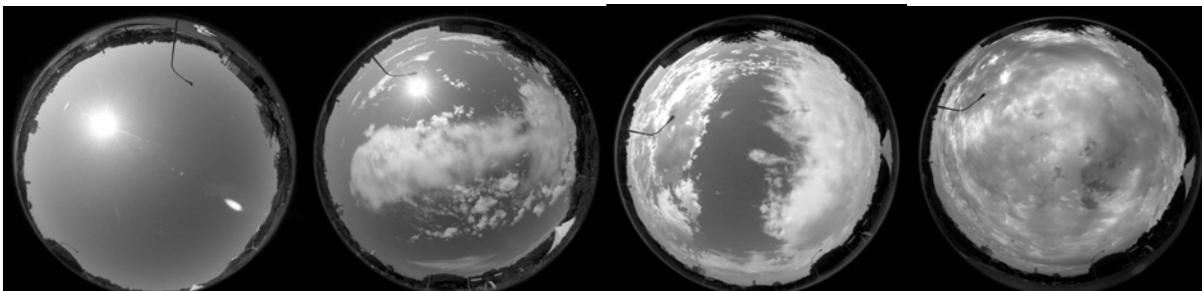


Figura 17 – Fotos do céu em diferentes condições de nebulosidade

⁷ Respectivamente radiância e luminância do sol e do céu

Na Figura 17 pode-se ver o efeito da variação de nebulosidade na distribuição de luminâncias do céu, sendo que as áreas em branco apresentam maiores luminâncias. Observa-se que o céu claro apresenta-se mais escuro que o céu encoberto, caso se desconsidere o sol. É possível perceber também que o céu claro apresenta uma homogeneidade maior de luminâncias, sendo mais fácil prever a sua distribuição. Os céus parcialmente encobertos apresentam uma distribuição totalmente heterogênea e mesmo no céu encoberto da figura, pode-se observar grande variação de tons de cinza.

Existem vários modelos de distribuição da radiação e da luz difusa na abóbada celeste. A CIE (1995) apresenta uma compilação destes modelos, fazendo recomendações para a escolha do tipo de céu a ser utilizado nos cálculos de iluminação natural. Para isso, considera-se cada uma das 145 zonas do céu estabelecidas no item 2.1 como sendo uma fonte pontual, à qual se atribui uma radiância e uma luminância específica. Estes modelos podem ser isotrópicos ou anisotrópicos. Os primeiros modelos descrevem céus em que a distribuição não varia com o azimute, sendo que uma superfície vertical desobstruída receberia a mesma quantidade de luz qualquer que fosse sua orientação em relação ao norte. Modelos anisotrópicos levam em conta a posição do sol e o impacto desta na distribuição de luz. Deste modo têm-se:

- O céu uniforme (isotrópico);
- O céu encoberto padrão CIE (isotrópico);
- O céu claro padrão CIE (anisotrópico);
- O céu intermediários e médios (anisotrópicos) e
- Os “*All-sky models*” que contemplam as variações de nebulosidade do céu e teoricamente se aplicam para qualquer condição.

A maioria dos cálculos de irradiância para superfícies inclinadas considera um céu uniforme (Vartiainen 2000b), pois normalmente a parcela direta é muito mais significativa que a difusa. e o erro obtido é considerado aceitável. No cálculo da iluminação natural, no entanto, a luz direta causa distribuição irregular, ofuscamento e excesso de iluminação na maior parte das vezes, tornando-se indesejável. Por isso, a maioria dos modelos trata da distribuição de luminâncias do céu e não de radiâncias.

Observa-se que nenhum destes modelos faz menção à aleatoriedade do comportamento das nuvens, sendo todos eles considerados como aproximações aceitáveis da realidade nas condições onde foram desenvolvidos. É importante, no entanto, ressaltar aqui a importância de se realizarem medições locais que validem estes modelos para as regiões estudadas.

Foram estudados três modelos de céu, sendo dois de luminâncias e um de radiâncias. O modelo proposto por Perez et al (1993) apresentou resultados inconsistentes e foi descartado. Deste modo apresentam-se aqui os modelos propostos por Igawa & Nakamura (2001) de luminâncias e por Brunger & Hooper (1993) de radiâncias.

2.5.1. Modelo de distribuição de luminâncias

O modelo proposto por Igawa & Nakamura (2001) é baseado em medições de luminâncias realizadas em Tóquio, Japão (35°40' N, 139°49' L), no período de Março de 1992 a Setembro de 1993. O modelo tem como principal parâmetro a iluminância global normalizada (N_{evg}) que estabelece a relação entre a iluminância medida em um plano horizontal (E_g) e uma iluminância global padrão (S_{evg}) que é função da altura solar (ξ_s). Assim:

$$N_{\text{evg}} = E_g/S_{\text{evg}} \quad (-) \quad \text{Equação 21}$$

$$S_{\text{evg}}(\xi_s) = -36,78.\xi_s^5 + 188,79.\xi_s^4 - 375,95.\xi_s^3 + 306,20.\xi_s^2 + 15,47.\xi_s + 0,83 \quad (\text{klux}) \quad \text{Equação 22}$$

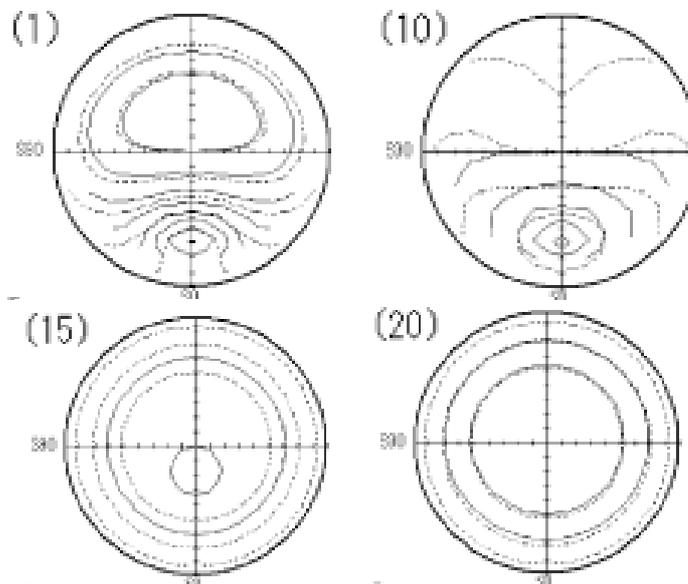
Parte-se do Céu Claro Padrão da CIE para estabelecer a formulação. O modelo de céu CIE é composto de duas equações, que consideram a variação da luminância do ponto (L_{vp}) em $\text{cd}/(\text{sr}.\text{m}^2)$ de acordo com a altura e o azimute do ponto respectivamente.

$$L_{\text{vp}} = f(\xi_p) \cdot f(\gamma_p) \quad (\text{cd}/\text{sr}.\text{m}^2) \quad \text{Equação 23}$$

$$f(\xi_p) = 1/[1 + a_1/\exp(a_2.\text{sen } \xi_p)] \quad (-) \quad \text{Equação 24}$$

$$f(\gamma_p) = 1 + b.[\exp(c.\gamma_p) - \exp(c.\pi/2)] + d.\cos^2 \gamma_p \quad (-) \quad \text{Equação 25}$$

Onde os coeficientes a_1 , a_2 , b , c e d foram modificados em função de N_{evg} para contemplar todas as condições de céu, conforme o mostrado na Figura 18.



Fonte: Igawa & Nakamura, 2001

Figura 18 – Variação da distribuição de luminâncias do céu para diferentes valores de N_{evg}

Os coeficientes seguem as equações:

$$a_1 = 5,5 \quad (-) \quad \text{Equação 26}$$

$$a_2 = 1,82 \cdot N_{\text{evg}}^2 - 5,82 \cdot N_{\text{evg}} + 2,26 \quad (-) \quad \text{Equação 27}$$

$$b = 24,3 \cdot (1,6 \cdot N_{\text{evg}})^{5,9} \cdot \exp(-0,20 \cdot N_{\text{evg}}) \cdot (1,1 - N_{\text{evg}})^{1,5} \quad (-) \quad \text{Equação 28}$$

$$c = -3,05 / [1 + 24 \cdot \exp(-7,7 \cdot N_{\text{evg}})] \quad (-) \quad \text{Equação 29}$$

$$d = 0,46 / [1 + 630 \cdot \exp(-9,9 \cdot N_{\text{evg}})] \quad (-) \quad \text{Equação 30}$$

A luminância de cada zona é calculada para o seu ponto central e depois multiplicada pelo ângulo sólido da zona.

2.5.2. Modelo de distribuição de radiâncias

Para estudo da distribuição de radiâncias foi usado o trabalho de Brunger & Hoper (1993), baseado em medições realizadas em Toronto, Canadá (43°40' N) no período de Fevereiro de 1983 a Fevereiro de 1984. Os autores buscaram trabalhar com variáveis que independessem da localidade. Deste modo, o modelo baseia-se nos valores medidos de irradiância difusa (I_d), no índice de limpidez (k_t) e na razão entre a irradiância difusa e a global, denominada índice de claridade (k), dado pela Equação 31.

$$k = G_d / G_g \quad (-) \quad \text{Equação 31}$$

A radiância de um determinado ponto ($R_{vz}(\alpha_p, \gamma_p)$) em watts por esferorradianos por metro quadrado ($W/(sr \cdot m^2)$) é dada pela equação:

$$R_{vz}(\xi_p, \gamma_p) = G_d \cdot \{ [e_0 + e_1 \cdot \text{sen } \xi_p + e_2 \cdot \exp(-e_3 \cdot \psi)] / [\pi \cdot (e_0 + 2 \cdot e_1/3) + 2 \cdot e_2 \cdot I(\xi_s, e_3)] \} \cdot (W/(sr \cdot m^2)) \quad \text{Equação 32}$$

Onde:

G_d é medido ou calculado pela Equação 10;

ψ é a distância entre a direção do disco solar e o ponto estudado, calculado pela equação:

$$\psi = \arccos [\cos \xi_p \cdot \cos \xi_s \cdot \cos (\gamma_p - \gamma_s) + \text{sen } \xi_p \cdot \text{sen } \xi_s]; \quad (^\circ) \quad \text{Equação 33}$$

$I(\xi_s, e_3)$ é calculado pela equação:

$$I(\xi_s, e_3) = \{ [1 + \exp(-e_3 \cdot \pi/3)] / (e_3^2 + 4) \} \cdot \{ \pi - [1 - \{ 2 \cdot [1 - \exp(-e_3 \cdot \pi)] \}] / \{ \pi \cdot e_3 \cdot [1 + \exp(-e_3 \cdot \pi/3)] \} \} \cdot [(1 - \alpha_s \cdot \pi) \cdot \text{sen } \xi_s - 0,02 \cdot \pi \cdot \text{sem}(2 \cdot \xi_s)] \quad (-) \quad \text{Equação 34}$$

Os coeficientes e_0 , e_1 , e_2 e e_3 são dados em função de k e k_t na Tabela 6

Tabela 6 – Valores para os coeficientes para o modelo de céu

K	k_t	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85
0,95		0,1864	0,2002	0,1380	0,1508	0,1718	0,2060			
		0,1979	0,1772	0,0930	0,5472	0,5666	-0,0294			
		0,0000	0,0000	0,2890	0,6659	0,8734	2,9511			
		1,0000	1,0000	0,9667	1,6755	2,4129	3,7221			
0,85		0,1431		0,3477	0,2664	0,2139	0,1520	0,1151		
		0,1420		-0,2153	-0,1559	0,0307	0,1497	0,1805		
		2,6360		5,3170	1,7758	1,6099	1,8315	2,2284		
		5,5250		4,4211	2,8590	3,7260	4,6125	4,1553		
0,75				0,3687	0,2684	0,2019	0,1870	0,1842	0,1566	
				-0,2927	-0,1615	-0,1275	-0,0632	0,0253	0,3003	
				2,6268	4,5224	1,4096	1,2819	1,3080	1,8486	
				2,8413	4,0842	2,2453	2,5932	3,1127	14,7440	
0,65				0,3851	0,2843	0,2713	0,1597	0,2088	0,1273	
				-0,2726	-0,1645	-0,1837	-0,1715	-0,0520	-0,0500	
				4,1962	5,2960	2,8220	1,2964	1,3225	1,5961	
				5,2590	4,3678	3,4860	1,9183	2,8364	2,0993	
0,55				0,6079	0,2892	0,2816	0,2465	0,2070	0,2477	
				-0,4838	-0,1953	-0,1945	-0,1245	-0,0927	-0,0711	
				11,0780	2,1346	3,8606	2,9163	1,1098	1,5836	
				4,5880	3,7268	3,7447	4,0760	2,5586	3,4500	
0,45					0,2337	0,2822	0,2916	0,2583	0,2457	0,2315
					-0,1015	-0,1842	-0,2065	-0,1654	-0,1398	-0,2028
					11,7920	6,0300	2,7327	1,9525	1,5120	1,5803
					5,3698	4,5241	3,7624	3,3769	2,9640	2,3229
0,35			e_0			0,3162	0,3006	0,2871	0,2491	0,2510
			e_1			-0,2039	-0,2172	-0,2184	-0,2224	-0,0907
			e_2			6,2226	4,5443	2,6467	1,5992	0,9733
			e_3			5,8975	4,2660	3,5940	2,6404	2,6775
0,25							0,3417	0,3153	0,3071	0,2971
							-0,2574	-0,2338	-0,2576	-0,3126
							4,1918	3,8860	2,3127	1,3594
							4,3268	4,3920	3,5189	2,3970
0,15								0,3360	0,3243	0,3061
								-0,2600	-0,3003	-0,4531
								4,2481	1,9157	1,6120
								4,3727	3,2680	2,3190

Fonte: Bunker & Hooper, 1993

Assim como a luminância, a radiância da zona é calculada para o ponto central e depois multiplicada pela sua área.

2.5.3. Distribuição da radiação e da luz diretas

A irradiância direta em plano horizontal foi convertida em radiância a partir da equação:

$$R_D = G_D / \sin \xi_s \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equação 35}$$

Seu valor foi adicionado ao valor da zona na qual se encontra o disco solar. O mesmo procedimento foi adotado para a iluminância direta.

2.6. CÁLCULO DA TEMPERATURA DO CÉU

Além da emissão de radiação de onda curta, pela qual o Sol é o responsável, a abóbada celeste também está continuamente emitindo e absorvendo radiação de onda longa, conforme indicado na Figura 5, pg 40. Caso não houvesse atmosfera, a abóbada seria um corpo negro ideal a uma temperatura de 0 K (-273°C), continuamente absorvendo a energia irradiada da

Terra, cujo balanço térmico se estabilizaria em temperaturas bem mais baixas. Na existência de atmosfera, no entanto, a chamada temperatura de ponto de céu sobe consideravelmente, mas ainda pode ficar vários graus abaixo da temperatura do ar, ou da temperatura superficial das edificações e das pavimentações. Desse modo, o céu torna-se uma importante fonte de resfriamento das superfícies. Duffie & Beckman (1980) apresentam duas equações para o cálculo da temperatura de fundo de céu.

$$T_{\text{céu}} = 0,0552.(T_e + 273)^{1,5} \quad (\text{K}) \quad \text{Equação 36}$$

$$T_{\text{céu}} = (T_e + 273).[0,8 + (T_{\text{po}} - 273)/250]^{0,25} \quad (\text{K}) \quad \text{Equação 37}$$

Onde

$T_{\text{céu}}$ é a temperatura de fundo de céu dada em K^8 ;

T_e é a temperatura instantânea do ar externo em $^{\circ}\text{C}$ e

T_{po} é a temperatura de ponto de orvalho em $^{\circ}\text{C}$, calculada a partir da umidade relativa pela fórmula mostrada por Santamouris & Asimakopoulos (1996):

$$T_{\text{po}} = 234,175.[\ln \text{UR} + 17,0085.T_e/(234,175 + T_e)]/[17,08085 - [\ln \text{UR} + 17,0085.T_e/(234,175 + T_e)]] \quad (\text{C}) \quad \text{Equação 38}$$

Onde **UR** é a umidade relativa, sendo 1 igual a 100% e 0 igual a 0%.

Duffie & Beckman (1980) observam ainda que os resultados da primeira e da segunda equação coincidem quando a umidade relativa está em torno de 25%. A segunda fórmula apresenta um grau de precisão maior do que a primeira, pois o vapor d'água é um dos principais responsáveis pela absorção da radiação de onda longa. No entanto, a concentração desse vapor na forma de nuvens pode causar um aumento ainda maior nessa absorção, levando à formulação desenvolvida por Behrdal e Matin apresentada por Givoni (1994) e Santamouris (1996), que leva em conta a cobertura de nuvens.

Nesse caso, Givoni (1994) propõe a utilização da temperatura de céu como sendo a temperatura do ar e atribui à abobada celeste uma emissividade menor que 1 ($\varepsilon_{\text{céu}}$), o que significa que ela não mais é considerada como um corpo negro. O valor dessa emissividade depende da temperatura de ponto de orvalho (T_{po}) e do Índice de Nebulosidade (**NI**). Em primeiro lugar, calcula-se a emissividade de um céu claro (ε_{cc})

$$\varepsilon_{\text{cc}} = 0,711 + 0,56.(T_{\text{po}}/100) + 0,73.(T_{\text{po}}/100)^2 \quad (-) \quad \text{Equação 39}$$

Essa emissividade sofre uma variação diária em função da hora do dia (**t**).

⁸ Essa será a única grandeza de temperatura que não será dada em graus centígrados ($^{\circ}\text{C}$). Isso porque ela entra na fórmula de transferência de calor com o valor em Kelvin. Como a temperatura de céu não será utilizada nos cálculos e sim a temperatura do ar e a emissividade do céu, considerou-se desnecessária a conversão.

$$\Delta\varepsilon = 0,013.\cos(\pi.t/12) \quad (-) \quad \text{Equação 40}$$

A emissividade do céu, considerando a nebulosidade, é dada pela equação abaixo.

$$\varepsilon_{\text{céu}} = (\varepsilon_{\text{cc}} + \Delta\varepsilon).(1 + 0,0224.NI - 0,0035.NI^2 + 0,00028.NI^3) \quad (-) \quad \text{Equação 41}$$

2.6.1. 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):

$$E = (\Phi / d^2).\cos \theta_{\text{zsup}} \quad (\text{lux ou W/m}^2) \quad \text{Equação 42}$$

Onde:

E é a irradiância ou iluminância no ponto P;

Φ é a intensidade do fluxo radiante ou luminoso (**W/m²** ou **lm/m²**)

d é a distância em metros (**m**)

θ_{zsup} é o ângulo de incidência do fluxo em relação à normal da superfície.

Como a abóbada celeste tem raio infinito e tem-se o valor de luminância e radiância, essa equação é convertida em

$$E_{\text{vz}} = L_{\text{vz}} \cos \xi_{\text{z-sup}} \quad (\text{lux}) \quad \text{Equação 43}$$

$$G_{\text{vz}} = R_{\text{vz}} \cos \xi_{\text{z-sup}} \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equação 44}$$

Onde:

E_{vz} e **G_{vz}** são a iluminância ou irradiância no ponto devido à zona z_i (**lux** ou **W/m²**);

L_{vz} e **R_{vz}** são a luminância ou radiância da zona z_i (**cd/m²** ou **W/m²**)e

$\xi_{\text{z-súp}}$ é o ângulo com que a radiação ou luz vinda daquela zona incide na superfície estudada (°).

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

$$\xi_{\text{z-sup}} = \cos \xi_{\text{z}}.\cos \beta_{\text{sup}} + \text{sen } \xi_{\text{z}}.\cos \beta_{\text{sup}}.\cos(\gamma_{\text{z}} - \gamma_{\text{sup}}) \quad (^\circ) \quad \text{Equação 45}$$

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 na Tabela 4)e o ângulo que cada área forma com a superfície ($\xi_{\text{z-s}}$).

Desse modo:

$$FVC = \sum A_z \cos \xi_{z-s} \quad (-) \quad \text{Equação 46}$$

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

Caracterização da Obstrução

3.1. DEFINIÇÃO DE OBSTRUÇÃO

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. A formulação exposta no capítulo 2 se aplica quando o objeto de análise pode ver todas as partes do céu. Elementos que se interponham entre o sol e o céu (ou parte dele) e o ponto analisado são definidos como sendo *obstruções*. Estas obstruções podem ser naturais ou não. Em algumas vezes a própria topografia do terreno esconde parte do céu, em outras a vegetação é responsável por isso. Nesse trabalho, foram tratadas somente as obstruções causadas pelas edificações.



Figura 19 – Foto com lente “olho de peixe” indicando a obstrução no canteiro central da Av. Paulista, em frente ao Conjunto Nacional

Novas edificações construídas irão sempre alterar a condição de exposição à radiação dos vizinhos (Santamouris, 2001). Ao obstruírem parte do céu (ver Figura 19), 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 do ano, esta edificação também provocará obstrução da radiação direta, o que se denomina *sombreamento*. Nesse caso a redução dos ganhos de radiação, e conseqüentemente de carga térmica, será bastante significativa. Em climas quentes, esse efeito pode ter impacto positivo no desempenho térmico da edificação. No entanto, ao contrário das obstruções naturais, que utilizam a radiação para outros processos que não os de troca seca, as edificações podem contribuir para o aquecimento urbano, ao acumular calor recebido por onda curta durante o dia e não conseguir libera-lo durante a noite por onda longa para o fundo de céu (Duarte, 2000). Esse fenômeno é denominado ilha de calor.

É possível, muitas vezes, que as fachadas da edificação funcionem como superfícies refletoras para a radiação, dependendo do coeficiente de reflexão dos materiais usados. Quanto maior esse coeficiente maior a contribuição de luz e radiação que esta obstrução trará para o ponto. No caso da superfície refletir o sol, pode ser inclusive que a sua luminância seja maior que a da zona de céu localizada atrás dela. Nesse caso ela aumentaria, e não diminuiria, a incidência de luz no ponto estudado. Nesse trabalho, no entanto, desprezou-se a componente refletida da radiação, embora ela possa ser incorporada mais tarde no modelo.

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 a partir dos chamados ângulos de obstrução verticais (θ_v) e horizontais (θ_h), que serão neste trabalho sempre medidos em relação ao horizonte e ao norte, respectivamente, conforme mostrado na Figura 20.

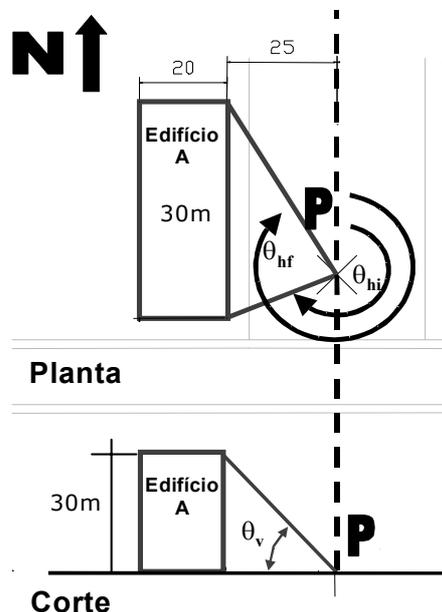


Figura 20 – Exemplo de ângulos de obstrução do Edifício A em relação ao ponto P

O estudo da obstrução pode ser feito de forma, gráfica ou analítica.

No primeiro caso são utilizados simuladores de trajetória solar (*heliodons*)⁹. No segundo, utilizam-se desenhos de sombras ou máscaras de obstrução do entorno. O estudos de mascaramento são feitos mais comumente na projeção estereográfica (Szokolay, 1987; Bittencourt, 1990; Frota, 2004). 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 (ver Figura 21).

⁹ Ver Frota (2004) para maiores informações. A avaliação da obstrução por meios experimentais não é abordada neste trabalho.

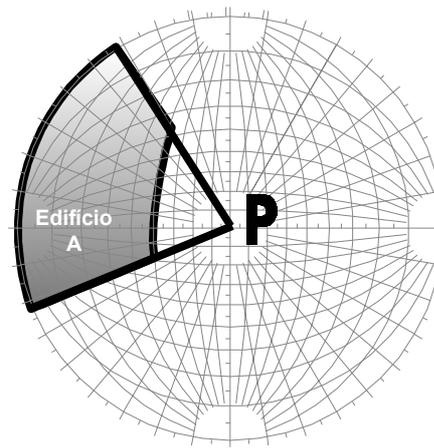


Figura 21 – Mascaramento do Edifício A no ponto P, na projeção estereográfica

Os procedimentos analíticos serão tratados com detalhe no próximo item. Neste trabalho, a obstrução considerada é sempre o novo edifício a ser construído, cujo impacto no entorno deseja-se avaliar. O ponto de referência estará sempre na linha limite do terreno. Considera-se esse ponto como sendo o pior caso, representando as condições de exposição do terreno vizinho. À medida que se adentra o terreno o ângulo de obstrução diminui.

3.2. CÁLCULO DA OBSTRUÇÃO

Neste trabalho, o efeito da obstrução é sempre avaliado de forma analítica. Para isso, 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 mais a sudeste do terreno, de modo que só se tenham valores positivos, ou seja um dos vértices do terreno.

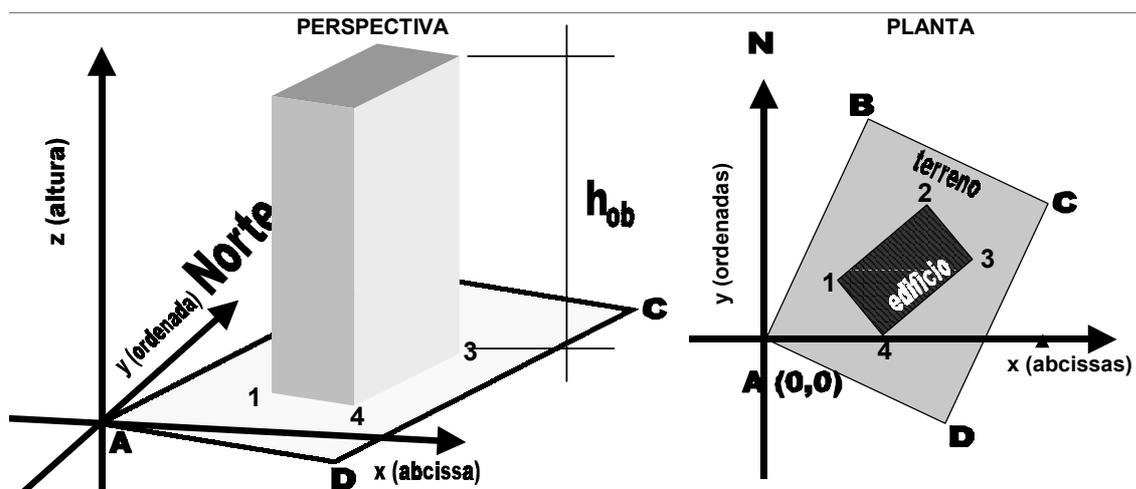


Figura 22 – Terreno no plano cartesiano, esquema de vértices

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 22).

Cada segmento **AB**, **BC**, **CD** e **DA**; **12**, **23**, **34** e **41** pertence a reta, definida por uma equação com o formato:

$$y = a_{\text{seg}} \cdot x + b_{\text{seg}} \quad (\text{m}) \quad \text{Equação 47}$$

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. Assim os coeficientes são calculados a partir das equações:

$$a_{12} = (x_2 - x_1)/(y_2 - y_1) \quad (-) \quad \text{Equação 48}$$

$$b_{12} = y_1 - a_{12} \cdot x_1 \quad (-) \quad \text{Equação 49}$$

É necessário apenas determinar as equações que contêm os segmentos que formam o prédio. Para os segmentos que formam o terreno, calcula-se somente ponto médio ($x_{M_{\text{seg}}}$, $y_{M_{\text{seg}}}$). Como exemplo de cálculo será utilizado o segmento **AB**. Os demais pontos são encontrados de forma análoga.

$$x_{MAB} = (x_A + x_B)/2 \quad (\text{m}) \quad \text{Equação 50}$$

$$y_{MAB} = (y_A + y_B)/2 \quad (\text{m}) \quad \text{Equação 51}$$

São então traçados raios partindo desse ponto, na direção do azimuth central de cada uma das 145 zonas do céu (Figura 23).

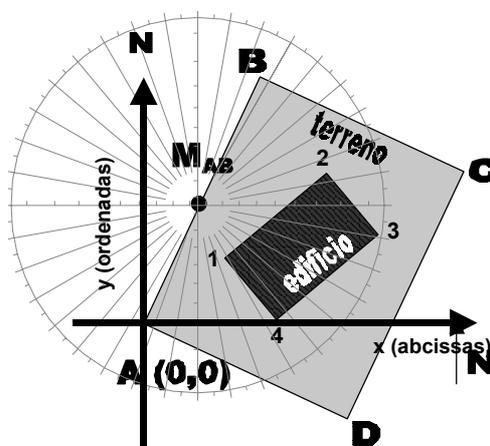


Figura 23 – Esquema dos raios partindo do ponto médio

Os coeficientes da equação dos raios são calculados por:

$$a_{z1-MAB} = \operatorname{tg} \gamma_{z1} \quad (-) \quad \text{Equação 52}$$

$$b_{z1-MAB} = y_{MAB} - a_{z1-MAB} \cdot x_{MAB} \quad (-) \quad \text{Equação 53}$$

Cada raio intersecta as retas do edifício, definida a partir dos coeficientes encontrados na Equação 48 e na Equação 49, a não ser que sejam paralelas. Determina-se então o ponto de intersecção.

$$x_{z1-MAB/12} = (b_{z1-MAB/12} - b_{12}) / (a_{12} - a_{z1-MAB/12}) \quad (m) \quad \text{Equação 54}$$

$$y_{z1-MAB/12} = a_{12} \cdot x_{z1-MAB/12} - b_{12} \quad (m) \quad \text{Equação 55}$$

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

$$\theta_{v \ z1-MAB/12} = \arctan \{h_{ob} / [(x_{z1-MAB/12} - x_{MAB})^2 + (y_{z1-MAB/12} - y_{MAB})^2]^{0,5}\} \quad (^\circ) \quad \text{Equação 56}$$

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

Uma zona do céu estará obstruída por uma edificação se atender a **TODAS** as condições abaixo:

- $x_1 \leq x_{z1-MAB/12} \leq x_2$;
- $y_1 \leq y_{z1-MAB/12} \leq y_2$ e
- $\theta_{v \ z1-MAB/12} \geq \gamma_{z1}$.

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** γ_{z1}) da zona for positivo, soma-se 0,005 a x_{MAB} e quando ele for negativo subtrai-se o mesmo valor. Se $x_{MAB} \leq x_{MAB} \pm 0,005 \leq x_{z1-MAB/12}$ então a zona está realmente obstruída pela edificação, caso contrário, a zona de azimute complementar é que estará.

Este procedimento é repetido para cada zona, cada face e cada ponto médio do terreno.

As obstruções afetam as trocas térmicas radiativas do ponto estudado, já que o ponto passará a trocar calor com elas e não com o céu. Caso este ponto seja representativo da situação de um edifício, ele pode permitir a avaliação das alterações causadas pela obstrução nas condições térmicas e luminosas dos seus ambientes, bem como do impacto no seu desempenho.

4

Caracterização dos Usos da Energia Solar

A energia solar incidente na edificação pode ser utilizada como fonte de energia para os mais diversos fins. A seguir serão detalhados alguns usos possíveis desta energia, bem como alguns de seus impactos indesejáveis. O foco é o ser humano, mas, como as relações do ser humano com o meio são intermediadas pela edificação e pelos sistemas de captação de energia solar, o aproveitamento da energia é determinado também pelo objeto construído que o envolve. Para tanto, optou-se por utilizar métodos tradicionais de avaliação desse conjunto de sistemas, buscando-se a partir daí definir níveis ótimos de radiação incidente.

A utilização da energia solar pode se dar de forma passiva ou pró-ativa. Para classificar os sistemas, observou-se a seguinte definição:

“Sistemas passivos envolvem o edifício, ou elementos dele, em fluxos naturais de energia térmica, tais como convecção, condução e radiação. Sistemas solares (pró-) ativos¹⁰, por outro lado, envolvem coleta, transporte ou armazenamento mecânicos de calor por elementos separados da estrutura do edifício” (Traduzido de Harris, Miller & Thomas, 1985, p. 383)

Embora essa definição trate apenas dos fenômenos térmicos, ela pode ser expandida para abarcar a iluminação e a conversão de energia. Sistemas passivos deste modo, são aqueles em que elementos da própria edificação captam a radiação solar para um uso imediato, enquanto os sistemas pró-ativos são aqueles em que elementos anexos à edificação captam a radiação solar e a convertem em outra forma de energia para posterior utilização ou armazenamento. Embora na ferramenta desenvolvida tenham-se observado somente usos passivos, considerou-se importante ressaltar a possibilidade dos usos pró-ativos e apresentar a formulação matemática para que essas informações sejam incorporadas em estudos futuros. Os itens 4.1 a 4.3 tratam de sistemas passivos e os itens 4.4 e 4.5, a sistemas pró-ativos, sendo que será dada mais ênfase no estudo do primeiro grupo de sistemas.

4.1. CONFORTO LUMINOSO

4.1.1. Níveis de iluminância necessários

O primeiro passo para se estabelecer o impacto da energia solar no conforto luminoso é o estabelecimento de níveis de iluminância mínimos. Os principais estudos encontrados foram gerados nos países europeus e nos Estados Unidos e alguns deles tratam somente das fontes artificiais de luz, com é o caso da Illuminating Engineering Society – IES (1998). Os estudos

¹⁰ O autor usa a definição de sistemas ativos para descrever o uso de energia solar para aquecimento de água e geração fotovoltaica. Neste trabalho eles são denominados sistemas PRÓ-Ativos, pois não implicam em consumo de energia. Sistemas ativos seriam o ar condicionado e a iluminação artificial.

desta instituição mostram como os níveis de iluminância necessários foram sendo reduzidos com o tempo (Tabela 7). Atualmente a instituição trabalha com os valores mostrados na Tabela 8, que determinam os níveis de iluminância de acordo com o tipo de tarefa visual a ser realizada no ambiente. Cada tipo tarefa pertence a uma categoria com níveis de iluminância definidos e serve como base para a classificação do ambiente. Esta norma serviu de base para a elaboração de diversas outras, inclusive a brasileira NBR 5413 (ABNT, 1991), que determina os níveis mínimos de iluminância artificial em interiores. A norma brasileira contém duas tabelas: uma com os níveis para cada tarefa visual e uma com os níveis para cada tipo de ambiente, o que pode gerar recomendações divergentes de acordo com a interpretação que o projetista faz da norma.

Tabela 7 – Níveis de iluminação segundo estudos que embasaram as normas atuais.

Nível de luz preferido no plano de trabalho (lux)	
Bodman, 1962-7	700 – 1300
Saunders, 1969	800 – 1000
Nemecek & Grandjean, 1976	400 – 850
Bean & Hopkins, 1980	>200

Fonte: IES (1998)

Tabela 8 – Níveis de iluminação artificial prescritos pelo IES e pela NBR 5413

Tipo de atividade	Nível de iluminância (lux)	Plano de trabalho de referência
Espaços públicos com entorno escuro	20-30-50	Níveis gerais de iluminação
Orientação simples para visitas curtas	50-75-100	
Local de trabalho com tarefas visuais ocasionais	100-150-200	
Tarefas visuais de grande tamanho e contraste	200-300-500	Iluminância na tarefa
Tarefas visuais de contraste médio ou tamanho pequeno	500-750-1000	
Tarefas visuais com baixo contraste ou tamanho muito pequeno	1000-1500-2000	
Tarefa visual de baixo contraste e tamanho pequeno por período prolongado	2000-3000-5000	Iluminância na tarefa, geral e suplementar
Tarefa visual prolongada que requer exatidão	5000-7500-10000	
Tarefas especiais de tamanho muito reduzido e com baixos contrastes	10000-15000-20000	

Fonte: NBR 5413 (ABNT, 1991)

Littlefair (2001), por sua vez, trata dos níveis recomendados para iluminação natural através do conceito de Daylight Factor, ou Fator de Luz Diurna (**FLD**). Devido à variabilidade na quantidade da luz natural no decorrer do dia, trabalha-se não com uma iluminância fixa, mas com uma porcentagem da iluminância que se poderia obter no ambiente externo e

desobstruído. É proposto um conjunto de requisitos para que a iluminação de um ambiente seja considerada de boa qualidade entre elas:

- FLD médio de 2% em cozinhas, 1,5% em salas de estar e 1% em quartos;
- Uniformidade baseada na geometria e refletância do ambiente¹¹;
- Nenhuma parte significativa do quarto além da Linha Sem-Céu (**LSC**), ou seja, não receber luz direta do céu¹².

Hopkinson, Petherbridge & Longmore (1975) recomendam os níveis mostrados na Tabela 9. É importante observar, no entanto, que os valores da tabela foram gerados com base no céu encoberto padrão CIE, com níveis de luminância muito menores do que os encontrados no céu brasileiro. Para tanto seriam necessárias algumas correções, reduzindo o **FLD** médio necessário por fatores da ordem de 1/2 a 1/5 vezes.

Tabela 9 – Níveis de iluminação natural

	FLD mínimo
Habitações	
Cozinha	2%
Sala de estar	1%
Quarto	0,5%
Edifícios escolares	2%
Hospitais	1%
Escritórios	1% / 2%
Salas de desenho	6% / 2%
Laboratórios	3 a 6%
Fábricas	5%
Edifícios públicos	1%

Fonte: Hopkinson, Petherbridge & Longmore (1975)

Os valores de **FLD** recomendados por Hopkinson, Petherbridge & Longmore apresentam os mesmos problemas daqueles recomendados por Littlefair. Os valores dados resultam em níveis de iluminância muito altos se levado em conta a disponibilidade de luz no céu brasileiros. Uma solução para esse impasse seria considerar, como faz a norma DIN 5034 de 1982 apresentada por Alucci (1992), que os níveis necessários para a iluminação natural correspondem a 60% dos níveis requeridos para iluminação artificial.

A escolha dos requisitos mínimos de iluminância torna-se ainda mais complexa quando se levam em conta que a legislação urbana não determina qual o tipo de atividade que será

¹¹ O autor não deixa claro os critérios para definir uma boa uniformidade. Relações de contraste entre plano de trabalho, entorno imediato e entorno distante normalmente aceitas estão na faixa de 10:3:1 (IES, 1998)

¹² Para maiores referências à linha sem céu, ver item 5.1, p. 96.

desenvolvida no ambiente. No entanto, pode-se afirmar que, considerando-se os níveis de iluminância da IES e a determinação da norma alemã, os níveis indicados para a realização de tarefas visuais mais freqüentes estariam entre 120 e 300 lux (60% do valor recomendado para tarefas visuais de grande tamanho e contraste - Tabela 8). Utilizando os gráficos propostos por Alucci (1992, p. 56) para uma janela quadrada, de 1,5 x 1,5 m, o Fator de Céu (componente do **FLD** que considera somente a luz recebida diretamente do céu, livre de obstruções) passaria de mais de 7% a 1,5 m da abertura para 1% a 4,5 m. Isso significa que se houvesse 300 lux no fundo de um quarto com essas dimensões, ter-se-iam mais de 2100 lux nas proximidades da janela. O contraste de 7:1 é indesejável mas pode ser reduzido aumentando a refletância das paredes internas, por exemplo. O nível de iluminância médio seria algo em torno de 1100 lux

4.1.2. Métodos para cálculo da luz natural

Segundo Robbins (1986), os métodos para cálculo e projeto da luz natural se dividem em três categorias principais, embora possa haver mais de uma metodologia de cálculo dentro de um mesmo método. São eles: o método dos lumens, o método da transferência de fluxo e o método das componentes. Milne & Zurick (1998) apresentam ainda qual método é utilizado em cada um dos programas computacionais mais comuns.

4.1.2.1. O método dos lumens

O método dos lumens foi desenvolvido nos EUA nos anos 50, voltado para cálculos de iluminação artificial, tornando-se o procedimento de cálculo recomendado pela IES. Foi desenvolvido para o cálculo da iluminação artificial e é baseado na premissa de que a iluminância de um ponto é função da quantidade de luz presente no plano de abertura. A janela é considerada uma luminária vertical não pontual.

São calculados apenas três pontos (terços médios) do ambiente com o plano de trabalho a uma altura de 0,75m, assumindo-se que são suficientes para se ter uma idéia da distribuição da luz no interior do ambiente.

Devido à necessidade de determinação do fluxo luminoso da janela em lumens, não é possível trabalhar com a relação entre a iluminância interna e externa. Este método fornece sempre a iluminância do ponto já em **lux** e o cálculo só é válido para aquela condição de céu e para aquele horário. Permite trabalhar com quatro tipos de céu:

- Céu encoberto CIE padrão;
- Céu uniforme que só pode ser utilizado se há dispositivo de proteção solar interno.
- Céu claro, sem sol na janela;
- Céu claro, com sol na janela, desde que haja proteção solar e

Cada tipo de céu representa um resultado interno diferente, sendo difícil a determinação da eficiência do sistema de iluminação natural. Nesse caso é fundamental a determinação de dias

típicos para os quais são feitos os cálculos. Esse procedimento é utilizado nos programas EnerWin e SOLAR-5.4

4.1.2.2. *Método das componentes*

Desenvolvido principalmente por Hopkinson, Petherbridge & Longmore (1975), este método foi criado para resolver o problema da variabilidade diária e sazonal da luz natural. Ao invés de determinar a iluminância em um ponto do ambiente, ele estabelece uma relação entre esta iluminância e a existente em um ponto localizado em um plano horizontal desobstruído no exterior. Este é o modelo recomendado pela CIE, utilizado nos programas DOE-2 e Energy-10. Divide o fluxo entre a três componentes, celeste, refletida externa e refletida interna, que são somadas para se obter. Esse método não está vinculado a iluminância, mas sim à distribuição relativa de luminâncias no céu, funcionando bem para céus encobertos, independe da orientação das aberturas. Para céu claro, o valor de **FLD** varia de acordo com a posição do sol e com a orientação. Ainda não há modelos universalmente aceitos de distribuição de luminâncias para céus parcialmente encobertos, devido à sua alta variabilidade.

Nos países onde há pouca disponibilidade de luz natural, normalmente o cálculo do **FLD** é feito para dias de céu encoberto, visando a determinar a iluminância mínima no ponto, mas para o caso brasileiro essa metodologia tende a subestimar excessivamente os resultados, prejudicando, por exemplo, a avaliação de custo-benefício de um sistema integrado natural e artificial. Há alguns métodos para o cálculo de **FLD**, sendo que a norma brasileira de iluminação natural, ainda não aprovada, recomenda o processo desenvolvido por Souza (1997), onde se utilizam ferramentas gráficas para permitir o cálculo para céu claro e encoberto.

Uma questão a ser considerada é se o **FLD** poderia ser tornado mais constante para os diversos tipos de céu se ao invés da iluminância exterior horizontal, ele fosse feito em função da iluminância em um plano vertical de mesma orientação que a abertura. Nesse caso, por exemplo, uma parede voltada pra oeste teria um **FLD** mais constante, já que no período da manhã, quando o sol não incidisse, a iluminância exterior em um plano vertical voltado para oeste já seria proporcionalmente menor. Procedimentos para obter este “**FLD** vertical” estão apontados no trabalho de Love & Navvab (1994).

4.1.2.3. *O método da transferência de fluxo*

Este método é mais usado em programas que, além do cálculo, proporcionam também visualizações do ambiente projetado, tais como Radiance, LightScape e Lúmen-Micro. É potencialmente o mais preciso, calculando para cada elemento finito do espaço o seu fator de visão de cada outro elemento e permitindo assim avaliar a radiação luminosa recebida de cada um deles. O processo é repetido por sucessivas inter-reflexões até a transferência de fluxo tornar-se estável. Este método apresenta duas vantagens sobre os demais:

- É o único que permite levar em conta a luz solar direta, seja ela incidente no ponto ou refletida pelas superfícies interiores, avaliando inclusive sistemas de iluminação natural indireta;

- É capaz de levar em conta a luz refletida por áreas adjacentes ao ambiente analisado e a reflexão de superfícies inclinadas ou com outras formas complexas.

Como no método dos lumens, normalmente é fornecido um valor absoluto de iluminância, o que causa os problemas e limitações citados acima. São utilizados os céus CIE padrão claro ou encoberto, já que modelos satisfatórios que descrevem a distribuição de luminâncias em céus parcialmente encobertos ainda não foram desenvolvidos. No entanto, ao contrário do método anterior, ele pode ser usado para fornecer percentagens da luz incidente externa como o **FLD**, mas o **FDL** (Flux Transfer Daylight Factor), como Robbins (1986) chama, mede sempre a relação entre a iluminância no plano da abertura e na superfície horizontal.

Como tratar espaços com aberturas em mais de uma orientação, onde os valores externos incidentes são diferentes, não fica claro no texto. Assim não se sabe se ao invés do plano desobstruído externo, deve-se tomar como referência para o cálculo de do FLD a iluminância de uma das fachadas, uma média simples das duas ou uma média ponderada pela área de janela.

A grande desvantagem deste método é a sua complexidade. Exige cálculos pesados, sendo virtualmente impossível de ser feito completamente a mão e que tornam demorados mesmo os cálculos computacionais. Utilizado em programas que fazem simultaneamente a visualização (renderização) e cálculo de iluminação, como o Radiance, LightScape, Superlight e Lúmen-Micro, requer horas para que a distribuição de cada hora seja calculada.

4.1.3. Modelagem matemática para cálculo da iluminância interna

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

$$FLD_{\text{médio}} = F \cdot TL \cdot J \cdot A_j / A_p \cdot 100\% \quad (\%) \quad \text{Equação 57}$$

Onde

FLD_{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 de um **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 à razão de aspecto¹³ do ambiente, à distribuição das aberturas e às refletâncias das superfícies internas. Desse modo, mesmo considerando-se que a homogeneidade dos níveis internos é fundamental, observa-se que ela depende de variáveis que fogem ao escopo desta pesquisa, visto que não se relacionam com a escala urbana. Desse modo, acredita-se que ao garantir um nível médio adequado, torna-se responsabilidade do projetista assegurar que a luz esteja bem distribuída 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**, desse modo, é função basicamente da orientação da janela, do nível de obstrução e da distribuição de luminâncias no céu. Frühling adotou originalmente um **F** de 0,5, assumindo uma distribuição uniforme no céu e desprezando a refletância do solo. Adotando-se a distribuição de luminâncias para céu encoberto padrão proposta pela CIE(1996), onde a luminância de um ponto no zênite é três vezes a de um ponto horizonte, chega-se a um valor de **F** da ordem de 0,39.

Nesse estudo, no entanto, propõe-se trabalhar diretamente com radiação incidente no plano vertical que contém a abertura, já ponderado o efeito da obstrução, que pode ser calculada hora a hora quando se conhece a distribuição real de luminâncias no céu. Assim, é possível retirar o fator **F** da equação e relacionar o **FLD**_{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 para simplificar a fórmula.

Esse valor, no entanto, foi revisto para confirmar sua confiabilidade e para considerar ambientes onde a reflexão interna fosse nula. Desse modo, considera-se que o ambiente recebe apenas a componente de céu, garantindo o nível médio para o pior caso. Observa-se, porém, que os ganhos na quantidade e na distribuição proporcionados por paredes internas claras são significativos, devendo ser usados como recurso de projeto sempre que necessário.

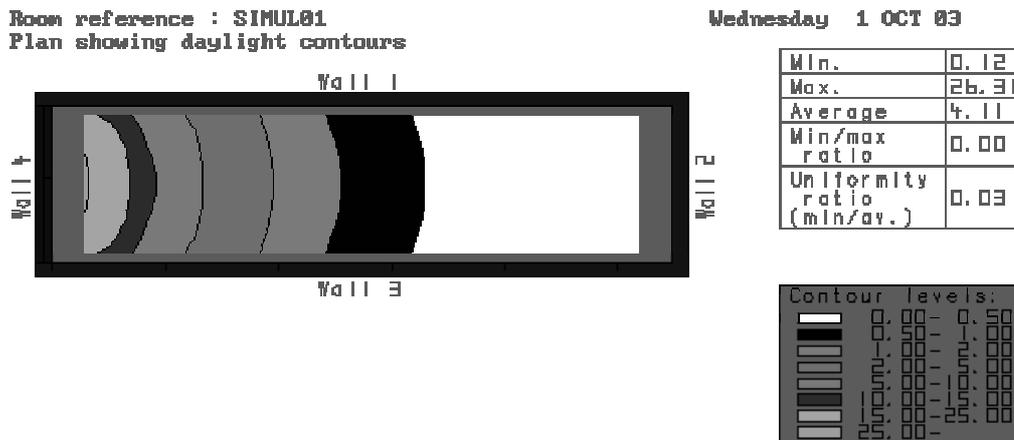
Para o estudo do valor de **J** foram feitas diversas simulações no *software Daylight* (Frame & Birch, 1991). O *software* fornece as curvas de distribuição do **FLD**, além do valor médio para o ambiente. Para se contemplar o maior número de variações possível, foram variadas a área do ambiente, a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

¹³ Razão de aspecto do ambiente é a relação comprimento–largura, sendo que neste trabalho o comprimento é a dimensão perpendicular à abertura e a largura a dimensão paralela à abertura. A janela também pode apresentar, para uma mesma área, diferentes razões de aspecto. Nesse caso a razão de aspecto é definida pela relação altura-largura da abertura.

Tabela 10 – Variáveis para simulações no Daylight

Variável	Valores
Área	10 – 20 – 30 m ²
Relação A_j / A_p	1:6 – 1:4 – 1:2 – 1:1
Razão de aspecto da janela	1:2 – 1:1 – 2:1
Razão de aspecto do ambiente	1:3 – 1:1 – 3:1

Embora isso resulte em um total de 108 simulações, várias combinações tornaram-se impossíveis, porque a altura da janela excedia o pé-direito ou porque a área de janela era maior que a área de fachada. Desse modo foram realizadas 51 simulações, cujo exemplo se pode ver na Figura 24.



Fonte: Frame & Birch, 1991

Figura 24 – Exemplo de simulação no Daylight para área de 20m², 1/6 de relação A_j/A_p , razão de aspecto da janela 2:1 e razão de aspecto do ambiente 3:1

Com os valores de **FLD** médios calculados, fez-se o processo inverso da equação de Frühling. Como o software utiliza o céu encoberto padrão CIE, o valor de **F** é de 0,39 e a relação A_j/A_p e dada para cada caso. 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.

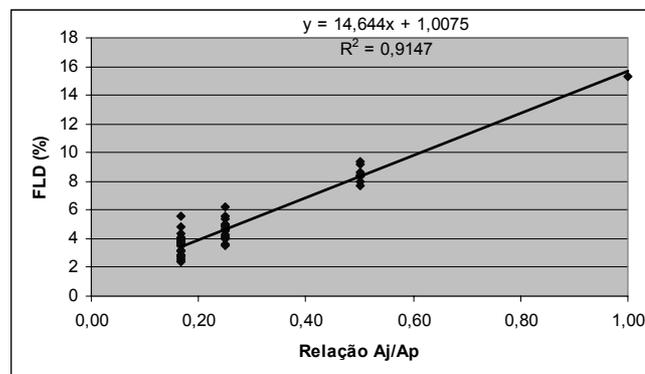


Figura 25 – Relação entre o FLD calculado e a relação A_j/A_p

O estudo também mostrou que o **FLD** é muito mais dependente da relação A_j/A_p , do que das demais variáveis estudadas, comprovando a validade do modelo utilizado (Figura 25).

Aqui já se pode fazer uma primeira estimativa dos níveis de iluminância vertical nas fachas para que não haja necessidade de complementação com iluminação artificial nos ambientes. Utilizando-se como nível mínimo os 500 lux da norma NBR5413, multiplicados por 0,6 (redução prevista pela norma alemã devido à qualidade da luz natural), considerando-se $F = 1$ e $J = 0,4$, e relação A_j/A_p como 1/6, conforme previsto na maioria dos códigos de obra brasileiros, tem-se que a iluminância vertical mínima na fachada deve ser de **5400 lux**.

4.2. CONFORTO TÉRMICO

4.2.1. Índices de conforto

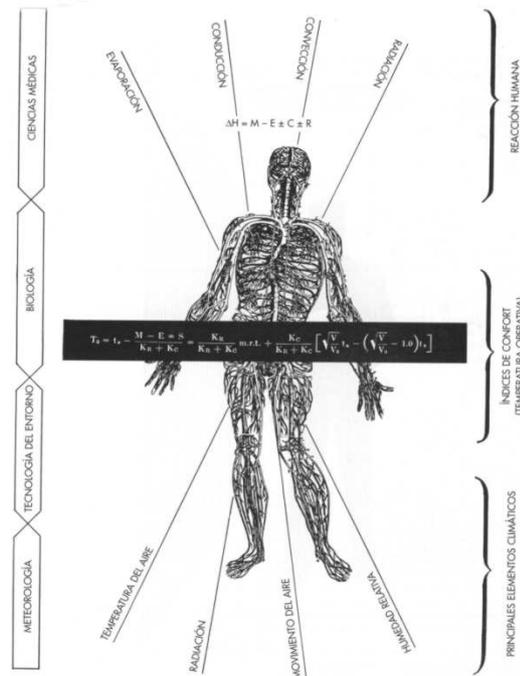
Fanger (1970) define o conforto térmico como sendo a condição mental que a pessoa expressa quando está satisfeita com o seu ambiente térmico. Devido às variações fisiológicas humanas, no entanto, os limites que definem esta condição são variáveis, sendo é possível, que mesmo em um ambiente climatizado artificialmente, conforto se possa garantir o conforto de todo um grupo de usuários simultaneamente.

Para definir quais são essas condições, Fanger (1970) apresenta o conceito de neutralidade térmica, condição na qual o indivíduo não prefere um entorno mais frio ou quente. A condição de neutralidade depende do balanço térmico do indivíduo, sendo influenciado principalmente pelas seguintes variáveis:

- nível de atividade (que influencia a produção de calor pelo corpo);
- resistência térmica das vestimentas;
- temperatura do ar; temperatura média radiante;
- velocidade relativa do ar (que é a velocidade do ar no recinto mais a velocidade gerada pelo movimento do indivíduo) e
- pressão de vapor d'água no ar ambiente.

Observa-se que este balanço não leva em conta as trocas por radiação de onda curta, não devendo ser utilizado sem adaptações caso o indivíduo esteja diretamente exposto à radiação solar. No entanto, em ambientes sombreados é possível

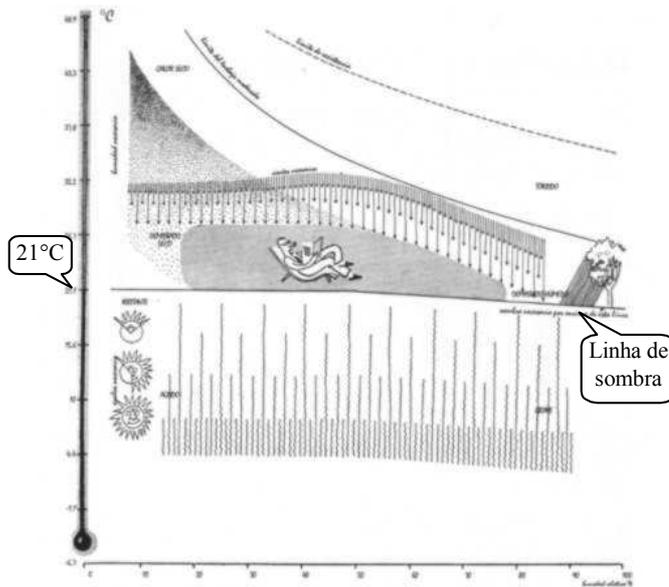
Note-se que a neutralidade pode ser atingida através de várias configurações destas variáveis. O esquema de combinação é mostrado na Figura 26.



Fonte: Olgay (1998)

Figura 26 – Esquema do balanço térmico humano

Baseado nesse esquema, foram feitos estudos que geraram recomendações para o projeto de ambientes que proporcionassem condições de conforto, baseado nos dados climáticos locais, denominados diagramas bioclimáticos. Estes diagramas normalmente trabalham com dados locais de temperatura e umidade, indicando estratégias que o arquiteto deve adotar no projeto da edificação, tais como sombreamento, insolação, permeabilidade aos ventos, massa térmica, entre outros.



Fonte: Olgay, 1998

Figura 27 – Diagrama Bioclimático de Olgay

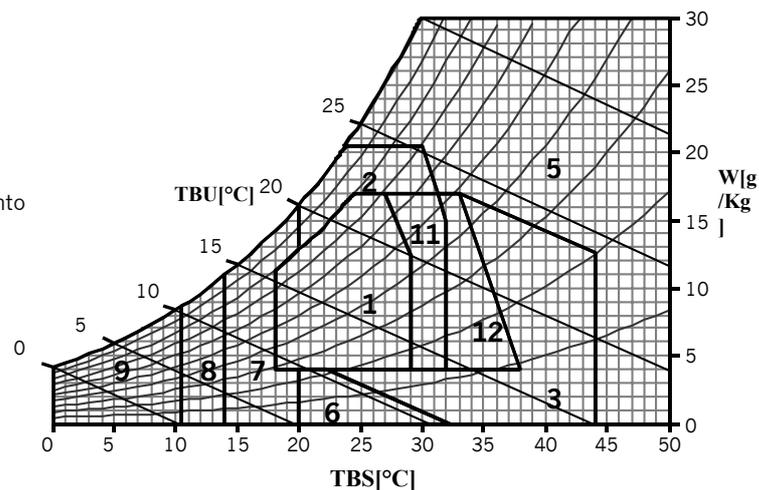
O primeiro desses diagramas foi proposto por Olgay em 1963. O diagrama, mostrado na Figura 27, indica a zona de conforto entre 21°C e 27°C quando se tem até 50% de umidade relativa do ar.

A partir daí a zona se estreita, refletindo o fato de que as altas umidades relativas prejudicam os mecanismos de resfriamento do corpo humano por evapotranspiração. De qualquer maneira, como as temperaturas usadas nos estudos bioclimáticos são sempre tomadas à sombra, acima de 21°C já seria indesejável a incidência de sol sobre o indivíduo, definindo aí a chamada linha de sombra.

Outro estudo foi desenvolvido por Givoni (1976), desenhando o diagrama bioclimático sobre a carta psicrométrica. A carta foi posteriormente adaptada para países em desenvolvimento, alargando a zona de conforto. Esta versão da carta, mostrada na Figura 28, é apresentada por Lamberts, Dutra & Pereira (1997). A zona de conforto inicia-se aos 18°C, mas pode-se assumir que a linha de sombra, até onde a incidência de sol seria aceitável, se prolongue um pouco mais até os 20°C, onde se encontraria o prolongamento das linhas que definem a zona de aquecimento passivo.

ZONAS:

1. Conforto
2. Ventilacao
3. Resfriamento
5. Ar Condicionado
6. Umidificação
7. Massa Térmica/Aquecimento
8. Aquecimento Solar
9. Aquecimento
11. Vent./Massa/Resf.
12. Massa/Resf. Evap.

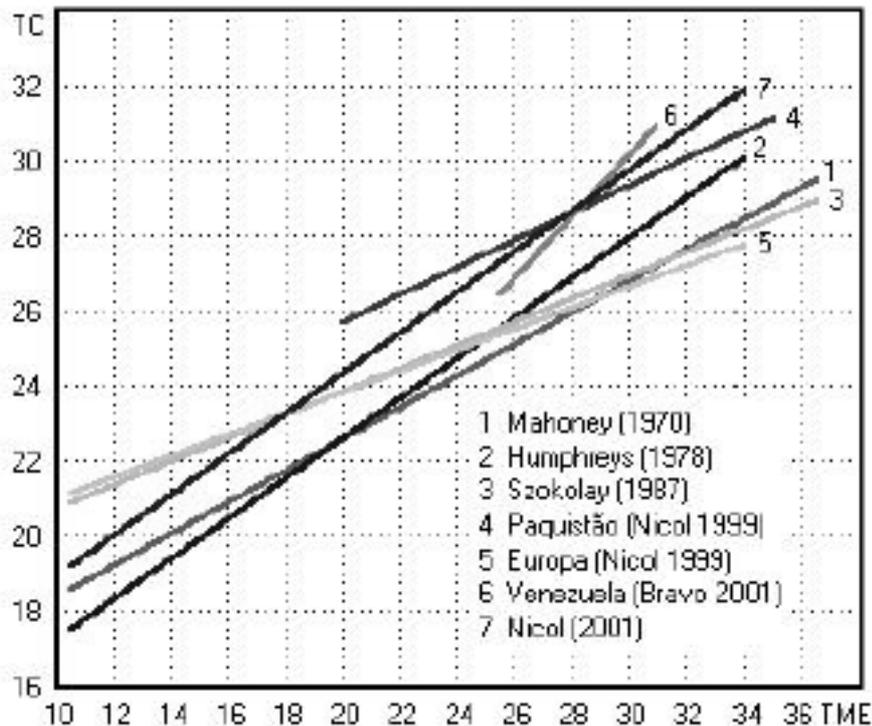


Fonte: Lamberts et al (1994)

Figura 28 – Diagrama Bioclimático de Givoni

Foram ainda feitos vários estudos utilizando-se de modelos adaptativos, onde a temperatura de neutralidade térmica apresenta uma variação de acordo com as condições médias externas. A vantagem desse tipo de modelo é que ele leva em conta a aclimação do indivíduo e a variação sazonal dos limites de conforto.

Roriz (2003) apresenta vários modelos para o cálculo da temperatura neutra. A comparação entre os índices indica a necessidade de que estudos sejam efetuados para diferentes regiões climáticas. Isso se deve ao fato de a temperatura neutra não contemplar as demais variáveis envolvidas no balanço térmico do indivíduo.



Fonte: Roriz (2003)

Figura 29 – Relação entre T_n e T_{mm} para vários modelos de cálculo

Szokolay (1987) ainda faz uma releitura da carta bioclimática de Givoni aplicando o modelo adaptativo. A temperatura neutra (T_n) é dada em função da temperatura média mensal (T_{mm}) pela Equação 58.

$$T_n = 17,6 + 0,31.T_{mm} \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Equação 58}$$

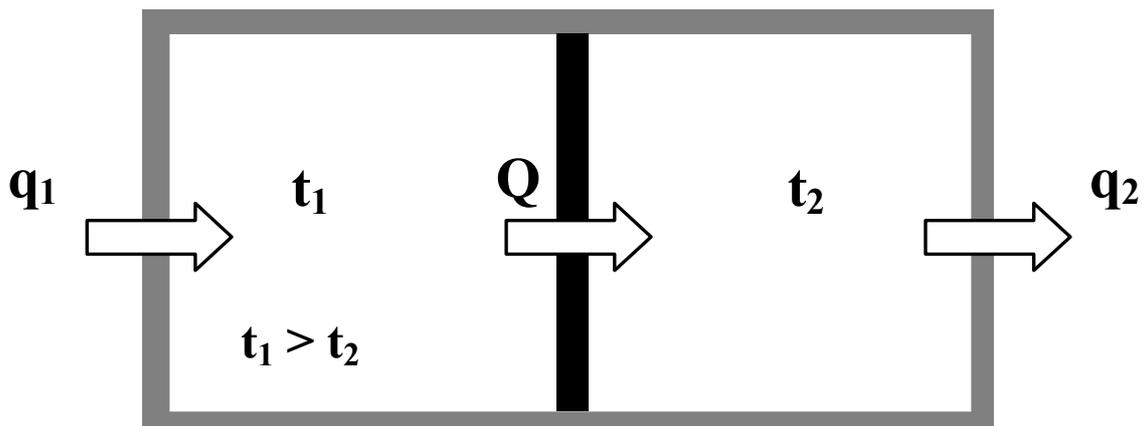
As zonas bioclimáticas de Givoni foram revistas e adaptadas de acordo com a variação da temperatura neutra. Os limites de conforto são a margem de erro do modelo de temperatura neutra, $\pm 2^\circ\text{C}$

4.2.2. Regime térmico

Há dois procedimentos correntes para o cálculo do desempenho térmico de um ambiente: regime permanente, cujo procedimento de cálculo foi desenvolvido por Croiset e apresentado em Frota (1995), e o regime periódico, cujo procedimento foi desenvolvido por Danter (1983) e é apresentado por Roriz (1996) e Szokolay (1987).

4.2.2.1. Regime permanente

Caso haja diferença de temperatura entre dois corpos, o corpo mais quente cede calor para o mais frio. Para que ao longo do tempo esta taxa de transferência permaneça constante, é necessário repor o calor perdido pelo corpo quente e retirar o calor ganho pelo corpo frio.



Baseado em: Roriz (1996)

Figura 30 – Fluxo de calor entre dois ambientes

Desse modo, para que o fluxo (Q) permanecesse constante, q_1 e q_2 deveriam ser iguais a Q . Nesse caso, tem-se o regime permanente ou estacionário.

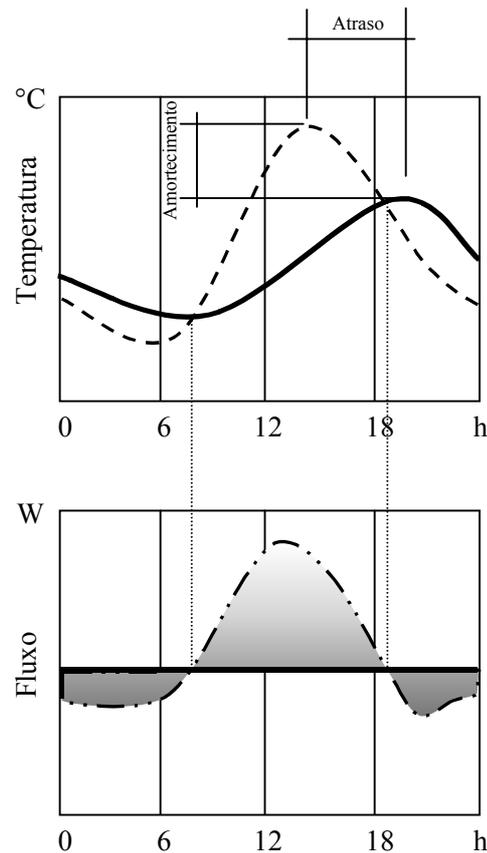
O procedimento de regime permanente é adotado pelo Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB). Calcula a temperatura do ar de um local não climatizado artificialmente considerando que o balanço térmico para cada horário seja igual a zero.

Para o cálculo divide-se o regime provocado pela onda da temperatura exterior, sem cargas solares e o regime provocado pela insolação. Considera-se que a onda da temperatura interior varia sobre a mesma média da temperatura exterior, mas é amortecida pela inércia da edificação. Considera-se também efeito do amortecimento e do atraso da edificação nos ganhos solares.

4.2.2.2. *Regime variável periódico*

Quando não há reposição do calor transmitido entre os corpos, ou essa reposição não é igual ao fluxo entre eles, há uma alteração nas temperaturas dos corpos ao longo do tempo e, conseqüentemente, uma alteração da taxa de fluxo entre eles. Nesse caso o regime é denominado variável.

Quando as variações de temperatura se repetem em intervalos sucessivos, configura-se o regime periódico. Isso se aplica às variações do ar externo, que seguem aproximadamente uma curva senoidal no período de 24 horas, com temperatura mínima antes do nascer do sol (por volta das 6 horas) e máxima no começo da tarde (entre 14 e 15 horas). Sob efeito dessa variação e daquela provocada pela radiação solar também as temperaturas superficiais externas dos edifícios, o fluxo pela parede e, em última instância, as temperaturas internas sofrerão variações periódicas.



Baseado em: Roriz (1996)

Figura 31 – Efeito da inércia no fluxo

O procedimento da Admitância, utilizado pelo Building Research Establishment e, por sua maior complexidade, apresenta precisão maior que os métodos que consideram o regime permanente. Parte do pressuposto que em um período de 24 horas, na ausência de ganhos solares e de cargas internas, as médias da temperatura interna e da temperatura externa são iguais.

O procedimento calcula a Temperatura Ambiental, que segundo Roriz (1996), é a temperatura de um ponto fictício que troca calor por convecção e por radiação com todas as superfícies à sua volta. Considerando-se constantes as propriedades térmicas dos materiais da edificação, o efeito conjugado dos ganhos de energia pode ser equacionado a partir de três fatores: admitância, fator de decrescimento e fator de superfície, que dependem tanto das condições climáticas de temperatura e radiação quanto das propriedades dos materiais da construção.

A formulação matemática é bastante complexa e seu detalhamento foge ao escopo deste trabalho.

4.2.3. Modelagem matemática para cálculos térmicos

Devido à necessidade de um modelo simplificado, que não carregasse demasiadamente o modelo computacional e permitisse a utilização de *softwares* de planilha de cálculo, o regime adotado para cálculo foi o permanente. Considerou-se também que o nível de precisão dos

modelos que partem desta premissa são mais do que adequados pra os objetivos deste trabalho.

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:

$$\Delta T_{inst} = Q/q \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Equação 59}$$

Onde **Q** representa normalmente os ganhos térmicos devido à radiação solar e às cargas internas e **q** representa as perdas por ventilação e por condução. Observa-se que **Q** pode ser tornar-se negativo com a troca de radiação de onda longa com o fundo de céu. Nesse caso o sinal de ΔT_i se inverteria e as perdas se tornariam ganhos e vice-versa, indicando uma inversão do fluxo térmico.

O valor de **Q** é dado por:

$$Q = Q_S + Q_{OL} + Q_I \quad (\text{W}) \quad \text{Equação 60}$$

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 ganho 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 separadamente e somá-los ao final.

$$Q_{SO} = \sum G_{gsup} \cdot U_{sup} \cdot \alpha_{sup} \cdot R_{se} \cdot A_{sup} \quad (\text{W}) \quad \text{Equação 61}$$

Onde:

G_{gsup} é a irradiância na superfície, calculado a partir do modelo de céu da Equação 32 e da Equação 44, em **W/m²**;

U_{sup} é a condutividade térmica do componente, dado em **W/ (m².°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 (m²).

Para fechamentos transparentes aplica-se o mesmo procedimento, mas substitui-se o fator **U**. $\alpha \cdot \mathbf{Rse}$ pelo fator solar (**S_{tr}**)¹⁴ do vidro utilizado. Assim:

$$Q_{ST} = \sum G_{gsup} \cdot S_{tr} \cdot A_{sup} \quad (\text{W}) \quad \text{Equação 62}$$

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 (**Φ_{céu}**) e o coeficiente de absorção da superfície para radiação de onda curta (**α_{sup}**) pela emissividade da superfície (**ε_{sup}**).

$$Q_{OL} = \sum \Phi_{céu} \cdot U_{sup} \cdot \epsilon_{sup} \cdot Rse \cdot A_{sup} \quad (\text{W}) \quad \text{Equação 63}$$

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

$$\Phi_{céu} = \sigma (\epsilon_s \cdot (T_{ir} + 273)^4 - \epsilon_{céu} \cdot (T_e + 273)^4) \cdot FVC_{sup} \quad (\text{W}) \quad \text{Equação 64}$$

Onde:

σ é a constante de Stefan-Boltzmann: **5,9997.10⁻⁸ W/(m².K⁴)**;

T_{ir} é a temperatura interna real do ambiente(°C);

ε_{céu} é calculada pela Equação 41 (-);

T_e é a temperatura instantânea do ar externo (°C) e

FVC_{sup} é o fator de visão de céu, calculado pela equação Equação 46 (-).

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 Equação 59 é dado pela equação:

$$q = q_c + q_v \quad (\text{W/°C}) \quad \text{Equação 65}$$

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

$$q_c = \sum U_{sup} \cdot A_{sup} \quad (\text{W/°C}) \quad \text{Equação 66}$$

¹⁴ Para referência no cálculo do fator solar de vidros ver Caram (1998)

$$q_v = 0,35.N.V \quad (W/^\circ C) \quad \text{Equação 67}$$

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 ($T_{i\ inst}$), seria dada pela equação:

$$T_{i\ inst} = T_e + \Delta T_{inst} \quad (^\circ C) \quad \text{Equação 68}$$

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.

$$T_{im} = T_{em} + Q_m/q_m \quad (^\circ C) \quad \text{Equação 69}$$

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 as duas, ponderada por um Fator de Inércia¹⁵ (**m**), que é indicativo da inércia da edificação, sendo **m = 0** para inércia nula e **m = 1** para inércia infinita. Assim:

$$T_i = m. T_{im} + (1 - m).T_{i\ inst} \quad (^\circ C) \quad \text{Equação 70}$$

4.3. EFEITO BACTERICIDA E PSICOLÓGICO

A radiação solar também pode ser utilizada como fator bactericida. Ambientes sem incidência de sol, especialmente residências e áreas molhadas, podem acumular fungos e outros microorganismos nocivos à saúde (Obolenksy & Korzin, 1982).

¹⁵ Este fator de inércia é análogo ao amortecimento proposto por Croisset (ver Frota, 1995). O seu cálculo depende da área de superfície pesada e da resistência térmica do material. Neste trabalho, o fator de inércia **m** não será calculado, mas sim assumido como sendo padrão para as edificações de acordo com a relação área opaca e área transparente de fachada (para mais detalhes, ver item 7.3.)

O IES (1998) apresenta estudos a respeito dos efeitos da radiação sobre micro-organismos, normalmente realizados com a bactéria *Escherichia coli*. Constatou-se que o comprimento de onda mais eficiente na eliminação destes microorganismos está na faixa do ultra-violeta, entre 220 e 300 nm, pois é a faixa de maior absorção por parte do DNA do organismo. O pico é dado aos 265 nm e radiações com comprimento de onda acima de 318 nm praticamente não apresentam resultados. Utilizando-se lâmpadas UV desinfetantes em locais com ventilação higiênica adequada, estima-se que ao se expor uma superfície a radiações médias em torno de 20 – 25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (0,25 W/m^2) na faixa de 253,7 nm obtém-se uma desinfecção compatível com ambientes hospitalares. O IES apresenta também uma tabela, mostrando a irradiância necessária para se evitar a formação de colônias de micro organismos. O mais resistente, o esporo de *Aspergillus niger*, resiste a uma exposição de até 1320 J/m^2 ou 0,36 W/m^2 durante um período de uma hora.

No caso da energia solar, Obolensky & Korzin (1982) afirmam que a legislação soviética foi baseada em estudos da década de 50, que concluíram que uma erradicação de praticamente 100% das bactérias pode ser obtida com a exposição contínua da superfície a três horas de sol. Os próprios autores afirmam que a grande falha neste estudo é desconsiderar que esse período de insolação pode significar doses diferentes de insolação de acordo com a latitude, condições climáticas e mesmo com as características do vidro utilizado no edifício.

“Medições e cálculos confirmaram o fato de que o indicador de duração da radiação (solar) incidente não caracteriza de forma adequada o complexo e mutável campo radiativo, que afeta objetos biológicos e determina a natureza e a magnitude dos efeitos” (traduzido de Obolensky & Korzin, 1982, p. 502).

Não foi encontrada, desse modo, indicação para cálculo da necessidade de radiação solar incidente para desinfecção de ambientes. Na radiação emitida pelo sol, tem-se incidindo normalmente no topo da atmosfera 49 W/m^2 na faixa entre 220 e 300 nm, ou seja, 3,59% do total¹⁶. Admitindo-se que essa proporção seja reduzida à metade pela passagem pela atmosfera¹⁷, superfícies que recebessem acima de 20 W/m^2 por uma hora estariam devidamente descontaminadas. O valor baixo indica que a principal preocupação na verdade deve ser garantir que todas as superfícies recebam radiação solar, pois a radiação direta do sol apresenta normalmente valores superiores a esse. Não foi possível determinar qual seria o efeito da radiação difusa ou refletida também, embora possa-se inferir que elas também contribuem, de forma menos eficiente, para a desinfecção dos ambientes.

Além dos efeitos já citados, no entanto, a radiação solar tem também um efeito psicológico. Obolensky & Korzin (1982) realizaram estudos em Moscou que indicavam que a porcentagem de pessoas que consideravam adequada a insolação do seu apartamento reduzia-se consideravelmente para apartamentos voltados para norte (menos de duas horas de insolação no verão) e noroeste (menos de duas horas e meia na primavera). Littlefair (2001) apresenta

¹⁶ Calculado de acordo com Duffie & Beckman (1980), p.6.

¹⁷ Na verdade a distribuição espectral da radiação incidente na Terra dificilmente é medida. A proporção entre o ultra-violeta depende da composição da atmosfera e da espessura da camada de ar atravessada pelo raio. A redução de 50% nessa proporção é apenas um exercício teórico, devendo ser complementada por estudos posteriores.

estudos, feitos para países europeus, que se dividem em duas abordagens. Um grupo determina um número de horas de sol em um dia específico, normalmente durante o inverno e o outro determina um número mínimo de horas de sol no ano, indicando apenas a necessidade de uma boa distribuição dessa insolação nos meses de inverno¹⁸. Dentre os estudos destacam-se:

- Bitter & van Ierland, 1965 – 2 horas de sol em todos os ambientes de permanência prolongada no dia 19 de fevereiro;
- Gilgen & Barrier, 1976 – em 8 de fevereiro, a sala de estar deve receber insolação mínima de 60 a 90 minutos, devendo chegar a um ótimo de 2 horas, Quarto com insolação mínima de 30 minutos, devendo também chegar a um ótimo 2 horas;
- Neeman e outros, 1976 – entre 400 e 500 horas de sol incidente no ambiente, distribuídas em pelo menos 6 meses. Não define quais são estes meses, podendo acontecer de uma residência receber sol somente no verão;
- Klingenberg & Seidl, 1982 – 4 horas de insolação próximo ao equinócio de primavera, tomando como referência o dia 20 de março.

Outro dado importante obtido nestes estudos é o ponto que deve ser tomado para a avaliação do efeito psicológico da insolação. Observou-se que se deve contar o número de horas de sol na parede da janela e não no centro do ambiente, visto que o primeiro dado tem melhor correlação com a resposta do usuário.

É importante ressaltar que os estudos psicológicos foram gerados para países frios e podem não corresponder à realidade climática brasileira. Apesar disso, trabalhos como o de Assis, Valadares & Souza (1995) tenham utilizado critérios semelhantes (uma hora de sol no quadrante norte), a partir das recomendações feitas por Moretti (1997) e Alucci, Carneiro & Baring (1996).

4.4. AQUECIMENTO DE ÁGUA

4.4.1. Coletores solares planos

Coletores solares planos absorvem a energia solar e transmitem para a água que circula pelos tubos do seu interior. São confeccionados em sua caixa externa em alumínio, assim como suas aletas de absorção, que são posteriormente pintadas de tinta preta fosca. O conjunto é coberto com um vidro que deverá, preferencialmente, ser liso. Os coletores possuem norma para teste de eficiência, a NB-10184 (Norma Brasileira), devendo o fabricante apresentar a etiqueta do INMETRO do seu equipamento ao oferecê-lo.

¹⁸ Deve-se observar que os estudos foram feitos para o hemisfério norte, onde as estações são invertidas. Deste modo é importante revisar as datas propostas, caso se queira aplicar algum desses estudos ao caso brasileiro.

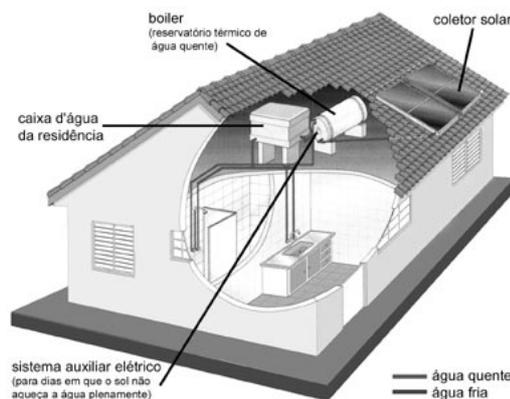


Fonte: Soletrol, 2001

Figura 32 – Exemplo de coletor solar plano

Os coletores normalmente são instalados na cobertura das edificações, orientados para norte e com uma inclinação média da ordem da latitude ou da latitude + 10°. A segunda opção, apesar de reduzir o ganho de verão e de ter um balanço anual de radiação incidente inferior, aumenta a irradiância no período de inverno, sendo a mais recomendada.

O coletor é ligado a um reservatório de água quente isolado do qual sai a tubulação de distribuição para a casa. A circulação de água entre o coletor e o reservatório pode ser feita através de bombas ou utilizando-se do efeito de termosifão, onde as próprias variações de temperatura e densidade da água promovem a circulação no sistema. Um aquecedor elétrico ou a gás é colocado como sistema auxiliar, caso a radiação solar não seja suficiente para aquecer a água à temperatura desejada.



Fonte: Soletrol, 2001

Figura 33 – Exemplo de sistema de coletor solar plano

Steadman (1982) recomenda que o coletor aqueça a água a uma temperatura média de 55° C, afirmando ser suficiente, para uma família que consome 300 litros nos Estados Unidos, um coletor de 6 m²de área.

4.4.2. Vantagens dos coletores

Pereira et al (1995) afirmam que a tecnologia dos coletores solares planos para aquecimento de água a temperaturas moderadas (em torno de 50°C) está completamente dominada no Brasil. Os autores apresentam uma série de sistemas de baixo custo que podem ser usado em residências ou edifícios escolares. Uma das grandes vantagens dos coletores é que se pode

reduzir a complexidade do sistema, e conseqüentemente do custo, atingindo ainda assim um desempenho razoável. Faz-se um estudo custo-benefício para se verificar se é interessante reduzir a eficiência do coletor de modo a tornar a compra e instalação acessível.

Assis (2000) apresenta estudos que indicam que a redução no uso do chuveiro elétrico impacta diretamente o consumo no horário de ponta, entre 18 e 19 horas. O chuveiro elétrico é altamente difundido no Brasil¹⁹ e, é em geral, o equipamento instalado com a maior potência, variando entre 3500 W e 7000 W. Pereira et al (1995) aponta que a redução na demanda por energia elétrica nas edificações residenciais possibilitaria às concessionárias uma postergação de investimentos na geração e transmissão de eletricidade, minimizando também o impacto ambiental causado pelas usinas geradoras, sejam elas hidrelétricas ou termoelétricas.

Quando a matriz é termoelétrica, o coletor solar vem sendo apontado como importante elemento para redução de impactos ambientais, reduzindo o nível de poluição por ozônio nas camadas inferiores da atmosfera (Garcia-Chavez & Strevel, 2001).

Em climas temperados, o sistema de aquecimento de água é normalmente associado a sistemas pró-ativos para o aquecimento de ambientes. Nesses casos, o sistema funciona com eficiência reduzida no período de verão, quando aquece apenas a água, o que gera emissões desnecessárias de gases e aumenta o custo de operação do sistema. (Rylatt, Gadsden & Lomas, 2001) Nesse caso o coletor solar cobre entre 80 e 90% das necessidades de energia para aquecimento de água no verão, permitindo o desligamento do sistema por mais tempo e ainda contribui no inverno com uma parcela significativa desse aquecimento, reduzindo os gastos do sistema auxiliar.

4.4.3. Modelagem matemática dos coletores solares planos

A eficiência de um coletor depende principalmente da capacidade da transparência do vidro absorção da placa, além do seu coeficiente de perda. Duffie & Beckman (1980) apresentam a equação que determina que a radiação utilizada pelo coletor:

$$Q_u = A_c \cdot Fr \cdot [G_{gc} (\tau \cdot \alpha) - [U_c \cdot (T_f - T_e)]] \quad (W) \quad \text{Equação 71}$$

Onde:

Q_u é o ganho útil de calor do coletor em **W**

$\tau \cdot \alpha$ é a porcentagem da radiação absorvida, considerando a transmitância do vidro e a absorção do coletor

A_c é a sua área em **m²**

Fr é o fator de remoção de calor do coletor

¹⁹ Assis (2000) cita como dado que o chuveiro elétrico está presente em 68% das residências brasileiras.

G_{gc} a irradiância sobre o plano inclinado do coletor em W/m^2

U_c o coeficiente de perda do coletor em $W/m^2 \cdot ^\circ C$

T_f é a temperatura do fluido no interior do coletor em $^\circ C$ e

T_e é a temperatura externa em $^\circ C$

Como o desempenho do coletor varia de acordo com a radiação incidente e a temperatura do ar, sua eficiência é determinada apenas para condições específicas. O INMETRO (2003) apresenta uma classificação da eficiência energética média dos coletores, que no Brasil está na faixa de 50% para os modelos intermediários. Não está claro, no entanto, se trata-se do parâmetro $Fr.U$ ou $Fr.(\tau.\alpha)$, ambos citados por Duffie & Beckman como os principais indicadores comparativos para os coletores. Deve-se estudar a eficiência real e o desempenho para o clima da cidade, verificando a demanda de aquecimento suplementar.

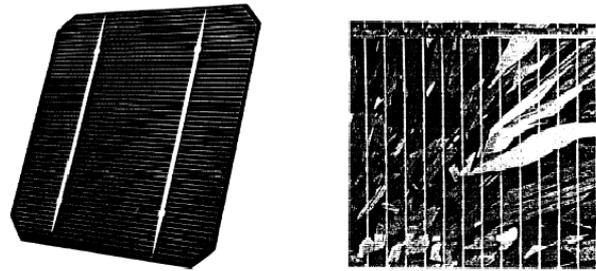
Embora o trabalho de envelope solar de Knowles e Berry (1980) não justifique a escolha do horário de insolação, assumindo o valor de 9h às 15h, imagina-se que, sendo este o período de maior disponibilidade de radiação solar e tendo a cidade de Los Angeles um clima ameno, o critério utilizado tenha sido o de conversão de energia. Assis (2000) o período de funcionamento do sistema auxiliar de aquecimento de água como sendo o período indicado para a proteção do acesso ao sol, comprovando o período proposto por Knowles e Berry a partir de dados coletados na cidade de Belo Horizonte. O procedimento pode ser discutido, pois desconsidera a influência da inércia térmica da água e do padrão de consumo no horário de uso do sistema auxiliar, mas para uma primeira abordagem parece adequado.

4.5. SISTEMAS FOTOVOLTÁICOS

4.5.1. O painel fotovoltaico

A célula fotovoltaica tem a capacidade de converter a radiação solar em energia elétrica de corrente contínua (DC) (Gasquet, 2004) Ela é composta de um material semicondutor, normalmente o Silício, tratado por um processo chamado difusão, no qual são introduzidas pequenas quantidades de outros elementos (normalmente Boro e Fósforo). Após este tratamento, o silício é denominado dopado, contendo áreas com excesso de cargas negativas (semicondutor tipo N) e positivas (semicondutor tipo P) dentro da sua estrutura. O espaço que separa ambas é denominado junção P-N, sendo que as áreas N, quando expostas à energia solar, têm seus elétrons excitados cedendo elétrons para as zonas P através de uma ligação com material condutor, gerando então uma corrente.

O autor afirma que o silício utilizado para fabricação de fotocélulas passa antes por um processo de purificação e pode apresentar-se com uma estrutura cristalina uniforme ou com uma estrutura policristalina.

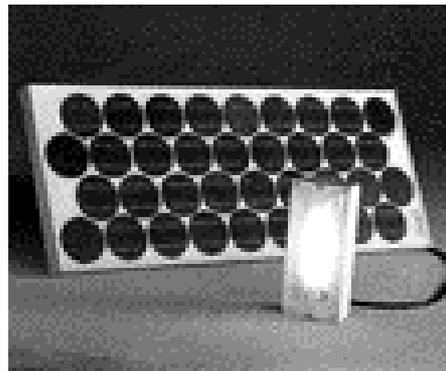


Fonte: Gasquet, 2004

Figura 34 – Células fotovoltaicas cristalinas e policristalinas

É possível também que não sejam usadas células e sim uma estrutura semicondutora depositada sobre uma base laminar, metal ou vidro. Como não há estrutura cristalina, esse material é denominado silício amorfo. A maior eficiência é obtida com o silício cristalino, devido à sua pureza e qualidade estrutural, decrescendo na célula policristalina e atingindo valores ainda menores no silício amorfo. Apesar disso, o último pode ser incorporado aos materiais construtivos e tem diversas aplicações na construção civil, permitindo que praticamente todo o edifício atue como conversor de energia. As células atualmente produzidas em escala industrial com material cristalino e policristalino apresentam eficiência de conversão entre 9% e 12%. O valor teórico máximo, para células e condições de exposição bem específicos, varia de 25% a 28%, dependendo do material semicondutor utilizado (Gasquet, 2004). Observa-se que é uma eficiência reduzida, pois há necessidade de conversão na forma de energia térmica em energia elétrica. Os processos solares térmicos para aquecimento de água, por exemplo, apresentam eficiência média de 55%.

Os painéis fotovoltaicos se apresentam como uma composição de células, ligadas em série, sobre uma base estrutural.



Fonte: Heliodinamica, 2004

Figura 35 – Exemplo de painel fotovoltaico fabricado no Brasil.

Como os sistemas fotovoltaicos geram energia apenas durante o dia, é necessário um sistema de armazenamento, que possa acumular o excesso diurno para uso noturno. Em sistemas remotos e isolados isso são utilizadas para este fim baterias, cujo custo deve ser computado quando se for avaliar os benefícios do sistema fotovoltaico. Em áreas ocupadas, é possível utilizar a rede elétrica como uma bateria infinita, que recebe todo o excesso gerado e supre todas as necessidades noturnas, sem risco de sobrecarga.

4.5.2. Utilização de fotovoltaicos ligados à rede

Atualmente os sistemas solares fotovoltaicos apresentam viabilidade econômica em alguns casos no Brasil, principalmente para sistemas remotos isolados, conjugados com baterias. O uso de sistemas conectados à rede em áreas urbanas, no entanto, ainda depende de incentivos e subsídios. Rana (2003) afirma que, na Índia, o custo da energia solar deve cair a médio e longo prazo, de 40 a 60 centavos de dólar por kWh para 4 a 6 centavos por kWh, possibilitando uma maior difusão das tecnologias renováveis. Com isso pode-se alcançar reduções de até 25% em emissões de CO₂. Mesmo no caso brasileiro, onde a matriz é hidrelétrica, a adoção desses sistemas representaria redução significativa no impacto ambiental causado por novas usinas geradoras de energia. As vendas anuais de fotovoltaicos nos Estados Unidos aumentaram de poucos quilowatts nos primeiros anos de difusão da tecnologia para 150 MW em 1998 (Thornton, 2000). Thornton afirma que os painéis fotovoltaicos são já uma excelente opção para aplicações urbanas conectadas à rede quando o custo da energia não é a principal variável a ser considerada. Os sistemas amorfos podem ser incorporados às edificações (*Building Integrated Photovoltaics- BIPV*) levando à economia nos sistemas de suporte de painéis que permitem a utilização de fotovoltaicos a preços competitivos. Como ícone deste tipo de aplicação tem-se o 4 Times Square, onde um filme de silício amorfo foi aplicado sobre parte da fachada envidraçada.



Fonte: Thornton, 2000

Figura 36 – Edifício 4 Times Square em Nova York com fachada fotovoltaica

Exemplos da avaliação de sistemas fotovoltaicos integrados às edificações são mostrados em United States (2004), Krauter et al. (2001), Ruther & Montenegro (2001) e Yang & Burnett (1999).

Duas ressalvas devem ser feitas em relação aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. A primeira delas é que, por ser um sistema de baixa eficiência e alto custo, deve-se sempre considerar a real necessidade e benefício da instalação do sistema. Painéis instalados em superfícies verticais, especialmente em fachadas que recebem pouca insolação, como a sul, são sub-aproveitados e devem ser evitados. A segunda é que, embora a cidade possa funcionar como usina de geração de energia (Salomoni, Knob & Ruther, 2003), o tecido urbano não precisa ser completamente ocupado por sistemas fotovoltaicos. Pode-se desse modo, permitir áreas de maior densidade onde os sistemas inexistem ou são colocados apenas na cobertura dos edifícios mais altos, priorizando áreas naturalmente menos densas para a geração concentrada de energia.

4.5.3. Modelagem matemática dos painéis fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos geralmente são testados para as condições padrão de temperatura e irradiância fornecendo valores de corrente (I_{pd}) em amperes (**A**) e de voltagem (V_{pd}) em volts (**v**). A irradiância solar padrão (G_{pd}) é de 1000 W/m^2 e a temperatura da operação da célula (T_{cpd}) é de 25°C . Para que se possa extrapolar os dados da condição padrão para as condições efetivas, Zilles & Lorenzo (1990) apresentam as equações simplificadas:

$$I = I_{pd} - I_{sc} \cdot (1000/G_{gsup} - 1) \quad (\text{A}) \quad \text{Equação 72}$$

$$V = V_{pd} - cvt \cdot (T_{cpd} - T_c) \quad (\text{v}) \quad \text{Equação 73}$$

Onde:

I e **V** são respectivamente a corrente em **A** e a voltagem em **v** na célula nas condições determinadas;

I_{sc} é a corrente de curto circuito da célula em **A**;

G_{gsup} é a irradiância na superfície da célula em **W/m**²;

cvt é o coeficiente de voltagem com a temperatura em **v/°C**;

T_c é a temperatura de operação da célula em **°C**.

O coeficiente de variação de voltagem no módulo é calculado em função do número de células (n_c) e do coeficiente de variação de voltagem de cada uma delas (**cvt_c**) que apresenta um valor típico de $2,3 \text{ mv/}^\circ\text{C}$, pela fórmula:

$$cvt = n_c \cdot cvt_c \quad (-) \quad \text{Equação 74}$$

A temperatura de operação da célula é dada pela equação:

$$T_c = T_e + (TNOC - 20) \cdot G_{gsup} / 800 \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Equação 75}$$

Onde:

T_e é a temperatura do ar externo em $^\circ\text{C}$ e

TNOC é a temperatura nominal de operação da célula em $^\circ\text{C}$, definida como a temperatura da célula em um módulo exposto a uma radiação de 800 W/m^2 , temperatura ambiente de 20°C e velocidade do vento de 1 m/s^{20} .

Para o módulo HM-70-D12 da Heliodinamica (2004), com os dados mostrados na

Tabela 11 – Características do módulo HM-70D12

Características	Medidas e especificações	HM-70D12
Constituição	células solares de silício monocristalino de 125mm, redondas	36 células inteiras
Potência máxima*	W	70,0
Corrente em Potência máxima	A	4,38
Tensão em Potência máxima	V	16,8
Corrente de curto-circuito	A	4,86
Tensão de circuito aberto	V	21,0
Dimensões (C x L x A)	mm	1242 x 487 x 45
Peso	kgm	8,6

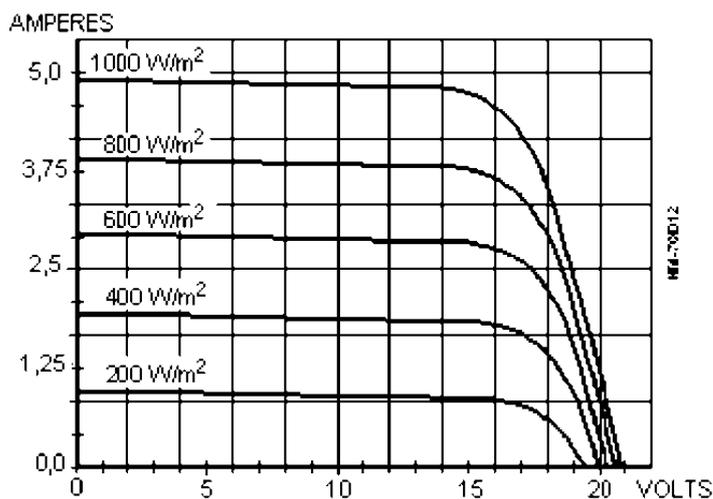


Figura 37 – Desempenho do módulo para diferentes condições de irradiância ($T_c=45^\circ\text{C}$)

²⁰ Estimativas razoáveis TNOC estão na faixa de 47°C , para os módulos da Helio dinâmica TNOC é 45°C

4.6. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO COMBINADO

Para que se conseguisse a integração dos critérios de uso foi necessário compatibilizar e priorizar recomendações muitas vezes divergentes em relação ao impacto da obstrução no desempenho da edificação. Há casos, por exemplo, em que a obstrução reduz a quantidade de luz disponível na fachada das edificações, reduzindo o conforto luminoso, mas ao mesmo tempo reduz a carga térmica incidente, podendo, em climas quentes, ser uma importante contribuição para a melhoria das condições de conforto térmico. Como comparar as duas situações? Seria mais interessante garantir o conforto térmico e admitir perdas no conforto luminoso do ambiente ou o contrário?

Hoje é possível, através de meios ativos, gerar condições de conforto dentro dos ambientes. Caso os níveis de iluminação não sejam suficientes, pode-se utilizar uma complementação com um sistema artificial e caso a temperatura interna atinja valores altos, pode-se retirar o excesso de carga térmica com um aparelho de ar condicionado. Embora qualitativamente os ambientes condicionados e iluminados artificialmente deixem a desejar, as temperaturas internas e os níveis de iluminância adequados para o conforto térmico e luminoso podem ser atingidos. Como é necessária energia elétrica para atingir o conforto, este consumo pode ser considerado como indicativo do desempenho do ambiente e como medida do desconforto do usuário.

Observa-se também que essa abordagem permite associar ao conforto térmico e luminoso a economia de energia proporcionada pelo aquecimento solar da água e a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos, produzindo um critério único para todas as possibilidades de uso da energia solar.

Para ilustrar esse tipo de proposta, apresentam-se dois métodos de avaliação que utilizam o consumo de energia como ferramenta para avaliar o desempenho térmico de edificações, ambientes ou componentes da edificação e a metodologia adotada para cálculo do consumo energético em um ambiente.

4.6.1. Método Termo-luminoso (LT Method)

Este método é descrito em Commission of the European Communities (1994) como “*The LT (Lighting and Thermal) Method*” para o estudo da eficiência energética de edificações simples na Europa. Ele é totalmente manual, feito através de planilhas e gráficos, e traz alguns conceitos interessantes que podem ser adaptados de modo que se estabeleçam com mais clareza os critérios para o envelope solar em climas quentes.

O primeiro deles é o conceito de zonas passivas, áreas da edificação que podem se beneficiar dos recursos naturais (luz e sol) para seu condicionamento. Cada zona tem a sua orientação, conforme mostrado na Figura 38 e têm profundidade de 6m ou de duas vezes o pé direito do pavimento. Os ambientes com esta profundidade têm o melhor potencial para o aproveitamento de sistemas solares passivos, sendo fundamental que as condições de exposição ao sol e à luz natural sejam preservadas.

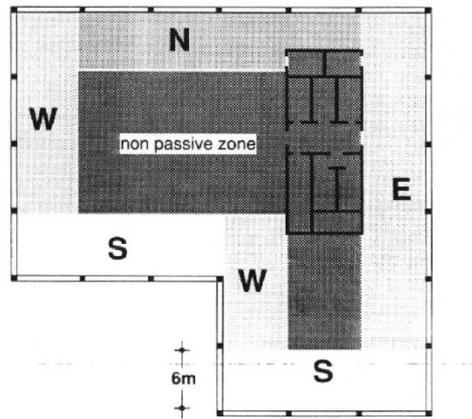


Figura 38 – Exemplo de demarcação de zonas passivas em um edifício

Determinadas as zonas passivas, são consultadas as chamadas Curvas LT, que determinam o consumo de energia para aquecimento, resfriamento e iluminação de acordo com a orientação e a proporção de área envidraçada e opaca (Figura 39). Com isso é possível para cada clima e orientação o tamanho mais adequado para as aberturas.

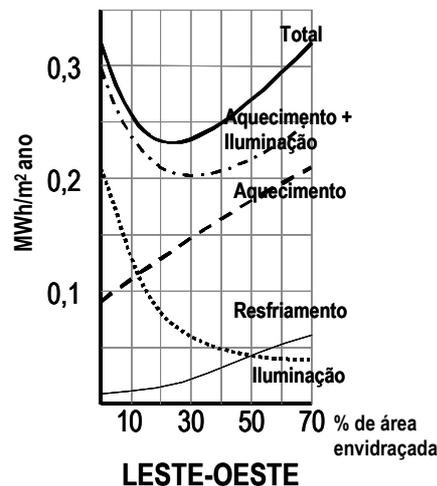


Figura 39 – Exemplo de Curvas LT

As obstruções são consideradas em duas categorias: acima de 45° e entre 15° e 45°. Obstruções menores que 15° são desprezadas, bem como as localizadas fora de uma linha de 60° tomada a partir da fachada. As obstruções implicam em fatores de correção que modificam o gasto encontrado na tabela, sendo maior do que 1 para luz e aquecimento, pois aumentam o consumo nessas áreas, e menor do que 1 para o resfriamento, pois as obstruções reduzem a carga térmica devido à radiação solar. Não é mostrado, no entanto, como foi feito o cálculo destes fatores.

4.6.2. Método da janela ótima

A janela ótima é um conceito desenvolvido por Alucci (1992) onde os gastos energéticos com ar condicionado e iluminação artificial de um cômodo são testados para diversas configurações

de janela, variando-se a área e a razão de aspecto (relação altura-largura) de modo a atingir uma geometria ótima que minimize os gastos de energia.

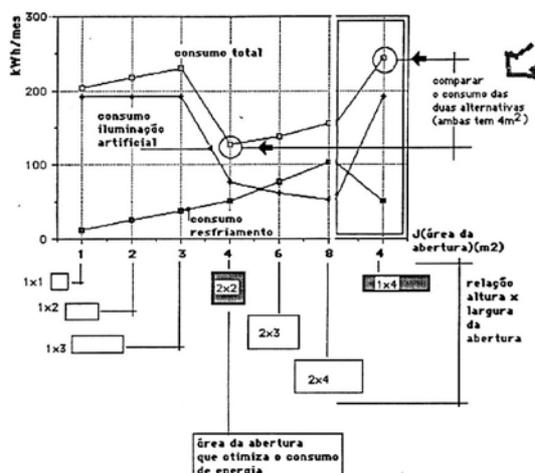


Figura 40 – Exemplo de gráfico para determinação da geometria ótima da janela

Para o cálculo do consumo de energia com o condicionamento artificial, calculam-se as cargas do ambiente (ganhos e perdas por ventilação, radiação, condução e ocupação) e compara-se a temperatura resultante destes ganhos com a temperatura de conforto para a região. Além de Alucci, Roriz (2001) fornece um procedimento gráfico simplificado para este cálculo. Para o cálculo do consumo com iluminação artificial, verifica-se a eficiência da iluminação natural, ou seja, a porcentagem de horas do ano o nível de iluminância desejado será atingido em determinado ponto do ambiente.

Ambos no entanto exigem a entrada dos dados do tipo de ocupação, da geometria do ambiente e dos materiais usados, que não são definidos pela legislação urbana, reforçando a necessidade de se estabelecer um ambiente padrão para o cálculo.

4.6.3. Modelagem matemática para consumo de iluminação artificial

Segundo Alucci (1992), o consumo de luz artificial é dado pela equação:

$$CEE_i = Pot \times t_o \times A_p \quad (\text{Wh}) \quad \text{Equação 76}$$

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**;²¹

t_o é o tempo de ocupação em horas (**h**) e

A_p é a área do ambiente em **m²**.

²¹ 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.

Neste trabalho, assume-se que o sistema de iluminação artificial só é ligado quando a iluminação natural é insuficiente e que é imediatamente desligada caso os níveis voltem a ser satisfatórios, o que nem sempre é verdade. O raciocínio descrito acima 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.

O tempo de ocupação é o período de utilização do sistema artificial e compreende todas as horas em que os níveis de iluminância do ponto de referência (ou no caso deste trabalho, os níveis médios do ambiente) tenham ficado abaixo do nível de referência. O nível de referência é o valor considerado necessário para o desenvolvimento das atividades para o qual o ambiente foi projetado e pode ser visto na Tabela 8.

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.

4.6.4. Modelagem matemática para consumo de condicionamento de ar

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

$$CEE_{AC} = 3,6 \cdot CER / E_{AC} \quad (\text{Wh}) \quad \text{Equação 77}$$

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**.²²

O método para o cálculo de carga de refrigeração (**CER**) é adaptado de Alucci (1992), de Roriz (2001) e de Szokolay (1987).

Estes autores propõem a seguinte equação para o cálculo:

$$CER = q \cdot Gh_R \quad (\text{W}) \quad \text{Equação 78}$$

Onde **q** é o coeficiente de perda calculado na Equação 65 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:

$$Gh_R = T_e - T_b \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Equação 79}$$

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

²² 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.

considerar o efeito da inércia da edificação, que reduz as variações das temperaturas internas e muitas vezes o consumo de energia. Deste modo, optou-se por calcular o número de Graus-hora não em relação à temperatura externa e sim em relação à temperatura interna suposta (T_i)²³. Para a determinação da temperatura de base utiliza-se a temperatura neutra calculada pela média das temperaturas dos últimos 30 dias (T_{n30}) acrescida de uma variação de tolerância (v_{tl}).

$$Gh_R = T_i - (T_{n30} + v_{tl}) \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Equação 80}$$

O cálculo do consumo pode ser feito para cada horário, sendo o consumo total a soma do consumo de todas as horas do ano.

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. Assim:

$$Gh_A = (T_{n30} - v_{tl}) - T_i \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Equação 81}$$

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.

$$CEE_{AQ} = 3,6.CEA \quad (\text{W}) \quad \text{Equação 82}$$

Observa-se que mesmo em edificações não condicionadas artificialmente, o consumo de energia pode ser tomado como indicativo do nível de desconforto dos ocupantes. A grande vantagem em utiliza-lo como parâmetro é que ele permite a comparação do desempenho térmico com o luminoso. Além disso, pode-se comparar também os sistemas passivos e pró-ativos, permitindo uma análise mais completa do desempenho total da edificação.

²³ Maiores considerações acerca do efeito da inércia no consumo de energia da edificação são feitas no [item 7.3](#)



Avaliação da Obstrução: Procedimentos Existentes

Ao longo do tempo foram desenvolvidos vários procedimentos para determinação da necessidade de acesso ao sol e para a avaliação do impacto do arranjo urbano na utilização da energia solar para fins passivos e pró-ativos. Alguns destes procedimentos foram efetivamente incorporados a legislações, enquanto outros permaneceram apenas como exercícios teóricos.

Neste capítulo serão apresentados alguns destes procedimentos, suas origens, mecanismos e aplicações.

5.1. LINHA SEM-CÉU (LSC)

Quando a janela é obstruída por um edifício, poderá haver pontos no ambiente de onde um observador não poderá ver diretamente o céu. O conjunto destes pontos é denominado Zona Sem Céu e o limite desta zona é chamada de No Sky Line (Linha Sem Céu – LSC). Littlefair (2001) a cita como um dos determinantes da qualidade luminosa de um ambiente, conforme indicado no item 4.3. Como toda a iluminação destes pontos tem como origem reflexões da luz natural, o autor afirma as áreas do cômodo além desta linha apresentam qualidade ambiental reduzida e que nenhuma porção significativa do ambiente deve estar além dela. A posição da LSC é função das características geométricas da janela e da obstrução, podendo ser calculada, para janelas e obstruções paralelas entre si e infinitas na horizontal ($\theta_{hf} - \theta_{hi} = 180^\circ$) a partir da equação abaixo:

$$p = h_j \cdot R / (h - 0,75 - h_j) \quad (m) \quad \text{Equação 83}$$

O peitoril nesse caso é considerado com a mesma altura do plano de trabalho (0,75 m) As variáveis da Equação 83 estão definidas na Figura 41.

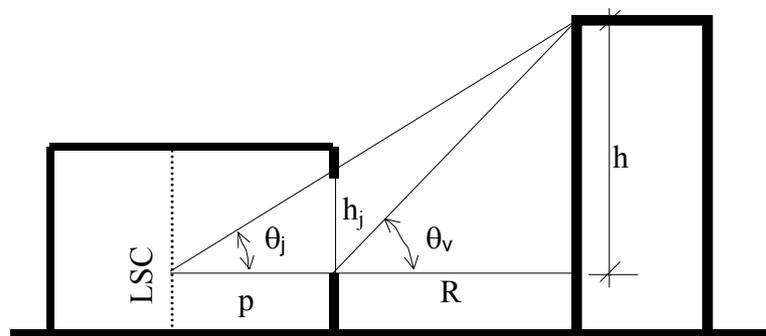


Figura 41 – Cálculo da linha sem céu

Onde:

h é a altura do obstáculo a partir do plano de referência

p é a profundidade da linha sem-céu

R é a distância do obstáculo à janela;

h_j é a altura da janela.

Fixando-se um valor para a altura da janela em 1,5 m é possível determinar a profundidade da linha sem céu em função de **R** e **h**. Observa-se que o ângulo θ_v varia ligeiramente de acordo com o a posição da linha sem céu. Foi então calculado o valor de **p** para diversos valores de **R** e **h**. A tendência é que a tangente do ângulo seja dada pela função do gráfico da Figura 42.

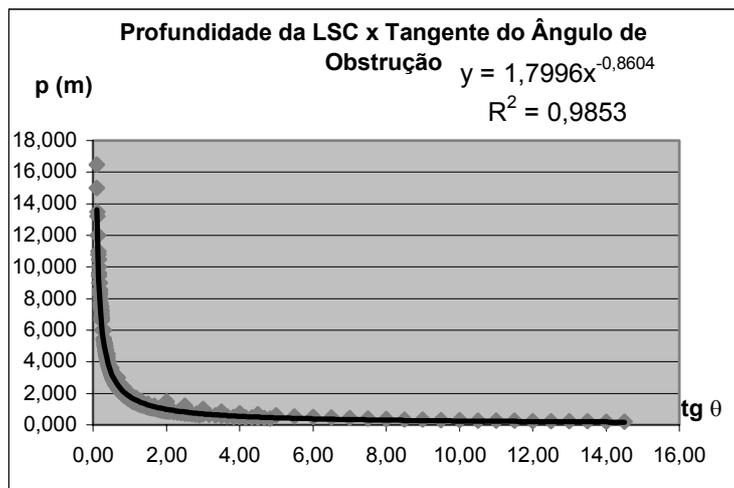


Figura 42 – Distância da linha sem céu à janela em função de $\text{tg } \theta_v$

Utilizando-se a equação do gráfico obtém-se uma linha sem céu a 6m da janela com uma obstrução de 13° e a 4m com uma obstrução de 21° . Quanto maior a profundidade desejada da LSC, menor será a obstrução permitida e menores as alturas das edificações circundantes. Deve-se encontrar um ponto ótimo entre a profundidade da linha sem céu e a densidade desejada.

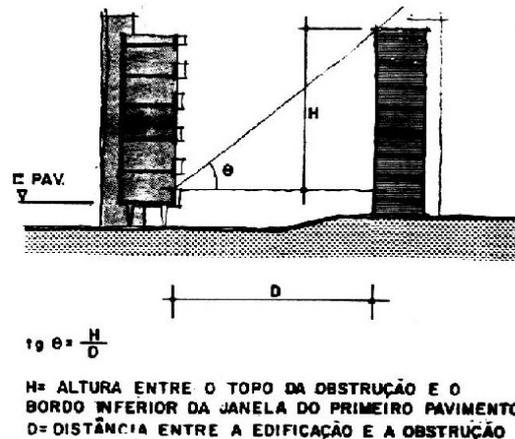
Vianna & Gonçalves (2001) sugerem que, baseado na amplitude do campo visual vertical humano, o ângulo θ_j seja igual a 60° . Para a janela em questão significa que a LSC está a 1,15m da janela e a obstrução máxima é de 59° , permitindo à pessoa uma visão do céu somente quando aproximasse da janela, na periferia do seu campo visual.

5.2. ÂNGULOS DE OBSTRUÇÃO

Um dos mais tradicionais mecanismos de proteção do acesso ao sol e à luz natural são os ângulos de obstrução. As edificações nesse caso são consideradas paralelas e infinitas, desconsiderando-se as contribuições de luz pelas laterais da edificação. Uma das vantagens dessa abordagem, colocada por Ng (2003), é que os recuos necessários para que a edificação

proteja a iluminação natural do vizinho fazem com que a sua própria janela se afasta das edificações circundantes, melhorando as suas próprias condições de iluminação.

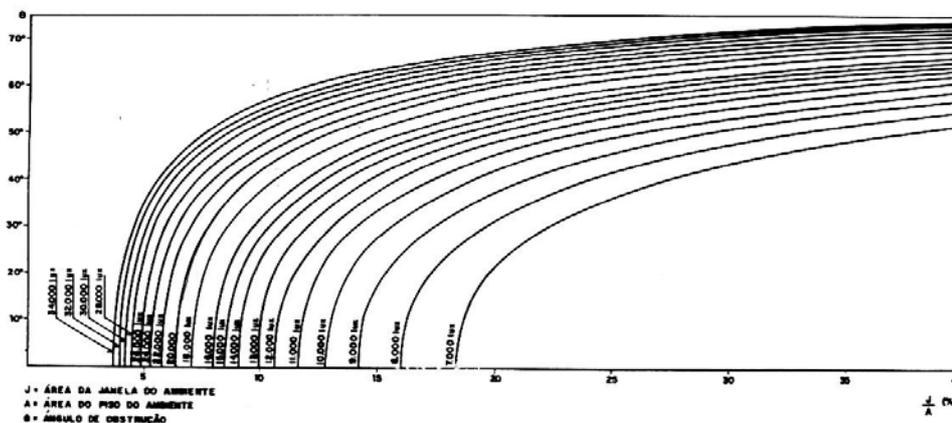
Foram encontrados poucos estudos referentes aos critérios e métodos para a determinação destes ângulos. Os indícios apontam para a apropriação acrítica de um modelo cuja a primeira referência encontrada foi a da Antoine (1976). Um dos poucos estudos encontrados para a determinação dos ângulos de obstrução para iluminação foi desenvolvido por Alucci, Carneiro & Baring (1986) para o espaçamento de edificações em conjuntos habitacionais.



Fonte: Alucci, Carneiro & Baring (1986)

Figura 43 – Cálculo do ângulo de obstrução

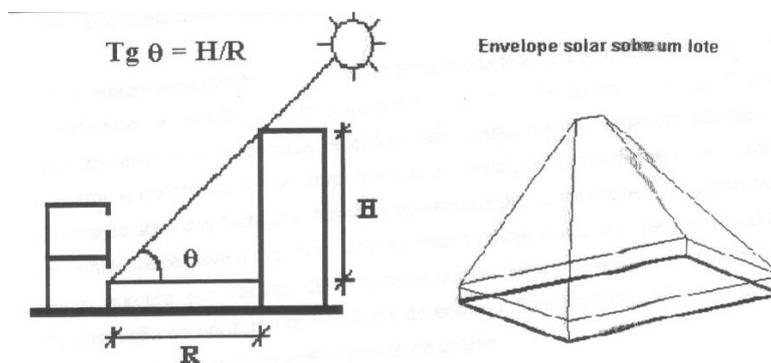
A generalização é perigosa porque os conjuntos habitacionais têm características bem específicas que não se aplicam às demais edificações da cidade. O resultado também depende da razão entre área de janela e área de piso, que é determinada na maior parte das cidades brasileiras pelo código de obras, normalmente com valor na faixa de 0,16 (1/6). No teste feito para Belo Horizonte utilizando-se a eficiência de 80% encontrou-se, utilizando o gráfico abaixo uma obstrução de 50°, mesmo resultado obtido por Assis, Souza & Valladares (1995) e utilizado no estudo que deu suporte à lei de uso e ocupação da cidade.



Fonte: Alucci, Carneiro & Baring (1986)

Figura 44 – Abaco para a determinação da distância mínima entre edificações

Uma adaptação do modelo de ângulos de obstrução, os recuos progressivos, é apresentada por Assis (2000). Nesse modelo o ângulo de obstrução é convertido em recuos que aumentam de acordo com a altura do prédio, sendo uma das ferramentas de mais fácil aplicação.



Fonte: Assis (2000)

Figura 45 – Modelo de envelope com recuos progressivos

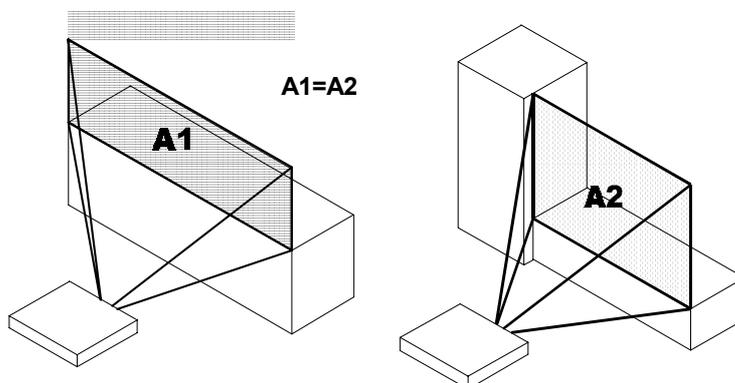
Este modelo acabou sendo incorporado na revisão da legislação urbanística de Belo Horizonte, ainda que de forma parcial. Assis, Valladares & Souza (1995) desenvolveram um estudo para a cidade aplicando o modelo de Alucci, Carneiro & Baring (1986) e o critério de uma hora de sol em cada fachada. Como não se previu a possibilidade de recuos diferenciados para cada orientação, chegou-se a um ângulo de 45° , que deveria ser incorporado à lei na forma de recuos progressivos. No caso específico de Belo Horizonte, podem ser feitas algumas observações. Primeiramente, o recuo foi rejeitado por pressão na câmara de vereadores. Os recuos reais implantados resultam em um ângulo de obstrução de cerca de 75° na maior parte da cidade e de 83° no centro, onde desejava-se permitir uma maior densidade construtiva (ver Belo Horizonte, 1996). Observou-se, no entanto, que o estabelecimento do recuo progressivo não levou à adoção da arquitetura “bolo de noiva”, pois os construtores preferem determinar o número de pavimentos da torre e aplicar o recuo máximo. Ainda assim, o uso intensivo do potencial construtivo indica que propostas acordos particulares entre proprietários, como sugerem Knowles & Berry (1980) dificilmente seriam aplicáveis na cidade.

Criticou-se também a validade da legislação, dada a quantidade de edificações irregulares, sem aprovação pelos órgãos competentes, pois ela só se justifica com a aplicação uniforme na cidade. Este, no entanto, torna-se um problema menor quando se observa que as principais edificações geradoras de sombreamento e obstrução são as de múltiplos pavimentos, que geralmente passam pelos processos normais aprovação.

5.3. INDICADORES DE ALTURA PERMITIDA

Como já mostrado, a onda de reconstrução que se seguiu à Segunda Guerra apresentou-se como uma oportunidade na Inglaterra para que fossem reavaliados a legislação urbana e os códigos de edificação. Crompton (1955) afirma que já na década de 1930 os ângulos de obstrução mostravam-se inadequados para prover os níveis mínimos de iluminação no interior das edificações, pois exigiam para isso ângulos muito pequenos. Ao considerar que a iluminação do ambiente é proporcional à parcela de céu que ele vê, o código passou a

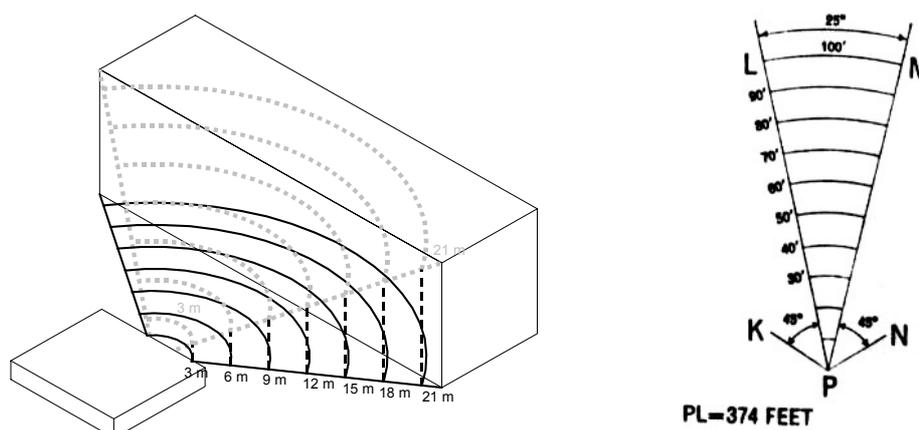
considerar não só o ângulo de obstrução vertical, mas também o horizontal. Como nem sempre se devem considerar as obstruções urbanas como paralelas e infinitas, leva-se em conta deste modo a contribuição luminosa do céu que se vê entre as edificações, caso haja espaçamento entre elas ou diferenciação de altura (Figura 46).



Fonte: baseado em Crompton (1955)

Figura 46 – Configurações diferentes que apresentam o mesmo fator de visão de céu

Os indicadores de altura permitida da norma inglesa são derivados dos estudos realizados por Allen (1943) com base nas pesquisas de Gropius. Allen avaliou principalmente a relação entre a obstrução, denominado *Daylight Factor*²⁴, que depende não só do ângulo de obstrução vertical da edificação, mas também do ângulo de obstrução horizontal. Como a área de céu vista depende da altura do edifício obstrutor e da distância que ele se encontra da janela analisada, torna-se possível converter os ângulos sólidos em projeções horizontais. Os *Daylight Indicators* são ábacos compostos por uma combinação de ângulos verticais e horizontais de obstrução, onde os arcos concêntricos funcionam como curvas de nível que indicam a altura máxima que a edificação vizinha pode atingir. (Figura 47)



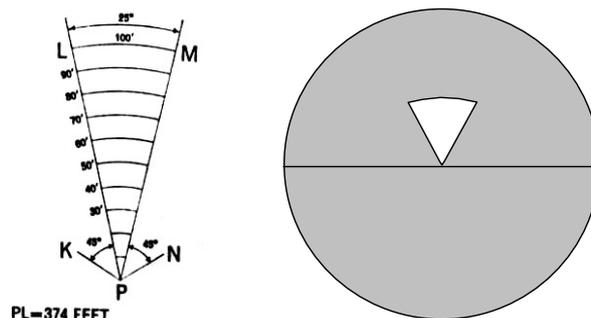
Fonte: England (1964)

Figura 47 – Construção dos Indicadores de Altura Permitida

²⁴ O Daylight Factor de Allen é a área de céu vista pela edificação. No caso estaria sendo considerada somente a componente de céu, desprezando-se a reflexão externa e interna da luz e subestimando a contribuição. No entanto, para os fins propostos em seu trabalho, as premissas de Allen se mostraram adequadas.

Partiu-se do pressuposto de que a iluminação natural das edificações deve ser resolvida para um dia nublado de inverno, o que para a Inglaterra da época, significavam 5000 lux de iluminância horizontal em um plano desobstruído²⁵. Com isso, considerou-se que um **DF** da ordem de 0,2 % seria o mínimo necessário para a realização de qualquer atividade.

Foram avaliados os diversos indicadores e o seu fator de visão de céu, construindo-se a máscara de a partir dos ângulos determinados horizontalmente (no caso da Figura 48, o ângulo LPM, 25°) e verticalmente pelas curvas de nível (no caso abaixo, 15°). A máscara foi sobreposta ao diagrama de fator de forma proposto por Souza (1994) para o cálculo de DF.



Fonte: England (1964)

Figura 48 – Exemplo de Indicador e visão de céu proporcionada

A máscara foi sobreposta ao diagrama de fator de forma proposto por Souza (1994) para o cálculo de DF. (Tabela 12).

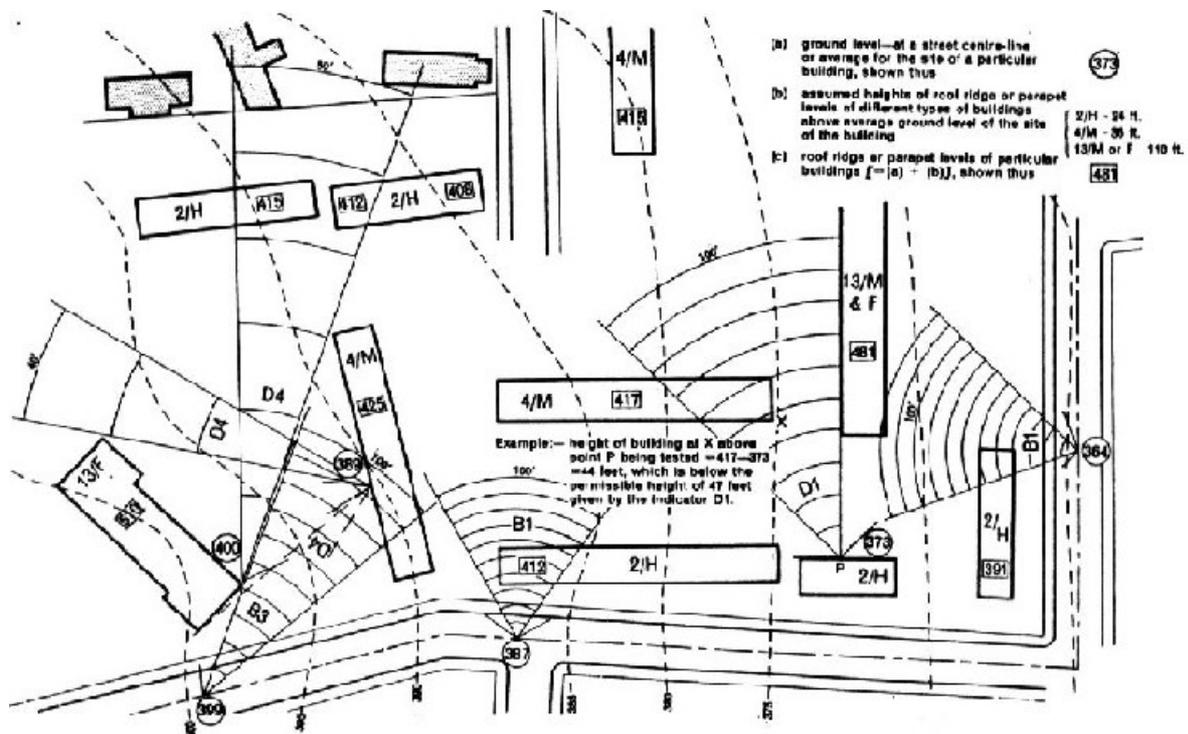
Tabela 12 – Ângulos de obstrução dados pelos indicadores da norma inglesa

A partir do centro das ruas e dos limites do terreno	Zonas não residenciais	A1 DF = 0,51% $\theta_h = 59^\circ$ $\theta_v = 65^\circ$	A2 DF = 0,33% $\theta_h = 54^\circ$ $\theta_v = 35^\circ$	A3 DF = 0,24% $\theta_h = 49^\circ$ $\theta_v = 20^\circ$	A4 DF = 0,22% $\theta_h = 43^\circ$ $\theta_v = 15^\circ$
	Zonas residenciais	B1 DF = 1,00 % $\theta_h = 43^\circ$ $\theta_v = 65^\circ$	B2 DF = 0,85% $\theta_h = 36^\circ$ $\theta_v = 45^\circ$	B3 DF = 0,78% $\theta_h = 28^\circ$ $\theta_v = 30^\circ$	B4 DF = 0,50% $\theta_h = 19^\circ$ $\theta_v = 20^\circ$
A partir dos demais prédios no terreno	Zonas não residenciais	C1 DF=0,74% $\theta_h = 40^\circ$ $\theta_v = 45^\circ$	C2 DF = 0,56% $\theta_h = 35^\circ$ $\theta_v = 30^\circ$	C3 DF = 0,42% $\theta_h = 30^\circ$ $\theta_v = 20^\circ$	C4 DF = 0,34% $\theta_h = 25^\circ$ $\theta_v = 15^\circ$
	Zonas residenciais	D1 DF=1,02% $\theta_h = 25^\circ$ $\theta_v = 45^\circ$	D2 DF = 0,85% $\theta_h = 20^\circ$ $\theta_v = 35^\circ$	D3 DF = 0,89% $\theta_h = 15^\circ$ $\theta_v = 25^\circ$	D4 DF = 0,54% $\theta_h = 10^\circ$ $\theta_v = 20^\circ$

²⁵ O trabalho de Littlefair (2001) apresenta um valor um pouco maior para o céu encoberto padrão inglês, 6.300 lux, conforme pode ser observado no item 5.4.

Observa-se que os valores mínimos para o fator de céu são baixos, especialmente considerando-se um céu de 5000 lux. Isso significaria iluminâncias entre 11 e 51 lux na janela, desprezando-se a refletividade das obstruções. É importante lembrar, no entanto, que a parte da abóbada próxima ao zênite dificilmente é obstruída, o que significa que o fator de céu é normalmente muito superior àquele determinado pelo ábaco. A maior vantagem do método é superar a visão de obstrução contínua, paralela e horizontal, permitindo avaliar às mais diversas configurações de edifícios.

Os ábacos são utilizados em uma análise que deve ser feita ponto a ponto (England, 1964) (ver Figura 49). O vértice P deve ser colocado no ponto a ser analisado (a fachada da edificação vizinha ou a borda do terreno), devendo existir alguma posição do ábaco em que os acros concêntricos não se sobreponham a nenhuma edificação com altura superior à indicada.

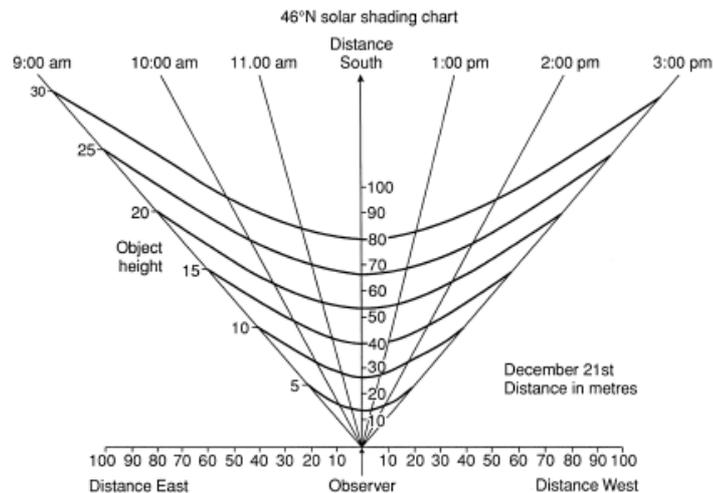


Fonte: England (1964)

Figura 49 – Exemplo de utilização dos indicadores

Além dos indicadores de altura permitida voltados para a iluminação natural, o código inglês apresenta também indicadores de insolação, utilizados para avaliar se as janelas do entorno recebem a insolação mínima desejada. Para isso, England (1964) considera que a radiação direta só é considerada útil quando o ângulo horizontal entre o sol e o plano da janela é inferior a 22° e a altura solar é maior que 5°. As linhas que definem a altura máxima da edificação não são mais arcos perfeitos e sim curvas derivadas da projeção dos ângulos solares.

No entanto, o procedimento de avaliação é similar ao realizado para a iluminação natural. A única diferença é que o indicador de insolação permanece sempre com o marcador das 12h apontando para o sul.



Fonte: Littlefair (1998)

Figura 50 – Exemplo de indicador de insolação semelhante ao da norma inglesa

5.4. ILUMINÂNCIA VERTICAL

Lynes citado por Littlefair (2001) afirma que a iluminância em um determinado ponto de um ambiente é diretamente proporcional à iluminância vertical na parede externa na qual está localizada a abertura. No estudo de caso de Littlefair para casas térreas inglesas, seria recomendada uma obstrução contínua máxima de 25° para que se garantissem as condições de iluminação descritas no item 3.1. Considerando-se a refletância do solo de 0,1 e a da obstrução de 0,22, a iluminância vertical no plano da janela seria de 27% da iluminância disponível em um plano horizontal desobstruído. Para o autor, seria possível, caso as características do ambiente se mantiverem constantes, transferir esse valor para qualquer outra região do mundo, desde que se soubesse a frequência da iluminância horizontal difusa em plano desobstruído. Por exemplo, se em Londres, onde a iluminância de 6,3 klux é excedida por 70% do tempo o valor é de 27%, em Atenas, onde a iluminância excedida por 70% do tempo é de 9,5 klux seria necessária uma iluminância vertical de apenas 18% para se obter a mesma quantidade de luz no interior da edificação.

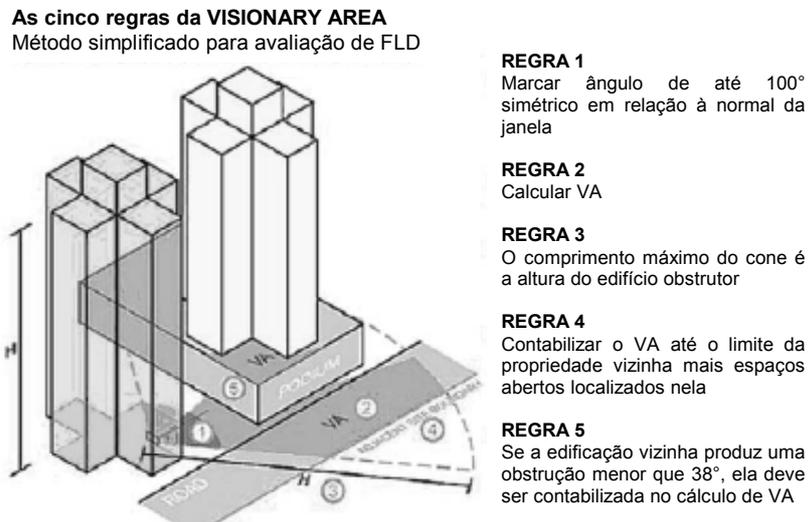
A grande desvantagem desta abordagem é que ela só é válida caso o ambiente estudado seja o mesmo, assim como as condições de céu. Ela oculta ainda as características do ambiente que foram importantes para o cálculo, não sendo possível aplica-la às cidades brasileiras sem considerar se o ambiente típico escolhido corresponde.

5.5. MODELO DE HONG KONG

A cidade de Hong Kong, na China, tem convivido desde 2001 com uma legislação de proteção ao acesso à luz natural. Com uma população de 7,5 milhões de habitantes em uma área de 200 km², a cidade apresenta-se como a mais densa do mundo. Ng (2003) apresenta a legislação de 1959, utilizando ângulos de obstrução gerados nos moldes das legislações européias e que teve bons resultados a princípio. Ela assumia que as obstruções tinham

distribuição homogênea ao longo das vias, sempre paralelas em relação à rua e com alturas semelhantes, pressupostos que deixaram de ser verdade na Hong Kong contemporânea.

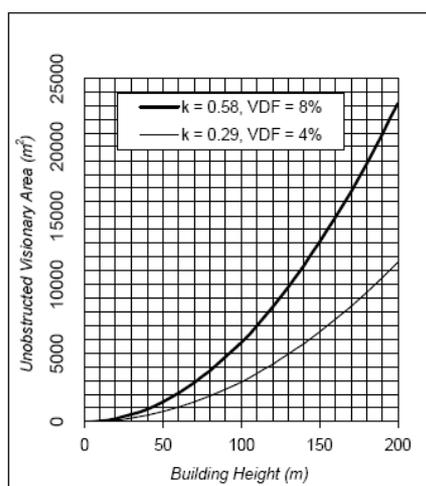
A proposta de Ng é bastante original, instituindo o conceito de UVA (Unobstructed Vision Área), um desenvolvimento dos indicadores da norma inglesa. A UVA é dada pela área de um cone plano perfeito com 100° de abertura e raio igual à altura da edificação obstrutora que não intercepta a edificação (Figura 51).



Fonte: adaptado de Ng (2003)

Figura 51 – Exemplo de cálculo de UVA

Através de estudos experimentais e simulações computacionais, foi estabelecida uma relação entre a UVA e a fator de luz diurna vertical na fachada., estabelecendo como mínimo necessário 8% para salas e quartos e 4% para cozinhas. O coeficiente k (ver gráfico da Figura 52) é dado em função da iluminação desejada e para cada altura de prédio lê-se um valor de UVA necessário.



Fonte: Ng (2003)

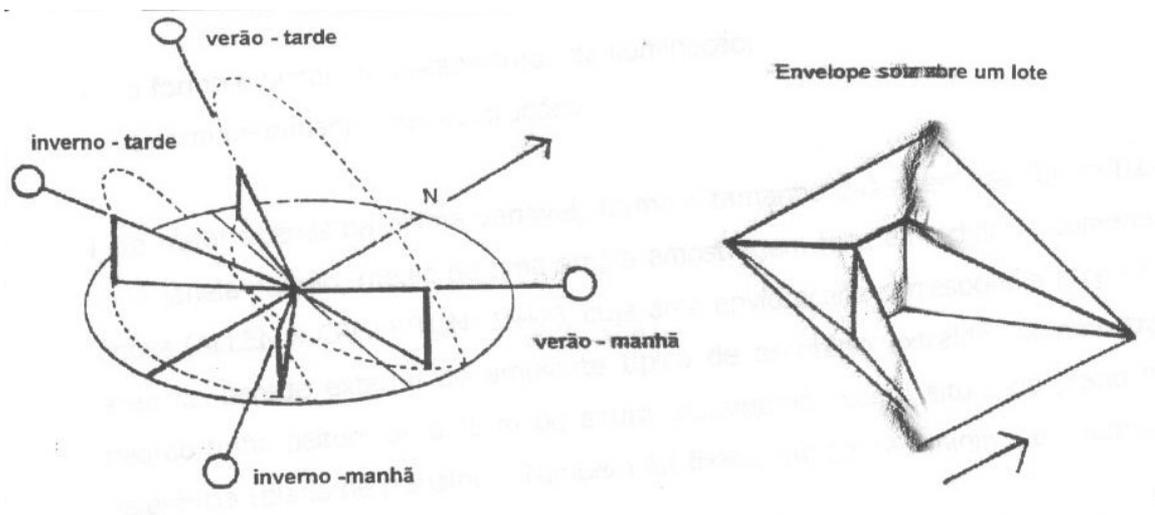
Figura 52 – Gráfico para determinação o valor de UVA necessário de acordo com a altura da edificação

Por exemplo, para uma edificação obstrutora de 100 m de altura, o UVA dos vizinhos deve sempre apresentar área superior a 6000 m².

O modelo de Ng apresenta várias semelhanças com o da norma inglesa, mas parece ser de aplicação mais simples para leigos.

5.6. ENVELOPE SOLAR

O envelope solar é um construto espaço temporal que define o volume máximo que um edifício pode ocupar sem causar sombras indesejáveis nos vizinhos. Foi desenvolvido por Knowles & Berry (1980), que propõe um método em que o envelope é gerado por meio de planos paralelos aos raios solares nos horários seleccionados. É uma construção geométrica complexa feita em onze passos e tem difícil aplicação. O horário a ser protegido é das 9h às 15h, provavelmente voltados para o horário de melhor aproveitamento da energia solar para aquecimento de água e para conversão de energia.



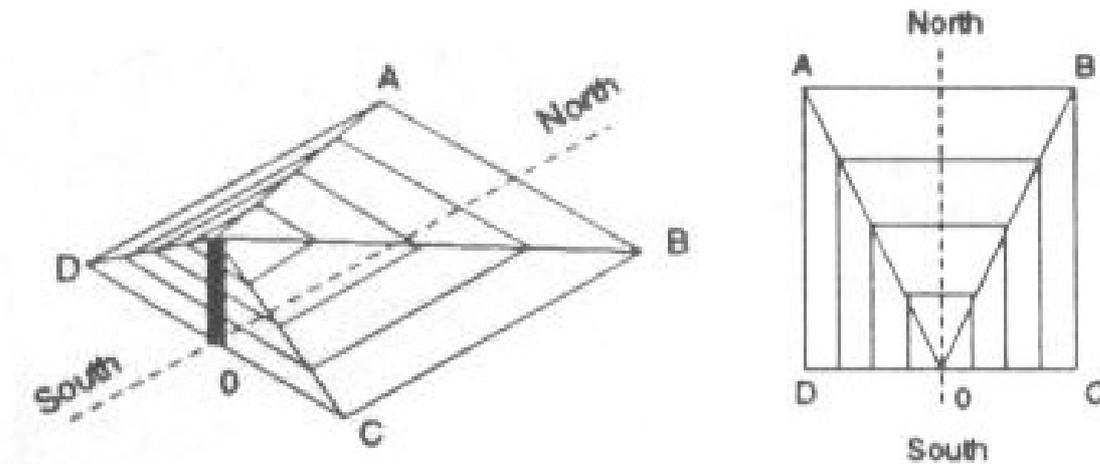
Fonte: Assis (2000)

Figura 53 – Modelo de envelope tridimensional.

O estabelecimento de critérios que orientam a construção do envelope também é um fator importante a ser considerado. O trabalho americano designa três graus de acesso: o acesso de telhado (*Rooftop access*), onde somente a cobertura dos edifícios tem acesso ao sol garantido; o acesso de edifício (*Whole-building access*), onde também os planos verticais do edifício recebem insolação; e o acesso de lote (*Whole-site access*) onde mesmo as partes não edificadas do terreno têm acesso ao sol garantido (United States, 1982). Os graus de acesso implicam tempo de insolação progressivamente menores, mas permitem densidades maiores, o que pode ser interessante no caso das latitudes elevadas, onde os ângulos de incidência solar são muito pequenos.

Uma adaptação do procedimento é proposta por Comissão of the European Communities, (1994), através de uma combinação do envelope tridimensional com o os ábacos ingleses. O envelope é representado na forma de curvas de nível espaçadas de acordo com a altura do

pavimento padrão. É um dos mais fáceis de serem utilizados e depende somente da representação em planta.



Fonte: Comission (1994)

Figura 54 – Exemplo de envelope com curvas de nível para um a latitude de 30° e acesso ao sol entre 9h e 15h

5.7. ENVELOPE DE SOMBREAMENTO

Emmanuel (1993) faz uma abordagem oposta à de Knowles & Berry (1980), buscando utilizar a massa edificada para amenizar o problema de sobre-aquecimento do recinto urbano em climas equatoriais, preocupando-se mais com o conforto do usuário externo do que com o desempenho da edificação. O autor afirma que a geometria urbana é o mais importante fator no clima urbano, com influência maior que a dos materiais de superfície e a ventilação. É desconsiderada a possibilidade a utilização dos ventos para amenizar as condições climáticas equatoriais devido às baixas velocidades do ar existentes, à dificuldade na previsão do comportamento do vento e à proximidade entre a temperatura do ar e a temperatura superficial da pele, que reduz as trocas.

O objetivo do envelope de sombreamento (*Shadow Umbrella*) é evitar o aquecimento das superfícies, reduzindo a carga de radiação recebida durante o dia. Com isso, elas se manteriam mais frias e serviriam como receptoras de calor, resfriando o pedestre. O período de sombreamento necessário foi definido como sendo de 8h ao pôr-do-sol em áreas comerciais e de 9h ao pôr-do-sol em áreas residenciais.

São fornecidos ângulos de obstrução necessários para cada orientação em latitudes de 0° a 12°. Da avaliação dos ângulos obtidos, o autor deriva algumas observações:

- O sombreamento mais eficiente é dado para edifícios localizados no quadrante nordeste do ponto de interesse;
- As densidades urbanas devem crescer em direção ao nordeste, com menores edifícios no nordeste e maiores na direção oeste;

- As bordas nordeste e sudoeste dos loteamentos podem ser deixadas abertas, ou seja, deixadas sem ocupação de edifícios.

O autor recomenda também a composição de áreas sombreadas com áreas com espelhos d'água e vegetação, de modo a otimizar a eficiência do sombreamento e tirar partido também outros tipos de trocas térmicas importantes para o meio urbano.

5.8. MÉTODO DAS RADIAÇÕES PONDERADAS

O método das radiações ponderadas foi desenvolvido por Aroztegui (1981) para o projeto de proteções solares para aberturas. Ele toma a temperatura neutra como base e multiplica a radiação solar pelo que ele chama de “fator de ponderação”, que cresce na medida em que a temperatura externa se afasta neutra. A temperatura neutra já foi comentada no item 4.2.1, e é calculada pela Equação 58, p. 76. Os fatores de ponderação são dados na Tabela 13 em função da diferença entre a temperatura externa e a temperatura neutra (Δt).

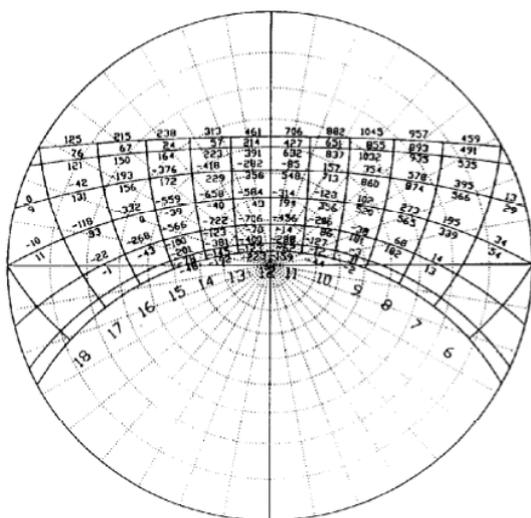
Tabela 13 – Fatores de ponderação segundo Aroztegui (1981)

Calor		Frio	
Δt	FP	Δt	FP
+ 10	-11,2	- 1	+ 0,5
+ 9	- 9,5	- 2	+ 1,0
+ 8	- 8,0	- 3	+1,5
+ 7	- 6,5	- 4	+ 2,0
+ 6	- 5,2	- 5	+ 2,5
+ 5	- 4,0	- 6	+ 3,0
+ 4	- 2,8	- 7	+ 3,5
+ 3	- 1,8	- 8	+ 4,0
+ 2	- 1,0	- 9	+ 4,5
+ 1	- 0,3	- 10	+ 5,0
		- 11	+ 5,5
		- 12	+ 6,0

Fonte: Aroztegui (1981)

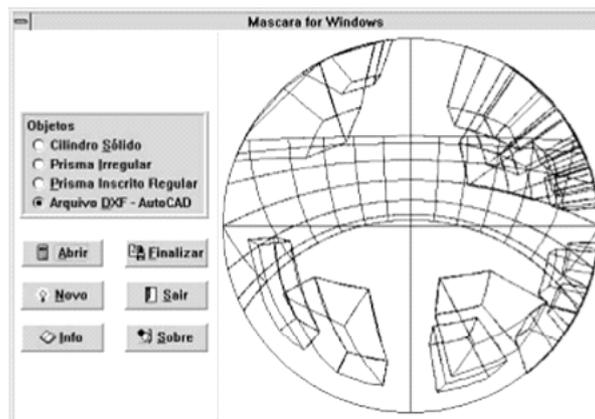
Os fatores de ponderação são então plotados na carta solar em projeção estereográfica. O objetivo é projetar uma proteção solar que exclua o sol quando a radiação ponderada for negativa, ou seja indesejável (pois a temperatura do ambiente está acima da temperatura neutra), e permita a sua entrada quando a radiação ponderada for positiva. Sendo na maior parte das vezes impossível fazer isso, deve-se buscar um balanço das radiações sempre positivo, significando que há mais sol desejável entrando do que indesejável.

O método foi utilizado por Pereira, Silva & Turkienikz (2001) para a avaliação dos ângulos de obstrução para a cidade de Florianópolis, através de um programa de computador que permitia o desenho do entorno em projeção estereográfica.



Fonte: Pereira, Silva & Turkienikz, 2001

Figura 55 – Exemplo das radiações ponderadas plotadas na carta solar



Fonte: Pereira, Silva & Turkienikz, 2001

Figura 56 – Exemplo de projeção estereográfica de entorno feita no computador

Há algumas ressalvas a serem feitas em relação a este método. A primeira delas é que o método de cálculo dos fatores de ponderação não é claro e simples de ser compreendido mesmo quando se observa o trabalho original de Aroztegui. A formulação apresentada pelo autor para o cálculo do fator de ponderação na verdade dá a sensação térmica de acordo com o afastamento da temperatura ambiente em relação à neutra. O valor calculado e o tabelado apresentam defasagem, indicando que erros nas equações apresentadas. No caso, optou-se por apresentar aqui apenas os valores tabelados, assumindo-os como verdadeiros. Uma segunda questão a ser levantada é a questão dos critérios para determinação das obstruções máximas. Pereira, Silva & Turkienikz (2001), na impossibilidade de excluir todas as radiações indesejáveis e permitir as desejáveis, determinaram três critérios que, embora lógicos, ainda parecem arbitrários e merecem estudos mais aprofundados:

- Balanço das radiações ponderadas anuais positivo;
- Balanço positivo nos equinócios;
- 1,5 a 2 horas de sol por dia durante o inverno.

Os critérios baseiam-se somente na recomendação térmica, tomada como a mais crítica sem maiores considerações. Os autores apresentam a possibilidade de integração com os critérios de conversão de energia e iluminação natural a partir da projeção estereográfica, mas não chegam a desenvolver este aspecto.

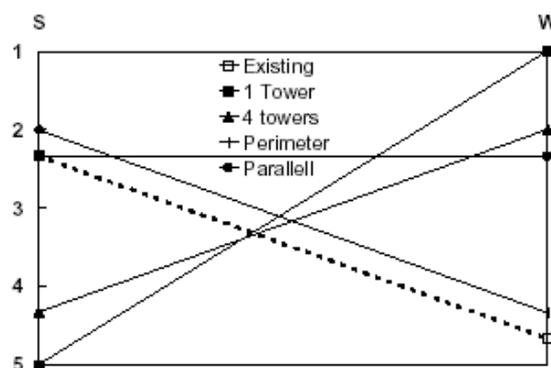
5.9. MODELO ARGENTINO PARA AVALIAÇÃO INTEGRADA

Em 2001 o Centro de Investigación Hábitat y Energía da Universidad de Buenos Aires realizou diversos estudos para avaliar a “sustentabilidade” da forma das edificações e do tecido urbano na cidade (De Schiller, 2001). A legislação urbana de Buenos Aires, em revisão no momento em que o estudo foi feito, mostrava uma tendência de favorecer edificações mais altas, visando

a um aumento das densidades urbanas. A autora ressalta que, embora nas altas latitudes europeias o acesso ao sol traga benefícios irrestritos, em climas subtropicais e tropicais a radiação direta pode ser causa de problemas sérios de sobre-aquecimento das edificações. Também é observado que os padrões europeus visam a garantir o acesso ao sol nos ambientes internos, visto que as pessoas passam a maior parte do inverno em ambientes fechados. Em climas mais amenos, isso não se aplica, sendo o sol um importante determinante na utilização de espaços públicos, que são objetos de preocupação do estudo argentino.

Foram realizados estudos de insolação em heliodon e ventilação em softwares de simulação do tipo *Computer Fluid Dynamics* (CFD) para avaliar as condições de acesso ao sol e ao vento de diferentes arranjos urbanos: o arranjo existente (composto de edificações densamente distribuídas com alturas médias), uma torre isolada, blocos com quatro torres, blocos ocupando o perímetro da quadra com pátio interno e blocos paralelos. Além disso, avaliou-se o desempenho energético dos blocos e o impacto no conforto térmico do entorno através de um processo análogo ao LT Method, mas que não considerou o desempenho luminoso do ambiente. Foram estabelecidas notas para cada critério, sendo que a edificação de melhor desempenho recebeu nota 1 e a de pior desempenho nota 5. Os resultados foram avaliados para verão e inverno e as médias comparadas.

Alternative tissue	Facades		Sidewalks		Gardens	
	S	W	S	W	S	W
Existing	4	5	2	4	1	5
1 Tower	5	1	5	1	5	1
4 towers	5	2	4	2	4	2
Perimeter	3	4	1	5	2	4
Parallel	1	1	3	3	3	3



Fonte: De Schiller (2001)

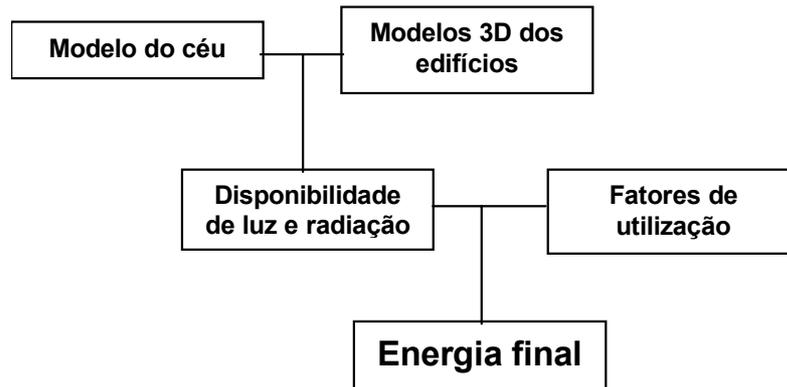
Figura 57 – Classificação das tipologias de acordo com o critério de acesso ao sol no espaço urbano circundante e método de comparação²⁶

Para a insolação, considerou-se que a torre isolada tem o melhor desempenho para o inverno e o pior para o verão, enquanto a ocupação periférica apresenta o resultado oposto. Os mais equilibrados foram os blocos paralelos, que obtiveram desempenho razoável tanto no verão quanto no inverno. No caso da ventilação, verificou-se que o desempenho é um pouco mais homogêneo, excetuando-se o arranjo existente, que apresentou o melhor desempenho no inverno e o pior no verão. Os arranjos periféricos e paralelos apresentaram os melhores resultados. Em relação ao desempenho energético, novamente o arranjo paralelo atingiu um desempenho satisfatório para ambas as estações, apresentando-se como a melhor alternativa para a cidade.

²⁶ As letras S e W na tabela significam Summer (verão) e Winter (inverno)

5.10. O PROGRAMA PRECIS

O programa PRECIS – Assessing the Potential for Renewable Energy in Cities – busca avaliar o potencial que o meio urbano tem para o aproveitamento solar, buscando configurações urbanas e propostas de edifício que otimizem este aproveitamento. O programa utiliza como método de simulação o *software Radiance*, desenvolvido pelo Lawrence Berkley Laboratory, nos Estados Unidos. O objetivo do programa é verificar a radiação incidente em fachadas de novos edifícios bem como avaliar o impacto na radiação incidente nas fachadas dos edifícios pré-existentes. O esquema conceitual é dado pela figura abaixo:



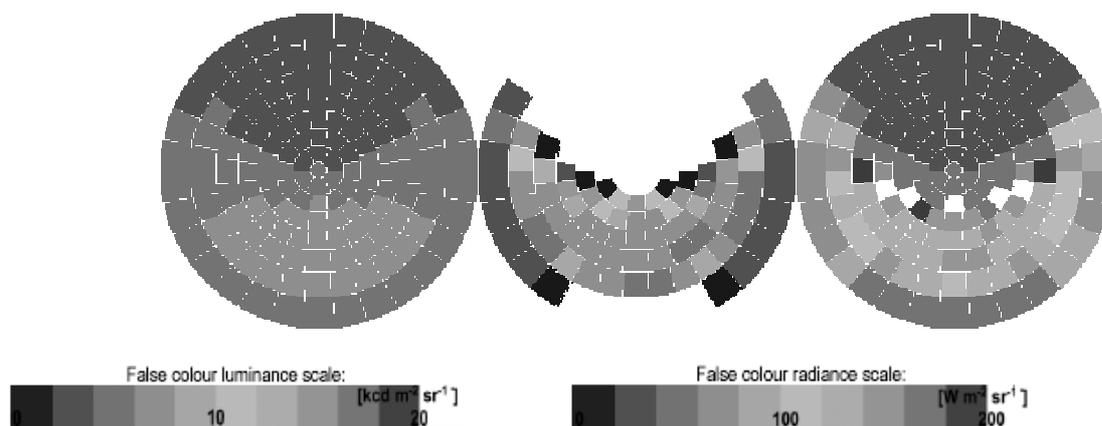
Fonte: traduzido de Compagnon (2000)

Figura 58 – Esquema teórico do PRECIS

São considerados como usos possíveis da energia solar o aquecimento de ambientes, a iluminação natural e a conversão fotovoltaica, sendo que os fatores de utilização são determinados para cada um destes usos.

Para isso, foram elaborados primeiramente modelos de céu, utilizando como referência o “*All-sky Model*” de Perez, Seals & Michalsky (1993). O modelo é calculado hora a hora a partir dos dados do programa *METEONORM*²⁷ e a distribuição é feita nas mesmas 145 zonas propostas por Tregenza, descritas no item 2.1. Os cálculos são feitos a partir do desempenho médio anual, sendo necessário converter os modelos horários em anuais. O primeiro céu caracteriza a estação de aquecimento (*heating season*) e o valor da radiância da zona é resultante da média das radiâncias das horas em que a temperatura externa é igual ou inferior a 12°C. O segundo modelo é feito para o cálculo de geração de energia fotovoltaica. A radiância da zona é resultado da média das radiâncias de todas as horas diurnas, ou seja, onde haja radiação solar disponível. O terceiro modelo é utilizado para a avaliação da iluminação natural e a luminância da zona é resultante da média das luminâncias nos horários entre 8h e 18h. O resultado dos modelos é mostrado na Figura 59. Observa-se que a principal contribuição vem da área do céu cruzada pelo sol, embora a contribuição difusa das zonas restantes não possa ser desprezada. É possível também perceber que a radiância difusa não é homogênea, devido ao modelo de distribuição mais preciso utilizado.

²⁷ Banco de dados climáticos



Fonte: Compagnon (2000)

Figura 59 – Modelos de radiância difusa, direta e global para o céu utilizados pelo PRECIS

A partir destes modelos, o procedimento de *ray-tracing* do *Radiance* calcula a radiação e a luz incidente em cada fachada e na cobertura. Determinam-se então as áreas da envoltória do edifício (fachada e cobertura) onde esta energia pode ser aproveitada. O trabalho foca na área de fachadas, pois considera imprecisa a modelagem da cobertura, uma vez que desconsidera a inclinação dos telhados. Além disso, considerou-se que as coberturas normalmente são pouco obstruídas, pois encontram-se em pontos mais altos e os edifícios não apresentam grandes disparidades de altura entre si. Embora isso seja verdade para as cidades europeias, onde as densidades e a estrutura urbana são relativamente homogêneas, este pressuposto não se aplica às cidades brasileiras, onde a heterogeneidade de usos e alturas é bastante comum.

São então estabelecidos valores mínimos para que seja possível determinar a possibilidade de utilização da energia solar naquele ponto de fachada. Estes valores são calculados a partir de equações que levam em conta as condições climáticas locais e características das edificações e dos sistemas tipicamente encontrados na Europa.

Para definir a utilização da energia, o método avalia cinco variáveis:

- Irradiância anual nas fachadas por metro quadrado de área de piso;
- Porcentagem de área de fachada com irradiação superior à necessária para aquecimento no inverno (*heating season*);
- Porcentagem de área de fachada com irradiação anual acima de 800 kWh/m² (ou seja, com potencial para aproveitamento para geração fotovoltaica);
- Porcentagem de área de fachada com iluminância média anual superior a 10 klux e
- Porcentagem da área de fachada com um fator de luz natural superior a 40%²⁸.

²⁸ Na verdade o que o autor chama de fator de luz natural (Daylight Factor) corresponde ao que nesse trabalho foi denominado fator de visão de céu (FVC), mas optou-se por manter a nomenclatura original.

Foram feitas simulações para diversas cidades e locais para avaliar a aplicabilidade do método. Compagnon (2000) apresenta estudos de caso genéricos e estudos específicos realizados para Atenas, Gucliasco, Friburgo, West Cambridge e Trondheim. Foram propostas diversas configurações para novos edifícios ou assentamentos urbanos nessas áreas, avaliando o impacto destas configurações no desempenho energético tanto das novas construções quanto no entorno pré-existente.

Os estudos comparam várias propostas de implantação de edifícios, buscando encontrar aquele em que as superfícies apresentam a maior área disponível para o uso de tecnologias solares passivas e pró-ativas. A abordagem, deste modo, é a inversa da adotada no presente trabalho, onde o principal objetivo é determinar o impacto da edificação no vizinho e não a melhor forma pra o desempenho da própria edificação ou conjunto de edificações.

Na Figura 60 vê-se a aplicação do método em um estudo para a ocupação de um terreno (Perolles Site) em Friburgo, na Suíça, onde se faria uma intervenção urbana com vários edifícios. São mostradas algumas propostas e os seus respectivos desempenhos, sendo destacados os melhores resultados.

Urban area	View	Plan	Orientation rose	Facades annual irradiation per square meter floor area	% of facade area with irradiation ≥ 151 [kWh m ⁻²] during heating season	% of facade area with annual irradiation ≥ 800 [kWh m ⁻²]	% of facade area with mean illuminance ≥ 10 [lx]	% of facade area with daylight factor ≥ 40 %
Whole area (present situation): plot ratio = 1.2				224 [kWh m ⁻²]	52 %	6.5 %	54 %	40 %
Stripes 1 (10 storeys) plot ratio = 2.0				309 [kWh m ⁻²]	74 %	21 %	82 %	87 %
Stripes 2 (12 storeys) plot ratio = 2.0				305 [kWh m ⁻²]	82 %	35 %	97 %	95 %
Stripes 3 (12 storeys) plot ratio = 2.0				315 [kWh m ⁻²]	96 %	29 %	95 %	94 %
Towers 3 (15 storeys) plot ratio = 2.0				289 [kWh m ⁻²]	95 %	12 %	95 %	96 %
Towers 4 (15 storeys) plot ratio = 2.0				274 [kWh m ⁻²]	100 %	21 %	100 %	96 %

Fonte: Compagnon (2000)

Figura 60 – Estudo de caso para Friburgo (Perolles Site)

Percebe-se que, ao desprezar a área de cobertura, pode-se optar por soluções menos eficientes, visto que a irradiância diária nesta área é normalmente maior do que no restante da edificação. Observa-se também que o desenho que apresenta a maior área disponível para fotovoltaicos não foi a mesma que apresentou os melhores resultados para os demais critérios,

mostrando-se necessária uma hierarquização e comparação dos critérios de modo a estabelecer prioridades.

O método desenvolvido pelo PRECIs apresenta vários pontos positivos, como a consideração da radiação refletida pelo entorno e a simplificação dos parâmetros que definem os valores mínimos de irradiância e iluminância para os diversos usos. Como desvantagem, há o fato de que os padrões utilizados para o cálculo dos limites mínimos só se aplicam para a realidade europeia, sendo desaconselhável sua aplicação direta nas cidades brasileiras sem as devidas adaptações. Por fim, o modelo não considera a utilização da energia solar para o aquecimento de água e nem o efeito que a obstrução pode ter no consumo de ar condicionado. Este último fator, embora pouco relevante para climas temperados, é relevante para regiões mais quentes.

5.11. ESTUDO REALIZADO PARA A CIDADE DE MOGI DAS CRUZES, SP

No período de junho a agosto de 2003 o Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo (NUTAU) foi contatado para realizar uma consultoria técnica para auxiliar a prefeitura da Mogi das Cruzes na elaboração do seu código de obras. A equipe foi coordenada pelo Prof. Dr. Geraldo Gomes Serra e as recomendações relativas à área de conforto ambiental foram desenvolvidas em conjunto pelo autor, pela Profa. Dra. Denise Duarte e pela Arqta. Ms. Alessandra Rodrigues Prata.

Este estudo apresentou como uma grande oportunidade para aplicar os conceitos desenvolvidos até então e para se elaborar uma ferramenta que realmente pudesse ser aplicada por algum tipo de instrumento legal. Foi também possível verificar a resistência por parte da administração pública na implantação de ferramentas afins.

A cidade de Mogi das Cruzes está localizada a 23° 30' de latitude sul e 46° 30' de longitude oeste. O diagnóstico climático foi feito a partir da carta bioclimática de Givoni (1998), com base em dados da Estação Meteorológica do Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG-USP. O diagnóstico acusou a existência de stress térmico de calor durante cerca de 60% do ano, mas percebeu-se a necessidade de aquecimento passivo no período de inverno. A insolação é ainda necessária devido à alta umidade, que prejudica a durabilidade dos materiais construtivos. Esses fatores orientaram a escolha dos critérios propostos nesse estudo.

Embora o código contemplasse diversos outros aspectos, vários deles inclusive relativos ao conforto ambiental das edificações, será apresentado neste trabalho somente o estudo para definição de recuos.

5.11.1. Definição dos recuos frontais, laterais e de fundo

5.11.1.1. Insolação

A princípio, os recuos foram definidos com base nos critérios de insolação propostos por Assis, Valadares & Souza (1995), baseados em vasta pesquisa bibliográfica e que se mostraram adequados para uma avaliação simplificada da questão. Desse modo estabeleceu-se que as edificações deveriam apresentar no mínimo uma hora de sol no solstício de inverno nas

fachadas voltadas para com azimute entre 225° e 135° , ou seja, qualquer fachada que não esteja orientada para o quadrante sul, com uma tolerância de mais ou menos 15° . A fachada sul foi excluída porque na latitude de Mogi seria impossível garantir sua insolação, visto que o sol está sempre inclinado para norte.

O estudo foi feito utilizando a carta solar para a latitude da cidade, marcando-se os ângulos de obstrução máximos que permitissem a incidência de sol no período desejado.

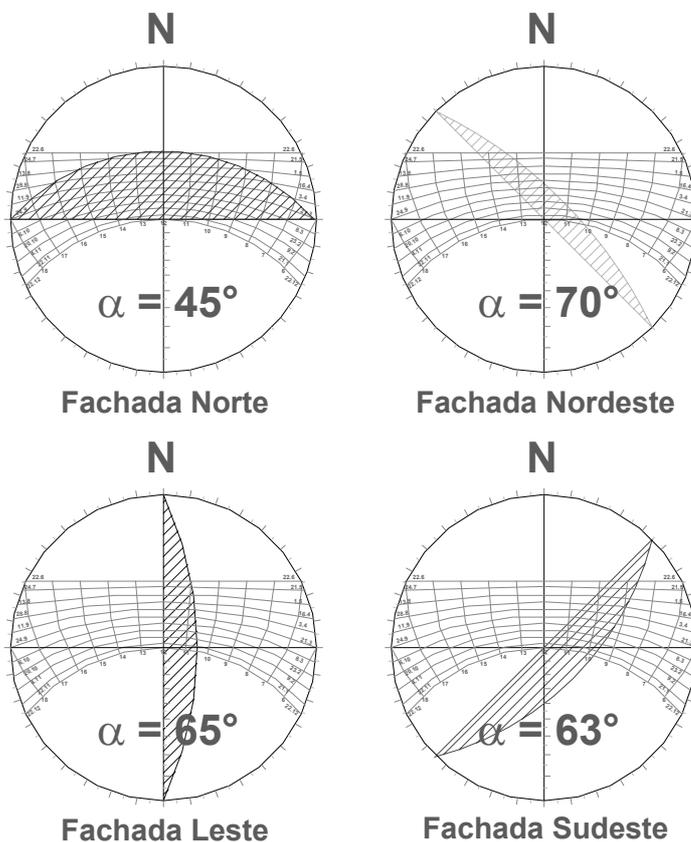


Figura 61 – Análise das obstruções máximas que permitissem uma hora de sol nas fachadas Norte, Nordeste, Leste e Sudeste

Observa-se que devido à simetria da trajetória solar, quando tomada em relação ao eixo norte-sul, os ângulos máximos de obstrução para as fachadas Noroeste, Oeste e Sudoeste já estariam resolvidos, sendo respectivamente de 70° , 65° e 63° (Figura 61).

Como o recuo tem por objetivo proteger o sol do vizinho e não o seu próprio, ele deve ser aplicado na fachada de orientação oposta. Desse modo, cada imóvel tem o seu acesso ao sol garantido porque a construção vizinha segue os ângulos propostos. Assim, o recuo com ângulo de 45° deve ser aplicado na fachada sul do edifício, o de 70° nas fachadas sudeste e sudoeste e o de 65° nas fachadas nordeste, leste, noroeste e oeste.

A grande inovação dessa proposta em relação aos demais códigos de obra do país foi exatamente sugerir recuos diferenciados para cada orientação, observando-se que caso se tomasse o ângulo mais restritivo como critério, a densidade construtiva seria reduzida excessivamente sem necessidade.

O ponto crítico a partir do qual o ângulo de obstrução deve ser medido é o peitoril da janela do primeiro pavimento, considerando-se que dessa forma toda a janela receberá a insolação mínima proposta. Foi verificada também a necessidade de estabelecer um recuo lateral e de fundo mínimos. Foram estudadas duas propostas de recuos mínimos 1,50m e 2,0m. A escolha desse recuo foi deixada a cargo da prefeitura, tendo sido demonstrado que quanto maior o recuo mínimo do vizinho, menores seriam os recuos da edificação e maior seria a altura máxima permitida na divisa.

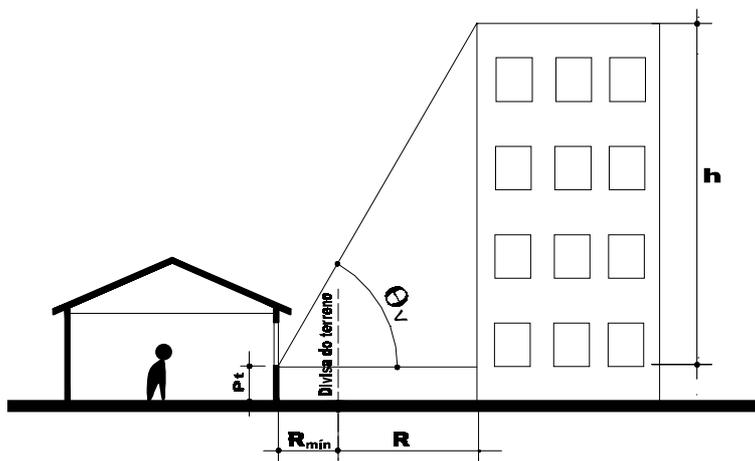


Figura 62 –Esquema para a definição dos recuos laterais e de fundo

Os recuos lateral e de fundo finais são calculados a partir de uma fórmula que leva em conta o recuo mínimo do vizinho, a altura do peitoril e o ângulo de obstrução, dado em função da orientação da testada do lote. A equação utilizada é:

$$R = (h - Pt) / \text{tg } \theta_v - R_{\text{mín}} \quad (\text{m}) \quad \text{Equação 84}$$

Onde:

R é o recuo em metros;

θ_v é o ângulo de obstrução máximo dado em função da orientação da testada;

h é a altura do prédio;

Pt a altura do peitoril e

R_{mín} é o recuo mínimo.

As paredes sem janela não necessitariam de recuo mínimo, mas devem respeitar a altura máxima na divisa e o ângulo máximo de obstrução. Nesse caso, o recuo resultante da Equação 85 pode ser usado mesmo que ele seja menor do que 2,00m. Paredes sem janelas não precisam ter recuos mínimos. Considerar exatamente o recuo indicado pela equação.

A Tabela 14 e a Tabela 15 mostram uma simplificação do cálculo, já admitindo um altura de peitoril de 1,20m, o afastamento de 2,00m e o ângulo máximo de obstrução para cada

orientação. Os ângulos entre parênteses indicam a tolerância pra que uma testada seja considerada em uma determinada orientação. Ou seja, uma fachada será considerada sul mesmo que a sua normal esteja a 15° do sul verdadeiro.

Tabela 14 - Afastamento lateral e de fundo, considerando-se um afastamento mínimo de 2,00 m

Orientação	Ângulo θ	Alt. Max. Divisa (m)	Recuo (m)
S ($\pm 15^\circ$)	45°	3,20	H - 3,20
NE - NO - L - O ($\pm 20^\circ$)	65°	5,70	0,45 H - 2,50
N - SE - SO	70	7,15	0,35 H - 2,50

Tabela 15 - Recuos frontais, considerando-se uma largura de via V

Orientação	Ângulo θ	Alt. Max. Frontal (m)	Recuo (m)
S ($\pm 15^\circ$)	45°	V + 1,20	H - (V + 1,20)
NE - NO - L - O ($\pm 20^\circ$)	65°	2,20 V + 1,20	0,45 H - (V + 0,54)
N - SE - SO	70	2,85 V + 1,20	0,35 H - (V + 0,42)

Para determinar o impacto das obstruções na iluminação natural, foi efetuado um estudo utilizando-se a fórmula de Frühling (Equação 57) mostrada no item 4.1.3, que calcula o **FLD** médio para o ambiente.

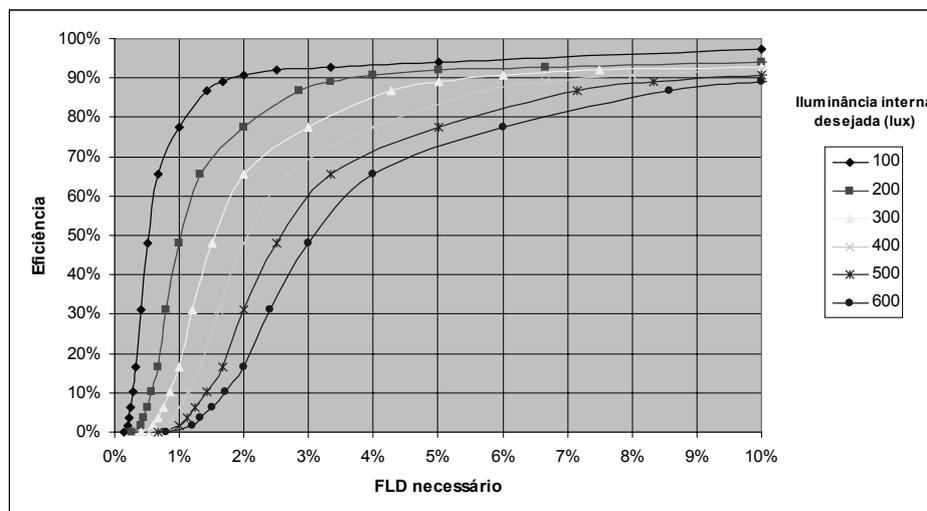
Para o estudo de Mogi das Cruzes, no entanto, não se trabalhou com a iluminância vertical da fachada, sendo necessário o cálculo do fator de janela (**F**). Adotou-se como padrão a distribuição de luminâncias para céu encoberto proposta pela CIE (1996), onde a luminância de um ponto no zênite é três vezes a de um ponto horizonte, por ser o tipo de céu onde ocorrem os menores níveis globais de iluminância. Esse céu apresenta também como vantagem o fato de ser isotrópico, ou seja, não apresenta variações de luminância em relação ao azimute, fazendo com que **F** seja constante para todas as orientações.

Para se computar o efeito da obstrução, utilizou-se o método gráfico proposto por Souza (1995) desenhando-se obstruções com ângulos de 60°, 70° e 80° na projeção estereográfica e superpondo-as ao Diagrama de Contribuição Relativa de Luz (DCRL) para céu encoberto. O valor de **F** seria o a porcentagem de céu visível. Aqui foi feita uma simplificação, pois o DRCL foi desenhado para cálculos de iluminâncias horizontais e não verticais. O erro decorrente é da ordem de 15%, o que é aceitável considerando-se que: 1) a luminância próxima ao zênite é três vezes maior do que a do horizonte, região do céu mais obstruída pelo entorno; 2) o cálculo está desconsiderando as componentes refletidas externas; 3) trata-se de um trabalho de escala urbana e 4) a razão de aspecto da janela e do ambiente não são consideradas, sendo fundamentais para cálculos mais precisos de iluminação.

A relação área envidraçada/área de piso é objeto de especificação dos códigos de obra e foi definida pela mesma equipe. Ao invés de se propor um valor fechado pra A_j/A_p , o que se fez foi elaborar uma tabela que relacionasse esta relação com a eficiência do sistema de iluminação natural e o ângulo de obstrução (θ_v). Com isso, a prefeitura pôde avaliar o impacto do ângulo de obstrução e da dimensão da janela na eficiência do ângulo

No entanto, o **FLD** não é indicador suficiente do desempenho do sistema de luz natural, sendo fundamental estabelecer o nível real de iluminância no plano de trabalho, para que se pudesse comparar melhor com os critérios normalizados. Foram utilizados os valores da norma brasileira NBR 5413, considerando-se valores entre 300 e 750 lux como níveis médios adequados para ambiente iluminados artificialmente, podendo-se utilizar iluminação localizada no caso de tarefas com requisitos maiores. Estes valores foram multiplicados por 0,6, atendendo a recomendação da norma DIN 5034 (1979), resultando em níveis médios recomendados de 180 a 480 lux.

Para determinar o **FLD** médio necessário, seguiu-se o procedimento proposto por Alucci (1992), relacionando o **FLD**, os níveis de iluminância internos requeridos e a freqüência de ocorrência dos níveis de iluminância difusa externos. Por esse procedimento, estabeleceu-se uma eficiência mínima para o sistema de luz natural que é comparada com a freqüência de ocorrência dos níveis externos ou então se encontra a eficiência do sistema pelo procedimento inverso. Por exemplo, caso se tenha a necessidade de um nível médio de 500 lux no plano de trabalho com uma eficiência de 80%, verifica-se qual o nível de iluminância externo é superado por 80% do tempo. Isso significaria que o valor no plano de trabalho seria igual ou superior a 500 lux por essa percentagem do tempo. Caso o valor seja 5.000 lux, o **FLD** necessário seria de 10%. Da mesma maneira pode-se fazer o caminho contrário, com um **FLD** de 10% e uma necessidade de 500 lux no plano de trabalho, determinar que a eficiência do sistema seria de 80%.



Fonte: Elaborado a partir da tabulação dos dados medidos pelo IAG-USP

Figura 63 – Eficiência de sistemas de luz natural para São Paulo, SP

Utilizando-se a fórmula de Fruhling e os dados de freqüência de ocorrência baseado nos resultados obtidos no item 2.4(Figura 63), foi feita a Tabela 16 correlacionando obstrução, nível médio no ambiente, eficiência do sistema e relação A_i/A_p .

Tabela 16 – Relação entre A_p/A_j , iluminância mínima, eficiência, e ângulo de obstrução

Iluminância	Eficiência	Ângulo de obstrução			
		55°	60°	70°	80°
300	60%	14 ²⁹	13	11	8
	70%	10	10	8	6
	80%	7	7	5	4
500	60%	7	7	5	4
	70%	6	5	4	3
	80%	4	4	3	2
750	60%	6	5	4	3
	70%	4	4	3	3
	80%	3	3	3	2

Embora a escolha final tenha ficado a cargo da prefeitura, foi feita uma recomendação para que se adotasse um ângulo de obstrução de 70°, que não entraria em conflito com as recomendações de insolação, e uma relação de A_j/A_p de 1/5, próxima à relação 1/6 encontrada nos códigos de obras atuais. Isso garantiria 300 lux de iluminância (180 lux com a redução de 60% para iluminação natural) por 80% do ano. É importante lembrar que esse valor refere-se à área envidraçada e não à área de vão, visto que muitas das janelas atuais têm área de iluminação efetiva muito menor que a área de vão.

²⁹ Na tabela a relação A_j/A_p foi invertida, para que se trabalhasse com números inteiros.

6

Políticas de acesso ao sol: implicações e obstáculos

Para avaliação do impacto da implantação das políticas de proteção de acesso ao sol e à luz natural foram avaliados dois casos: a norma inglesa no pós-guerra e o estudo feito para implementação do envelope solar na cidade de Los Angeles. Apresenta-se também a avaliação do impacto dos recuos propostos em Mogi das Cruzes nas densidades de ocupação. Acredita-se que o mesmo método possa ser aplicado para a avaliação de estudos em outros locais e com outros critérios.

6.1. INGLATERRA

A primeira grande crítica ao código inglês é feita por Waldram (1948) que aponta a utilização de um modelo de céu ultrapassado na sua elaboração. De fato, foi considerada uma distribuição uniforme de luminâncias, subestimado, em relação a um céu encoberto padrão CIE, a contribuição da área próxima ao zênite (que normalmente está desobstruída) e superestimando a contribuição da área próxima ao horizonte (que normalmente está obstruída). Isso geraria indicadores provavelmente mais restritivos que o necessário, mas os próprios autores admitem as limitações do código e consideram as simplificações necessárias, pois em muitos terrenos se faz a avaliação sem quem nenhum dos dois edifícios (o que obstrui o céu e o que tem o seu céu obstruído) está ainda construído. Desse modo a margem de erro seria aceitável. Waldram (1948) critica ainda a dificuldade de utilização dos indicadores, considerando-os excessivamente complexos. Como o código está em vigor até hoje, imagine-se que ao longo do tempo a adaptação aos seus critérios e procedimentos foi satisfatória.

No entanto, a disseminação de soluções de projeto que incorporassem e que utilizassem os critérios propostos da melhor maneira parece ter sido demorada. O próprio Crompton (1955) admite que o código teve impacto negativo nas densidades desejadas, devido à tradição da cultura arquitetônica inglesa (e européia) de dispor as edificações na periferia da quadra, deixando livre o centro para poços de iluminação.

A resposta ao código foi melhor em áreas com densidades médias para altas, onde tanto arquitetos quanto clientes foram simpáticos à idéia do controle. Nestes locais também os foram realizados mais projetos inovadores, aproveitando-se da flexibilidade do instrumento. No entanto, nas zonas centrais de alta densidade como o centro de Londres, onde os coeficientes de aproveitamento poderiam atingir 5,0, o resultado foi considerado desapontador. É citado como único exemplo de edifício não convencional, projetado dentro das linhas do novo código após seus dez primeiros anos de implantação, a Bucklerbury House.

Um dos grandes problemas levantados por Crompton (1955) refere-se à compatibilização entre os critérios urbanísticos e os indicadores de altura máxima permitida. Em Londres, as densidades na época eram controladas pelo *Floor Space Index*, que representa razão entre a área bruta construída de uma edificação e a área do terreno, acrescida de metade da área das

ruas vizinhas. O FSI era determinado a partir da área necessária para as diversas atividades urbanas e da área disponível de terrenos disponíveis para a instalação destas atividades, fazendo parte de um planejamento maior. Deste modo, terrenos pequenos tinham sua flexibilidade muito comprometida, sendo sugerida pelo autor uma troca do FSI pelo BDI que é a relação a área construída e a área não construída do terreno, acrescida de metade da área das ruas vizinhas. Deste modo, pode-se permitir nos terrenos pequenos a construção de edifícios mais altos que ocupassem uma área menor, dando a eles maior flexibilidade para se adequarem à densidade desejada e aos indicadores simultaneamente.

É interessante também observar que a utilização da planta aberta e a disposição perpendicular das edificações foram prontamente incorporadas tanto pela arquitetura quanto pelo planejamento urbano moderno brasileiros, podendo ser vista claramente no projeto das super quadras da cidade de Brasília, por exemplo.

6.2. LOS ANGELES

O estudo do envelope solar foi realizado por Knowles e Berry para a cidade americana de Los Angeles. Antes da sua aplicação o governo americano patrocinou um estudo para verificar as implicações da ferramenta no planejamento urbano que aponta suas principais vantagens e desvantagens (United States, 1982).

Como pontos positivos, são principalmente citadas a possibilidade de utilização, passiva ou pró-ativa, da energia solar e a uniformidade da sua aplicação fazendo com que todos os proprietários de terreno tenham restrições construtivas equivalentes e recebam também os mesmos benefícios de acesso solar. Knowles & Berry (1980) afirmam ainda que a ferramenta permite inovações arquitetônicas, apesar de incentivar o modelo “bolo de noiva” com recuos progressivos nos andares superiores. Uma outra vantagem seria a similaridade do modelo do envelope com os modelos já existentes de recuos de edificações, não apresentando portanto grande inovação nas questões legais.

Há no entanto, alguns pontos que devem ser estudados com atenção. O primeiro problema é a questão da densidade construtiva. O envelope-solar se mostrou compatível com as regiões de densidade moderada na cidade de Los Angeles, sendo argumentado que a ferramenta não deveria ser aplicada nas regiões de alta densidade, especialmente nos centros urbanos, havendo a possibilidade de que densidades proporcionadas pelo envelope sejam incompatíveis. Deve-se evitar deste modo, que o critério de acesso ao sol predomine sobre outros critérios de planejamento igualmente válidos. Algumas alternativas, no entanto, podem ser propostas. É possível, por exemplo, substituir a densidade máxima por um intervalo de densidades, com um teto e um piso para os coeficientes de aproveitamento. Outra solução é utilizar a transferência do direito de construção para garantir que a densidade desejada para uma determinada região seja atingida. Do mesmo modo, pode-se incentivar o remembramento de lotes, permitindo um maior volume do envelope.

O segundo problema está na complexidade do envelope, o que leva a discutir a capacidade da administração municipal gera-los e fiscalizar sua aplicação. Cavallezzi (1996) lembra da

diferença entre a eficácia jurídica e a eficácia social da norma. O primeiro ponto a ser colocado é a capacidade de geração do envelope, já que embora algumas das ferramentas apresentadas no item 5 sejam fáceis de serem aplicadas, a maioria delas tem geração complexa. O ideal também é que cada lote tenha seu próprio envelope, o que torna inviável a sua aplicação em cidades onde não haja sistema de geoprocessamento. Para isso há duas soluções: o desenvolvimento de programas computacionais que façam os cálculos mais complexos³⁰ ou a simplificação do instrumento, como é proposto por Assis (2000). Ainda assim, pode haver problemas na fiscalização de projetos, especialmente nas projeções dos ângulos de obstrução nos planos de projeção dos projetos, implicando a necessidade de treinamento da equipe de fiscalização, assumindo que os projetistas já estejam preparados para lidar com a questão.

6.3. MOGI DAS CRUZES

6.3.1. Densidades

A maior complexidade dos recuos propostos em relação aos códigos de obras tradicionais despertou na prefeitura da cidade uma preocupação com a densidade construtiva proposta na Lei de Uso e Ocupação do Solo e aquela que seria possível de ser atingida utilizando-se os critérios propostos. Era importante garantir que os dois instrumentos legais se complementassem, evitando restrições maiores em uma das duas legislações.

6.3.1.1. Lotes para construção de baixa renda (5x25 m)

A primeira preocupação da prefeitura de Mogi das Cruzes era com os lotes pequenos e retangulares, com dimensões de 10 x 25 m, bastante comuns na periferia da cidade e que eram, legalmente, subdivididos. Embora em teoria se tratasse de um único lote com duas unidades habitacionais, na prática o que ocorre é a existência de lotes de 5 de frente com 25 de profundidade, voltados especialmente para a população mais pobre. Sem entrar no mérito desse tipo de parcelamento, que torna muito difícil garantir a qualidade ambiental das edificações, fez-se um estudo para mostrar que era possível construir nesse tipo de terreno, embora seja necessário empregar soluções projetuais mais criativas. Nos estudos feitos tirou-se sempre partido da altura máxima permitida na divisa.

Os terrenos orientados no sentido NO-SE ou NE-SO não apresentam qualquer tipo de problema, pois permitem alturas de até 5,70 na divisa, permitindo construir praticamente dois andares, desde que se tire partido da inclinação do telhado. Nesse caso, para o melhor aproveitamento do terreno, a edificação deve ser praticamente toda encostada na divisa, devendo utilizar-se ambientes voltados para poços de ventilação e iluminação. Observa-se que as dimensões dos poços de ventilação e iluminação também foram determinadas seguindo o mesmo critério de recuos no seu dimensionamento e garantindo, por isso, a mesma penetração de sol e luz natural de uma fachada externa.

³⁰ Já existem exemplos como o apresentado por Capeluto & Shaviv (2001)

No caso de terrenos orientados no sentido N-S também não há grandes problemas, os recuos frontais e de fundo serão maiores, mas sendo essa a maior dimensão do terreno isso pode ser facilmente assimilado pelo projeto, podendo seguir a mesma recomendação proposta para os terrenos NO-SE.

O caso mais problemático é o dos lotes orientados no sentido L-O, com as testadas laterais voltadas para norte e sul. A fachada sul apresenta recuos grandes e permite apenas um andar colado na divisa (altura máxima da divisa de 3,20m). Ainda assim, observou-se que a construção de um andar está assegurada, podendo inclusive apresentar um segundo andar com terraço e ambientes com até 2,00m de largura.

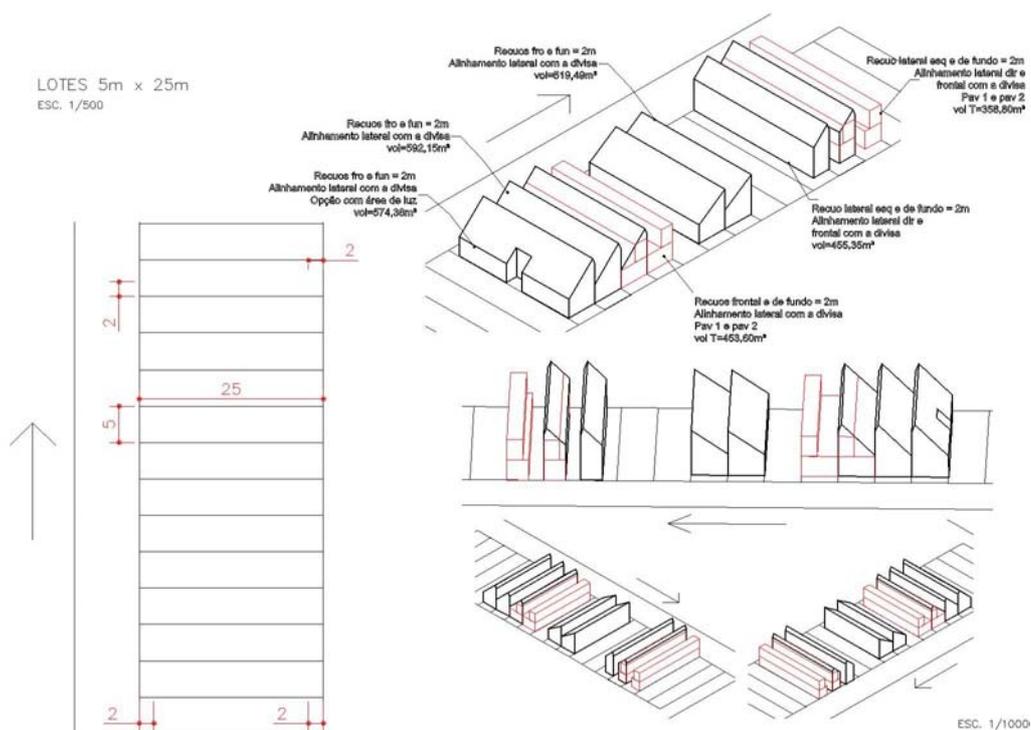
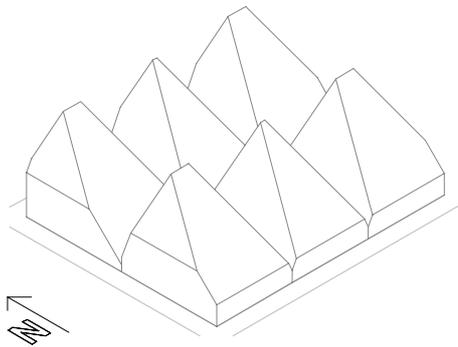


Figura 64 – Estudo de ocupação de lotes de 5 x 25 m utilizando os recuos propostos

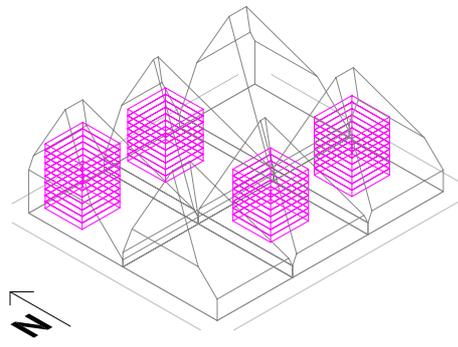
6.3.1.2. Lotes para construção de edifícios de múltiplos pavimentos (40x50 m)

O segundo caso a ser estudado era o de terrenos de 40 x 50 m, utilizados na construção de edifícios mais altos e alvo de grande especulação imobiliária. Para mostrar a viabilidade deste tipo de terreno, foi realizado um estudo que construiu um volume a partir dos recuos e verificou o aproveitamento possível. Foram estudadas quadras orientadas no sentido N-S, L-O e NO-SE (que na verdade representam a orientação NE-SO espelhada, não sendo necessário fazer um estudo específico para essa orientação de terreno) No caso foi estudada a ocupação do terreno por edifícios convencionais com plantas quadradas de 20 x 20 m ou plantas retangulares de 38 x 10,5 m, ambos com uma área de cerca de 400 m², ou 4 unidades de 100 m² por andar. Também foi feito um estudo da ocupação máxima do volume, dividindo sua capacidade pelo pé direito (3,00m) para se encontrar a área máxima que pode ser construída. A área encontrada dessa forma é apenas 10% maior do que a que seria encontrada caso se construíssem pavimentos com paredes retas que preenchessem todo o volume.

A Figura 65, a Figura 66 e a Figura 67 mostram o volume obtido com a aplicação da fórmula e o resultado da ocupação com edifícios convencionais. Os terrenos que estão vazios têm o mesmo volume e forma de um terreno simétrico a ele, estando apenas espelhado.

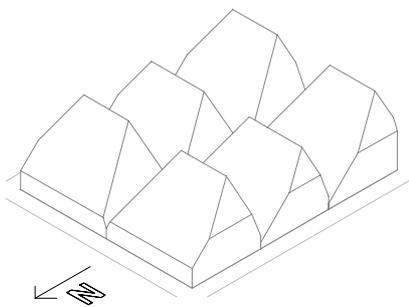


(a) Orientação N-S (volume)

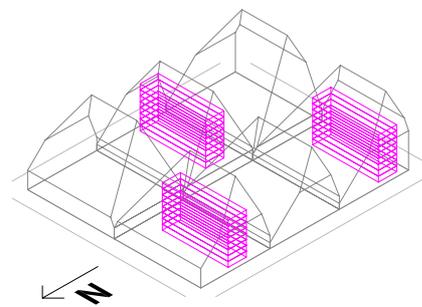


(b) Orientação N-S (convencional)

Figura 65 – Estudo de ocupação de lotes N - S de 40 x 50 m utilizando os recuos propostos

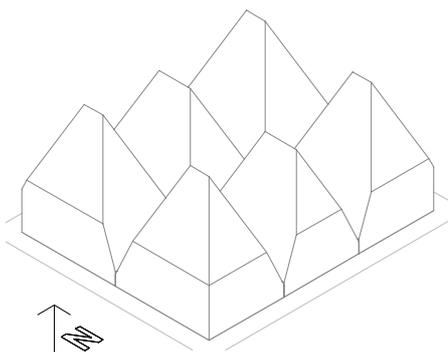


(a) Orientação L-O (volume)

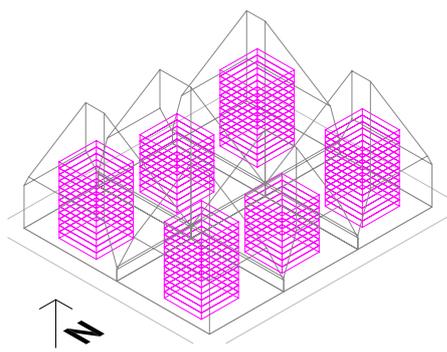


(b) Orientação L-O (convencional)

Figura 66 – Estudo de ocupação de lotes L - O de 40 x 50 m utilizando os recuos propostos



(e) Orientação NO-SE (volume)



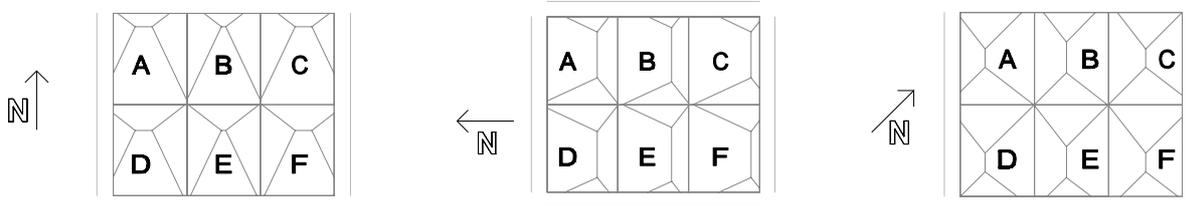
(f) Orientação NO-SE (convencional)

Figura 67 – Estudo de ocupação de lotes NO SE de 40 x 50 m utilizando os recuos propostos

Observa-se que novamente o menor aproveitamento é tido na orientação L-O, especialmente nos terrenos localizados no meio do quarteirão. Para mostrar a diferença entre terrenos com diversas orientações, foi feita uma tabela comparativa com a área construída e o coeficiente de aproveitamento para cada uma das soluções. Observar que no caso do estudo com edificações

convencionais foi estudado o número de pavimentos que poderiam ser construídos, sendo este um parâmetro de compreensão mais imediata. Para chegar à área construída, basta multiplicar esse valor por 400 m².

Tabela 17 – Estudo para coeficiente de aproveitamento em lotes de 40x50m



		Orientação maior dimensão					
		N - S		L - O		NO - SE	
Tipo de ocupação	Lote	Área construída	Coeficiente de aprov.	Área construída	Coeficiente de aprov.	Área construída	Coeficiente de aprov.
Convencional	A	10 pav	2,0	8 pav	1,6	12 pav	2,4
	B	8 pav	1,6	8 pav	1,6	9 pav	1,8
	C	9 pav	1,8	8 pav	1,6	12 pav	2,4
	D	10 pav	2,0	8 pav	1,6	12 pav	2,4
	E	8 pav	1,6	8 pav	1,6	9 pav	1,8
	F	9 pav	1,8	8 pav	1,6	12 pav	1,8
Ocupação máxima	A	14600 m ²	7,0	14300 m ²	7,0	20300 m ²	10,0
	B	12950 m ²	6,0	11600 m ²	5,5	17400 m ²	8,5
	C	14600 m ²	7,0	13300 m ²	6,5	20700 m ²	10,0
	D	15400 m ²	7,5	14300 m ²	7,0	20100 m ²	10,0
	E	13700 m ²	6,5	11600 m ²	5,5	17200 m ²	8,5
	F	15400 m ²	7,5	13300 m ²	6,5	20450 m ²	10,0

O resultado demonstrou a viabilidade dos recuos, mesmo utilizando-se a ocupação convencional. Alturas de 8 a 10 pavimentos são bastante razoáveis para cidades de médio porte e o coeficiente de aproveitamento de 1,6 pode ser aumentado até 5 vezes caso o projeto seja mais elaborado e melhore a ocupação feita do volume resultante. Como a lei de uso e ocupação prevê coeficientes de no máximo 5, a restrição dos recuos não deverá ser problema para a questão da densidade construtiva do município.

6.3.1.3. Implementação do código

A proposta inicial da equipe de consultoria era sugerir um código de obras por desempenho e não normativo como tem sido até hoje. Por esse modelo, seriam estabelecidos critérios de desempenho e maneiras de verifica-lo, ficando a cargo do projetista encontrar soluções para atingir o critério proposto. No entanto várias propostas encontraram resistências por parte da administração pública na sua implementação. Relatam-se aqui algumas delas, não só relativas aos recuos progressivos, mas também a outros aspectos do código.

A primeira resistência encontrada foi a política de desburocratização que vinha sendo conduzida. O objetivo era desafogar o setor de aprovação da prefeitura com a lei de contorno, que significa que os projetos para edificações residenciais unifamiliares não passariam por nenhuma verificação que não pudesse ser feita somente com a implantação do edifício.

Considerava-se que a qualidade da habitação unifamiliar é de inteira responsabilidade do proprietário e do construtor, não sendo papel da prefeitura tomar parte nessa fiscalização. Edificações mais complexas poderiam passar revisões mais cuidadosas, mas a demanda da prefeitura ainda era por um texto normativo, que estabelecesse parâmetros construtivos e dimensões diretamente aplicáveis ao projeto e não por modos de avaliação de desempenho.

Para contornar essa questão foi proposta uma implementação em três níveis. O primeiro nível se referia à relação do edifício com a vizinhança e seria de observância obrigatória por todos os tipos de construção, devendo portanto ser passível de verificação tendo-se em mãos somente a implantação do edifício. Nessa categoria foi incluído o estudo dos recuos. O segundo nível se referia a instruções normativas para o interior das edificações, tais como dimensões de cômodos e aberturas. Seria requisito para aprovação de todas as categorias de uso, mas as edificações unifamiliares estariam liberadas da sua avaliação, ficando a responsabilidade a cargo do projetista ou do proprietário. No terceiro nível, procedimentos de verificação de desempenho seriam propostos e seriam requisitos facultativos, voltados principalmente para empreendimentos mais complexos interessados em uma maior qualidade ambiental. Propôs-se também a criação de um certificado de conformidade para as edificações que cumprissem todos os critérios, com algum tipo de premiação em termos de redução da carga tributária ou aumento de potencial construtivo.

O segundo problema foi o receio das dificuldades de implementação devido à falta de capacitação técnica dos projetistas da cidade e a dificuldade de treinamento do corpo técnico da prefeitura que iria realizar a fiscalização. Alguns parâmetros foram descartados por serem de difícil avaliação pela equipe e procedimentos complexos foram sistematicamente rejeitados e mesmo o grau de simplificação final atingido em algumas áreas não ficou a contento. Ainda assim foi apresentado um procedimento para avaliação de conforto térmico e luminoso da edificação, reduzido a uma planilha que usava de aritmética simples e material tabelado para verificar o desempenho dos prédios.

Foi levantada também a questão da densidade construtiva, politicamente delicada devido à influência política dos construtores. Era necessário também compatibilizar as densidades resultantes do código com as propostas na lei de uso e ocupação do solo, que estava sendo elaborada simultaneamente. A prefeitura no entanto julgou razoáveis as restrições considerando o resultado do estudo mostrado no capítulo anterior.

Um último fator analisado foi a interferência na propriedade privada, que deveria ser minimizada a todo custo. As restrições propostas no interior das unidades habitacionais foram sistematicamente vetadas e a responsabilidade passada aos usuários e construtores. Por isso também houve uma preocupação muito grande com as exceções, evitando penalizar pessoas que não precisariam adotar recuos. Por isso foram liberados da verificação terrenos cujos vizinhos tenham inclinação superior a 45° ou sejam áreas onde a construção é proibida.



Obstrução e Consumo Energético: Estudos Exploratórios

7.1. OBSTRUÇÃO 1.0: ESTRUTURA

Com a verificação dos procedimentos existentes na literatura foi possível gerar o procedimento para a cidade de Mogi das Cruzes que, embora simplificado, respondeu às necessidades da administração pública local. Este estudo levou em conta apenas a iluminação natural e a necessidade mínima de sol psicológica e para desinfecção. Para uma avaliação mais completa, aprofundando-se a avaliação da iluminação e incluindo-se os estudos térmicos, foi elaborado um software programado no *Microsoft Excel*, denominado **Obstrução 1.0**, colocado em CD anexo.

O objetivo deste software é calcular o impacto que uma nova edificação terá no consumo energético anual do entorno. Cada vizinho é representado por uma célula de teste, um ambiente padrão colocado no ponto médio de cada divisa do terreno, com uma única abertura voltada para a edificação cujo impacto deseja-se avaliar (Figura 68).

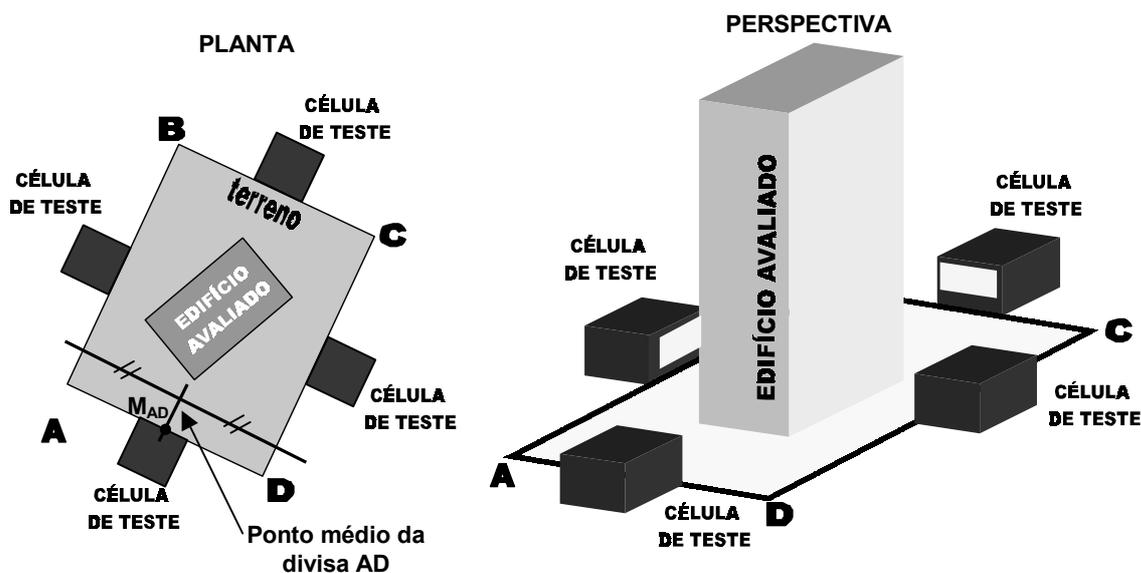


Figura 68 – Distribuição das células de teste

O consumo de energia anual de cada célula é calculado com base nos valores horários de radiância, luminância, temperatura e umidade, utilizando-se da modelagem matemática apresentada nos capítulos 2 a 4 e totalizado para um ano. O consumo de cada vizinho é dado pelo consumo da célula multiplicado pela dimensão da divisa do terreno sobre a qual ele se localiza. O edifício cujo impacto deseja-se avaliar é definido pelos vértices do terreno (A, B, C e D), pelos vértices do edifício (1, 2, 3 e 4) e pela sua altura, conforme mostrado na Figura 69.

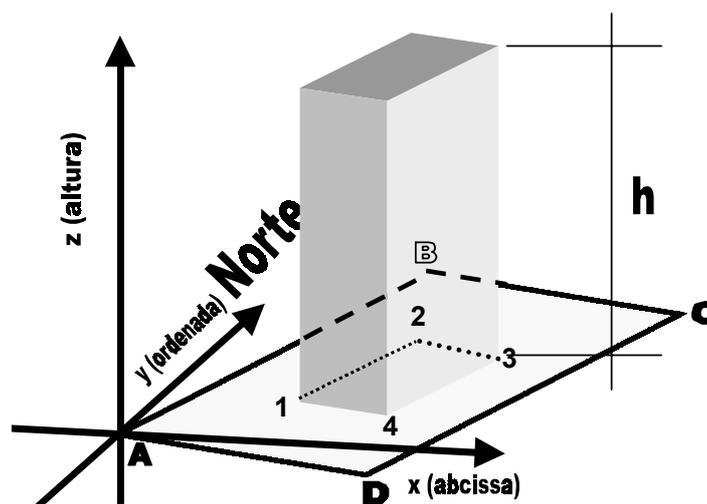


Figura 69 – Dados do terreno a serem entrados no programa - esquema

O *software* tem dois tipos de usuário: o planejador urbano (usuário avançado) e o leigo (usuário restrito). O primeiro insere dados climáticos e características da célula de teste, calibrando o programa para o usuário restrito, que avalia apenas a edificação que ele está projetando.

Tabela 18 – Dados de entrada e de saída do *Obstrução 1.0* para usuários restritos e avançados

	Entrada		Saída
	Usuário restrito	Usuário avançado	
Obstrução 1.0	<ul style="list-style-type: none"> Vértices do terreno A, B, C e D Vértices do edifício: 1, 2, 3 e 4 Altura do edifício 	<ul style="list-style-type: none"> Largura, comprimento e altura da célula de teste Relação Área de Vidro/ Área de parede (WWR) Características dos materiais (U, α, Str, TL) Carga interna Dados climáticos: Posição do sol, temperatura do ar, emissividade do céu e distribuição de luminâncias e radiancias 	<ul style="list-style-type: none"> Varição absoluta no consumo de energia total das edificações vizinhas Varição percentual no consumo total das edificações vizinhas Varição absoluta e percentual no consumo de por uso Varição absoluta no consumo para cada vizinho, considerando-se um por lateral do terreno

Observa-se que o programa *Obstrução 1.0* não apresenta os modelos para caracterização do céu incluídos. Isso porque esses modelos exigem cálculos pesados e foram colocados em planilhas separadas para evitar problemas ao se tentar abrir as planilhas. Desse modo, o software só é aplicável, atualmente, para a cidade de São Paulo.

Para fazer a adaptação para novas cidades, o usuário avançado deve contar também com as planilhas *Posição do Sol*, *Céu Luz 01 e 02*, *Céu Luz Difusa*, *Iluminação Direta*, *Luz FINAL*, *Céu Radiação 01e 02*, *Céu Radiação Difusa*, *Radiação Direta* e *Radiação FINAL*, também colocadas em CD anexo. Os dados de entrada e saída das diversas planilhas é mostrado na Tabela 19. O cálculo deve ser feito utilizando-se as planilhas na ordem em que elas são mostradas na tabela.

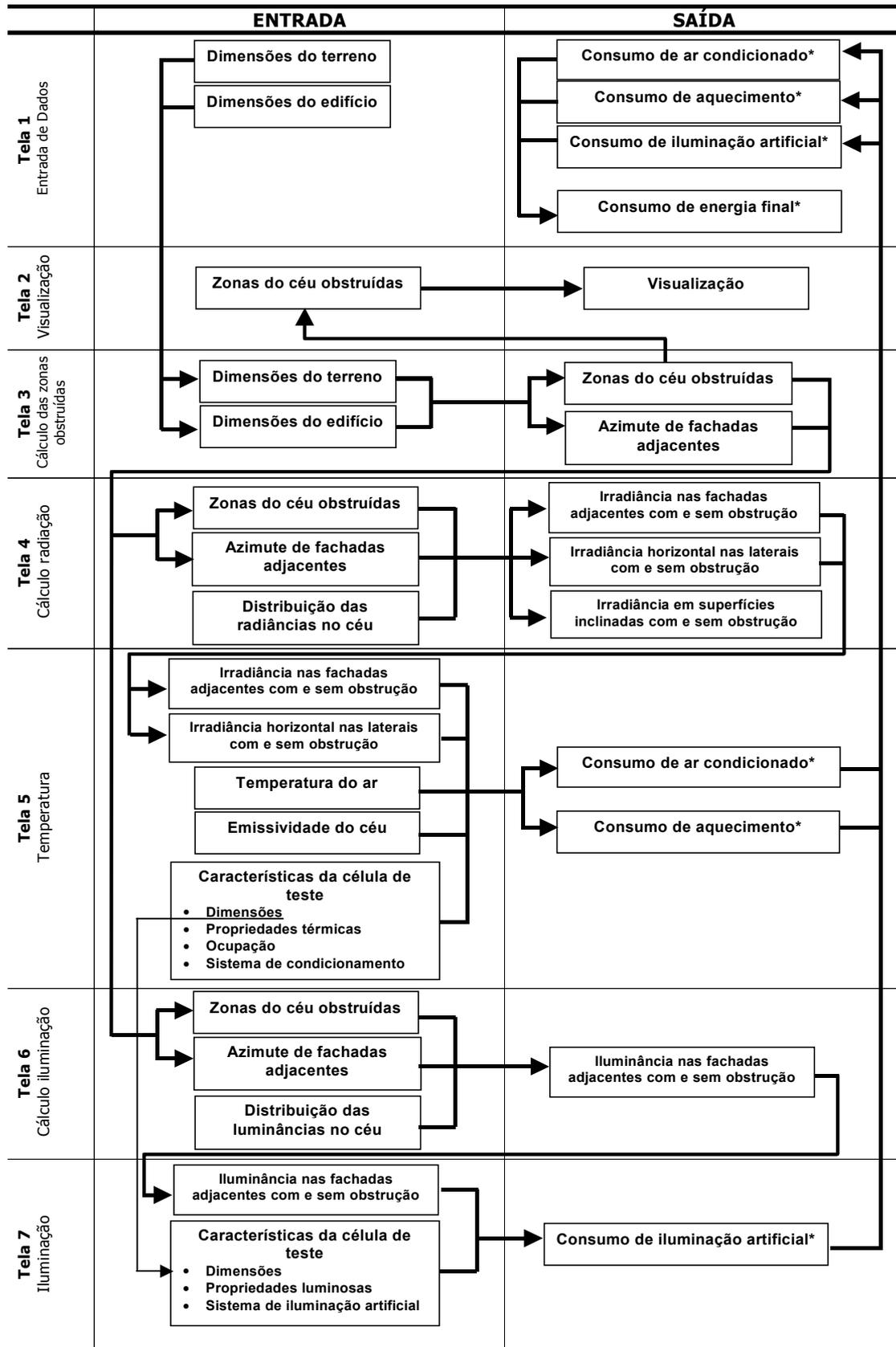
Tabela 19 – Dados de entrada e de saída para dados climáticos e modelagem de céu

Nome da Planilha	Entrada	Saída
Posição do Sol	<ul style="list-style-type: none"> • Latitude da cidade estudada • Temperatura do ar medida hora a hora • Umidade relativa medida hora a hora • Irradiância Global medida hora a hora³¹ • Irradiância Difusa medida hora a hora³² 	<ul style="list-style-type: none"> • Altura e azimute solar hora a hora • Irradiância direta • Eficácia luminosa direta e difusa • Iluminância global, direta e difusa • Emissividade do céu • Índice de limpidez e de claridade
Céu Radiação 01	<ul style="list-style-type: none"> • Altura e azimute solar hora a hora • Índice de limpidez e de claridade • Irradiância global 	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficientes para cálculo da distribuição de radiação difusa no céu
Céu Radiação 02	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficientes para cálculo da distribuição de radiação difusa no céu 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição de radiação difusa no céu para os pontos centrais das zonas
Céu Radiação Difusa	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição de radiação difusa no céu para os pontos centrais das zonas 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição da radiação difusa no céu
Radiação direta	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição de radiações diretas no céu • Eficácia luminosa da luz direta 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição de radiação direta no céu
Radiação FINAL	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição da radiação difusa no céu • Distribuição de radiação direta no céu 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição total de radiações no céu
Céu Luz 01	<ul style="list-style-type: none"> • Altura e azimute solar hora a hora • Iluminância global 	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficientes para cálculo da distribuição de luz difusa no céu
Céu Luz 02	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficientes para cálculo da distribuição de luz difusa no céu 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição relativa horária de luminância difusa no céu
Céu Luz Difusa	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição relativa horária de luminância difusa no céu 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição absoluta de luminância difusa no céu
Iluminação direta	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição de radiação direta no céu • Eficácia luminosa da luz direta 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição de luminância direta no céu
Luz FINAL	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição absoluta de luminância difusa no céu • Distribuição de luminância direta no céu 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição total de luminâncias no céu

O procedimento para cálculos de céu e de dados climáticos ainda é complexo. Posteriormente objetiva-se reescrever o programa em outra linguagem para reduzir o seu tamanho e permitir incorporação das demais planilhas no **Obstrução**. Quando disponíveis os dados climáticos da cidade estudada, o fluxo de dados do **Obstrução 1.0** se dá de acordo com a Figura 70.

³¹ Caso não estejam disponíveis os dados horários de irradiância global, ver capítulo 2 para referências sobre como calculá-los

³² Idem para os dados de irradiância difusa. É também possível obtê-los a partir dos dados de irradiância global.



*Observa-se que o consumo citado refere-se sempre ao consumo de energia anual das edificações vizinhas

Figura 70 – Fluxo de dados no programa *Obstrução 1.0*

7.2. OBSTRUÇÃO 1.0: APRESENTAÇÃO E EXEMPLO DE APLICAÇÃO

O programa está organizado em 7 telas, sendo que apenas duas são utilizadas pelos usuários restritos. Na primeira delas, a de *Entrada de dados*, são inseridos os dados da edificação e exibidos os resultados do cálculo (Figura 71).

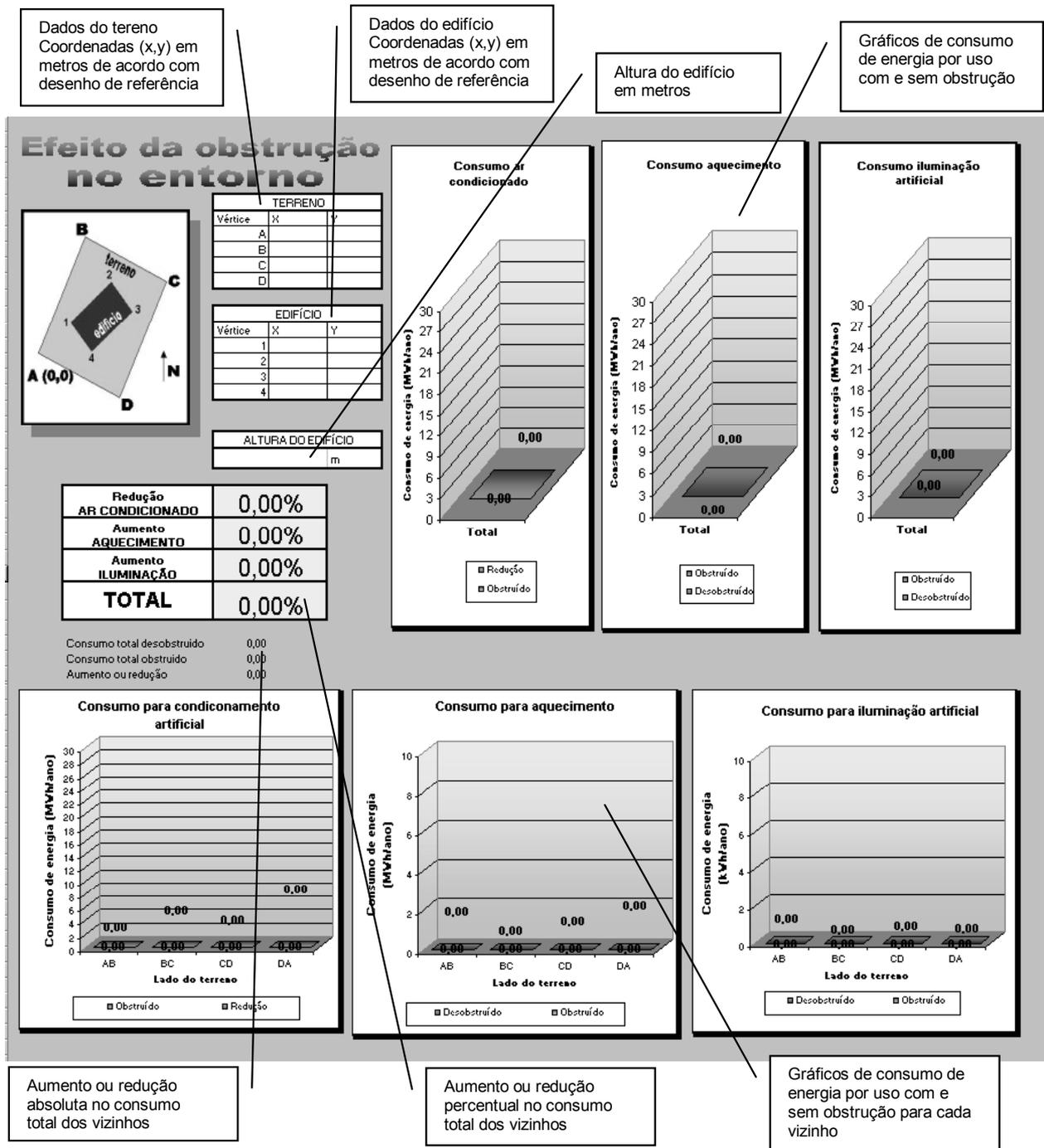


Figura 71 – Planilha de entrada de dados do obstrução

Para a avaliação do desempenho energético de uma edificação vizinha é necessário, em primeiro lugar, determinar as características da célula de teste. Estes dados são inseridos pelo

usuário avançado, de acordo com as características das edificações na cidade onde se aplica o procedimento.

Para uma primeira estimativa, considerou-se uma célula de 6 m de largura por 6 m de profundidade, baseada na zona passiva proposta pelo *LT Method* (Commission, 1994). O pé-direito foi considerado 3 m, valor médio para as edificações brasileiras, podendo ir de 2,5 m para edificações residenciais a 4,5 m em edifícios comerciais. Os valores de **U** foram estabelecidos de acordo com o projeto de norma de zoneamento bioclimático para habitações sociais (Comitê, 2003), como sendo 3,6 W/(m².°C) para elementos opacos verticais, 4,9 W/(m².°C) para elementos transparentes e 2,0 W/(m².°C) para a cobertura, tanto para fluxo ascendente quanto para descendente. O vidro escolhido foi aquele que apresentava o melhor desempenho termo-luminoso, o vidro verde³³, com **TL** de 0,71 e **S_{tr}** de 0,4. Para os sistemas artificiais, consideraram-se dois sistemas altamente eficientes: 12 W/m² de potência instalada de iluminação e 10,36 kJ/Wh para o sistema de ar condicionado. A absorção da parede e da cobertura foi considerada igual, atribuindo-se um valor intermediário, 0,5 para ambas. Como último parâmetro fixo, considerou-se uma renovação de apenas 1 volume por hora, considerando-se ventilação higiênica e infiltração por fresta. Como o parâmetro de avaliação é o consumo de energia, a renovação de ar apenas prejudicaria a eficiência do ar condicionado, e por isso foi mantida em um mínimo. Considerou-se também a princípio uma edificação de inércia intermediária, com um **m** de 0,5.

Para o primeiro estudo, serão desconsideradas as cargas internas e a relação área de vidro e área total de parede (*window wall ratio - WWR*) será de 0,5. como temperatura de conforto, considerou-se a temperatura neutra com base na média dos últimos 30 dias com tolerância de 2°C para calor (**T_n + 2**) e 4°C para frio (**T_n - 4**) para frio.

As características da célula de teste são definidas nas tela 5 e 7. Observa-se que os valores comuns às duas planilhas são atualizados pelo usuário na tela 5 (*Temperatura*) e automaticamente transferidos para a tela 7 (*Iluminação*). Na Figura 72 observam-se os dados de entrada da tela 5 – *Temperatura*, com os dados a serem informados pelo usuário marcados em cinza.

Dimensão da célula	h	3 m	Uopaco	3,6	
	L	6 m	Utransp	4,9	
	C	6 m	Ucob	2,0	
	WWR	0,5	α	0,5	
	Str vidro	0,4	Eficiência A	10,36 kJ/Wh	
	Renovações	1 Volume/h	m	0,5 k.A cob	72 Qi
qv	35,64	Qsv	4,57 k*A opaco	44 Qi total	0
qc	148,50	Qsh	2,16 k*A trans	44	
Qso	0,97	σ	5,67E-08	TI temp s	2
Qst	3,60	ε sup.	0,9	TI temp i	4

Figura 72 – Características da célula de teste na tela 5 que calcula o consumo de ar condicionado

³³ Ver Alucci (2004)

Na tela 7, seria necessário entrar apenas com os dados de transmissão luminosa do vidro, potência instalada do sistema de iluminação artificial e nível de iluminância de referência.

Dimensão do bloco	h	3 m	U _{luz}	0,4
	L	6 m	τ vidro	0,71
	C	6 m	Nível de referência	300 lux
	WWR	0,5	Consumo de energia	12 W/m ²

Figura 73 – Características da célula de teste na tela 7 que calcula o consumo de iluminação artificial

Os dados do céu são transferidos dos arquivos *Luz FINAL.xls* e *Radiação FINAL.xls* no mesmo formato. Devem também ser inseridos os dados de temperatura e temperatura de céu, retirados do arquivo *Posição do Sol.xls* para a coluna apropriada na Tela 5.

Com estas informações é possível inserir as informações do edifício cujo impacto no entorno deseja-se avaliar. A título de exemplo, será utilizado um edifício de 60 x 60 m centralizado em um terreno de 84x 84 m, orientado no sentido norte-sul e com altura de 12 m (Figura 74).

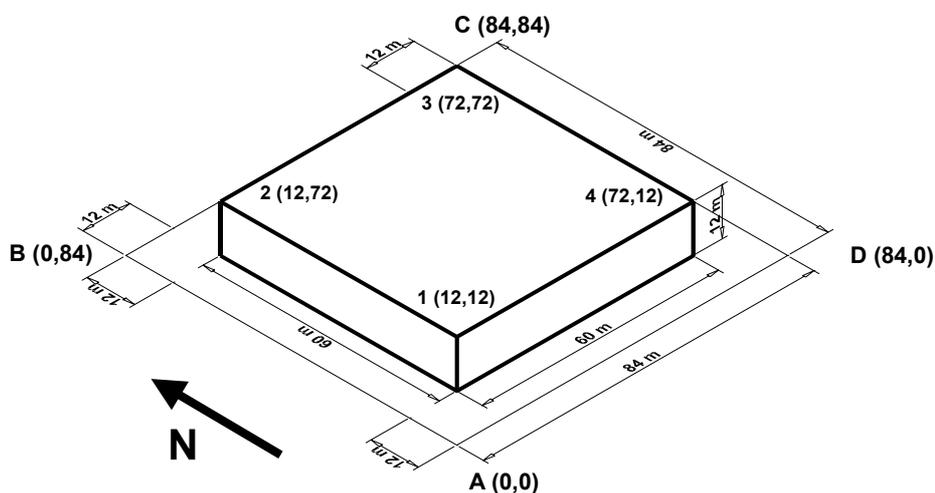


Figura 74 – Perspectiva do edifício exemplo com dados para inserção no *Obstrução 1.0*

Os dados do terreno inseridos na tela 1 são transferidos para a tela 3 – *Cálculo das zonas obstruídas*, onde é calculada a obstrução que o prédio causa no ponto médio de cada linha limite do seu terreno, conforme procedimento mostrado no item 3.2. O cálculo da obstrução é feito zona a zona para cada ponto médio e ao fim tem-se uma planilha onde é atribuído um Fator de Obstrução (FO) 0, caso esteja obstruída, e 1, caso não esteja obstruída pelo edifício em questão (Figura 75).

Obstrução p/	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7
MAB	1	1	0	0	0	0	0
MBC	1	1	1	1	0	0	0
MCD	1	1	1	1	1	1	1
MDA	0	0	0	0	0	0	0

Figura 75 – Exemplo do resultado final da tela 3

A planilha calcula também o azimute para fachadas paralelas aos limites do terreno. Este dado será utilizado no cálculo do consumo de energia das células de teste. O resultado da planilha 3 pode então ser visualizado pelo usuário na Tela 2 – *Visualização*, em uma projeção cilíndrica simplificada (Figura 76). A rotação da visualização em projeção cilíndrica – os azimutes das zonas estão na vertical e a altitude na horizontal – se deveu a limitações no programa.

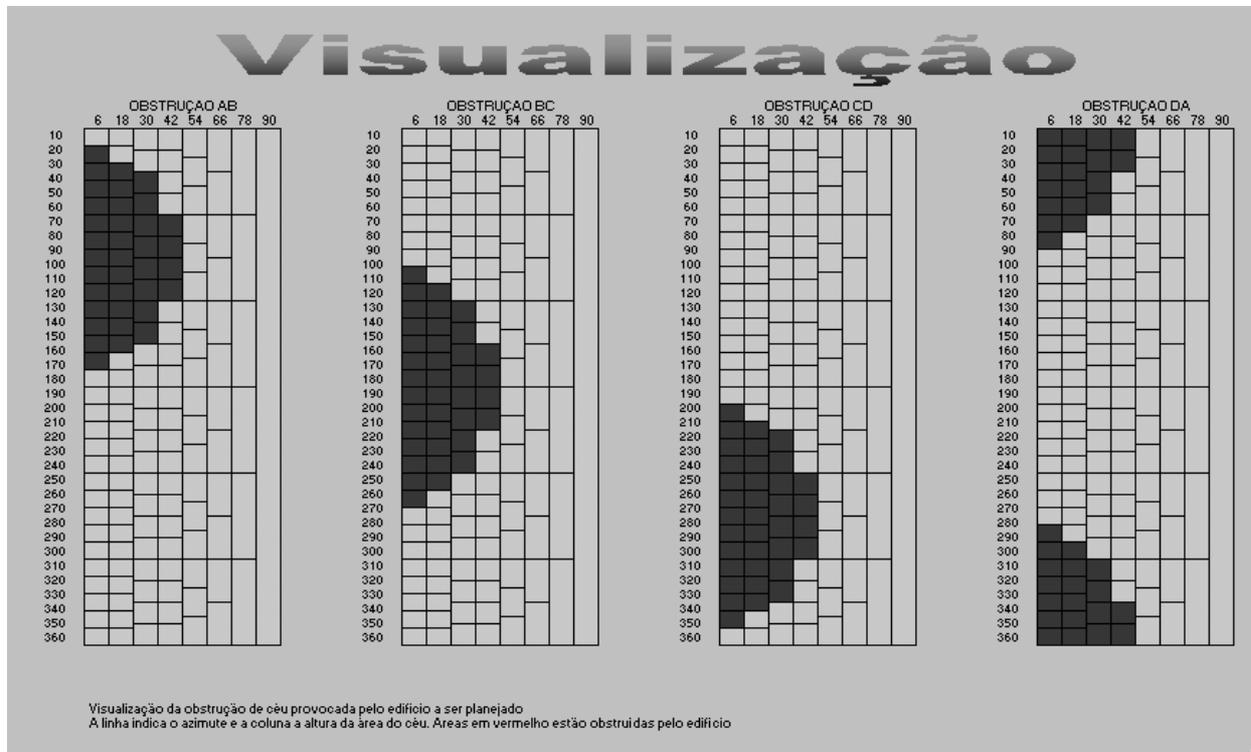


Figura 76 – Obstrução causada pelo edifício exemplo no ponto médio da janela das células de teste

No caso do edifício exemplo tem-se o mesmo ângulo de obstrução horizontal e vertical (aproximadamente 160° e 45°, respectivamente) para todas as células, devido à sua simetria.

O resultado da Tela 3 é passado para as Telas 4 e 6, que contêm respectivamente a distribuição de radiâncias e luminâncias no céu hora a hora. É calculada a irradiância obstruída e desobstruída (G_{segO} e G_{segD}) em superfícies verticais e horizontais e a iluminância obstruída e desobstruída (E_{segO} e E_{segD}) em superfícies verticais localizadas em cada limite do terreno, que serão as fachadas expostas das células de teste com e sem obstrução. O cálculo é feito pelo somatório da contribuição de cada zona, multiplicado pelo fator de obstrução (**FO**) (0 ou 1). Ressalta-se, deste modo, que a componente refletida é desprezada neste estudo. Para o lado AB ter-se-ia:

$$E_{ABO} = \sum_{1-145} (E_{vz} \cdot FO) \quad (W) \quad \text{Equação 85}$$

$$G_{ABO} = \sum_{1-145} (G_{vz} \cdot FO) \quad (W) \quad \text{Equação 86}$$

Foi feito também o cálculo de irradiância para superfícies orientadas para o norte e inclinadas para a latitude (ϕ) e pra latitude mais 10° ($\phi + 10^\circ$), para possibilitar a inclusão do cálculo de painéis de aquecimento de água e fotovoltaicos futuramente. O resultado na tela 4 é mostrado

na Figura 77. A tela 6 apresenta configuração semelhante, mas só é calculada a iluminância vertical.

D. J. Hora	TODAS				MAB				MBC				MCD				MDA						
	S/Obstr.	LAT	LAT+10	V	S/Obstr.	V	H	LAT	LAT+10	V	S/Obstr.	V	H	LAT	LAT+10	V	S/Obstr.	V	H	LAT	LAT+10		
1 0																							
1 1																							
1 2																							
1 3																							
1 4																							
1 5																							
1 6																							
1 7	122	92	75	17	7	119	89	72	77	62	117	90	73	274	15	35	32	30	19	3	113	78	60
1 8	277	239	214	39	16	270	232	206	99	68	266	236	210	376	45	99	90	84	48	9	255	206	176
1 9	209	192	178	56	24	200	182	168	85	47	196	187	174	152	87	186	170	157	70	16	179	145	125
1 10	323	301	282	86	36	308	286	267	119	63	303	294	276	187	114	298	277	258	110	27	275	227	199
1 11	649	607	564	128	63	630	587	543	157	87	624	598	556	241	161	623	581	538	155	42	579	500	445
1 12	695	649	602	148	86	676	630	582	145	83	673	642	596	148	86	676	630	582	148	43	628	550	492
1 13	657	611	565	217	159	638	592	546	119	68	639	605	559	94	47	643	597	550	117	34	605	532	477
1 14	173	160	149	99	67	162	149	138	55	31	165	157	146	35	14	167	154	142	49	14	153	129	114
1 15	93	84	77	72	46	83	75	68	33	20	89	83	76	18	7	90	81	74	24	7	83	69	60
1 16	151	128	113	220	25	43	39	35	49	36	147	127	111	13	5	148	126	110	17	4	143	117	100
1 17	57	43	36	121	9	19	17	16	36	28	54	42	35	8	3	55	42	34	10	2	52	36	28
1 18	8	7	7	8	2	7	6	6	5	2	7	7	7	3	2	8	7	6	3	1	6	5	4
1 19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 20																							
1 21																							
1 22																							
1 23																							
2 0																							
2 1																							
2 2																							
2 3																							

Figura 77 – Cálculo da radiação horária incidente no dia 01/01 nas fachadas e na cobertura das células de teste com e sem obstrução

As telas 5 e 7 calculam o consumo de ar condicionado e iluminação artificial, utilizando as equações do capítulo 4. Trabalha-se apenas com quatro células, localizadas no ponto médio de cada linha limite do terreno³⁴. É calculado o consumo hora a hora e totalizado o consumo anual da célula. O consumo anual é multiplicado pela dimensão daquele lado do terreno e dividida pela largura da célula. Deste modo, atribui-se um peso maior para o consumo do maior lado do terreno. Visto que haverá uma maior área de vizinhança afetada. O resultado final é mostrado novamente na tela 1 (Figura 78).

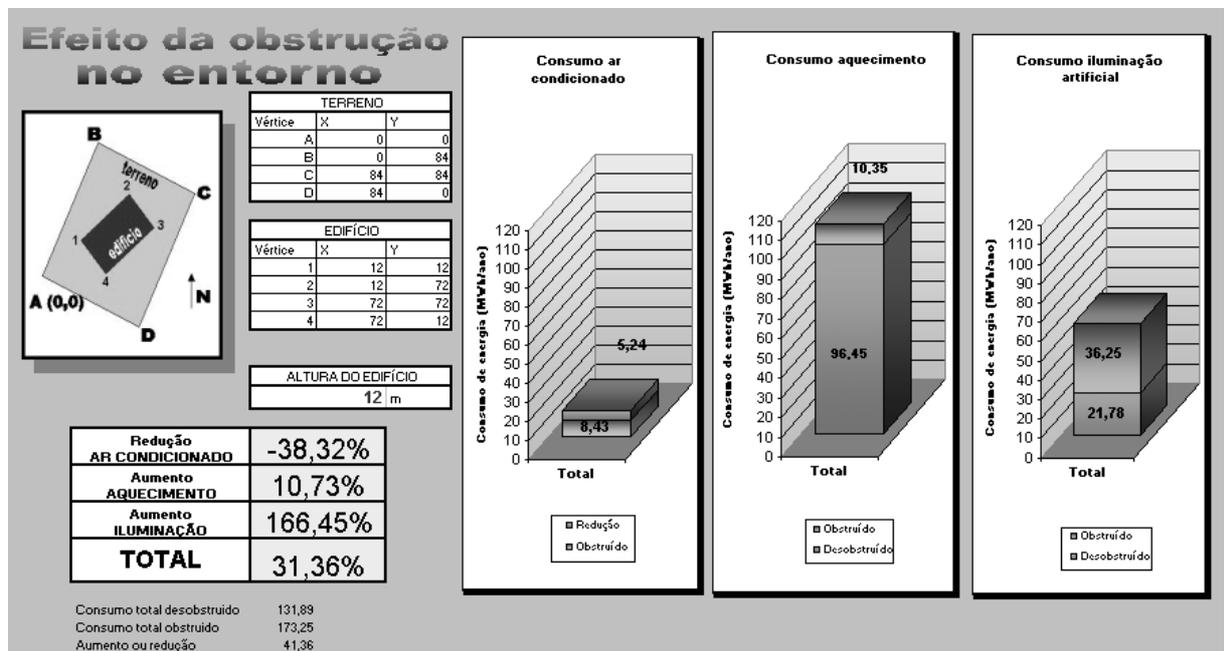


Figura 78 – Resultado da avaliação de impacto do edifício exemplo

³⁴ Na primeira versão do software os terrenos têm apenas quatro vértices e planos e edifícios, quatro lados. É possível permitir, no futuro, geometrias mais complexas, mas isso resulta em aumento no tempo de processamento.

Observa-se que o edifício exemplo reduz o consumo de ar condicionado total das edificações vizinhas de 13,73 MWh por ano para apenas 8,43 MWh/ano, uma redução de 38,32%. No entanto, o consumo para aquecimento e para iluminação é aumentado em 46,6 MWh/ano. O consumo de iluminação artificial do entorno mais do que dobra, sendo o principal responsável pelo balanço negativo. Deste modo, a edifício exemplo estaria aumentando o consumo energético dos vizinhos em 41,46 MWh/ano, ou seja, um aumento de 31,36% em relação aos 131,83 MWh/ano que o entorno consumiria caso o edifício não existisse.

7.3. ESTUDOS EXPLORATÓRIOS

Em um estudo urbano, no entanto, dados como materiais de fechamento e ocupação interna nem sempre estarão disponíveis, sendo mais interessante considerar um usuário padronizado a um real. As condições típicas das edificações locais são representadas pelos parâmetros da célula de teste e são variáveis importantes na avaliação do impacto da obstrução. Estes parâmetros podem ser obtidos a partir de estudos estatísticos que levantem as condições médias dos ambientes construídos na cidade em questão. Deste modo foram realizadas simulações, utilizando-se o **Obstrução 1.0** para se avaliar o peso de algumas variáveis no desempenho energético final dos ambientes e na influência de obstruções externas neste desempenho.

Utilizou-se como parâmetro nas simulações o mesmo edifício teste proposto no item anterior (ver Figura 74, p. 132). Isso por que ele resulta no mesmo ângulo de obstrução para todas as fachadas vizinhas e por que o seu ângulo de obstrução horizontal é próximo de 180°, aproximando-se de uma obstrução infinita. Os primeiros estudos, no entanto, foram realizados sem considerar obstrução, variando-se somente os parâmetros da célula de teste.

7.3.1. Variação de WWR e Q_i

Em primeiro lugar, variou-se a proporção de área transparente e área opaca na fachada (**WWR**) e a carga interna (Q_i).

O **WWR** foi fixado em três valores: 1/6 da área do piso (para uma célula de 6x6x3 m tem-se um **WWR** de 0,33), metade da área de fachada (0,5) e toda a superfície de fachada (1,0). Como a área envidraçada apresenta não só uma transmissão maior, mas também um **U** maior, tanto os ganhos quanto as perdas serão maiores por essa parte do fechamento. Observa-se também que não foram consideradas proteções externas na abertura. Esta foi a única hipótese pessimista nesta avaliação, já que observa-se que a maioria das edificações brasileiras não apresenta este tipo de preocupação.

A carga interna foi calculada com base em uma edificação comercial, considerando-se uma ocupação de 4 m² por pessoa (140 W³⁵) (Neufert, 1998) e 125 W de equipamentos instalados,

³⁵ Calor metabólico total para uma pessoa em atividade de escritório segundo Frota (1995)

o que cobriria o sistema de iluminação, computadores e outros equipamentos como cafeteiras, impressoras, elevadores, centros de processamento de dados, etc.

Foi considerado como período de utilização o horário comercial – 8 às 18 horas – e então encontrada a média para um período de 24 h resultando em um total de 67 W/m². Os valores intermediários foram encontrados tomando-se 50% e 25% deste valor (respectivamente 34 e 17 W/m²), sendo que o último aproxima-se da carga interna de uma edificação residencial.

O resultado da avaliação é mostrado na Figura 79.

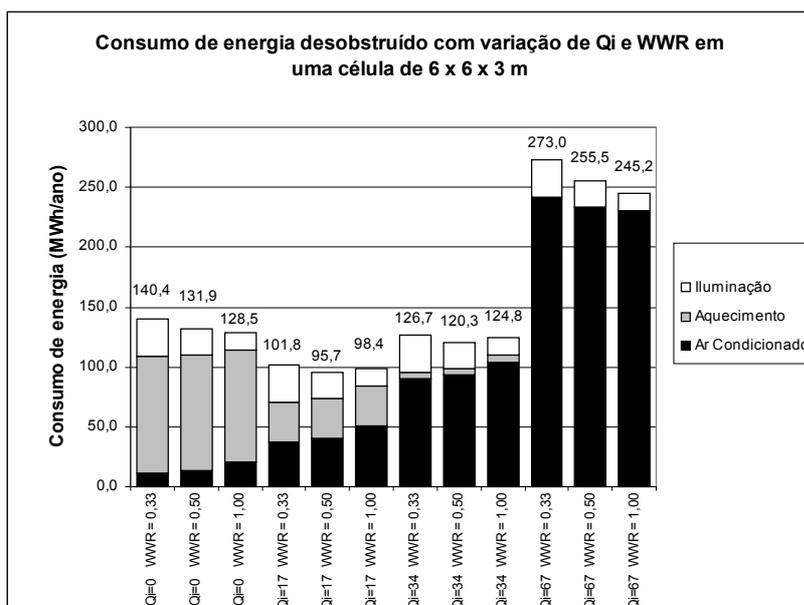


Figura 79 – Variação do consumo de energia para variação de WWR e Q_i para célula de 6 x 6 x 3 m

Observa-se que a carga interna afeta principalmente a proporção entre aquecimento e ar condicionado, obtendo-se um desempenho otimizado para cargas internas na faixa de 17 W/m². A partir deste estudo, considerou-se desnecessário a avaliação de células com cargas de 34 W/m², visto que o valor era simplesmente uma composição entre as células de 17 e de 67. Pode-se perceber também que a variação no consumo de energia para aquecimento tende a ser menor do que a variação no consumo para ar condicionado, mesmo quando a carga interna é baixa e a necessidade de aquecimento é maior.

7.3.2. Variação no volume da célula

A seguir, foram variadas as dimensões da célula, para que se pudesse verificar se a opção de 6 x 6 x 3 m era realmente adequada. Foram testadas células de 6 x 6 x 6 m, 3 x 3 x 3 m, 1 x 1 x 3 m e 1 x 1 x 1 m, com WWR de 0,5 e 1,0 e Q_i de 0, 17 e 67 W/m².

Os resultados das simulações foram associados com o volume da célula e com a variação dimensional linear ($\text{Volume}^{1/3}$). Buscou-se com isso determinar se é mais interessante utilizar módulos menores ou maiores. A variação na profundidade do cômodo e na relação entre a área de fachada e área de cobertura também afetam o desempenho do edifício.

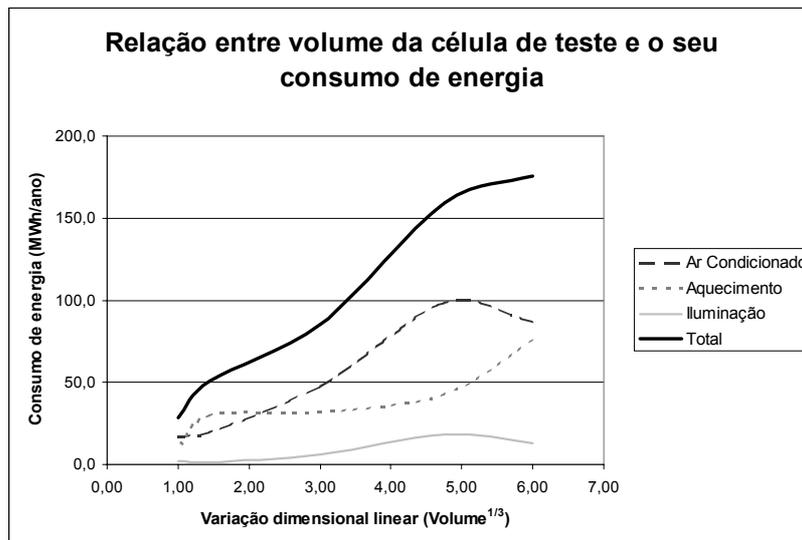


Figura 80 – Variação do consumo de energia de acordo com variação no volume da célula de teste

Embora o consumo de energia desagregado (ar condicionado, aquecimento e iluminação) tenha apresentado comportamento diferente, o consumo total apresentou uma relação quase linear com a variação dimensional linear da célula (Figura 80). Caso não se considerem as simulações feitas com as células de 6 x 6 x 3 m e 1 x 1 x 3 m, essa relação linear fica ainda mais evidente. Quando há variação na relação entre dimensões, o consumo tende a aumentar em relação aos ambientes cúbicos. Deste modo, buscando-se uma situação otimizada, optou-se por trabalhar com uma célula de teste de 3 x 3 x 3 m³⁶, mantendo o pé-direito típico das construções brasileiras e adotando um formato cúbico para a célula. Os resultados da variação de **WWR** e **Q_i** para esta célula são mostrados na Figura 81.

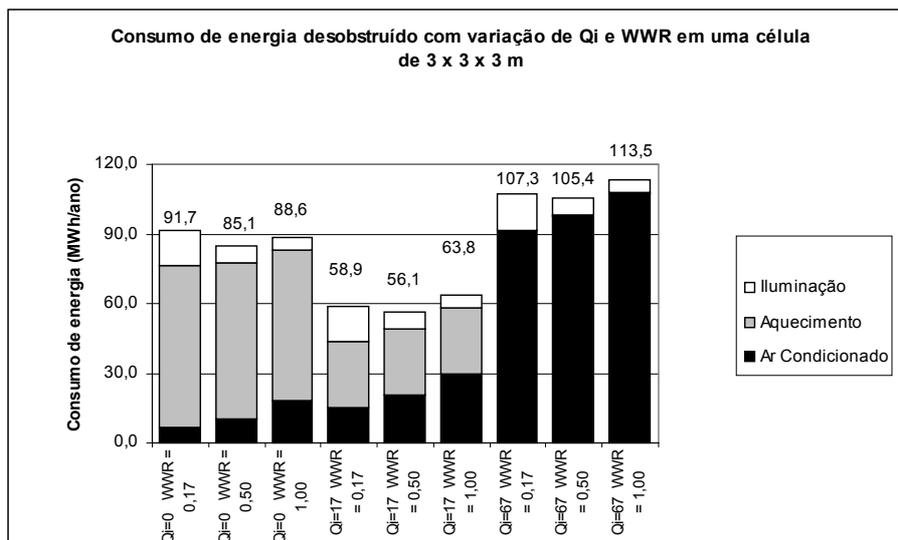


Figura 81 – Variação do consumo de energia para variação de WWR e Q_i para célula de 3 x 3 x 3 m

³⁶ A partir desta simulação, todas as outras foram realizadas considerando-se a célula de 3 x 3 x 3 m

Como era esperado há pouca diferença na proporção entre o consumo de ar condicionado, aquecimento e em relação aos resultados da célula de 6 x 6 x 3 m, embora os valores totais tenham se reduzido a aproximadamente a metade. Observa-se que para essa dimensão de célula, o melhor resultado é sempre obtido com o **WWR** de 0,5, qualquer que seja a carga interna da edificação.

7.3.3. Definição da temperatura interna

A temperatura interna da edificação é utilizada no cálculo da troca por onda longa com o fundo de céu, conforme mostrado na Equação 64. Para que se evitassem referências circulares na planilha, a temperatura interna tomada era sempre a temperatura interna suposta (T_i) dá hora anterior, sendo que na primeira hora assumia-se um valor de 20°C para a temperatura interna. O erro desta consideração era diluído ao longo do ano, sendo pouco significativo no resultado anual. No entanto, em edificações condicionadas artificialmente, a tendência é que a temperatura permaneça constante, ou próxima à temperatura de conforto estabelecida que seria igual a $T_n + 2$ para calor e $T_n - 4$ para frio. A comparação entre o cálculo considerando-se a temperatura interna como T_i ou como a temperatura de conforto é mostrada na Figura 82.

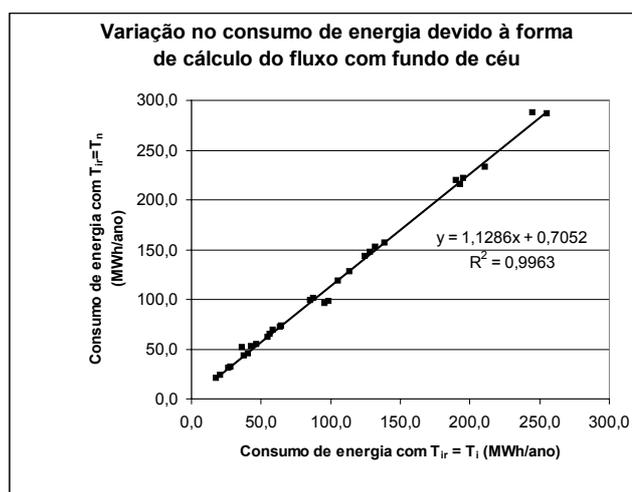


Figura 82 – Comparação entre cálculos para as duas hipóteses de T_i

Observa-se um acréscimo de aproximadamente 12% no consumo total quando se considera a temperatura neutra igual à temperatura de conforto. Como o consumo energético neste trabalho não tem valor em si, sendo apenas um referencial para comparação, optou-se por considerar a temperatura interna como sendo a temperatura interna suposta (T_i). No setor residencial principalmente, isto se justifica, visto que uma grande parte das edificações não conta com condicionamento artificial.

7.3.4. Variação na inércia da célula

A inércia térmica tem impacto significativo no consumo energético da edificação, pois ao amortecer a onda térmica, reduz os ganhos térmicos no período mais quente do dia, fazendo com que o calor só chegue ao interior das edificações à noite, quando as temperaturas externas são mais baixas. Deste modo, a inércia é um recurso que reduz simultaneamente os

gastos com aquecimento e com resfriamento. A Figura 83 mostra a redução no consumo de energia a medida que se aumenta a inércia da edificação.

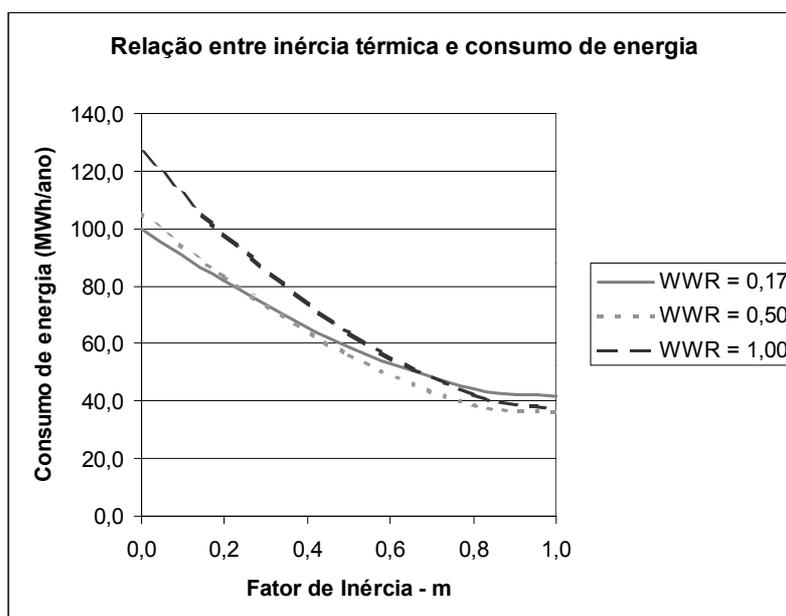


Figura 83 – Variação do consumo de energia para variação do Fator de Inércia para célula de 3 x 3x 3 m

Para edificações com maior área envidraçada na fachada, os benefícios da inércia são maiores, já que ajudam a distribuir os altos ganhos térmicos durante o dia. Como neste trabalho a inércia não é calculada e sim assumida, na forma do Fator de Inércia (m), considerou-se mais lógico associar a inércia à relação entre área de janela e área de parede, embora esta relação nem sempre seja constante. Assim, para um **WWR** de 0,17, m foi estabelecido como 0,8, para **WWR** de 0,5, m foi estabelecido como 0,5 e para um **WWR** de 1,0, m foi estabelecido como 0,2.

7.3.5. Estudos com a obstrução

Definidos os parâmetros das células de teste, foram realizadas simulações com o edifício exemplo. Foram simuladas células de teste com **WWR** de 0,17; 0,5 e 1,0. A carga interna também foi variada, podendo ser 0, 17 e 67 W/m². A obstrução varia de 15° em 15°, conforme a Tabela 20

Tabela 20 – Obstruções consideradas no estudo exploratório

Ângulo de obstrução vertical (°)	Altura do edifício exemplo (m)	Número de andares
15	3	1
30	7	2
45	12	4
60	21	7
75	45	15

Foram comparados os consumos totais e desagregados, além da diferença entre o consumo desobstruído e o obstruído. O resultado das simulações é mostrado na Figura 84.

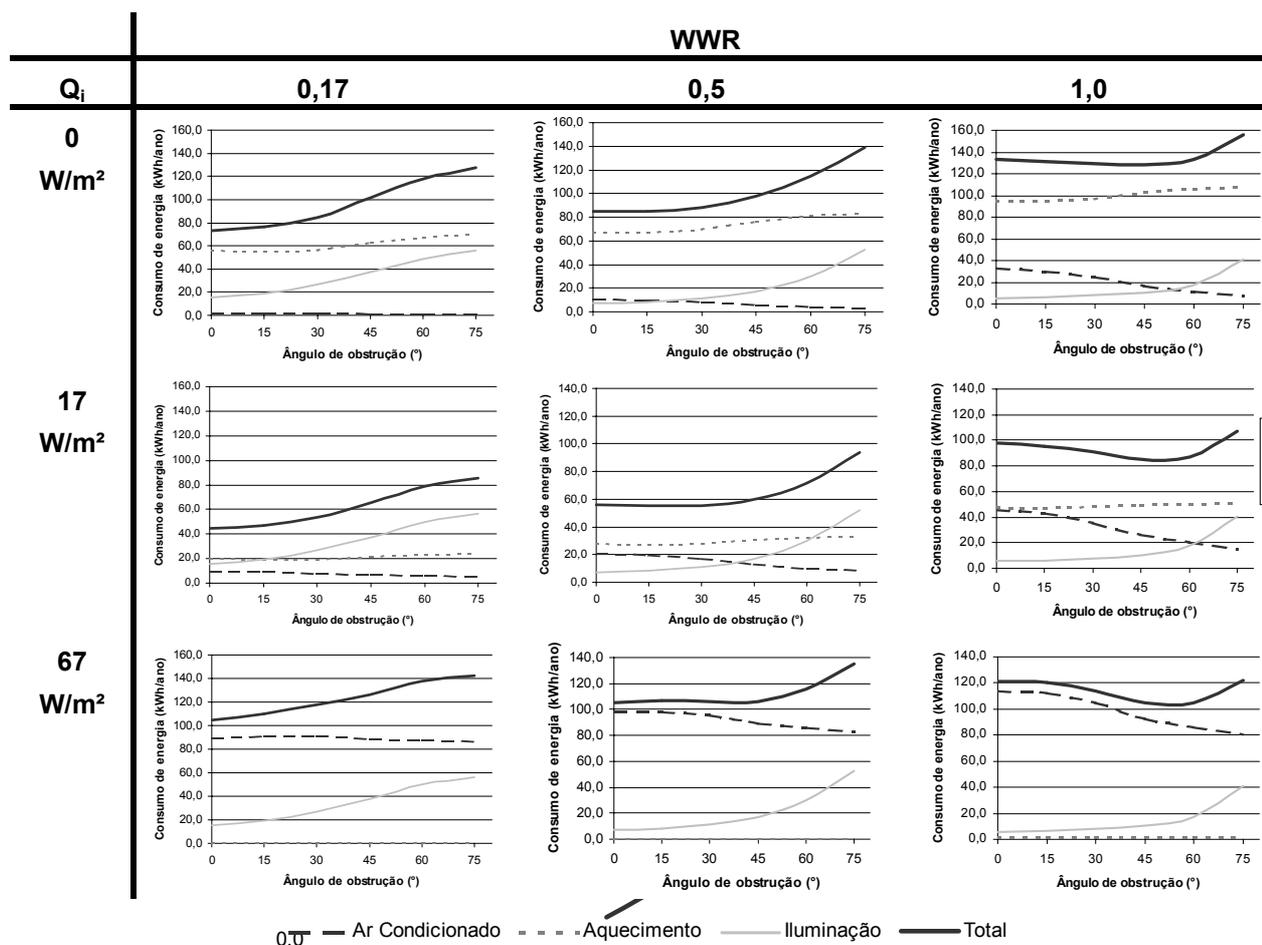


Figura 84 – Variação do consumo de energia com a obstrução para célula de 3 x 3 x 3 m

Observa-se que o formato da curva total é definido pela curva de iluminação, principalmente depois dos 45°, quando a última aumenta sua inclinação.

A carga térmica interna afeta o consumo final, com o mínimo aos 17 W/m^2 . A inclinação da curva também se altera um pouco, pois consumos maiores de aquecimento e refrigeração sofrem variações maiores, mesmo sem uma alteração percentual significativa. No entanto, a variação em Q_i não altera o desenho da curva significativamente, já que os pontos de deflexão se mantêm.

Já o **WWR** afeta significativamente o desenho da curva. Quanto maior for, menor a participação da iluminação artificial no consumo de energia e maior a participação do ar condicionado. Sendo assim é possível que em algumas situações, como no caso de uma ocupação com edifícios com cortinas de vidro, a inserção de novas construções pode melhorar o desempenho energético do entorno.

Isto pode ser comprovado quando se avalia a evolução da diferença entre o consumo obstruído e desobstruído para algumas das células acima.

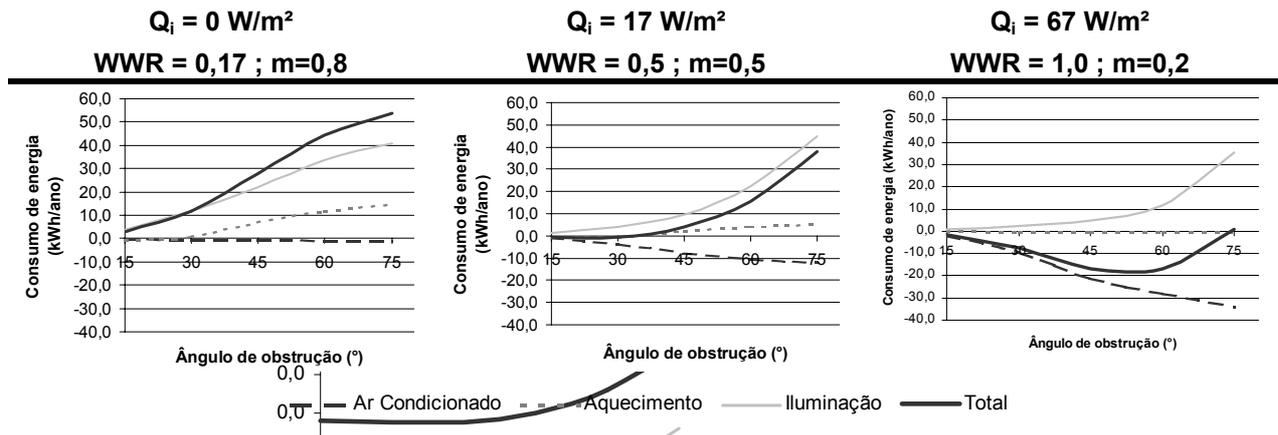


Figura 85 – Evolução da diferença no consumo de energia para célula de 3 x 3 x 3 m

Na Figura 85 fica clara a dependência entre as curvas de consumo total e de consumo para iluminação artificial, principalmente com obstruções acima de 45°. Embora na simulação com a célula de teste tendo carga interna de 67 W/m² a carga de ar condicionado tenha sido significativa, a partir dos 45° ela não foi suficiente para compensar o aumento do consumo de iluminação artificial.

7.3.6. Efeito da orientação do terreno

Foi verificado o efeito de rotação da célula de teste. O terreno do edifício exemplo foi rotacionado 45° de modo que as fachadas das células não mais ficassem expostas aos pontos cardeais, mas sim aos colaterais (NE, SE, SO, NO). Foram simuladas três configurações para a célula de teste, estando o resultado na Figura 86.

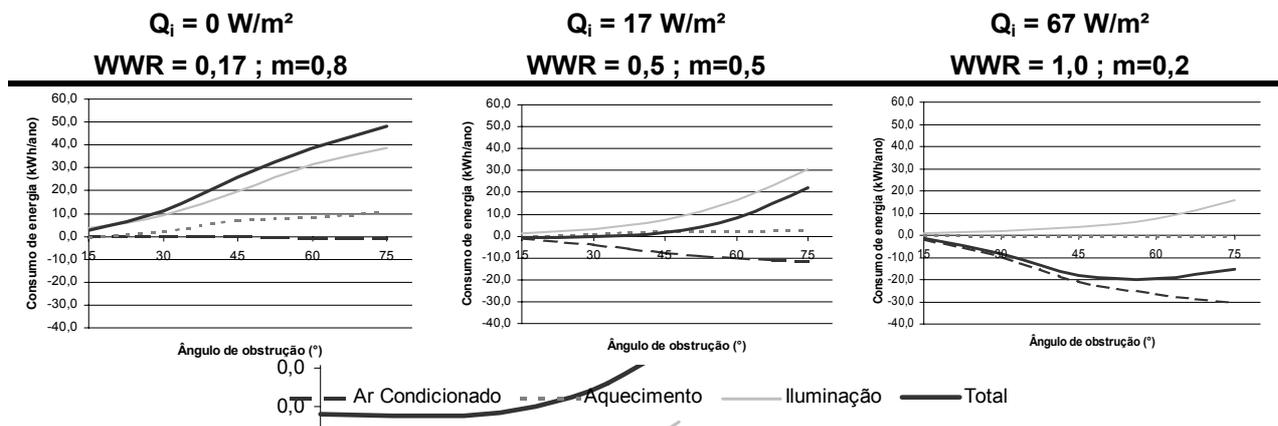


Figura 86 – Evolução da diferença no consumo de energia para célula de 3 x 3 x 3 m, orientada NE-SO

Comparando a figura acima com a Figura 85, observa-se que a variação no consumo total devido à obstrução foi menor e a curva de iluminação artificial apresentou inclinação mais suave. Para ambientes com cargas internas altas e grandes áreas envidraçadas na fachada, o gasto energético com iluminação artificial não chegou a compensar o gasto com ar condicionado, havendo redução no consumo total qualquer que fosse a obstrução colocada, com um ponto ótimo por volta dos 60°. Nos demais casos a curva total manteve valores positivos, com variações menores e com o ponto de inflexão se deslocando de 45° para 60°.

7.3.7. Verificação do impacto da obstrução para cada orientação de fachada

O **Obstrução 1.0** permitiu também uma avaliação do impacto da obstrução em cada fachada. No caso do edifício exemplo orientado no eixo norte-sul, o consumo do vizinho localizado no lado AB representa o impacto na fachada Oeste, no lado BC, fachada Sul, no CD, fachada Leste e no AD, fachada Norte. Para o edifício exemplo orientado no eixo nordeste-sudoeste, o vizinho do lado AB apresenta fachada Nordeste, no BC, fachada Sudeste, no CD, fachada Sudoeste e no AD, fachada Noroeste. Os resultados, para uma célula de 3 x 3 x 3 m, sem Q_i e com **WWR** de 0,17, são apresentados na Figura 87.

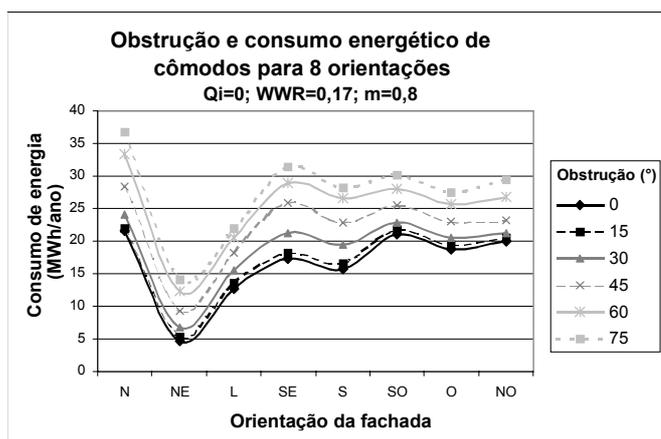


Figura 87 – Variação do consumo de energia de acordo com a obstrução e a orientação da célula de teste (versão 1)

Observou-se que neste caso não houve grande variação do impacto da obstrução no consumo de energia de cada fachada, com as curvas do gráfico se apresentando relativamente paralelas entre si. Pode-se destacar um espaçamento ligeiramente maior entre a curva de 0° e de 75° nas fachadas SE e S, sendo estas as fachadas mais sensíveis.

Os resultados, para célula com Q_i de 17 W/m² e **WWR** de 0,5, são apresentados na Figura 88.

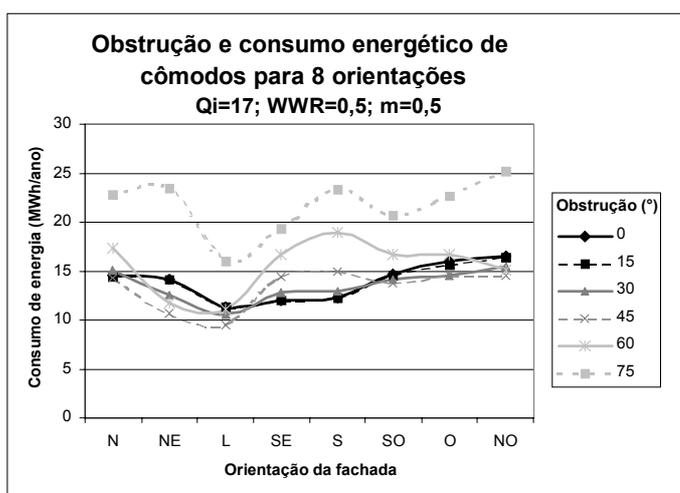


Figura 88 – Variação do consumo de energia de acordo com a obstrução e a orientação da célula de teste (versão 2)

Neste caso as fachadas SE e S se apresentaram mais sensíveis à obstrução, com as maiores variações no consumo. As fachadas L e SO são as menos sensíveis, embora as demais orientações tenham apresentado desempenho homogêneo, exceto para grandes obstruções (75°).

Os resultados, para célula com Q_i de 67 W/m² e **WWR** de 1,0, são apresentados na Figura 89.

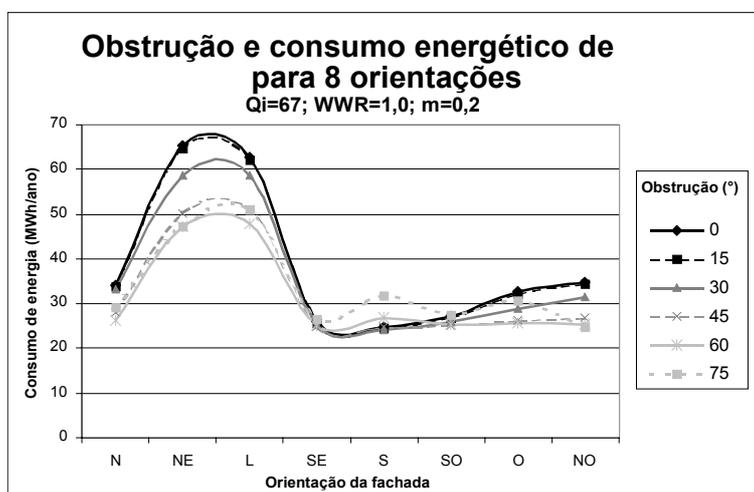


Figura 89 – Variação do consumo de energia de acordo com a obstrução e a orientação da célula de teste (versão 3)

Neste caso o setor NE-L apresentou-se mais sensível à obstrução, com grandes variações no consumo total. As fachadas SE e SO praticamente não apresentaram variação, indicando ser indiferente obstruí-las ou não. Observa-se que a sensibilidade é maior nas orientações que apresentaram maior consumo total. As curvas apresentaram um paralelismo maior do que as do caso anterior, mas tiveram a ordem invertida em relação ao primeiro estudo, sendo a curva sem obstrução a responsável pelos maiores gastos energéticos.

Considerando-se as duas últimas células como sendo representativas das condições residenciais e comerciais, respectivamente, podem-se estabelecer ângulos ótimos de obstrução para cada orientação de fachada.

Tabela 21 – Ângulos de obstrução ideais para cada orientação de fachada

	Orientação							
	N	NE	L	SE	S	SO	O	NO
Residencial	45	45	45	15	15	45	45	45
Comercial	60	75	60	45	30	45	60	75

A variação entre fachadas é considerável, indicando que os ângulos de obstrução devem ser determinados separadamente para cada uma delas. Embora os ângulos para edificações residenciais tem se apresentado restritivos, em algumas orientações ele pode ser elevado para 60° sem grande prejuízo para o consumo energético, destacando-se ai principalmente as fachadas L, O, N e NE.

8

Considerações finais e perspectivas futuras

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 a partir das contribuições de Gropius. Ela está intimamente ligada a questões de sustentabilidade urbana e de aproveitamento eficiente dos recursos naturais, conforme demonstrado no capítulo 1. Desde então, o assunto já produziu uma bibliografia considerável e vem sendo trabalhado em vários locais, com abordagens diferentes. O que se observou, no entanto, foi que a maior parte dos estudos foi feita em países de clima frio e latitude elevada, onde o sol é não só desejável, mas necessário, praticamente durante todo o ano. Nestes locais 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 cuidadosamente avaliados.

Estabelecer a comparação entre a necessidade de energia solar para iluminação e aquecimento e a sua indesejabilidade como carga térmica constituiu-se no principal desafio deste trabalho. A solução proposta por Alucci (1992), usar o consumo energético como variável comum, apresentou resultados bastante satisfatórios, embora tenha demandado cálculos demorados que não poderiam ter sido feitos sem o desenvolvimento do **Obstrução 1.0**. Observa-se que, embora o ar condicionado não seja um equipamento disseminado nas residências brasileiras, a estimativa da energia consumida serve como referência para a medida de desconforto, respondendo adequadamente ao fim proposto neste trabalho.

A parametrização da célula de teste foi a principal barreira à utilização do consumo de energia como variável unificadora, sendo necessários estudos mais aprofundados a respeito dos ambientes construídos na cidade de São Paulo e no Brasil como um todo para que se possam estabelecer parâmetros de base estática e, portanto, mais confiáveis.

Outra dificuldade foi a escassez de modelos matemáticos validados para a realidade climática brasileira. Refere-se, neste caso, principalmente aos modelos de distribuição de radiação e luminância e aos estudos de eficácia luminosa. A realização de medidas de campo faz-se urgente para que se possa confirmar a aplicabilidade dos modelos escolhidos para o caso de São Paulo, ou mesmo para que se possam adotar modelos mais complexos, levando em conta, por exemplo, o caráter aleatório da distribuição de nuvens. No caso, o que se conseguiu encontrar de dados brutos foram somente os dados de irradiância global e difusa, temperatura e umidade. A questão da validação de modelos para cálculo da iluminação natural faz-se especialmente urgente, não havendo no estado de São Paulo nenhuma estação medidora de luz até a presente data.

Foi possível, no entanto, chegar, no capítulo 7, a um ângulo de obstrução ótimo para cada orientação de fachada de acordo com o uso predominante das edificações vizinhas. Os ângulos recomendados no estudo para Mogi das Cruzes foram bastante próximos aos encontrados após as simulações para edifícios comerciais, embora os critérios usados fossem completamente diferentes. A iluminação apresentou-se como fator determinante, principalmente quando os edifícios não apresentavam altas cargas internas ou panos de vidro na fachada. O consumo para aquecimento apresentou variações pequenas com a obstrução. Isso se deve ao fato de a obstrução representar um papel ambíguo no que se refere a este sistema. Ao mesmo tempo em que impede o aquecimento solar passivo, ao bloquear a radiação direta em alguns horários do dia, ela reduz a troca por radiação de onda longa entre o ambiente e o fundo de céu, reduzindo as perdas durante a noite, quando a temperatura é mais baixa. Este fenômeno é visível quando se avalia isoladamente a fachada sul, onde a incidência de radiação direta é muito pequena e a obstrução provoca sempre redução no consumo de aquecimento. O consumo ar condicionado teve peso mais significativo nas edificações com fachadas envidraçadas, sendo o seu impacto aumentado na medida em que se aumenta a carga interna. Deste modo, pode-se inferir que só se justifica a avaliação do impacto da obstrução no desempenho térmico da edificação no caso de edificações comerciais, que normalmente apresentam o perfil citado. Caso contrário, a abordagem simplificada, levando em conta só a iluminação pode ser suficiente.

Conclui-se ainda que é possível utilizar ângulos de obstrução diferentes dependendo do uso e das características predominantes das edificações. Em zonas comerciais, uma alta densidade com edifícios altos é desejável, minimizando os ganhos solares nas edificações onde o ar condicionado já é sobrecarregado pelas altas cargas internas e onde a cultura brasileira é a utilização de panos de vidro. Nesse caso, os melhores resultados são obtidos quando se afasta a fachada sul, onde há pouca incidência de sol direto e a obstrução não impacta o consumo de ar condicionado, dos vizinhos e aproximar a oeste e a norte, onde há cargas térmicas indesejadas. Como demonstrado no estudo de impacto do código de Mogi das Cruzes no capítulo 6, é possível se atingir altas densidades, preservando o acesso dos vizinhos ao sol e à luz natural, sendo mais eficiente o aproveitamento do terreno quanto mais criativa for a solução arquitetônica e volumétrica do edifício.

A grande desvantagem de se estabelecerem ângulos de obstrução é que este instrumento desconsidera a luz e a radiação que penetram pelas laterais das edificações, quando não se trata de uma obstrução contínua e infinita. Por isso, objetiva-se ainda aprimorar o **Obstrução 1.0** para que ele possa efetivamente ser incorporado ao processo de aprovação de projetos, sendo possível realizar uma avaliação caso a caso, com base em um planejamento maior. O *software* deve ser revisto, com um aprimoramento na interface e no procedimento de cálculo, de modo que novas cidades possam ser incorporadas mais facilmente à sua base de dados. Um dos caminhos para a simplificação do programa seria abandonar a o cálculo horário para todos os dias do ano e usar dias típicos representativos de cada mês. Para isso, devem ser feitas, no futuro, simulações comparando o cálculo detalhado com o cálculo com médias e verificando se o erro é aceitável. Embora o *software* ainda possa ser melhorado, no entanto, ele tem condições de ser usado, principalmente para a cidade de São Paulo e adjacências imediatas, onde a base de dados já está completa.

Com as simulações realizadas, foi possível extrair deste trabalho uma série de recomendações arquitetônicas bioclimáticas para a cidade de São Paulo, embora este não fosse o seu foco. As simulações indicaram que a melhor opção para minimizar o consumo energético dos ambientes é uma composição equilibrada entre área transparente e área opaca e a utilização de inércia térmica. A área envidraçada apresentou-se como o principal recurso para balancear o gasto energético com refrigeração e iluminação, sendo que os melhores resultados foram sempre encontrados para um **WWR** de 0,5. A inércia permite o amortecimento da curva de temperatura diária, o que representa significativa redução do consumo energético tanto para aquecimento como para resfriamento, como apresentado no item 7.3.4. Embora neste trabalho tenha-se atrelado a inércia ao **WWR**, isso não é necessariamente verdade, pois é possível utilizar outros elementos que não a fachada (forro, piso, estrutura e fechamentos internos) como acumuladores de calor.

Tratamentos diferenciados de fachada também são recomendados. A fachada sul, por exemplo, é a melhor face para a utilização de panos de vidro, pois tem pouca insolação e a sua iluminação é prejudicada por estar voltada para a área menos luminosa do céu. Isso porque o modelo de distribuição de luminâncias utilizado considera a área mais clara do céu a área próxima do sol e a área mais escura a área oposta. Como o sol está quase sempre no quadrante norte, em São Paulo, os menores níveis de iluminância vertical tendem a ser encontrados na fachada sul, onde se deve aproveitar a ausência de irradiância direta para se utilizar uma maior proporção de fechamentos transparentes. Nas fachadas oeste e norte, é mais interessante inverter a situação, evitando a penetração do sol nos períodos de temperatura elevada. Como estas fachadas recebem grande quantidade de radiação direta, é indicados o uso de prateleiras de luz e outros elementos que captem a luz impedindo, ou minimizando, a carga térmica indesejável.

Como desdobramento natural desde estudo, por fim, recomenda-se a inserção de novas variáveis no estudo de impacto, tais como o conforto no meio urbano que entremeia as edificações, acústica e ventilação. Todos estes fatores são fortemente afetados pelas relações geométricas entre as edificações e podem ser combinados com o presente estudo no desenvolvimento de um método mais completo para avaliação do impacto ambiental de novas edificações no meio urbano.



Bibliografia

- ACSELRAD, Henri. Discursos da sustentabilidade urbana. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, São Paulo: ANPUR. n.1, p. 79-90, maio de 1999.
- AKUTSU, Maria; SATO, Neide N.; PEDROSO, Nelson. *Desempenho térmico de edificações habitacionais e escolares*; manual de procedimentos para avaliação. São Paulo: IPT. 1987.p. 45-52.
- ALLEN, William. Daylighting for buildings in urban districts. *Journal of the Royal Society do British Architects*. London. 85-87. feb. 1943
- ALLEN, William; CROMPTON, David. A form of control of building development in terms of daylighting. *Journal of the Royal Society do British Architects*. London.. 491-499. aug. 1947.
- ALLUCI, Márcia Peinado (Coord.), CARNEIRO, Cláudia de Medeiros, BARING, João Gualberto de Azevedo. *Implantação de conjuntos habitacionais*; Recomendações para a adequação climática e acústica. São Paulo: IPT, 1986, 95 p.
- ALUCCI, Márcia Peinado. *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, 1992.
- ALUCCI, Márcia; LONGO Jr., Celso, INOUE, Marcos. *Banco de Dados*; características térmicas, luminosas e acústicas de vidros e plásticos translúcidos. São Paulo: FAUUSP. 1997. Disponível em: <<http://www.usp.br/fau/deptecnologia/docs/bancovidros/index.html>>. Acesso em: 24 jun. 2004.
- ANTOINE, Pierre. *Principes d'urbanisme*. Paris: B. Ballière et Fils, 1946, p.5-15.
- AROZTEGUI, José Miguel. Método para projeto e avaliação de para-sóis externos, visando à otimização do seu desempenho térmico para um clima dado, In: Simpósio Latino-Americano de Racionalização da Construção e sua Aplicação na Habitação de Interesse Social. São Paulo, 1981. *Anais...* São Paulo: IPT, vol 2, 1981, 583-598.
- ASSIS, Eleonora Sad de. *Impactos da forma urbana na mudança climática; método para previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano*. 2000. 273 f. (Tese de Doutorado, Estruturas Ambientais Urbanas) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Paulo, 2000.
- ASSIS, Eleonora Sad de; VALLADARES, Victor Mourthé; , SOUZA, Roberta V. G. de. Bases para a determinação dos recuos e volumetria dos edifícios considerando a insolação e a iluminação natural, na revisão da Lei de Uso e Ocupação do Solo de Belo Horizonte,

- MG. In ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 3, Gramado, 1995. *Anais...* Porto Alegre: ANTAC, 1995. 511-516.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 5413: Iluminância de interiores*. Rio de Janeiro: ABNT, 1991
 - AZZEVEDO NETTO, Domigos Theodoro de. Aplicação dos instrumentos de planejamento e gestão do uso do solo, bem como normas e procedimentos. In: IPEA. Diretoria de Política Regional. Coordenadoria de Política Urbana. *Estudo de gestão do uso do solo e disfunções do crescimento urbano*. Relatório n. 4. Brasília: IPEA, out. 1996, 29-65.
 - BARTELMUS, P.. *Environment, growth and development, the concepts and strategies of sustainability*. London: Routledge, 1994. 60-78.
 - BEHLING, Sophia; BEHLING, Stefan. *Sol Power: the evolution of solar architecture*. Munich, New York: Pretzel-Verlag, 1996. 240 p.
 - BELO HORIZONTE, Prefeitura Municipal. *Legislação urbanística de Belo Horizonte: Plano diretor, lei n.7165 de 27 de agosto de 1996, parcelamento, ocupação e uso do solo urbano, lei n.7166 de 27 de agosto de 1996*. Belo Horizonte, 1996. 301 p.
 - BITTENCOURT, Leonardo. *Uso das cartas solares. Diretrizes para Arquitetos*. Maceió: EDUFAL, 1990.
 - BRASIL, Ministério das Minas de Energia. *Balanco energético nacional*. Brasília, 1997 apud SIGNOR, Regis. *Análise de regressão do consumo de energia elétrica frente a variáveis arquitetônicas para edifícios comerciais climatizados em 14 capitais brasileiras*. 1999. 122 f. (Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil). UFSC, Florianópolis, 1999.
 - BRASIL, Ministério das Minas de Energia. *Balanco energético nacional*. Brasília, 1997 apud SIGNOR, Regis. *Análise de regressão do consumo de energia elétrica frente a variáveis arquitetônicas para edifícios comerciais climatizados em 14 capitais brasileiras*. 1999. 122 f. (Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil). UFSC, Florianópolis, 1999.
 - BRUNGER, Alfred; HOOPER, Frank. 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, 1993.
 - CAPELUTO, I. G.; SHAVIV, E.. On the use of 'solar volume' for determining the urban fabric. *Solar Energy*. London: Elsevier Science. v. 70, n. 3. 275-280, 2001.
 - CARAM, Rosana. *Caracterização ótica de materiais transparentes e sua relação com o conforto ambiental em edificações*. 1998. (Tese de doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp, Campinas, 1998.

- CAVALLEZZI, Rosângela. Urbanismo e Direito: notas para uma abordagem interdisciplinar do espaço urbano. In: SEMINÁRIO DE HISTÓRIA DA CIDADE E DO URBANISMO, 4, Rio de Janeiro, 1996. *Anais...* Rio de Janeiro: UFRJ/PROURB, 1996, 882-887.
- COMITÊ BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO CIVIL. *Desempenho térmico de edificações*; Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 28 p. (Projeto de Norma 02:135.07-003)
- COMMISSION INTERNATIONALE D'ÉCLAIRAGE. *CIE S 003/E-1996: Spatial distribution of daylight*; CIE Standard Overcast Sky and Clear Sky. Vienna: CIE, 1996. 5p.
- COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. *CIE 110-1995 Spatial distribution of daylight*; luminance distribution of various reference skies. Vienne: CIE. 1994. 30 p. (Technical Report).
- COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. *Guide on daylighting of building interiors*. Paris: CIE, 1990 (draft, to be published)
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. *Energy in architecture*; the European passive solar handbook. London: BT Batsford. 1994, 340p.
- COMPAGNON, Raphael. *Solar and daylight availability in urban areas*. Fribourg: Ecole d'ingéineurs et d'architectes de Fribourg, 2000, 59 p. (Final Technical Report of the PRECIS programa – Assessing the Potential for Renewable Energy in Cities.)
- COMPAGNON, Raphael; RAYDAN, Dana. Irradiance and illuminance distribution in urban areas. In: *PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE*, 17, Cambridge, 2001. *Architecture, city, environment...* London: James & James, 2000, p.436-441.
- COSTA, Heloisa Soares de Moura. Desenvolvimento urbano sustentável: uma contradição em termos? *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, n.2, p. 55-71, março de 2000. ANPUR.
- CROMPTON, D. The Daylight Code; some notes on the form of control space about buildings. *Town Planning Review*. Liverpool: University of Liverpool, v. 26, p. 155-164, 1955
- DE SCHILLER, Sílvia. Building form, transformation of urban tissue and the evaluation of sustainability. In: *PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE*, 18, Florianópolis, 2001. *Proceedings...* Florianópolis: PLEA, 2001, p.453-460.
- DELLE DONNE, Macella. *Teorias sobre a cidade*. São Paulo: Martins Fontes, 1983.255p.
- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG, *DIN 5034: Daylight in interiors*, Part 1-2. Berlin, 1979.

- DUARTE, Denise. *Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental*. 2000. 278 f. (Tese de Doutorado, Estruturas Ambientais Urbanas) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Paulo, 2000.
- DUFFIE, Jonh A.; BECKMAN, William A.. *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York: Wiley-Interscience. 1980. 762 p.
- ECHENIQUE, Martin. Modelos: una discusión. In MARTIN, L. et al. *La estructura del espacio urbano*. Barcelona: Gustavo Gili, 1975. 235–249.
- EMMANUEL, Rohinton. A hypothetical ‘shadow umbrella’ for thermal comfort enhancement in the equatorial urban outdoors. *Architectural Science Review*. v. 36, n. 4.173-184. dec. 1993
- ENGLAND. Ministry of Housing and Local Government. *Planning for Daylight and Sunlight*. London: Her Majesty’s Stationery Office, 1964. 35 p.
- ERICKSSON, C.; GAY, J. B.; MOREL, N.. *Etude de sensibilité; influence de la fenetre sur le bilan energetique d’une construction*. Lausanne: EPFL. 1986. 75 p.
- FANGER, P.O.. *Thermal Comfort*. New York: Mc Graw-Hill, 1970, 239p.
- FRAME, Ian, BIRCH, Sheila, *Daylight Software*. Londres: Anglia Polytechnic. 1991. Available in <<http://www.usp.br/fau/deptecnologia/docs/conforto.html>> Cited in: 05 out. 2003.
- FROTA, Anésia. *Geometria da insolação*. São Paulo: Geros, 2004, 289p.
- FROTA, Anésia. *Manual de conforto térmico*. 2ª ed. São Paulo: Nobel, 1995, 243p.
- GARCIA-CHAVEZ, José Roberto; STREVEL, Rodolfo. Use of solar hot water systems for reducing the environmental damage in México City. In: *Passive and Low Energy Architecture*, 18, Florianópolis, 2001. *Proceedings...* Florianópolis: PLEA, 2001, p.259-263.
- GARCIA-CHAVEZ, José Roberto; STREVEL, Rodolfo. Use of solar hot water systems for reducing the environmental damage in México City. In: *PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE*, 18, Florianópolis, 2001. *Proceedings...* Florianópolis: PLEA, 2001, p.259-263.
- GASQUET, Hector. *Conversión de la luz solar em energía eléctrica*. Mexico: ENALMEX, 2004. Disponível em: <<http://www.enalmex.com>>. Citado em: 28 jun. 2004.
- GELLER, H. S.. *Efficient electricity use: a development strategy for Brazil*. American Council for an Energy-Efficient Economy. Washington, 1990,164 p. apud LAMBERTS, Roberto, GHISI, Enedir, PAPST, Ana Lúcia. *Desempenho térmico de edificações*. Florianópolis: UFSC, 2000, 62 p. (Apostila da Disciplina Desempenho Térmico de Edificações).

- GHISI, Eneidir. *Desenvolvimento de uma metodologia para retrofit em sistemas de iluminação*: estudo de caso na Universidade Federal de Santa Catarina. 1997. 246 f. (Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil) – UFSC, Florianópolis, 1997.
- GIVONI, Baruch. *Man, Climate and Architecture*. 2ª ed. London: Applied Science Publishers LTD., 1976. 307-339.
- GIVONI, Baruch. *Passive and low energy cooling of buildings*. New York: John Wiley & Sons, 1994, 263 p.
- GOLDEMBERG, José. *Energia, meio ambiente e desenvolvimento*. São Paulo: USP, 2001, 234 p.
- GOTTDIENER, Mark. *A Produção Social do Espaço Urbano*. São Paulo: Ed USP, 1993, 310 p.
- HARRIS, Norman; MILLER, Cydney; THOMAS, Irving. *Solar Energy Systems Design*. New York: John Wiley and Sons, 1985, 776 p.
- HELIODINÂMICA. Módulo gerador fotovoltaico HM-70D12. Vargem Grande Paulista, 2004. Disponível em < <http://www.heliodinamica.com.br/down.htm>>. Citado em: 28 jun. 2004.
- HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J.. *Iluminação Natural*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.1975. 776 p.
- IGAWAA, Norio; NAKAMURA, Hiroshi. All Sky Model as a standard sky for the simulation of daylit environment. *Building and Environment*: Pergamon, v. 36, p. 763-770, 2001.
- ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. *Lighting Handbook*; Reference & Application. 8 ed. New York, IES of North America. 1998.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESOS E MEDIDAS. *Portal do consumidor*. Brasília: INMETRO. Março de 2003. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/pbetab12.asp>>. Acessado em: 16 Out. 2003.
- KAM, M.. Sustainable architecture: identifying obstacles and possible strategies for the Australian building industry. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 14, 1999, Brisbane. *Sustaining the future...* Energy-ecology-architecture. Brisbane: PLEA, 1999. 721-728.
- KATZSCHNER, Lutz. Urban climate studies as tools for urban planning and architecture. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 1997, Salvador. *Anais...* Salvador: FAUFBA / LACAM; ANTAC, 1997, p. 49-58.
- KNOWLES, Ralph; BERRY, Richard. *Solar envelope concepts*; moderate density building applications. Los Angeles: University of Southern California. 1980.135 p.

- KRAUTER, Stefan et al. Façade elements for combined photovoltaic-solar thermal energy generation and building insulation. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 18, Florianópolis, 2001. *Proceedings...* Florianópolis: PLEA, 2001, p.275-279.
- LAMBERTS, Roberto et al. *Analysis Bio*. Versão 2.1.1. Florianópolis: UFSC, 1994. Disponível em: < <http://www.labee.ufsc.br/software/analysisBIO.html>>. Acesso em: 04 jun. 2004.
- LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano, PEREIRA, Fernando O. R.. *Eficiência energética na arquitetura*, São Paulo: PW, 1997. 192 p.
- LAMBERTS, Roberto; GHISI, Enedir, PAPST; Ana Lígia. *Desempenho térmico de edificações*. Florianópolis: UFSC, 2000, 62 p. (Apostila da Disciplina Desempenho Térmico de Edificações).
- LEITE, Antônio Dias. *A energia do Brasil*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997, 528 p.
- LI, Danny H. W.; LAM, Joseph C.. An analysis of climatic parameters and sky classification. *Building and Environment*: Pergamon. v. 36, n. 4. p. 435-445. 2001.
- LITTLEFAIR, Paul. Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment. *Solar Energy*. London: Elsevier Science, v. 70, n. 3, 177-185, 2001.
- LITTLEFAIR, Paul. Passive solar urban design: ensuring the penetration of solar energy into the city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. London: Elsevier Science, v. 2, 303-326, 1998.
- MARION, W.; GEORGE, R.. Calculation of solar radiation using a methodology with world wide potential. *Solar Energy*. London: Pergamon. v. 71, n. 4, p. 275-293, 2001.
- MARTIN, Leslie; MARCH, Lionel (Ed.). *Urban Space and Structures*. London: Cambridge University Press 1972. 272 p.
- MASCARÓ, Lúcia; MASCARÓ, Juan Luis. *Código de obras; aspectos ambientais*. Porto Alegre: UFRGS, 1994.
- MASCARÓ, Lúcia. *Ambiência Urbana*. Porto Alegre, Sangra: DC Luzziato, 1996, 200 p.
- MILNE, Murray; ZURICK, Jennifer. Daylight prediction techniques in energy design tools. In: DAYLIGHTING 98, 1998, Ottawa. *Conference Proceedings...* Ottawa, 1998, p. 89-95.
- MOREIRA, Antônio Cláudio M.L. Megaprojetos & ambiente urbano: parâmetros para elaboração do Relatório de Impacto de Vizinhança. *Pós - Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP*, São Paulo: FAUUSP, n. 7, p. 107-118., 1999.
- MORETTI, Ricardo. *Critérios de urbanização para empreendimentos habitacionais*. 1997. (Tese de Doutorado, Engenharia Civil) – Escola Politécnica, USP, São Paulo, 1997.

- MUMFORD, Lewis. *A cidade na história*. São Paulo: Martins Fontes, 1998, 742 p.
- MUNNER, T.; GUL, M.; KINGHORN, D.. Development of a meteorological illuminance model for daylight computations. *Applied Energy*. London: Elsevier. v. 59, n. 4, p. 235-260, 1998.
- NEUFERT, Ernst. *A arte de projetar em arquitetura*. 5ª ed. São Paulo: Gustavo Gili, 1998.
- NG, Edward. A new method for daylight design in high density cities – experiences from Hong Kong. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 20, Santiago, 2003. *Proceedings...*Santiago: PLEA, 2003, D-6. (Available in CD-ROM).
- OBOLENSKY, N.V., KORZIN, O. A.. Insolation and sun control in the field of construction: the progressive ways of their normalization and regulation. In: CIB SYMPOSIUM IN BUILDING CLIMATOLOGY, Moscow, 1982. *Proceedings...*Moscow: CIB, 1982, p.498-521.
- OLGAY, Victor. *Arquitectura y clima; manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili, 1998, 203 p.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento. *Nosso Futuro Comum*. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1988. 1-26.
- PACHECO, R. S. et al. Atores e conflitos em questões ambientais urbanas. *Espaço & Debates* 35:46-51. São Paulo: NERU, 1992
- PEREIRA, Elizabeth et al. Coletores solares de baixo custo para residências, conjuntos habitacionais, escolas públicas e creches. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 3, Gramado, 1995. *Anais...*Gramado: ANTAC, 1995, p.305-310.
- PEREIRA, Fernando O. R.; SILVA, Carlos A. N.; TURKIENIKZ, Benamy. A methodology for sunlight urban planning: a computer-based solar and sky vault obstruction analysis. *Solar Energy*. London: Elsevier Science, v. 70, n. 3, p. 217-226, 2001.
- PEREZ, R. SEALS, R. MICHALSKY, J. All-weather model for sky luminance distribution: preliminary configuration and validation. *Solar Energy*. Pergamon. v. 50 n. 3. p. 235-245. 1993.
- POULTON, Michael. Externalities, transaction cost, public choice and the appeal of zoning. *Town Planning Review*, Liverpool: University of Liverpool, v. 68, n. 1, 81-92, 1997.
- RANA, Ashish. Evaluation of a renewable energy scenario in India for economic and CO₂ mitigation effects. *RURDS*, Blackwell, v. 15, n. 1, p. 45-54, 2003
- RIBEIRO, Maurício Andrés; MELLO, Hygina Bruzzi de. *Arquitetura e Energia. Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*, Belo Horizonte: PUC-MG, n. 4, 63-96, maio de 1996.

- RIVERO, Roberto. *Arquitectura y Clima*. Montevideo: Universidad de la Republica, Facultad de Arquitectura, 1988. 278 p.
- ROBBINS, Claude L.. *Daylighting: design and analysis*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1996.
- RORIZ, Maurício. Consumo de energia no condicionamento térmico de edificações.; um método de avaliação. ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO,6, São Pedro, 2001. *Anais...*São Pedro: ANTAC, 2001. (CD-ROM)
- RORIZ, Maurício. *Conforto térmico em edificações: um modelo matemático e uma aplicação*. 1996. 185 f. (Tese de doutoramento, Estruturas Ambientais Urbanas) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Paulo, 1996.
- RORIZ, Maurício. Flutuações horárias dos limites de conforto térmico: uma hipótese de modelo adaptativo. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO,7, Curitiba, 2003. *Anais...*Curitiba: ANTAC, 2003. (CD-ROM)
- RUTHER, Ricardo; MONTENEGRO, Alexandre. Building-integrated, grid-connected photovoltaic installations in warm climates: choice of technologies. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 18, Florianópolis, 2001. *Proceedings...*Florianópolis: PLEA, 2001, p.243-248.
- RYLATT, M.; GADSDEN, S.; LOMAS, K.. GIS-based decision support for solar energy planning in urban environment. *Computers, Environment and Urban Systems*. Pergamon, v. 25, p. 579-603, 2001.
- SALAMONI, Isabel; KNOB, Paulo; RUTHER, Ricardo. Methodology to calculate the potential of energy generation in urban areas. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 20, Santiago, 2003. *Proceedings...*Santiago: PLEA, 2003, H-9. (Available in CD-ROM).
- SANTAMOURIS, M. (Ed.). *Energy and climate in the urban built environment*. London: James & James, 2001, 402 p.
- SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D.. *Passive Cooling of Buildings*. London: James & James, 1996, 470p.
- SCARAZZATO, Paulo Sérgio, ASSIS, Eleonora Sad de; SOUZA, Roberta V. G.; ROMERO, Marcelo. Dynamic of daylight in tropical humid climates and its influence on indoor environment. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL TECNOLOGIA, ARQUITETURA E URBANISMO. São Paulo, 1996. *Anais...* São Paulo: NUTAU, 1996, p. 57-62.
- SCARAZZATO, Paulo. *Dia típico de projeto aplicado à iluminação natural; dados referenciais para localidades brasileiras*. 1995. (Tese de Doutorado, Estruturas Ambientais Urbanas) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Paulo, 1995.

- SCHENEIDER, Wolf. *De Babilônia a Brasília; las ciudades y sus hombres*. Barcelona: Noguer, 1961. 522p.
- SIGNOR, Regis. *Análise de regressão do consumo de energia elétrica frente a variáveis arquitetônicas para edifícios comerciais climatizados em 14 capitais brasileiras*. Florianópolis: UFSC, 1999, 122 p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).
- SOLETROL. *Como funciona um aquecedor solar*. São Paulo. 2001. Disponível em <<http://www.soletrol.com.br/>>. Citado em: 29 jun. 2004
- SOUZA, Roberta Vieira Gonçalves de. *Iluminação natural em edificações: cálculo de iluminâncias internas; Desenvolvimento de ferramenta simplificada*. 1997.159 f. (Dissertação de Mestrado, Construção Civil) – Escola de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 1997.
- STEADMAN, Philip. *Energia, Medio Ambiente y Edificación*. Madrid: H. Blume, 192, 324 p.
- SZOKOLAY, Steven. *Building Thermal Design*. Queensland: University of Queensland. 1987.
- SZOKOLAY, Steven. *PLEA Notes: Design Tools and Techniques - Solar Geometry*. Queensland: University of Queensland, PLEA 1996.
- TATE, Jonh, MULUGETTA, Yacob. Sustainability: the technocentric challenge. *Town Planning Review*, v. 69, n. 1, 65-86. Liverpool: University of Liverpool, 1998.
- THORNTON, John. Renewables on main street. *Public Works Management & Policy*. Sage, v. 4, n. 3, p. 224-236, 2000.
- UNITED STATES. Department of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. *Utility-scale flat-plate thin film photovoltaics*. Washington: DOE. 2004. Available in: <http://www.eere.energy.gov/consumerinfo/pdfs/thinfilm_pv.pdf>. Cited in: Jun. 28th 2004.
- UNITED STATES. Department of Energy. Solar Energy Research Institute. *Solar envelope zoning; Application to the city planning process; Los Angeles case study*. Los Angeles: Technical Information Office, 1982, 120 p.
- VALE, B. A., VALE, R. J. D.. The ethics of solar energy: or why don't we all live in solar houses. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 14, 1999, Brisbane. *Sustaining the future...* Energy-ecology-architecture. Brisbane: PLEA, 1999. 659-664.
- VARTIAINEN, Eero. A comparison of luminous efficacy model with illuminance and irradiance measurements. *Renewable Energy: Pergamon*. v. 20, p. 265-277, 2000a.
- VARTIAINEN, Eero. A new approach to estimating the diffuse irradiance on inclined surfaces. *Renewable Energy: Pergamon*. v. 20, p. 45-64, 2000b.

- VIANNA, Nelso; GONÇALVES, Joana. *Iluminação e arquitetura*. São Paulo: Virtus, 2001, 381p.
- VIOLA, Eduardo J. A problemática ambiental do Brasil (1971-1991): da proteção ambiental ao desenvolvimento sustentável. *Polis*, n. 3, p. 4-14. São Paulo: Polis, 1991.
- WALDRAM, Percy. Control of urban redevelopment: an examination of current proposals. *Journal of the Royal Society do British Architects*. London. v. 55. n. 10. 462-463.1948.
- YANG, Hongxing; BURNETT, John. Solar power generation from buildings in Hong Kong. In: *PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE*, 14, 1999, Brisbane. *Sustaining the future...* Energy-ecology-architecture. Brisbane: PLEA, 1999. p. 857-851.
- ZAIN-AHMED, A. et al. The availability of daylight form tropical skies – a case study of Malaysia. *Renewable Energy*: Pergamon. v. 25, n.1, p. 21-30, 2002.