

OS MODELOS DE BALANÇO DE ENERGIA E SUA APLICAÇÃO NO PLANEJAMENTO URBANO

BARBIRATO, Gianna M. (1); MATTOS, Arthur (2).

- (1) Arquiteta, Doutora em Ciências da Engenharia Ambiental, pesquisadora do Grupo de Estudos em Conforto Ambiental / Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus A. C. Simões - Tabuleiro do Martins, 57072-970 - Maceió – AL, E-mail: gmb@fapeal.br
- (2) Físico, Meteorologista, Prof. Livre Docente da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC-USP, Professor visitante do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, , Av. Salgado Filho s/n, 59000-000, Natal, RN.

RESUMO

Inicialmente, é mostrada a estrutura básica dos modelos de balanço de energia da superfície urbana. Em seguida, são apresentados e analisados alguns modelos para a camada limite urbana e camada intra-urbana, quanto à sua formulação, parâmetros envolvidos nos cálculos dos fluxos e que intervém no meio ambiente climático urbano, resultados obtidos e limitações. Por fim, faz-se a aplicação de um modelo, adaptando-o a frações urbanas diferenciadas na cidade de Maceió – AL. A avaliação do potencial do modelo, após ajuste entre valores de temperatura do ar observados e calculados comprova a utilidade dessa ferramenta no teste de soluções e previsões dentro de problemas relativos ao planejamento e controle térmico de ambientes urbanos e na previsão de possíveis alterações térmicas em consequência de mudanças a que estão sujeitas as cidades.

ABSTRACT

Firstly, the basic structure of the urban energy balance models is shown. Soon after, some models for the urban boundary layer and urban canopy layer are presented and analyzed, in terms of their formulation (components of the balance equation), parameters enveloped in the estimate of the fluxes, results obtained and their limitations. Finally, the application of that tool in the urban planning is discussed by an adaptation of a climate model of urban energy balance to the typical climatic conditions of the city of Maceió-AL, to subsides the urban planning. The evaluation of the model, by observed and calculated air temperature values, shows the importance of that tool in solutions and previsions of urban planning, urban thermal control and further thermal effects of possible future configurations of cities.

1. INTRODUÇÃO

A partir das primeiras investigações sobre as diferenças entre os ambientes rural e urbano, foram desenvolvidos diversos estudos de processos de fluxos de energia, umidade e massa em ambientes urbanos. Esses estudos permitiram uma melhor caracterização da superfície atmosférica afetada pela urbanização.

Nesse contexto, a modelagem matemática é um recurso bastante utilizado na climatologia, já que permite o entendimento dos processos atmosféricos, a previsão dos fenômenos, além de se constituir, até certo ponto, como uma alternativa aos trabalhos de campo para obtenção de dados.

Para identificação das características da superfície urbana e das mais importantes destas na determinação do clima urbano, muitos modelos matemáticos são elaborados com base no entendimento do balanço de energia urbano. Os objetivos desse estudo é, portanto, analisar alguns desses modelos existentes, e discutir a sua aplicação no planejamento urbano, a partir da adaptação de um modelo proposto pela literatura técnica, na previsão do ambiente térmico em frações urbanas diferenciadas de um sistema climático tropical, a cidade de Maceió – AL.

2. OS MODELOS URBANOS DE BALANÇO DE ENERGIA

Os modelos de balanço de energia são comumente classificados como unidimensionais, porque admitem que não há advecção de calor ou umidade. BORNSTEIN(1986) classifica duas categorias de modelos climáticos urbanos de balanço de energia: os modelos da camada intra-urbana (“Urban Canopy Layer” - UCL), ou modelos de microescala, que calculam o balanço de energia de um ‘canyon’ urbano ou edifício; e os modelos da camada limite urbana (“Urban Boundary Layer” - UBL), ou modelos de mesoescala, que dizem respeito à resposta da camada limite urbana com a presença da cidade.

O balanço de energia de uma superfície urbana permite um melhor conhecimento do clima urbano e é representado satisfatoriamente por fluxos de energia através de um volume solo - construções - ar, se estendendo até uma altura onde as trocas verticais líquidas de calor são consideradas desprezíveis. Constitui o seccionamento da energia radiante absorvida na superfície da terra (Q^*) em fluxos de calor que controlam o clima da superfície: fluxos turbulentos de calor sensível e latente Q_H e Q_E , respectivamente, e fluxo de calor sensível de condução do solo ΔQ_S . São componentes, ainda, da equação do balanço, o fluxo de calor antropogênico (combustão, condicionamento do ar, etc.) Q_F e a advecção líquida ΔQ_A (v.fig1).

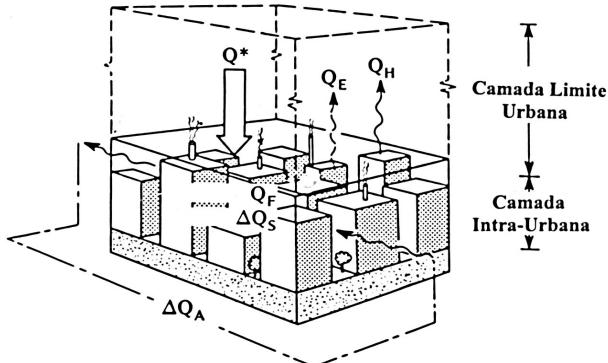


Figura 1 - Representação esquemática dos fluxos envolvidos no balanço de energia de um volume urbano construção - ar. Fonte: OKE(1996).

MYRUP (1969) desenvolveu um modelo de balanço de energia para uma cidade hipotética, com características micrometeorológicas de Davis e de Sacramento, na Califórnia. Teve como objetivo mostrar uma ferramenta para fins didáticos, de modo a prever a magnitude do excesso de temperatura no meio urbano. O trabalho pioneiro de MYRUP(1969) comprovou que a evaporação reduzida no centro da cidade e as propriedades térmicas dos materiais de construção e pavimentação são os parâmetros dominantes no balanço de energia da superfície, na forma da seguinte equação:

$$R_N = LE + H + S \quad (1)$$

onde R_N é o fluxo de radiação líquida; E a taxa de evaporação; L o calor latente da água (LE, portanto, é o fluxo de calor latente); H o fluxo de calor sensível para o ar e S o fluxo de calor para o solo. A partir dessa equação, foram encontradas relações físicas para cada um dos termos, de modo a obter uma série fechada de equações que tornaram-se base para boa parte das investigações posteriores.

NUNEZ & OKE (1977) investigaram as trocas de energia que ocorrem em um “canyon” urbano (microclima dentro da camada intra-urbana), com uma metodologia envolvendo medidas de campo em Vancouver, Canadá, no verão. Constataram no período diurno um balanço de energia relativamente suave, com o excedente de radiação dissipado pelas trocas turbulentas de calor, restando 20 - 30% armazenado nos materiais. À noite, em contrapartida, observaram um déficit de radiação quase inteiramente balanceado pela liberação de calor armazenado nas superfícies ambiente térmico ao redor.

Da mesma forma, TERJUNG & O'ROURKE (1980) propuseram uma simulação espacial do balanço de energia na camada intra-urbana, através de um modelo de balanço de energia urbano, realizando comparações entre temperaturas internas e superficiais de faces expostas de edificações, para uma cidade hipotética, de latitude 34°N, com diversos sistemas de canais de ruas. Demonstraram que a distribuição de fluxo de calor sensível e de radiação líquida de ondas longas (causas importantes da ilha de calor urbana) não apresentam a homogeneidade considerada em muitos modelos macroscópicos (para a camada limite urbana).

CARLSON & BOLAND (1978) desenvolveram um modelo numérico de simulação da temperatura e fluxo de calor da superfície urbana e aplicaram para O'Neill, Nebraska;

Wangara, Austrália e Los Angeles, Califórnia, a partir da equação básica de MYRUP(1969). Os resultados da pesquisa permitiram demonstrar que os dois parâmetros mais importantes na variação de temperatura da superfície são a inércia térmica e a menor disponibilidade de umidade, sendo que o efeito deste último parâmetro é mais forte durante o dia, enquanto que a inércia térmica é mais forte durante a noite.

O modelo de TSO et al.(1990) O modelo de TSO et al.(1990) foi aplicado para uma cidade tropical de baixa latitude (Kuala Lumpur, Malásia), com pequenas variações nas médias diárias e anuais de temperaturas do ar, e alta umidade relativa média anual. Incorporaram, aos termos da equação de balanço de energia urbano, a estimativa do armazenamento de energia das construções (massa construída urbana), na forma da seguinte equação:

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

onde: M = armazenamento de energia; R = fluxo de radiação líquida; H = fluxo de calor sensível para o ar; L = calor latente da água; E = taxa de evaporação (portanto, LE é o fluxo de calor latente);S = fluxo de calor para o solo.

$$M = m_c C_c \frac{dT_o}{dt}, \text{ onde:}$$

m_c = massa construída por unidade de área (kg/m^2)

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

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

OKE et al. (1992) constitui um estudo pioneiro de indicação da natureza da climatologia física em um sistema climático tropical, através de observações diretas do balanço de energia da superfície. A Cidade do México foi escolhida por ter o suporte científico necessário para a pesquisa. Foram realizadas medições diretas da radiação líquida e fluxo de calor sensível, de uma torre de 28m de altura, localizada a 4 km do centro da cidade. Além de estimativas por parametrização do armazenamento de energia, o fluxo de calor turbulento latente foi encontrado como residual da equação do balanço. Esse trabalho exemplifica bem a necessidade do entendimento da natureza exata dos sistemas climáticos urbanos tropicais.

3. APLICAÇÃO DO MODELO DE BALANÇO DE ENERGIA

Selecionou-se o modelo climático de balanço de energia proposto em Tso et al. (1990) para ser adaptado às condições climáticas típicas e para a simulação do comportamento térmico de diversas frações urbanas de Maceió-AL, especialmente por ter sido aplicado para uma cidade tropical de baixa latitude e clima quente e úmido, com perfil climático, portanto, semelhante à região de estudo.

A cidade de Maceió, capital de Alagoas, está localizada no litoral do Nordeste do Brasil, entre a latitude $9^{\circ}39'57''$ Sul e longitude $35^{\circ}44'07''$ Oeste, às margens do Oceano Atlântico, constituindo-se em bom exemplo de constância de nível térmico que caracteriza o litoral do Nordeste brasileiro, com temperatura média anual de $25,4^{\circ}\text{C}$ e variação anual de $3,4^{\circ}\text{C}$ entre os valores médios mensais das temperaturas médias

(26,7°C em fevereiro e 23,7°C em julho, maior e menor média, respectivamente) e uma alta umidade relativa média (78%).

Para a adaptação do modelo climático de TSO et al.(1990), foram inicialmente realizadas medições móveis de temperatura do ar em 3 frações urbanas da cidade de Maceió – AL, com padrões de uso e ocupação do solo diferenciados: fração urbana com alguma verticalização (ponto 1); fração urbana bastante verticalizada (ponto 2); fração urbana formada quase na sua totalidade de construções terreas (ponto 3). As temperaturas do ar foram medidas sob condições de céu claro, em um total de 5 dias, amostragem considerada satisfatória considerando-se a constância de nível térmico que caracteriza a região. O comportamento médio diário das temperaturas nos diversos pontos medidos e os dados colhidos em estação meteorológica é mostrado na fig.2.

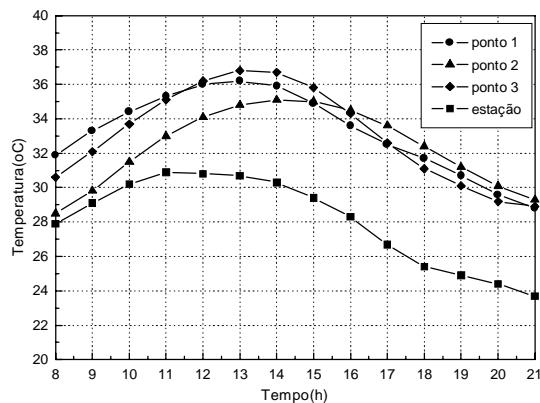


Figura 2 – Temperaturas do ar médias para o período observado.

Observou-se que as massas edificadas produziram, claramente, efeitos de elevação da temperatura interna do ar da cidade. Os valores obtidos pelas curvas de evolução da temperatura do ar mostraram pequenas variações entre as diversas frações urbanas, devido aos efeitos amenizadores da umidade atmosférica, mas que reforçam a influência, nas condições microclimáticas, de modificações no ambiente externo pela maior ou menor presença de superfícies como edificações.

As condições favoráveis de vento (brisas marítimas) a que está continuamente submetida a área de estudo certamente promovem a amenização das temperaturas do ar e resfriamento das superfícies. De qualquer forma, uma análise comparativa entre os pontos de medição mostraram tendências diferenciadas na totalidade da curva, com valores de temperatura mais altos para o ponto menos adensado - ponto 3, seguido do ponto 1 e do ponto 2 (área mais verticalizada).

A partir do trabalho experimental, foi feito o ajuste do modelo às condições climáticas típicas de Maceió mediante implementação computacional para automatizar a solução do problema (descritos detalhadamente em BARBIRATO, 1998), obtendo-se perfeita concordância de resultados. Após o devido ajuste dos parâmetros, a comparação entre os dados observados e os dados calculados pelo modelo mostrou boa correspondência entre o modelo e as medições no efeito diferenciado da temperatura do ar para as diversas tipologias de uso do solo estudadas. O resumo final dos dados de entrada são mostrados na tabela 1:

Tab.1 Parâmetros de Entrada Iniciais Utilizados para Ajuste do Modelo

PARÂMETRO	VALOR
Calor Específico do ar, C_p	1006 Jkg ⁻¹ °C ⁻¹
Densidade do ar, ρ_a	1,177kgm ⁻³
Calor Específico do solo, C_s	1185 Jkg ⁻¹ °C ⁻¹
Densidade do solo, ρ_s	1800 kgm ⁻³
Condutividade Térm. solo, k_s	1,225 Wm ⁻¹ °C ⁻¹
Calor Espec. do concreto, C_c	880 Jkg ⁻¹ °C ⁻¹
Calor Lat. Evapor., L	$2,437 \times 10^6$ Jkg ⁻¹
Massa Média de Concreto, m_c dos pontos observados e da estação de referência	$m_{c1} = 627,65$ kg/m ² ; $m_{c2} = 1.211,08$ kg/m ² ; $m_{c3} = 420,20$ kg/m ² m_c estação = 10 kg/m ² (valor estimado)
Constante de Von Kármán, K	0,4
Radiação Líquida, R	Valores calculados:
Vel. Vento a 300m, U_2	9m/s
Temp. ar a 300m, T_2	25°C
Umid. Espec. a 300m, q_2	0,003
Fração da Evap. Na Sup. , E_f	10%
Profund. do Solo, 2d	0,20m
Temp. do Solo em 2d, T_b	25°C

A figura 3 mostra a comparação entre os resultados observados e calculados.

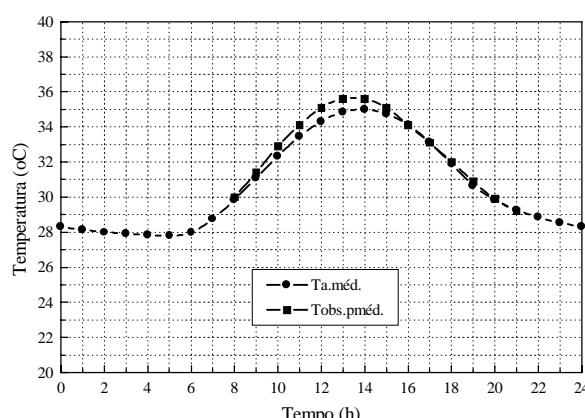


Figura 3 - comparação entre as médias ponderadas de temperaturas do ar observadas ($T_{obsméd}$) e simuladas ($T_{améd}$) dos pontos de observação

4. DISCUSSÃO

De um modo geral, o modelo adaptado é de fácil aplicação, embora solicite grande quantidade de parâmetros de entrada. Mostrou-se sensível às configurações urbanas distintas, podendo, portanto, ser útil no teste de soluções e previsões dentro do planejamento e controle térmico de ambientes urbanos. Quanto às suas limitações, não considera, entre outros fatores, a contribuição do calor antropogênico no ambiente térmico da cidade e possíveis efeitos de nebulosidade. Admite, ainda, uma única temperatura de equilíbrio da superfície, e não considera a complexidade geométrica de uma estrutura urbana. Por outro lado, inclui o cálculo da massa de construção urbana, importante parâmetro na determinação da influência da morfologia urbana nas condições térmicas de um determinado local.

A falta de instrumental adequado para a medição dos componentes de balanço de energia não permitiu a total avaliação do potencial do modelo. Do mesmo modo, os resultados encontrados para uma mesma região estudada não permitiram avaliar totalmente o alcance dessa ferramenta para outras condições microclimáticas mais diferenciadas dentro da cidade.

Na verdade, os modelos climáticos urbanos existentes, de uma maneira geral, sofrem ainda sérias limitações 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. Consequentemente, os fluxos de energia são tratados aproximadamente acima do nível médio dos telhados das construções (linha de demarcação entre a camada intra-urbana e a camada limite urbana) e não na camada intra-urbana, onde ocorre a maioria das atividades humanas. A forma urbana nesses modelos é simplificada por uma superfície plana de concreto (ou asfalto), desprezando a sua geometria específica e estrutura tridimensional.

Por outro lado, os modelos climáticos de balanço de energia da superfície urbana têm sido bastante aplicados em trabalhos didáticos e de pesquisa, no teste de soluções sugeridas para problemas climáticos urbanos e na previsão dos possíveis efeitos de diferentes usos do solo e emissões no ambiente atmosférico de áreas urbanas, levando ao conhecimento de, entre outros aspectos, considerações sobre questões atuais como a qualidade do ar e consumo de combustível.

5. CONCLUSÕES

É evidente que a maior parte dos modelos climáticos urbanos baseia-se em locais com um banco de dados climáticos considerável, tendo essas pesquisas, ainda, todo o suporte científico necessário. A modelagem matemática é, portanto, já bastante usada hoje em pesquisas sobre climatologia urbana para cidades de latitudes médias.

Sabe-se que uma das dificuldades encontradas em trabalhos de simulação consiste na escassez de parâmetros de entrada físicos e meteorológicos, o que leva a estimativas ou suposições baseadas em informações disponíveis, muitas vezes não apropriadas para a realidade local. Essa dificuldade impede maior avanço no campo da simulação climatológica urbana, que só se verificará com a realização de maior número de investigações que digam respeito a dados climáticos para as regiões tropicais.

O presente trabalho procurou evidenciar a necessidade hoje, dentro da climatologia urbana, de uma abordagem mais quantitativa dos fenômenos. Nesse contexto, torna-se importante o desenvolvimento de pesquisas que auxiliem o planejador urbano quanto à possibilidade de trabalhar com simulações urbanas que mostrem diversas alternativas de organização dos espaços urbanos, fundamentadas em critérios ambientais, entre os quais, o de conforto térmico dos ambientes urbanos.

Acredita-se que o aumento do reconhecimento da importância da questão ambiental urbana nos problemas de planejamento e conforto ambiental dos espaços urbanos poderá trazer maior divulgação e, consequentemente, maior atenção à essa área.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBIRATO, G. M. **Aplicação de modelo de balanço de energia para análise do ambiente térmico urbano de Maceió – AL.** Tese (Doutorado), 1998, 173p. SHS, EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.
- BORNSTEIN, R.D. Urban climate models: nature, limitations and applications. In: T.R. Oke (ed.), **Urban climatology and its applications with special regard to tropical areas**, WMO n.652, World Meteorological Organization, Geneva, 1986, p.199-236.
- CARLSON, T.N.; BOLAND, F.E. (1978). Analysis of urban - rural canopy using a surface heat flux / temperature model. **Journal of applied meteorology** n.17, 1998, p.998-1013.
- MYRUP, L. A numerical model of the urban heat island. **Journal of applied meteorology** n.8, 1969, p.908-918.
- NUNEZ, M.; OKE, T.R. The energy balance of an urban canyon. **Boundary Layer Meteorology** n.16, 1977, p.11-19.
- OKE, T.R. **Boundary layer climates**. 2.ed. New York: Routledge, 1996, 435p.
- OKE, T.R.; ZEUNER, G.; JAUREGUI, E. The surface energy balance in Mexico City. **Atmospheric Environment**, vol.26B, n.4, 1992, p.433-444.
- TERJUNG, W.H.; O' ROURKE, P. A. Simulating the causal elements of urban heat islands. **Boundary-Layer Meteorology**, n.19, 1980(a), p.93-118.
- _____ Influences of physical structures on urban energy budgets. **Boundary- Layer Meteorology** n.19, 1980(b), p 421-439.
- TSO, C.P.; CHAN, B.K.; HASHIN, M.A. An improvement to the basic energy balance model for urban thermal environment analysis. **Energy and Buildings** n.14, 1990, p.143-152.