



UMA ALTERNATIVA PARA MODELAGEM DOS EFEITOS TÉRMICOS EM MEIO AMBIENTE URBANO UTILIZANDO -SE O MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO

Gianna M. Barbirato (1); João Carlos C. Barbirato (2); Evelyne M. de A. Almeida (3)

(1) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Alagoas, Brasil – e-mail:

gmb@ctec.ufal.br

(2) Centro de Tecnologia – Universidade Federal de Alagoas, Brasil – e-mail: jccb@ctec.ufal.br

(3) DEHA, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Alagoas, Brasil

RESUMO

Proposta: Sabe-se que a modelagem numérica climática tem sido utilizada na resolução de problemas relacionados ao planejamento dos espaços urbanos e na caracterização da complexa superfície urbana e seu balanço energético. Observa-se, porém, que ainda muito pouco do que é desenvolvido na área refere-se a sistemas climáticos tropicais. Portanto, o presente trabalho pretende avançar na quantificação dos efeitos térmicos urbanos, tendo a modelagem numérica como uma importante ferramenta auxiliar nas questões hoje relacionadas ao planejamento urbano e conforto térmico dos espaços urbanos. **Método de pesquisa/Abordagens:** é apresentado um modelo climático urbano bidimensional, utilizando-se o Método dos Elementos de Contorno implementado em plataforma *MatLab®*, e tendo como base o monitoramento microclimático de pontos estabelecidos ao longo de um transeto, em importantes via de ligação da cidade de Maceió-AL, com diferentes características de uso e ocupação do solo. São identificados os efeitos térmicos consequentes nas áreas urbanas próximas e a relação com o microclima local. **Resultados:** Algumas aplicações possíveis do modelo foram demonstradas, e seu potencial de adaptação foi comprovado, como uma ferramenta de previsão do ambiente térmico de frações urbanas, apresentando boa correspondência entre os dados observados em campo e os dados calculados, após o ajuste de alguns parâmetros. **Contribuições/Originalidade:** 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. Pretende-se subsidiar futuros projetos ou intervenções urbanas locais, e enfatizar a importância da abordagem quantitativa climática como critério de planejamento urbano, com vistas ao conforto térmico.

Palavras-chave: Conforto térmico urbano; clima urbano; modelagem numérica.

ABSTRACT

Propose: The numerical modeling has been utilized in the resolution of problems related to urban planning and the characterization of the complex urban surface and its energy balance analysis. Mathematical models are reasonable capable of simulating the urban surface pattern. It is observed, however, that there are still few researches about numerical simulation of tropical urban climatic systems. Therefore, the present study quantifies the urban thermal effect, using numerical modeling as an important auxiliary tool in urban planning approach. **Methods** A two-dimensional urban climatic model is presented, using the Boundary Element Method (BEM) implemented in MatLab® platform. The simulations were based on microclimatic field observations throughout a transect, along a important railroad, with different characteristics of land use surface, in the city of Maceió, hot and humid tropical city at Northeast Brazil. **Findings** The urban area studied and the thermal effect correlations with local microclimate are identified. **Originality/value** In this way, it is suggested that

such model could be used to subsidize futures projects and local interventions, and to emphasize the importance of climatic quantitative information as criterion of urban planning.

Keywords: urban thermal comfort, urban climate, numerical modeling.

1 INTRODUÇÃO

As condições particulares do meio ambiente urbano modificam as suas feições climáticas, formando um clima particular: o clima urbano (LANDSBERG, 1981; OKE, 1996). Em regiões tropicais de baixa latitude, em especial as cidades de clima quente e úmido, o desconforto térmico causado pelos efeitos da urbanização e do crescimento populacional reflete-se em proporções maiores. Portanto, torna-se importante a ampliação dos conhecimentos na área de Climatologia Urbana de modo a subsidiar o planejamento e o desenho das cidades para a melhoria das condições de conforto térmico e de salubridade nos espaços urbanos (KATZSCHNER, 1988; ELIASSON, 2000).

A cidade de Maceió–AL, de clima quente e úmido, apresenta uma complexidade urbana e política de uso de solo decorrentes de seu crescimento desordenado, caracterizado, sobretudo, pelo adensamento vertical, especialmente em sua orla marítima, incrementado com o fortalecimento da vocação da cidade para o turismo. Esse fato, porém, resultou em prejuízos ao ambiente urbano e comprometimento da qualidade de vida de seus habitantes. O quadro que se configura hoje é o de grande concentração de atividades, tráfego intenso e concentração de massa construída, levando a alterações importantes nas condições térmicas locais e comprometendo também a qualidade do meio local.

Hoje a orla marítima da cidade sofre constante valorização imobiliária, obrigando o poder público, através do Código de Obras, a estabelecer limites para as construções nessa área da cidade, com o escalonamento das alturas das edificações, a partir das quadras contíguas à orla, bem como recuos progressivos de acordo com o número de pavimentos de uma edificação. Essas medidas, porém, sofrem pressão contínua do mercado imobiliário, levando a revisões do Código de forma a satisfazer as exigências da especulação imobiliária local, especialmente quanto a recuos e altura de edificações.

De qualquer forma, em Maceió, a escala de problemas relacionados ao clima urbano é bem menor, se comparada às grandes cidades que passam por um processo de acelerado crescimento urbano e industrial. Porém, a preocupação com a qualidade ambiental urbana deve estar inserida em todo processo de urbanização, seja ele acelerado ou não, considerando assim o estudo da climatologia urbana um instrumento importante no processo de planejamento das cidades.

É a partir da perspectiva da relação entre forma urbana e microclima local que se objetiva, no presente estudo, analisar a qualidade climática dos espaços urbanos, identificando o grau de atuação de atributos da forma urbana, particularmente a verticalização dos espaços urbanos, nas modificações climáticas, de modo que essas informações possam subsidiar futuras intervenções urbanas e projetos de edificações inseridas no tecido urbano, quanto ao aspecto do conforto térmico dos espaços.

Para alcançar os objetivos propostos, analisa-se uma fração urbana dentro da cidade, (via de ligação entre bairros e de grande atividade comercial). É traçado um transeto, onde se localizam pontos de medição de variáveis climáticas, ao tempo em que foram analisadas as características da configuração urbana, de modo a permitir a análise microclimática. Por fim, os resultados obtidos permitiram a modelagem e o ajuste de um modelo climático de balanço de energia, baseado na formulação dos Métodos de Elementos de Contorno, com a sua adaptação para as condições morfológicas e climáticas da região a ser estudada.

2 METODOLOGIA

2.1 Perfil climático da Região em Estudo: Maceió - AL

A cidade de Maceió, capital do estado de Alagoas, está situada no litoral do nordeste brasileiro entre a

latitude 9°45' ao sul em relação ao equador e longitude 35°42' Oeste. A cidade abrange uma área de 512,8km², sendo aproximadamente 200km² de área urbana, onde reside a maioria da população de cerca de 900 mil habitantes, segundo o censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, IBGE, Censo Demográfico 2000 (IBGE, 2005).

O clima de Maceió é caracterizado como quente e úmido, com incidência de radiação solar intensa, pequenas variações térmicas diárias, sazonais e anuais de temperatura (temperatura média anual de 24,8°C e amplitude média anual de 7,3°C), alta umidade do ar (média de 78,3%).

A cidade possui seus ventos mais freqüentes provenientes do quadrante leste (SE e NE), sendo os do NE predominantes nos meses mais quentes e os do SE mais constantes o ano inteiro. Quanto à velocidade dos ventos, o valor médio mensal é de 2,8m/s, com valores absolutos mais intensos de 10m/s na direção NE. Quanto à pluviosidade (2167,7 mm anuais), possui grande variação anual na distribuição de chuvas, sendo os meses mais chuvosos de abril a julho.

2.2 Descrição da área de estudo

Dentro da malha urbana da cidade de Maceió foi selecionada uma área de estudo, a partir do levantamento de campo, descrito em ALMEIDA (2006), de um transeto estabelecido em uma via de grande importância no contexto da cidade, na Av. Júlio Marques Luz (antiga Av. Jatiúca) no bairro de Jatiúca (T02 da Fig. 01), com diferentes padrões de ocupação urbana.

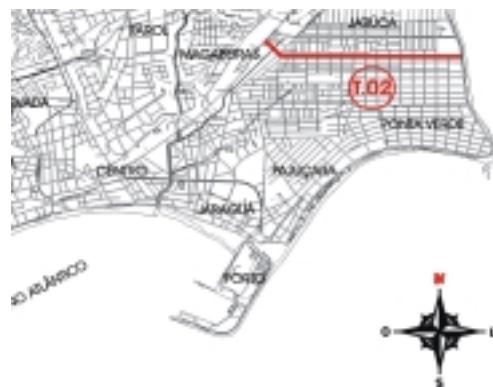


Figura 01 - Área de estudo para a presente pesquisa: o Transeto 2, T02 (Fonte: ALMEIDA, 2006).

No transeto estudado foram realizadas medições móveis de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos, em cinco pontos, em trajeto percorrido de carro durante uma série satisfatória de 06 dias, não consecutivos, no período de verão – Janeiro de 2005, por se tratar de um mês bastante representativo das condições mais desfavoráveis de conforto devido ao calor na cidade. A análise qualitativa do transeto T02 consistiu na aplicação da metodologia desenvolvida por KATZSCHNER (1997), quanto à elaboração de mapas que classificam as áreas (figura 02), bem como as metodologias de OLIVEIRA (1988) e BUSTOS ROMERO (2001), que qualificam os atributos da forma urbana e as constantes bioclimáticas dos espaços, auxiliando, portanto, o método de KATZSCHNER (1997).

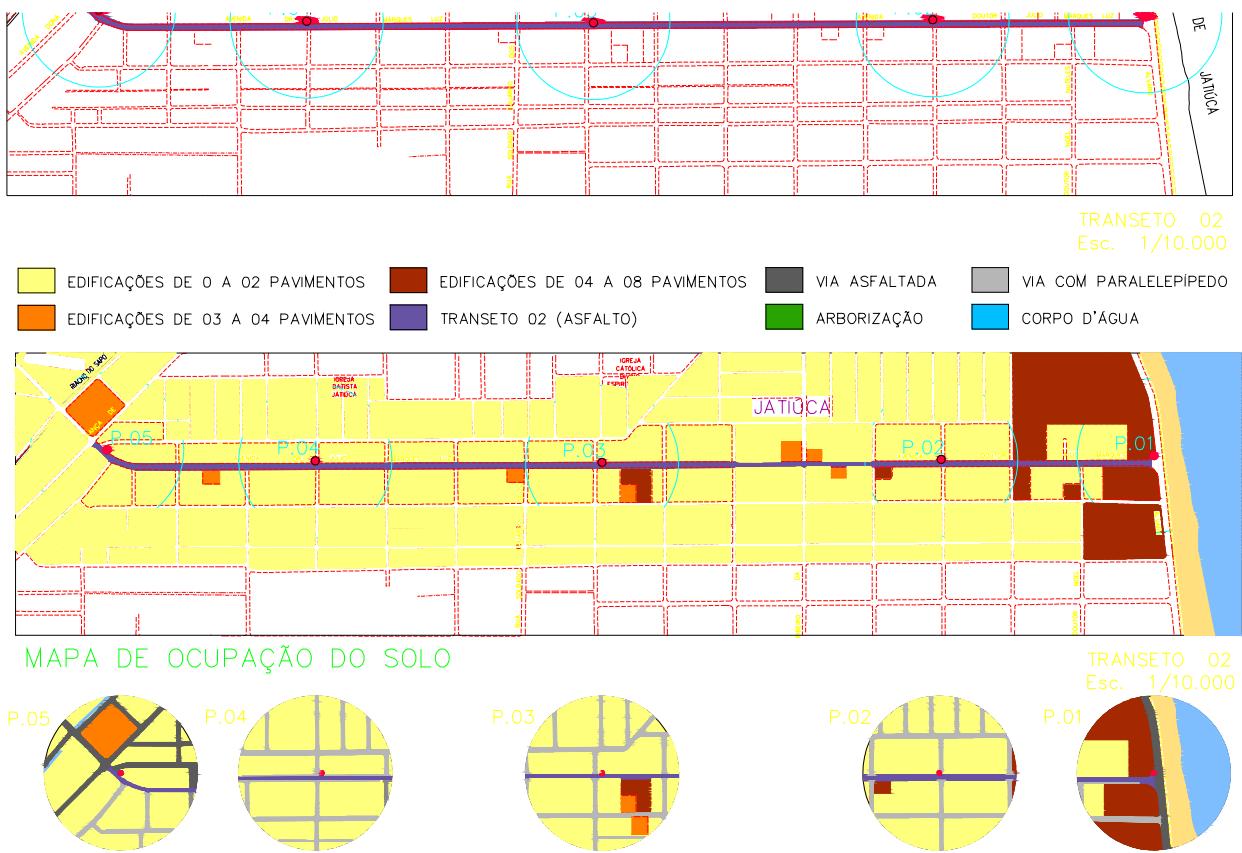


Figura. 02 – O transeto estudado – T02 (Fonte: ALMEIDA, 2006).

2.3 Discussão sobre o Modelo Climático Urbano

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, sobre um plano da superfície urbana. 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/m^2)

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

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

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

No plano da superfície (nível 0, conforme figura 9), as temperaturas do solo, das construções e do ar

estão sempre em equilíbrio térmico (T_0), sob a seguinte equação de balanço de energia:

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

onde:

M = armazenamento de energia (W / m^2);

R = fluxo de radiação líquida (W / m^2);

H = fluxo de calor sensível para o ar (W / m^2);

L = calor latente da água (J / kg);

E = taxa de evaporação (portanto, LE é o fluxo de calor latente) ($\text{kg} / \text{m}^2 \text{s}$);

S = fluxo de calor no solo (W / m^2).

Para solucionar cada termo do balanço de energia, são utilizadas equações auxiliares que podem ser vistas detalhadamente em BARBIRATO (1998).

Por outro lado, pode-se utilizar procedimentos mais sofisticados e eficazes de análise numérica, possíveis de definir a equação geral para pontos quaisquer, pertencentes ao contorno e à região externa ao domínio, que possa servir para tratar o problema em tela, imerso no problema potencial. Nesse contexto, indica-se o Método dos Elementos de Contorno (MEC), método consagrado de análise numérica de vários problemas na engenharia (BARBIRATO, 1999). O problema de campo, por exemplo, adequado aos parâmetros envolvidos no escopo do presente trabalho.

Os problemas de campo possuem diversas aplicações em engenharia, tais como torção de barras, condução de calor, escoamento irrotacional de fluidos, etc.

A equação diferencial do problema de campo é obtida aplicando-se a conservação de massa em um elemento de dimensões infinitesimais. Para o caso bidimensional e estacionário, expressa-se como segue:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) + b = 0 \quad (3)$$

com:

$$q_x = -k_x \frac{\partial u}{\partial x}; \quad q_y = -k_y \frac{\partial u}{\partial y}; \quad (4)$$

os significados físicos de u , k_x , k_y , q_x , q_y e b dependem do problema em estudo.

Admitindo-se o caso isotrópico, em que as constantes k_x e k_y possuem o mesmo valor (k), a equação (3) pode ser rescrita da seguinte forma:

$$\nabla^2 u + b = 0 \quad (5)$$

sendo ∇^2 o operador laplaciano. A equação (5) é conhecida como Equação de Poisson.

Utilizando-se o conceito de solução fundamental, estabelecendo o procedimento de colocação, posicionando-se o ponto fonte no contorno e em pontos externos, é possível generalizar a equação integral (6) para pontos quaisquer, pertencentes ao contorno e à região externa ao domínio:

$$c_i u_i + \int q^* \cdot u \, d\Gamma = \int u^* \cdot q \, d\Gamma + \int_{\Omega} b_i \cdot u^* \, d\Omega \quad (6)$$

onde c_i é uma constante que depende da posição do ponto fonte i , valendo 1 para pontos do domínio, $\frac{1}{2}$ para pontos do contorno e 0 para pontos externos. Esta equação (6) está definida para um meio contínuo, pois envolve integrais que se expressam de forma contínua em todo o contorno e domínio.

Assim, as integrais definidas para o contorno contínuo passam a ser escritas como somatórios de integrais definidas nos elementos. Outrossim, os campos de potencial (u) e fluxo (q) definidos ao longo do contorno, passam a ser expressos, de forma aproximada, como funções definidas nos elementos (u^e) e (q^e).

$$c_i u_i + \sum_{j=1}^N \left(\int_j q_{ij}^* \cdot u^e \, d\Gamma_j \right) = \sum_{j=1}^N \left(\int_j u_{ij}^* \cdot q^e \, d\Gamma_j \right) \quad (7)$$

Aplicando-se as condições de contorno, é possível reorganizar o sistema matricial que resulta da equação (7), no seguinte sistema de equações lineares:

$$\begin{bmatrix} H_{np} & -G_{np} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_{np} \\ q_{np} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -H_p & G_p \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_p \\ q_p \end{Bmatrix} \quad (8)$$

onde os índices p e np indicam os valores prescritos e não-prescritos, respectivamente. Efetuando-se o produto do termo à direita da equação (8), chega-se a:

$$A \cdot x = b \quad (9)$$

onde x é um vetor que contem os valores nodais incógnitos de potencial e fluxo.

A solução do sistema fornece, finalmente, os valores incógnitos de potencial e fluxo para o contorno do problema em estudo, que são reorganizados nos respectivos vetores de valores prescritos.

Não é possível desenvolver as aplicações com o equacionamento apresentado sem o auxílio de computadores e linguagens de programação. A formulação de balanço de energia encerrou código computacional escrito em linguagem C++, enquanto a formulação via Método dos Elementos de Contorno fez surgir um código computacional na plataforma *MatLab®* (HANSELMAN e LITTLEFIELD, 1999).

3 ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1 A Análise Experimental

Os gráficos apresentados em gráfico 01 (a, b, c) mostram os dados médios de temperatura do ar nos cinco pontos do Transeto 02 (T.02) às 9:00h, 15:00h e 21:00h respectivamente. Observa-se pouca variação nos valores das temperaturas ao longo do transeto, como também maiores valores à medida que os pontos de medição se afastam do oceano Atlântico. As temperaturas mais elevadas e a maior amplitude térmica diária encontram-se em no período das 15h (Gráfico 08) entre os pontos P.01e P.05 que é de 3,2°C, sendo maior em P.05.

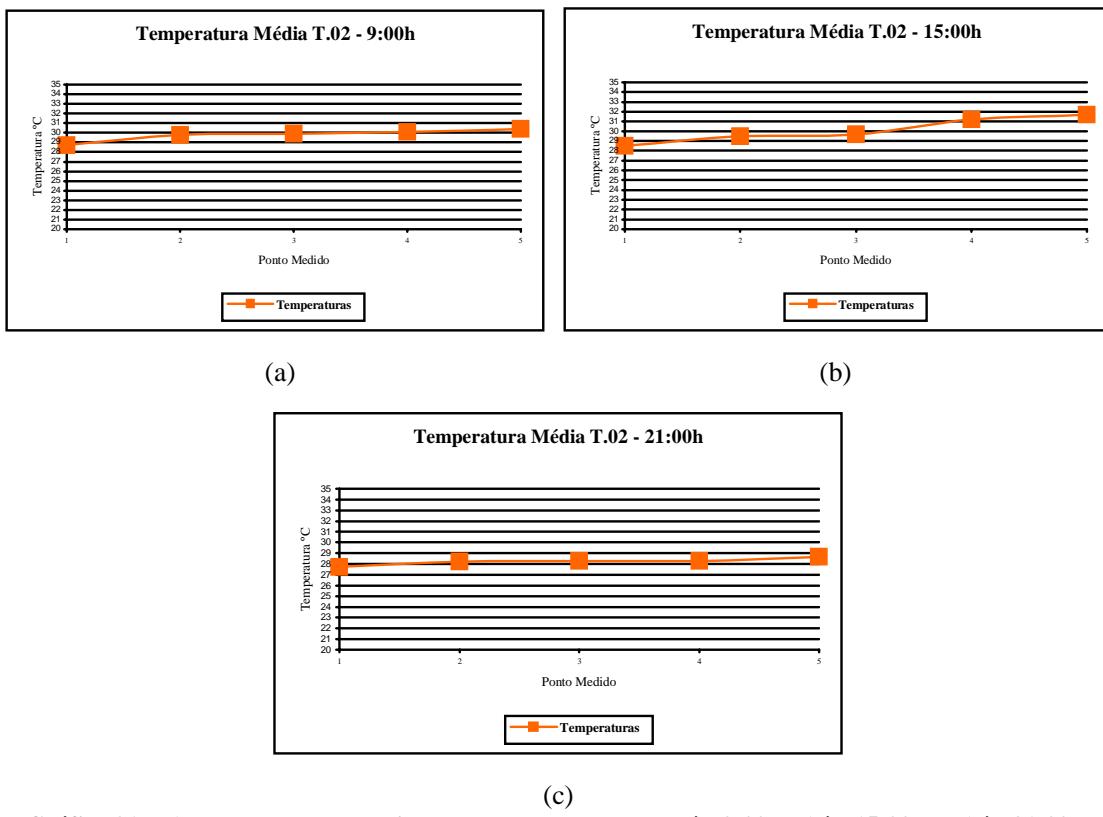


Gráfico 01 – a) Temperaturas medidas nos pontos do transeto às 9:00h; b) às 15:00h; e c) às 21:00h.

Quanto à distribuição espacial da temperatura do ar dentro da malha urbana, nota-se variações conforme as características da configuração urbana. Durante o dia as temperaturas mais elevadas foram registradas nos espaços abertos, sem sombreamento ou arborização, onde a radiação solar direta é mais intensa. À noite as temperaturas mais altas foram registradas nas áreas urbanas onde, devido à alta rugosidade, o calor é armazenado durante mais tempo. As menores amplitudes térmicas foram encontradas no ponto de medição P.01 do T.02, próximo ao mar, elemento estabilizador das temperaturas do ar.

3.2 A Análise Numérica

Os gráficos com a simulação numérica para cada um dos cinco pontos do transeto são apresentados a seguir, evidenciando a coerente adequação da formulação aos dados experimentais.

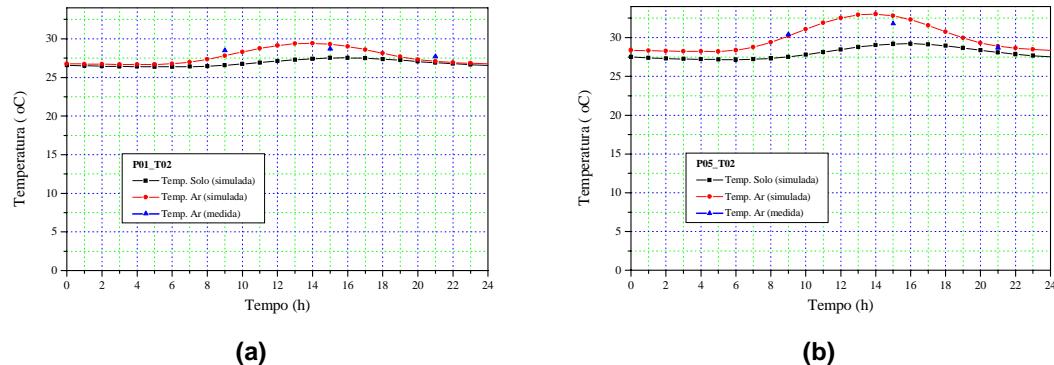


Gráfico 02 – Temperaturas simuladas do solo e do ar para os pontos P01 e P05, e as experimentais.

O programa computacional, a partir de sua calibração, passa a ser uma ferramenta importante para a simulação de casos futuros desejados para a região em análise. Por exemplo, a mudança do perfil das edificações a partir do ponto P02 aumentaria o volume de concreto da amostra de tecido urbano. Portanto, uma simulação numérica dessa alteração traria um indicativo das mudanças climáticas às micro-regiões adjacentes. Pode-se, nesse caso, tomar medidas compensatórias, influindo diretamente na determinação dos recuos, das áreas verdes, do gabarito, entre outros.

Todo o transeto foi discretizado para a análise das temperaturas e do fluxo. A análise via Método dos Elementos de Contorno leva em consideração as equações básicas de fluxo de energia, relacionando temperaturas com a massa de concreto, o que representa a edificação. O contorno inferior possui uma ligeira variação na ordenada, significando a diferença de altura das edificações dos pontos onde foram feitas as medidas de dados climatológicos ao longo do transeto. A seguir é apresentado o gráfico 03, advindo do processamento do transeto, que traz os vetores de fluxo para pontos internos, escolhidos aleatoriamente.

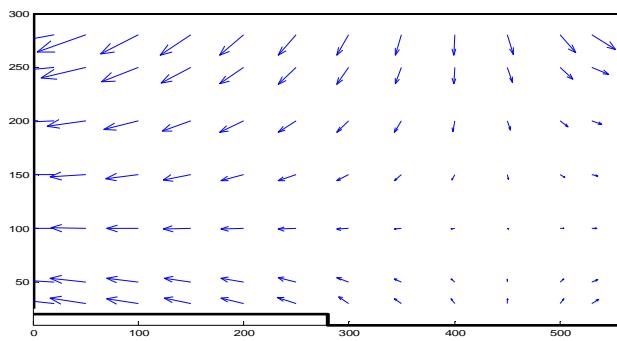


Gráfico 03 – Distribuição dos vetores de fluxo no transeto.

O gráfico 04 traduz, em escala cromática, a representação de temperatura, respectivamente, ao longo do transeto. Os valores apresentados são devidos às condições observadas às 15:00h no transeto analisado.

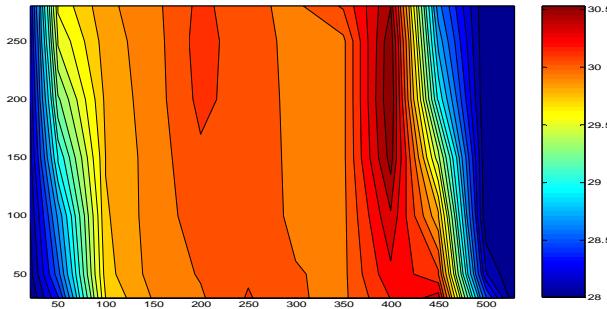


Gráfico 04 – Distribuição das temperaturas no transeto, representados em escala cromática.

A análise via Método dos Elementos de Contorno permite a simulação em um fragmento bidimensional do transeto utilizado, admitindo-se os parâmetros de entrada (fluxo de energia e temperaturas) em determinado tempo. Uma rede de pontos interna mais rebuscada propicia o detalhamento dos fluxos e temperatura com mais acurácia.

Os dois processos numéricos apresentados, portanto, são complementares nas investigações necessárias ao transeto e objeto deste trabalho.

4 CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos pode-se concluir a existência de microclimas diferenciados na malha urbana de Maceió, determinados pela influência da configuração urbana das áreas em estudo. Foram identificados padrões diferenciados de ocupação do solo e consequentemente características quanto aos atributos da forma urbana e aos atributos bioclimatizantes da forma urbana.

Desse modo, confirmou-se a influência de alguns aspectos urbanos no comportamento microclimático como: a relação entre densidade construída e temperaturas mais elevadas do que em áreas abertas, diferenças entre áreas pavimentadas e solo natural tanto nos valores de temperatura como na diminuição da umidade relativa do ar e a pouca influência da vegetação dispersa.

A carência de áreas verdes identificadas ao longo do transeto demonstra as condições de desconforto decorrente da falta de um tratamento paisagístico que amenize a radiação solar recebida, gerando áreas de sombra e com temperaturas mais amenas, podendo criar espaços mais confortáveis tanto do ponto de vista do conforto ambiental como psicológico. A pouca área verde encontrada ainda mostra-se dispersa e com pouca ou quase nenhuma influência sobre os dados de temperatura e umidade obtidos. Da mesma forma, o crescente volume de áreas pavimentadas e edificadas e a substituição do solo natural pelo construído na área estudada, o que obriga a cidade a conviver com superfícies em geral de maior refletividade de radiação solar, de maior emissividade de radiação infravermelha, de maior capacidade térmica e mais secas, que superfícies recobertas por um tipo qualquer de vegetação.

A partir dos dados experimentais, obtidos da investigação de campo, foi possível calibrar um modelo numérico utilizando diferenças finitas. O algoritmo permitiu a adequada simulação das áreas observadas, obtendo valores bem próximos aos experimentais. Com isso várias situações futuras podem ser ensaiadas numericamente e aferir suas consequências ao clima urbano. Também, um algoritmo a partir do Método dos Elementos de Contorno foi utilizado, chegando-se na análise mais detalhada da distribuição do fluxo de calor em um plano representando o transeto, além da distribuição da temperatura.

Para a obtenção da qualidade climática do ambiente urbano, é necessário, portanto, estabelecer o uso correto dos elementos climatológicos e sua interação em diferentes níveis de planejamento e construção, melhorando assim, os microclimas dos espaços externos. Sabendo-se que a utilização dos espaços urbanos varia em função de suas características microclimáticas, a aplicação dos conhecimentos na área da climatologia urbana visando a obtenção de um ambiente mais agradável e salubre para os habitantes da cidade, torna-se indispensável para a ordenação de espaço urbano em sua totalidade.

5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. M. de A. *Configuração urbana e sua relação com os microclimas: estudo de frações urbanas na cidade de Maceió*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Maceió, 2006. 143 p. Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas.

BARBIRATO, G. M. *Aplicação de modelo de balanço de energia para análise do ambiente térmico urbano em Maceió-AL*. Tese (doutorado). São Carlos, 1998. 173 p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BARBIRATO, J.C.C. (1999). *Método dos elementos de contorno com a reciprocidade dual para a análise transiente tridimensional da mecânica do fraturamento*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BUSTOS ROMERO, M. A. *Arquitetura bioclimática do espaço público*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2001. 226p.

ELIASSON, I. The use of Climate Knowledge in Urban Planning. *Landscape and Urban Planning*,

n.48, p.31-44, 2000.

HANSELMAN, D. e LITTLEFIELD, B. *MatLab 5 – versão do estudante*. Makron Books, Rio de Janeiro, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Censo Demográfico 2000*. IBGE, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Brasília, 2005. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 20.11.2005.

KATZSCHNER, L. The urban climate as a parameter for urban development. *Energy and Buildings*, v.11, n.1-3, 1988, p.137-147.

KATZSCHNER, L. Urban climate studies as tools for urban planning and architecture. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 1997, Salvador. *Anais...* Salvador: FAU/UFBA – ANTAC, 1997. p. 49-58.

LANDSBERG, H.E. *The urban climate*. New York, Academic Press, 1981, 276p.

OKE, T. R. *Boundary layer climates*. 2.ed. New York: Routledge, 1996, 435p.

OLIVEIRA, P.M.P.de. Cidade apropriada ao clima: a forma urbana como instrumento de controle do clima urbano. Brasília: Editora UnB, 1988.

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.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPEAL e ao CNPq pelos recursos de apoio à pesquisa e bolsas de iniciação científica e mestrado.