

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM MODELO DE BALANÇO DE ENERGIA PARA A CLIMATOLOGIA URBANA

BARBIRATO, João Carlos C. (1); BARBIRATO, Gianna M. (2)

(1) Doutor em Engenharia, professor do Departamento de Engenharia Estrutural - EES

(2) Arquiteta, Doutora em Ciência da Engenharia Ambiental, pesquisadora do Grupo de Estudos em Conforto Ambiental - GECA

Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas

Campus A.C. Simões CEP 57072-920 Tabuleiro dos Martins, Maceió – AL, Brasil

Email: jccb@fapeal.br , web page: <http://www.ctec.ufal.br/ees>

Email: gmb@fapeal.br , web page: <http://www.ctec.ufal.br/geca>

RESUMO

Apresentam-se, neste trabalho, as equações inerentes a um modelo climático urbano de balanço de energia, unidimensional, explicitando-se cada parcela componente, de modo que a sua implementação computacional auxilie a análise térmica de espaços urbanos, possibilitando simulações e previsões de ambientes térmicos diferenciados conforme mudanças de parâmetros físicos e meteorológicos. Segue o tratamento numérico das equações diferenciais que surgem no modelo, utilizando o Método das Diferenças Finitas. O sistema não linear obtido através da formulação, é resolvido adotando-se um procedimento computacional iterativo. É apresentada uma seqüência das rotinas computacionais requeridas para a implementação das equações encontradas, visando a aplicação em microcomputadores. São identificados os dados de entrada requeridos pelo programa computacional e todos os parâmetros envolvidos no problema. São apresentados, ainda, resultados dos testes de sensibilidade efetuados com o parâmetro "massa de concreto". Um exemplo processado para a cidade de Maceió-AL é apresentado, a fim de demonstrar a eficiência da formulação e do algoritmo utilizados.

ABSTRACT

This work presents an urban energy balance model, unidimensional, showing the parts of the equations components, for the computational implementation, to subsidize the thermal analysis of urban spaces, to provide simulations and predictions in changes of physical and meteorological parameters. Soon after, a numerical treatment of the differential equations is made, by the Finite Difference Method. In the formulation, there is a non-linear system, solved by computational routines, for use in microcomputers. The inputs required by the program and the parameters are identified. Sensibility tests with "concrete mass" parameter are presented. An example for the City of Maceió – AL is processed, to demonstrate the formulation and algorithm accuracy.

1. INTRODUÇÃO

Muitos problemas relacionados ao conforto térmico dos espaços, e especificamente à climatologia urbana, necessitam do auxílio da modelagem numérica, mas nota-se que essa interface é ainda pequena, já que os profissionais envolvidos de ambas as partes têm formações acadêmicas bastante diferenciada.

Sabe-se, por outro lado, que os modelos numéricos climáticos de balanço de energia da superfície urbana têm sido bastante aplicados em trabalhos didáticos e de pesquisa. BORNSTEIN (1986) enfatiza o potencial dos modelos atmosféricos no planejamento do desenvolvimento urbano, na criação de climas adequados aos assentamentos urbanos ou mesmo no planejamento de novas cidades e no teste de diferentes configurações de edifícios e materiais.

As cidades, entretanto, são uma das poucas superfícies que permanecem sem análise satisfatória de balanço de energia, devido ao grande número de fenômenos envolvidos em cada termo da equação do balanço e à dificuldade de sua precisa quantificação. O trabalho objetiva, portanto, mostrar a implementação computacional de um modelo numérico climático de balanço de energia, de modo a torná-lo uma ferramenta útil para investigações ligadas ao planejamento e conforto térmico dos espaços urbanos.

2. O MODELO CLIMÁTICO URBANO ESTUDADO

O balanço de energia da superfície constitui o seccionamento da energia radiante absorvida na superfície da terra em fluxos de calor que controlam o clima da superfície. O modelo climático urbano de TSO et al. (1990) representa o balanço de energia de uma fração urbana conforme figura 1, sobre um plano da superfície urbana:

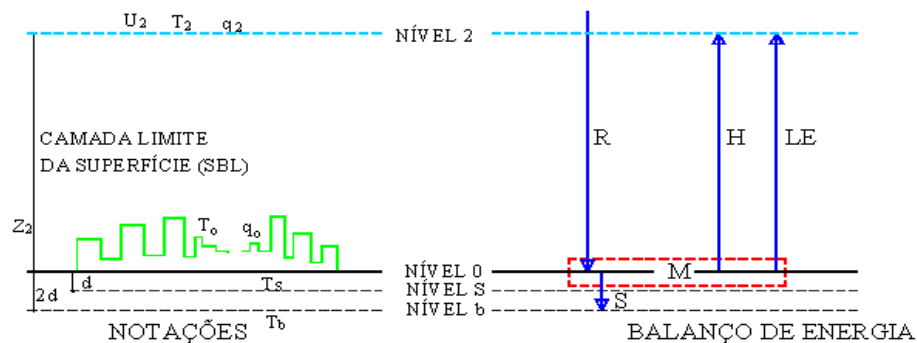


FIGURA 1 - Esquema do Modelo. Fonte: TSO et al., 1990, p.144.

O princípio do modelo é de que a massa construída urbana consiste de um plano homogêneo, avolumétrico, mas que é capaz de armazenar energia térmica à taxa de:

$$M = m_c C_c \frac{dT_o}{dt} \quad (1)$$

onde:

M = armazenamento de energia térmica (W/m²)

m_c = massa construída por unidade de área (kg/m²)

C_c = calor específico da massa construída, à pressão constante (kJ/kgK)

$\frac{dT_o}{dt}$ = taxa de mudança da temperatura do ar, em relação ao tempo.

No plano da superfície (nível 0, conforme figura 1), as temperaturas do solo, das construções e do ar estão sempre em equilíbrio térmico (T₀), sob a seguinte equação de balanço de energia:

$$M = R - H - LE - S \quad (2)$$

onde:

M = armazenamento de energia (W / m²);

R = fluxo de radiação líquida (W / m²);

H = fluxo de calor sensível para o ar (W / m²);

L = calor latente da água (J / kg);

E = taxa de evaporação (portanto, LE é o fluxo de calor latente) (kg / m²s);

S = fluxo de calor no solo (W / m²).

Para solucionar cada termo do balanço de energia, são utilizadas as seguintes equações (descritas detalhadamente em BARBIRATO, 1998):

$$H = \frac{\rho_a C_p K^2 U_2}{\left[\ln \left(\frac{Z_2}{Z_o} \right) \right]} (T_2 - T_o) \quad (3)$$

$$LE = \frac{\rho_a L K^2 U_2}{\left[\ln \left(\frac{Z_2}{Z_o} \right) \right]} (q_2 - q_o) \quad (4)$$

$$q_o = E_f \left(3,74 + 2,64 \left(\frac{T_o}{10} \right)^2 \right) \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

$$S = -k_s \frac{dT_s}{dz} \quad (6)$$

$$R = A \times \sin(wt) \quad (7)$$

onde:

A = amplitude do fluxo de radiação líquida;

C_s = calor específico do solo (J/kg °C);

ρ_a = densidade do ar (kg / m³);

ρ_s = densidade do solo (kg / m³);

Δ t = passo de tempo (s);

C_p = calor específico do ar à pressão constante ($J / kg^{\circ}C$);

d = profundidade do solo ao nível S (m).

E_f = fração de evaporação

K = constante de von Kármán ($\cong 0,40$) para a espessura da camada limite;

k_s = condutividade térmica do solo ($W / m^{\circ}C$);

q_0, q_2 = umidades específicas aos níveis 0 e 2, respectivamente;

T_0, T_2 = temperaturas aos níveis 0 e 2, respectivamente ($^{\circ}C$).

T_s = temperaturas do solo no nível S ($^{\circ}C$);

T_s' = temperatura do solo ao nível S , do passo de tempo anterior ($^{\circ}C$).

U_2 = velocidade do vento ao nível 2 (m/s);

Z_0 = rugosidade da superfície (m) que expressa a morfologia geométrica da superfície

Z_2 = altura da camada limite urbana (m);

3. TRATAMENTO NUMÉRICO DAS EQUAÇÕES

A expressão matemática que promove a ligação entre os níveis 0, s e b , detalhados no modelo apresentado, é derivada de uma diferença finita, na variável espaço, tendo como intervalo o valor da profundidade d a partir da superfície do solo. Sabe-se que o fluxo de calor no solo é dado pela expressão (6), segundo OKE (1996). Por outro lado, o balanço energético, tendo em vista essas camadas definidas, é verificado por:

$$\frac{\Delta S}{\Delta z} = C_s \frac{\Delta T_s}{\Delta t} \quad (8)$$

Aplicando a expressão (6) na relação (8), verifica-se o aparecimento da diferencial de segunda ordem no espaço, que após receber o tratamento aproximativo por diferenças finitas, resulta em:

$$\frac{dS}{dz} \cong k_s \frac{(T_b - 2T_s + T_0)}{d^2} \quad (9)$$

Na expressão (8) verifica-se o gradiente de temperatura no nível s , com relação à variável tempo, também aproximado por uma expressão de diferença, ou seja,

$$\frac{dT_s}{dt} \cong \frac{(T_s^t - T_s^{t-1})}{\Delta t} \quad (10)$$

Chega-se, afinal, em uma expressão que relaciona as temperaturas nos diversos níveis estabelecidos no modelo, de maneira aproximada (TSO et al.; 1990):

$$T_s^t = T_s^{t-1} + \frac{k_s}{\rho_s C_s} (T_b - 2T_s + T_0). \quad (11)$$

A equação (11) sugere a aplicação de procedimentos numéricos iterativos, já que a temperatura no nível s , T_s , apresenta-se ao mesmo tempo como resposta e dado de entrada.

A expressão (1) possui uma diferencial de primeira ordem também aproximada por uma relação de diferença, resultando em:

$$M \cong m_c c_c \frac{(T_0^t - T_0^{t-1})}{\ddot{A}t} \quad (12)$$

4. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO

Com as equações descritas nos item anterior, foi desenvolvido um código computacional, com o objetivo de automatizar a solução do problema. O programa gerado – o *BENERG.CPP* – foi testado para o caso apresentado em TSO et al. (1990), obtendo-se perfeita concordância de resultados. Com esse instrumental, foi possível a adaptação do modelo à região de Maceió-AL, demonstrando a coerência da formulação e a eficiência do algoritmo utilizado (BARBIRATO, 1998).

O programa, para uso em microcomputadores, é escrito em linguagem de programação C++ da Borland, para ambiente Windows. Calcula os valores das parcelas de energia dadas pelas equações (3), (4), (5), (6), (7) e (12), e temperatura no nível *s*, definida em (11), para cada passo de tempo Δt (de 90s ou 1min30Seg). Para passar para o intervalo seguinte, é necessário que as equações (2) e (11) sejam satisfeitas. Para se chegar a um erro satisfatório, é utilizado o algoritmo iterativo de Newton (conhecido como bissecção);

O programa simula um período de tempo de 48 horas. O intervalo de tempo pode ser alterado para 72 horas, porém, em se tratando de método aproximativo, ou seja, como os valores do instante “*t*” dependem dos encontrados em “*t-1*”, é preciso testar se existe, na prática, a degradação destes valores (erro acumulado). Para 48h não houve degradação dos valores para o Δt adotado.

Os dados do programa são lidos de arquivos montados em qualquer editor de texto, que informam ainda dados particulares da cidade:

- Parâmetros fixos:
 - $\rho_a, C_a, K, U_2, Z_2, Z_0, T_2, L, q_2, k_s, d, \rho_s, C_s, T_b, C_c$;
- dados de entrada:
 - M_c , massa de concreto por unidade de área;
 - E_f , fração de evaporação da superfície;
 - h_p , instante de partida do processo (simulação);
 - $T_s(h_p)$, temperatura do solo no instante h_p ;
 - $T_0(h_p)$, temperatura do ar no instante h_p .

Pode-se introduzir valores da temperatura do ar e do solo, requeridas para o início do processo iterativo, para qualquer hora. O programa, automaticamente, desloca o período de tempo que ele reconhece como de partida.

O programa computacional gera três arquivos de resultados:

- a) com parâmetros de entrada e os utilizados no programa; valores das temperaturas de ar e do solo bem como os valores das parcelas de energia nas 24 horas (de hora em hora);
- b) somente as temperaturas de ar e solo;
- c) somente valores com as parcelas do balanço de energia.

Os dois últimos arquivos são do tipo texto e servem como dados de entrada para o uso de um *software* gráfico qualquer (Excel, Origin, dentre outros).

Para adaptá-lo à cidade em estudo, é necessária alteração de uma subrotina que define a função da parcela R (radiação líquida). Na simulação de uma situação futura (alterações na massa construída, por exemplo) o programa necessita de valores das temperaturas do ar e do solo em um instante qualquer para iniciar o processo iterativo. Pode-se adotar valores de medições presentes (que são dados coerentes) e ao longo dos dois ciclos de tempo o modelo permite a acomodação dos dados calculados.

5. TESTES DE SENSIBILIDADE

Sabe-se que um modelo pode ser avaliado em termos da realidade física dos seus resultados. Isso, porém, não é fácil, devido à complexidade das relações entre as variáveis e parâmetros, que frequentemente torna difícil uma avaliação exata do que afeta determinada mudança, em um dado parâmetro.

Assim, após a comprovação da capacidade do programa *BENERG.CPP* de prever, com resultados satisfatórios, as temperaturas do ar dos ambientes urbanos estudados (BARBIRATO, 1998), procedeu-se o exame da dependência da variável temperatura do ar a alguns parâmetros de entrada do modelo, na forma de testes de sensibilidade. Esses testes tiveram a finalidade de explorar a resposta do modelo a mudanças nos diversos parâmetros de entrada.

Os testes de sensibilidade realizados com o parâmetro massa de concreto (m_c em kg/m^2) por exemplo, mostram pequena variação da temperatura do ar, especialmente a temperatura mínima (ver figura 2 e tabela 1). De qualquer forma, a variável temperatura do ar diminui seus valores máximos, à medida que aumenta a massa de concreto, retardando ainda, para mais tarde, o horário do valor da temperatura máxima registrada. A temperatura mínima, por outro lado, tem seus valores aumentados, para a mesma faixa de variação do parâmetro.

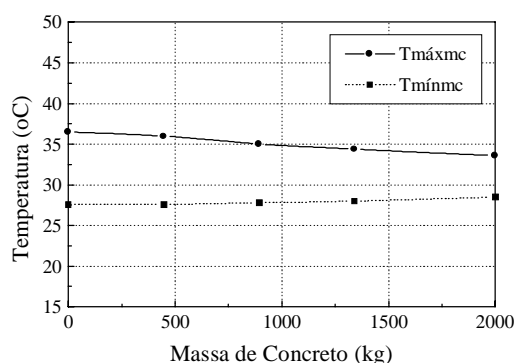


FIGURA 2 – Temperaturas do ar simuladas pelo modelo, para valores de m_c (kg/m^2)

TABELA 1 - Testes de sensibilidade com o parâmetro m_c (kg/m^2)

Valores de m_c (kg/m^2)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Retardo térmico (h)
0	36,5	27,6	12
446.7	36,0	27,6	13
893.4	35,0	27,8	14
1340.15	34,4	28,0	14
2000.0	33,6	28,5	15

6. ESTUDO DE CASO: MACEIÓ-AL

Para demonstrar a eficiência da formulação e do algoritmo utilizados, tomou-se um exemplo para a cidade de Maceió, com o devido ajuste dos parâmetros e dados de entrada requeridos (BARBIRATO, 1998). Fragmento da listagem do arquivo de resultados é mostrado a seguir.

```
***** Arquivo de Resultados *****
Arquivo de Entrada .....: slp3.dat
Tempo de processamento ....: 58 seg.

Valor do intervalo delta_t...: 0.025 = 90 seg.
Dados de entrada:
ro_a.....: 1.175
Ca.....: 1006.000
K.....: 0.400
U2.....: 6.500
Z2.....: 300.000
Zo.....: 1.700
T2.....: 27.500
L.....: 2437000.000
q2.....: 0.003
Ks.....: 1.225
d.....: 0.100
ro_s.....: 1800.000
Cs.....: 1185.000
Tb.....: 25.000
h_partida...: 8
Ts[ 8].....: 26.000
mc.....: 420.200
Cc,,.....: 880.000
To[ 8].....: 30.500
Ef.....: 0.070
```

```
VALORES DAS TEMP. DO SOLO (Ts) E DO AR (To)
Ts[ 0] ...: 26.59 To[ 0]...: 27.22
Ts[ 1] ...: 26.42 To[ 1]...: 27.14
Ts[ 2] ...: 26.30 To[ 2]...: 27.09
```

...

```
Ts[ 23] ...: 26.83 To[ 23]...: 27.33
Ts[ 24] ...: 26.60 To[ 24]...: 27.22
```

RESUMO DOS VALORES DAS PARCELAS DE ENERGIA E RESÍDUO

	M .	R .	H .	LE .	S .	Erro
0	-9.38	-167.04	-12.95	-152.36	7.65	0.000
1	-6.30	-167.04	-16.39	-153.20	8.84	-0.000
2	-4.31	-167.04	-18.71	-153.76	9.74	0.000
...						
23	-14.42	-167.04	-7.68	-151.07	6.13	0.000
24	-9.42	-167.04	-12.89	-152.34	7.62	-0.000

7. CONCLUSÕES

O modelo, apesar de solicitar razoável quantidade de dados de entrada, é relativamente simples, e de fácil aplicação por parte do usuário - planejador, desde que sejam corretamente calculados e estimados os valores dos parâmetros necessários para a partida do modelo. Sabe-se, por outro lado, das limitações dos modelos climáticos urbanos existentes, de uma maneira geral, quanto à sua aplicação para problemas práticos, ligadas à falta de validação com medidas de campo e dificuldades em se especificar as propriedades da complexa superfície urbana.

A aproximação utilizada para as equações que definem o modelo estudado, por diferenças finitas, mostrou um nível satisfatório de precisão. O processamento de um caso qualquer, utilizando-se um microcomputador Pentium, teve um tempo computacional ínfimo de 60s, isso para um $\Delta t = 90s$.

Os valores resultantes dos testes de sensibilidade do modelo, em relação às variações no parâmetro massa de concreto, são significativos, na medida em que coincidem com o que prescreve a literatura, inclusive com os obtidos em medições. Portanto, o modelo é capaz de simular as temperaturas na presença de mudanças na morfologia urbana.

É inegável a importância, hoje, na climatologia urbana, de uma abordagem mais quantitativa dos fenômenos, para que as decisões tomadas no âmbito do planejamento urbano sejam baseadas em informações mensuráveis e, especificamente, mostrem informações mais imediatas com o uso de simulações.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBIRATO, G. M. **Aplicação de modelo de balanço de energia para análise do ambiente térmico urbano de Maceió – AL**. Tese de Doutorado, SHS, EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 1998.
- BORNSTEIN. Urban climate models: nature, limitations and applications. In: **T.R. Oke (ed.), Urban climatology and its applications with special regard to tropical areas**. Mexico, 1984. Proceedings. WMO, Geneva, 1986, p.199-236 (WMO n.652).
- HOLMAN, J.P. **Transferência de calor**. McGraw Hill do Brasil, São Paulo, 1983.
- OKE, T.R. **Boundary layer climates**, Routledge, New York, 1996.
- OKE, T.R.; ZEUNER, G.; JAUREGHI, E. The surface energy balance in Mexico City. **Atmospheric Environment**, vol. 26B, n. 4, 1992, pp.433-444.
- TERJUNG, W.H., & O'ROURKE, P. A. Simulating the causal elements of urban heat islands. **Boundary-Layer Meteorology**, n.19, 1980, pp.93-118.
- TSO, C.P. A survey of urban heat island studies in two tropical cities. **Atmospheric Environment**, vol.30, n. 3, 1996, pp. 507-519.
- TSO, C.P., CHAN, B.K. and HASHIN, M.A. An improvement to the basic energy balance model for urban thermal environment analysis. **Energy and Buildings**, n.14, 1990, pp.143-152.