

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA CIDADE: ESTRATÉGIAS PARA A PROMOÇÃO DA CAPACIDADE NATURAL DE AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO DOS EDIFÍCIOS

M. Oliveira Panão, H. Gonçalves

Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P. Departamento de Energias Renováveis, Edifício Solar XXI, Estrada do Paço do Lumiar, 22, 1649-038 Lisboa, Portugal

marta.oliveira@ineti.pt, helder.goncalves@ineti.pt

P. Ferrão

IN+, Centro de Estudos em Inovação, Tecnologia e Políticas de Desenvolvimento,
Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico,
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

ferrao@ist.utl.pt

Resumo

Este estudo apresenta uma técnica para, a partir de um dado índice de construção, encontrar as formas urbanas mais favoráveis ao desempenho térmico de edifícios, com base na absorptância efectiva do edifício no Inverno e no Verão. Esse parâmetro é indicativo da exposição solar do mesmo e da capacidade natural de aquecimento de um edifício quando esse se encontra inserido numa malha urbana. A avaliação da absorptância efectiva para as duas estações do ano permitiu encontrar as formas de organização da malha que beneficiam a acessibilidade solar de Inverno, mas restringem-na no Verão.

Para o cálculo da absorptância efectiva utiliza-se o Método das Matrizes Urbanas que consiste em obter para cada geometria, uma matriz Ψ que descreve a forma como a radiação que incide em cada uma das parcelas que compõem as superfícies do bloco urbano se distribui pelas restantes superfícies. Essa matriz integra os factores de forma entre as superfícies e as respectivas propriedades de absorpção considerando, dessa forma, as reflexões múltiplas que ocorrem no interior do espaço urbano.

A aplicação de uma metodologia de optimização a diversas formas urbanas, com base no conceito de algoritmo genético, permitiu concluir que, para as latitudes de 37° e 42°, as malhas urbanas mais favoráveis são os blocos de secção rectangular, com 3 a 5 pisos, dispostos segundo um eixo Este-Oeste por forma a possuírem uma maior fachada exposta a Sul. O espaçamento entre blocos é sempre maximizado na direcção Norte-Sul por forma a permitir, no Inverno, uma maior exposição solar da fachada Sul e, por outro lado, minimizando o espaçamento entre blocos na direcção Este-Oeste, prevenir os excessivos ganhos solares na estação de Verão. Para uma latitude de 37° são ainda soluções blocos de secção quadrangular com 5 a 8 pisos, que formam uma malha com ângulo de $\pm 15^\circ$ relativamente à direcção dos pontos cardeais.

1. Introdução

As imagens de satélite ilustram que uma cidade resulta da conjugação de padrões de organização, ou malhas urbanas, que se distinguem pela forma como os edifícios se encontram dispostos no espaço (Figura 1).



**Figura 1 – Exemplos da malha urbana:
aspecto da cidade de Coimbra (esquerda) e Lisboa (direita).**

Os climas temperados possuem estações do ano com características muito demarcadas, pelo que, a disposição ideal dos edifícios é aquela que favorece a absorção de radiação solar no Inverno, mas que a limita no Verão. A morfologia urbana é, assim, uma condicionante importante ao desempenho térmico dos edifícios na medida em que faz variar a exposição solar dos edifícios. Uma escolha adequada da malha urbana pode ter consequências directas na eficiência energética da cidade, por uma redução no consumo de energia para climatização.

A disponibilidade ou acessibilidade solar pode ser, de alguma forma, medida através de diversos parâmetros: número de horas de exposição solar (Shao, 1990/91), índice de acessibilidade solar (Arnfield, 1990) ou envolvente solar (Knowles, 2003). Esses diferem da capacidade de um edifício absorver a radiação solar disponível, na medida em que consideram apenas a radiação solar que incide na superfície.

O espaço urbano, pelo efeito das múltiplas reflexões entre os edifícios, aumenta a capacidade de uma superfície absorver radiação (redução do albedo efectivo), no entanto, os sombreamentos entre os edifícios reduzem significativamente a radiação solar que incide nas fachadas. Por forma a contabilizar ambos os efeitos, estabelece-se o conceito de *absorptância efectiva do edifício* (Secção 2) indicador da capacidade que o edifício tem de absorver a radiação solar disponível. Esse parâmetro é indicativo da capacidade natural que uma malha urbana tem para "aquecer".

A integração dos resultados para as estações de Verão e de Inverno permite estabelecer um conjunto de regras para a organização da morfologia urbana, por forma a promover um melhor desempenho térmico das edificações urbanas (Secção 3).

2. Metodologia

2.1 Absorptância efectiva de um edifício

Define-se como absorptância efectiva de um edifício (α_b) a razão entre a radiação total absorvida pelas suas superfícies (cobertura e paredes) e a radiação total que incide no espaço urbano que esse ocupa, que se designa por unidade urbana, e que inclui o espaçamento necessário entre edifícios.

$$\alpha_b = \alpha_c \frac{A_c}{A_{uu}} + \alpha_p \frac{A_p}{A_{uu}} \quad (1)$$

Na equação anterior α_c e α_p são, respectivamente, as absorptâncias efectivas da cobertura e das paredes; A_c e A_p as áreas da cobertura e das paredes e A_{uu} a área da secção horizontal da unidade urbana.

A absorptância efectiva de uma superfície é definida como a absorptividade de uma superfície equivalente, com a mesma área, colocada na horizontal e sem obstruções de edifícios vizinhos. No caso de uma estrutura em que todos os edifícios possuem a mesma altura, a absorptância efectiva da cobertura coincide com a sua absorptividade. A absorptância efectiva das paredes, α_p , é calculada pelo método das matrizes urbanas (Oliveira Panão et al., *in press*).

O método consiste em obter, para cada geometria, um matriz Ψ que descreve a forma como a radiação que incide em cada uma das superfícies, se distribui por cada uma das parcelas que compõem a estrutura urbana. Essa matriz integra os factores de forma entre as sub-superfícies e as respectivas propriedades de absorpção. Uma vez que se obtenha a matriz urbana Ψ , o vector do balanço radiativo de todas as sub-superfícies, Φ , é obtido simplesmente por:

$$\Phi = \Psi \cdot \Omega \quad (2)$$

em que Ω é um vector construído com base nas irradiâncias de cada sub-superfície (radiação solar directa). A componente de Ω referente à superfície fictícia que constitui o topo da unidade urbana é igual à densidade de fluxo da radiação difusa D .

Segundo esse mesmo método, a absorptância efectiva de uma superfície genérica, composta por s sub-superfícies, é igual ao produto interno entre dois vectores κ e ω definidos por:

$$\kappa_j = \frac{\sum_{i=1}^s A_i \Psi_{i,j}}{\sum_{i=1}^s A_i} \quad (3)$$

$$\omega_j = \frac{\Omega_j}{\Lambda} \quad (4)$$

em que A_i é a área de cada sub-superfície i e Λ toma o valor da densidade de fluxo da radiação global.

2.2 Malha urbana

O modelo utilizado para o cálculo dos fluxos radiativos no interior de uma estrutura urbana apresenta características tridimensionais em que podem variar independentemente cada um dos seis parâmetros representados na Figura 2.

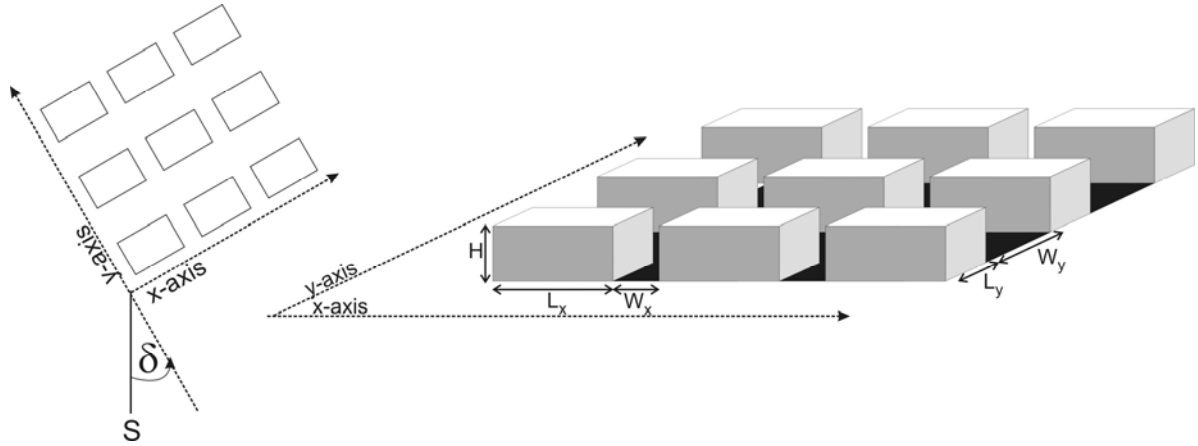


Figura 2 – Variáveis da geometria urbana: azimuth da malha (δ); altura (H), largura (L_x) e profundidade (L_y) dos edifícios; espaçamento entre os edifícios nas duas direcções (W_x e W_y).

A absorptância efectiva de um edifício foi calculada para um conjunto de geometrias em que se fizeram variar as dimensões dos blocos (altura H , largura L_x e profundidade L_y) bem como o espaçamento entre os mesmos segundo as direcções x e y (W_x e W_y).

Optou-se por comparar soluções urbanas com o mesmo índice de construção, I_c , parâmetro esse definido pela razão entre a área total de pavimentos e a área da unidade urbana. Adoptando-se um pé-direito exterior do edifício igual a 3, I_c pode ser expresso em função dos vários parâmetros que definem a geometria da Figura 2, por:

$$I_c = \frac{n_{\text{pisos}} A_{\text{pav}}}{A_{\text{uu}}} = \frac{H L_x L_y}{3(L_x + W_x)(L_y + W_y)} \quad (5)$$

Este estudo aplicou-se a locais com latitude igual a 37° e 42° , extremos do território de Portugal continental, em dois dias do ano: o solstício de Verão e Inverno (dias Julianos iguais a 172 e 355, respectivamente). A absorptância efectiva do edifício calculada para cada as estações de Verão e Inverno são identificadas, neste texto, por α_v e α_l , respectivamente.

2.3 Optimização da malha urbana

A variabilidade dos parâmetros que definem a geometria da Figura 2 condiciona o cálculo da absorptância a um conjunto alargado de soluções de malha urbana. Para além disso, os estudos de sensibilidade aplicados a uma das variáveis, fixando as restantes, possibilitam apenas encontrar soluções óptimas 'locais', sendo as conclusões dificilmente generalizáveis a outro conjunto de parâmetros.

Desta forma, utilizou-se o conceito de algoritmo genético que, através de cruzamentos e mutações dos *genes* que descrevem cada geometria, conduzem os resultados a convergir para um conjunto de malhas urbanas óptimas, evitando por isso o cálculo exaustivo de todas as geometrias (Figura 3).

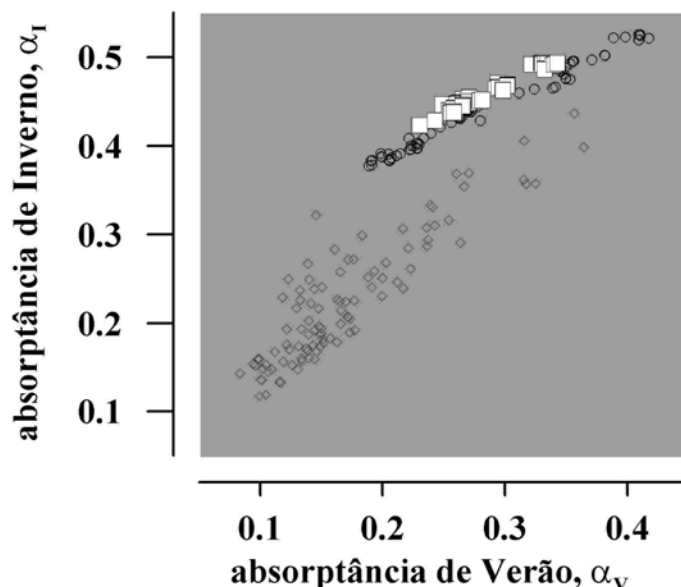


Figura 3 - Absorptância efectiva de um edifício no Inverno e no Verão, parâmetros de base para a optimização da malha urbana:
 ◇ população inicial; ○ após 10 gerações; □ após 20 gerações.

O *código genético* que descreve cada *gene*, ou solução, é um vector cujas componentes são: número de pisos do edifício n , razão de dimensões do edifício l ($= L_x/L_y$), razão entre o espaçamento nas duas direcções w ($= W_x/W_y$), dimensão base do edifício L ($= L_y$) e azimuth da malha δ . Na Tabela 1 apresentam-se os intervalos de valores discretos para cada uma das variáveis do código genético. Para todos os casos estudados, assume-se que o índice de construção se mantém constante e igual a 1, a absorptividade das paredes e coberturas igual a 0.5 e do solo 0.8.

Tabela 1 - Intervalos possíveis para as variáveis dos casos estudados.

Variáveis	m	l	w	L (m)	δ (deg)
Casos estudados	2 – 10	1 – 15	0.25, 0.33, 0.50,	10 – 30	0 – 165
	intervalos de 1	intervalos de 1	1, 2, 3, 4	intervalos de 5	intervalos de 15

A optimização baseia-se em encontrar soluções em que seja maximizado o parâmetro ζ definido por:

$$\zeta = \alpha_I (1 - \alpha_V) \quad (6)$$

soluções essas que correspondem a malhas com uma absorptância efectiva do edifício elevada no Inverno e, simultaneamente, minimizada para o Verão.

3. Resultados

3.1 Latitude 37°

Para um local cuja latitude seja 37°, assume-se uma radiação global diária de 9.2 e 28.8 MJm⁻², respectivamente, para o solstício de Inverno e Verão. As soluções de malha urbana que melhor se adaptam às condições de radiação desse local são caracterizadas por uma absorptância efectiva do edifício de 0.42–0.45 para o Inverno, e de 0.23–0.28 para o Verão (Tabela 2). Estes valores equivalem a dizer que os edifícios construídos numa malha urbana com as características sintetizadas na Tabela 2, absorvem 3.9-4.1 MJ por m² de área urbana (m²a.u.), no Inverno, e 6.6-8.1 MJ/m²a.u., no Verão.

O conjunto de soluções óptimas engloba malhas urbanas diversificadas (Figura 4 e Tabela 2), nomeadamente, blocos de secção rectangular com 5, 6 ou 8 pisos com um azimuth de ±15° (S3, S10, S20, S22); pequenos blocos com secção rectangular, 3 a 4 pisos e azimuth de 0° (S1, S2, S4, S12–S19, S23) ou +15° (S9, S21) e, por fim, blocos longos com secção rectangular, 3 pisos e azimuth de 0° (S5–S8, S11). Todas as soluções são caracterizadas por um maior espaçamento na direcção y (Figura 2), $w < 1$, o que corresponde à direcção Norte-Sul, para um azimuth da malha de 0°.

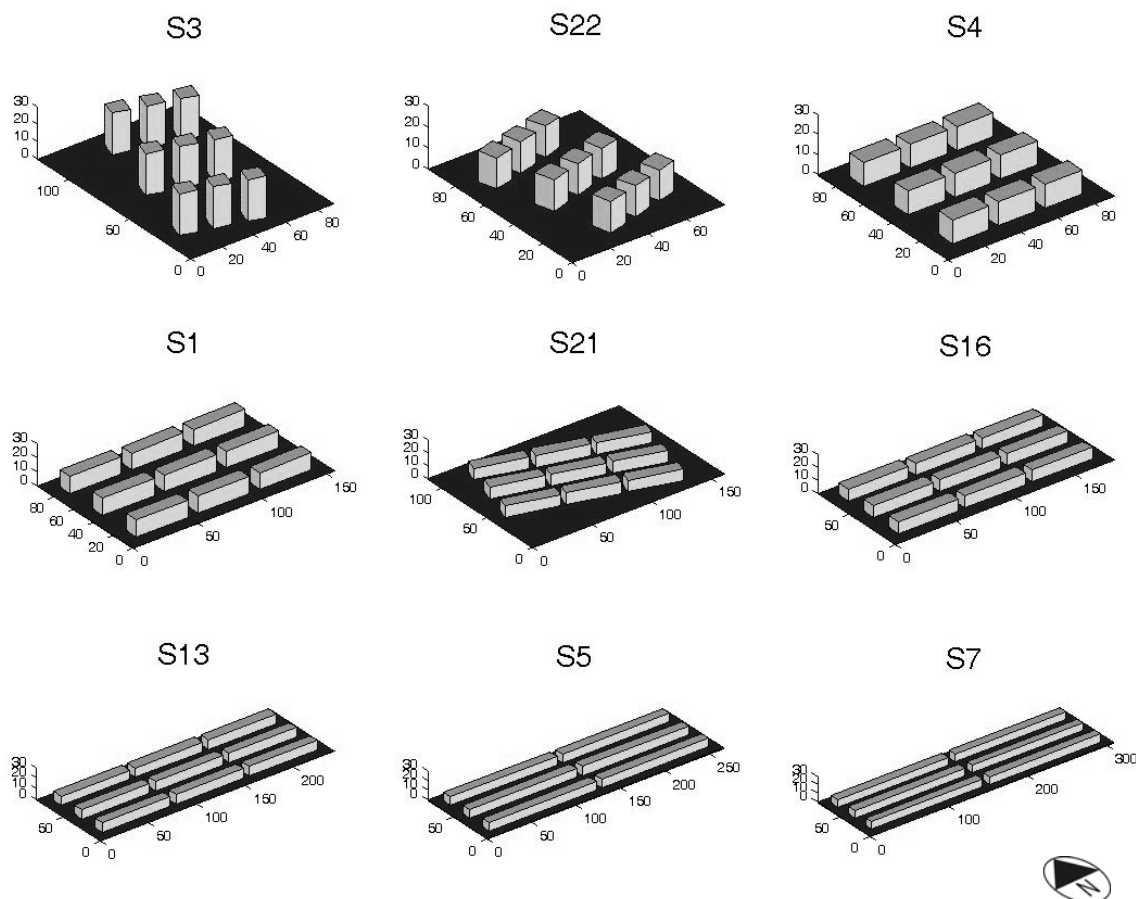


Figura 4 - Soluções óptimas para a malha urbana: latitude 37° e $I_c = 1$ (ver Tabela 2).

Unidades em metros.

Tabela 2 - Soluções óptimas para a malha urbana: latitude 37° e $I_c = 1$.

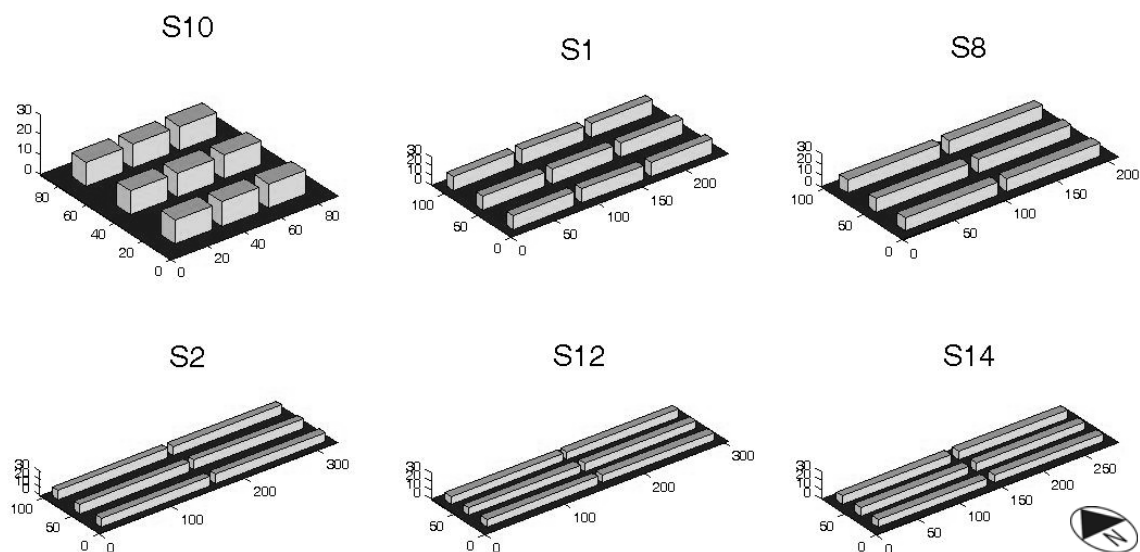
<i>Soluções</i>	<i>n</i>	<i>l</i>	<i>w</i>	<i>L (m)</i>	<i>δ (graus)</i>	α_v	α_i	ζ
S1	4	4	0.33	10	0	0.23	0.42	0.33
S2	4	4	0.25	10	0	0.23	0.42	0.33
S3	8	1	0.25	10	+15	0.24	0.43	0.33
S4	4	2	0.25	10	0	0.25	0.45	0.34
S5	3	12	0.33	10	0	0.25	0.44	0.33
S6	3	12	0.25	10	0	0.25	0.44	0.33
S7	3	14	0.50	10	0	0.26	0.44	0.33
S8	3	9	0.33	10	0	0.26	0.44	0.33
S9	4	2	0.25	10	+15	0.26	0.44	0.33
S10	6	1	0.25	10	-15	0.26	0.44	0.33
S11	3	8	0.25	10	0	0.26	0.44	0.33
S12	3	6	0.25	10	0	0.26	0.45	0.33
S13	3	7	0.33	10	0	0.26	0.45	0.33
S14	3	6	0.33	10	0	0.26	0.45	0.33
S15	3	5	0.25	10	0	0.27	0.45	0.33
S16	3	5	0.33	10	0	0.27	0.45	0.33
S17	3	6	0.50	10	0	0.27	0.45	0.33
S18	3	5	0.50	10	0	0.27	0.45	0.33
S19	3	4	0.33	10	0	0.27	0.45	0.33
S20	5	1	0.33	10	+15	0.28	0.45	0.33
S21	3	4	0.25	10	+15	0.28	0.45	0.33
S22	5	1	0.33	10	-15	0.28	0.45	0.33
S23	3	3	0.33	10	+15	0.28	0.45	0.32

A dimensão base do edifício é para todos os casos igual ao mínimo valor para essa variável ($L = 10$ m). Esse valor pode ser, em alguns casos, construtivamente inaplicável. Porém, na medida em que este estudo tem por base relações geométricas, é possível extrapolar os resultados para dimensões superiores. Um bloco de secção quadrangular com 20 m de dimensão base (20x20) e 10 pisos (equivalente à solução S22) ou um bloco de secção rectangular com a mesma dimensão base (40x20) e 8 pisos (equivalente à solução S4), são soluções óptimas quando comparadas com outras geometrias com a mesma dimensão base.

3.2 Latitude 42°

Para uma latitude de 42°, assumiu-se o valor de 28.8 MJm^{-2} para a radiação global de um dia de Verão e 7.1 MJm^{-2} para um dia de Inverno. A aplicação do conceito de algoritmo genético na procura de malhas urbanas que maximizem o valor de ζ , resultou num conjunto de resultados que são caracterizados por α_i variável entre 0.41 e 0.45, e α_v entre 0.20 e 0.27 (Tabela 3). De salientar o facto de, para esta latitude, comparativamente a 37°, existirem soluções com uma menor absorptância na estação de Verão, apesar do valor da radiação global ser idêntico. Pelo que os edifícios absorvem $5.8\text{--}7.7 \text{ MJ/m}^2\text{a.u.}$ no Verão. No Inverno esse valor é de $2.9\text{--}3.2 \text{ MJ/m}^2\text{a.u.}$

As malhas urbanas óptimas são apenas de dois tipos (Figura 5): pequenos blocos de secção rectangular com 3 a 5 pisos (S1, S9–S10, S21–S23) ou blocos longos de secção rectangular com 3 a 4 pisos (S2–S8, S11–S20). Em ambos os tipos de malha o azimuth da malha é sempre igual a 0° e o espaçamento entre blocos na direcção Norte-Sul é sempre superior ao Este-Oeste ($w < 1$).



**Figura 5 - Soluções óptimas para a malha urbana: latitude 42° e $I_c = 1$ (ver Tabela 3).
Unidades em metros.**

Tabela 3 - Soluções óptimas para a malha urbana: latitude 42° e $I_c = 1$.

Soluções	n	l	w	L (m)	δ (graus)	α_v	α_l	ζ
S1	5	7	0.25	10	0	0.20	0.41	0.33
S2	4	15	0.25	10	0	0.22	0.42	0.33
S3	4	13	0.25	10	0	0.22	0.42	0.33
S4	4	12	0.25	10	0	0.22	0.42	0.33
S5	4	10	0.25	10	0	0.22	0.42	0.33
S6	4	11	0.33	10	0	0.22	0.42	0.33
S7	4	10	0.33	10	0	0.22	0.42	0.33
S8	4	9	0.33	10	0	0.22	0.42	0.33
S9	4	7	0.25	10	0	0.23	0.43	0.33
S10	4	2	0.25	10	0	0.26	0.44	0.33
S11	3	15	0.50	10	0	0.26	0.44	0.33
S12	3	14	0.25	10	0	0.26	0.45	0.33
S13	3	15	0.33	10	0	0.26	0.45	0.33
S14	3	13	0.50	10	0	0.26	0.44	0.33
S15	3	12	0.25	10	0	0.26	0.45	0.33
S16	3	11	0.33	10	0	0.26	0.44	0.33
S17	3	13	0.25	10	0	0.26	0.45	0.33
S18	3	11	0.25	10	0	0.26	0.45	0.33
S19	3	10	0.33	10	0	0.26	0.44	0.33
S20	3	8	0.25	10	0	0.26	0.45	0.33
S21	3	7	0.25	10	0	0.27	0.45	0.33
S22	3	6	0.25	10	0	0.27	0.45	0.33
S23	3	7	0.33	10	0	0.27	0.45	0.33

3. Conclusões

Neste estudo, com base na absorptância efectiva do edifício calculada para o solstício de Verão e Inverno, propõem-se um conjunto de formas de organização dos edifícios no espaço, por forma, a promover uma maior absorção de radiação solar na estação de Inverno, reduzindo, tanto quanto possível, a radiação solar absorvida pelo edifício na estação de Verão.

Para uma latitude de 37°, as malhas que satisfazem esses requisitos são:

- Blocos de secção quadrangular com 5 a 8 pisos e azimuth da malha desfazado de $\pm 15^\circ$ em relação à direcção dos pontos cardeais;
- Pequenos blocos de secção rectangular com 3 a 4 pisos e azimuth da malha de 0° ou $\pm 15^\circ$;
- Blocos longos de secção rectangular com 3 pisos e azimuth da malha de 0° .

Para uma latitude de 42°, as malhas são caracterizadas por:

- Pequenos blocos de secção rectangular com 3 a 5 pisos e azimuth da malha de 0° ;
- Blocos longos de secção rectangular com 3 a 4 pisos e azimuth da malha de 0° .

Para ambas as latitudes verifica-se que as soluções óptimas possuem um maior espaçamento na direcção Norte-Sul comparativamente à direcção Este-Oeste. Para rotações da malha de $\pm 15^\circ$, o maior espaçamento é verificado na direcção que mais se aproxima de Norte-Sul.

O resultado deste estudo é relevante para o planeamento e organização de novas áreas urbanas, na medida em que propõe formas que não inviabilizam a exposição solar na estação de Inverno e, simultaneamente, actuam na prevenção dos ganhos solares excessivos na estação de Verão. Estas conclusões devem ser entendidas, no entanto, como indicações a integrar numa análise mais abrangente que deve incluir outros aspectos não menos importantes, como a ventilação dos espaços e dispersão de poluentes, prevenção sonora, aspectos funcionais e estéticos (Golany, 1996).

Agradecimentos

Os autores agradecem a contribuição da Fundação para a Ciência e Tecnologia, do Ministério para a Ciência e Tecnologia, pelo apoio financeiro através da atribuição de uma bolsa de doutoramento a M. Oliveira Panão (SFRH/BD/12256/2003).

Referências

- Arnfield AJ (1990). Street design and urban canyon solar access. *Energy and Buildings*, 14: 117-131.
- Golany GG (1996). Urban design morphology and thermal performance. *Atmospheric Environment*; 30: 455-465.
- Knowles RL (2003). The solar envelope: its meaning for energy and buildings. *Energy and Buildings*, 35: 15-25.

Oliveira Panão M, Gonçalves H, Ferrão P (*in press*). A matrix approach coupled with Monte Carlo techniques for solving the net radiative balance of building surfaces on the urban environment, Boundary-Layer Meteorology, doi:10.1007/s10546-006-9088-y.

Shao J (1990/91). Calculation of sunshine duration and saving of land use in urban building design. Energy and Buildings, 15-16: 407-415.