

Impacto do adensamento e da orientação solar de cânions urbanos na demanda por condicionamento térmico de edificações sob condições de clima desértico

Impact of densification and solar orientation of urban canyons on energy demand for air-conditioning under desert climatic conditions

Eduardo Leite Krüger

Resumo

O objetivo deste artigo é analisar o efeito da forma urbana no consumo de energia para condicionamento térmico de edificações, de modo a assegurar conforto sob condições de verão. O método considera cálculos de consumo energético para uma edificação de dois pisos com grande massa térmica, localizada em Sede Boqer (latitude 30°52'0N, longitude 34°46'60E e altitude de 480 m acima do nível do mar), Campus da Ben-Gurion University of the Negev, Israel, simulando-a para diferentes condições de cânion urbano. Tal edificação foi monitorada durante os meses de janeiro a agosto de 2006, servindo os dados monitorados como base para a calibração de um modelo de simulação com o software IDA Indoor Climate and Energy. Como parte dos dados de entrada do software de simulação, adotou-se a ferramenta de modelagem de clima urbano Canyon Air Temperature (CAT), de modo a se obterem temperaturas locais para as diversas situações de cânion urbano analisadas. Para a aplicação da ferramenta CAT, compararam-se as predições desse modelo com dados medidos em um cânion urbano em Sede Boqer, calibrando-se CAT para as condições de verão. Após a calibração do modelo de simulação e do modelo preditivo de temperaturas de ar no cânion, assumiram-se as configurações de análise: eixos de rua norte-sul (NS), leste-oeste (EW), perpendicular (PERP) e paralelo (PARAL) ao vento dominante, para as relações entre altura de prédio (H) e espaçamento entre prédios (W) H/W de 0,33, 0,66, 1 e 2. Os resultados obtidos oferecem recomendações gerais quanto à disposição geométrica de cânions urbanos e quanto ao gerenciamento de uma edificação de grande massa térmica, sob condições desérticas.

Palavras-Chave: Adensamento urbano. Cânions urbanos. Simulação termoenergética. Monitoramento térmico. Climatologia urbana.

Abstract

The purpose of this study was to analyze the effect of urban shape on the energy used for air-conditioning in buildings, in order to ensure indoor comfort during summer. The method considers energy consumption calculations for a massive, two-storied building, located at Sede Boqer (latitude 30° 52' 0N, longitude 34° 46' 60E, and altitude 480 m above sea level), campus of the Ben-Gurion University of the Negev, Israel. Thermal simulations for different urban canyon configurations were applied. The two-storied building was monitored from January until the end of August 2006, and the monitoring results were used for calibrating a simulation model with the software Indoor Climate and Energy (IDA). As part of the input data, Canyon Air Temperature model (CAT) was used for predicting local canyon temperatures for different street canyons. Predicted and measured temperatures at a street canyon in Sede Boqer were compared, calibrating CAT for summer conditions. Finally, after calibrating the IDA simulation model and the CAT model, the following canyon configurations were considered for analysis: NS and EW street axis orientations; street axis perpendicular (PERP) and parallel (PARAL) to prevailing wind direction, and aspect ratios (H/W) of 0.33, 0.66, 1 and 2. Results provide possible guidelines for the geometric definition of urban canyons and the management of a high thermal mass building under desert conditions.

Eduardo Leite Krüger
Departamento de Construção
Civil
Universidade Tecnológica
Federal do Paraná
Av. Sete de Setembro, 3165
Rebouças
Curitiba - PR - Brasil
CEP 80230-901
Tel.: (41) 3310-4723
E-mail: ekruger@utfpr.edu.br

Recebido em 25/10/07
Aceito em 07/03/08

Keywords: Densification. Urban canyons. Thermal simulation. Thermal monitoring. Urban climatology.

Introdução

Embora diversos modelos e técnicas para simulação térmica e energética de edificações tenham sido desenvolvidos e aperfeiçoados nas últimas décadas, as simulações realizadas não costumam tratar de forma eficaz as conseqüências do microclima urbano. Geralmente o projetista considera a edificação como desintegrada do meio externo imediato, ignorando em suas simulações as conseqüências diretas advindas das características geométricas urbanas e dos fatores relacionados ao clima urbano no ambiente construído (RATTI *et al.*, 2005). Um aspecto relevante: simulações térmicas e energéticas de edificações tendem a desconsiderar dados climáticos locais, adotando aqueles coletados em estações meteorológicas, não necessariamente próximo ao local onde se pretende construir. Oke (1999) mostra a importância de se contar com diversas estações meteorológicas urbanas e a dificuldade que se apresenta certas vezes quanto à seleção de dados climáticos confiáveis, representativos do microclima urbano.

Apesar de haver uma tradição consideravelmente longa em estudos comparando localidades dentro e fora de determinada malha urbana (estudos de ilhas de calor), apenas mais recentemente vem sendo investigado o impacto de determinado aspecto do desenho urbano ou medidas localizadas de equipamento urbano no balanço energético acima da malha urbana, mais especificamente nas condições microclimáticas no entorno de edificações. Há que se distinguir, conforme Oke (1978), duas situações básicas, relativas ao clima modificado em áreas urbanas: as condições microclimáticas no entorno da edificação, de forma geral uniformes até o topo das edificações que caracterizam a região (cânions urbanos); e aquelas que se situam acima das edificações, acima da malha urbana. Colocando isso de outra forma, nos seguintes espaços:

(a) *Urban Canopy Layer* (UCL) – Camada Urbana ao Nível das Coberturas, que compreende o espaço entre o solo e o nível médio das coberturas das edificações, e representa a interação entre a atmosfera e os elementos urbanos (espaço intra-urbano, microescala); e

(b) *Urban Boundary Layer* (UBL) – Camada Limite Urbana, que engloba o fato urbano e representa a interação da atmosfera com o conjunto da cidade (mesoescala).

Diversos desses estudos tratam exclusivamente do assim denominado “balanço energético de superfície” (*surface energy balance* ou SBE), com a distribuição dos fluxos energéticos ocorrendo segundo a equação básica:

$$Q^* + QF = QH + QE + \Delta QS, \quad (1)$$

na qual Q^* é a radiação líquida obtida para todos os comprimentos de onda, QF é o fluxo de calor antropogênico, QH é o fluxo de calor sensível, QE é o fluxo de calor latente, e ΔQS é o fluxo devido ao armazenamento de calor na malha urbana. A análise do comportamento dos diversos componentes do balanço energético de superfície, a forma como os fluxos estão distribuídos e a radiação líquida obtida para todos os comprimentos de onda têm sido objeto de diversas publicações na área de climatologia urbana. A relação dessas variáveis com fatores morfológicos e geométricos do desenho urbano mostra o vínculo com estratégias de planejamento urbano.

Além do SEB, alguns modelos permitem prever condições microclimáticas no interior de cânions urbanos. Dentro de um cânion urbano, o balanço energético pode ser calculado de modo a se verificarem ganhos e perdas atuantes em um pedestre (PEARLMÜTTER; BERLINER; SHAVIV, 2006). Nesse caso, as parcelas de radiação absorvida e refletida a partir das paredes e solo são distribuídas internamente, considerando sombreamentos existentes e o fator de visão do céu (SVF), havendo contribuições do calor armazenado no cânion, do vento, alterado em intensidade e direção, e da evapotranspiração. Enquanto a equação de balanço térmico dentro de um cânion nos fornece a possibilidade de se estimarem condições de conforto ou estresse térmico em ambientes externos (cânions), para simulações termoenergéticas de edificações, as variáveis de entrada são bem específicas. Em geral, consideram-se as características geométricas e de orientação solar do cânion, que gerarão sombreamentos e reflexões internas, a orientação em relação ao vento e o grau de redução de sua velocidade em função da densidade urbana, e, na medida do possível, a temperatura do ar no cânion. Quanto a esse último aspecto, é possível estabelecer modelos de relativa precisão para a predição da temperatura do ar em cânions urbanos, como a ferramenta de modelagem de clima urbano *Canyon Air Temperature* (CAT) (ERELL; WILLIAMSON, 2004; ERELL; WILLIAMSON, 2006), a partir de dados climáticos obtidos em estações meteorológicas convencionais e de características geométricas e físicas das duas localidades (cânion e estação meteorológica).

Como etapas independentes de um projeto de pós-doutorado realizado no *Department of Man in the Desert, Ben-Gurion University of the Negev*, Israel, foi utilizado o modelo analítico CAT citado

acima, com o intuito de simular condições de conforto e o correspondente consumo energético para climatização de um pequeno apartamento, uma vez alteradas as condições de entorno da edificação (orientação solar de um eixo de rua – cânion urbano, orientação relativa ao vento dominante, espaçamento entre prédios). Para o desenvolvimento dessa etapa da pesquisa, conduziu-se inicialmente monitoramento térmico de uma edificação com características da arquitetura bioclimática durante um longo período (KRÜGER, 2007), abrangendo diversas estações do ano. Construiu-se um modelo computacional dessa edificação no software IDA *Indoor Climate and Energy* (ICE, www.equa.se), variando-se as condições do cânion ao redor da edificação, porém adotando-se a temperatura predita para o cânion como referência externa para as simulações (e não a temperatura da estação meteorológica local, comumente adotada). Complementarmente, analisou-se o efeito do gerenciamento da edificação, com a operação adequada das aberturas no período quente, comparativamente a um gerenciamento inadequado. Os resultados encontrados podem nortear estratégias de planejamento urbano e gabaritos a serem adotados para edificações dentro da malha urbana.

Planejamento urbano climaticamente orientado

Sendo o entorno de edificações, principalmente em áreas urbanas, em geral pouco semelhante às condições de terreno, exposição ao vento e à radiação existentes em estações meteorológicas, há que se analisar a inter-relação deste com a edificação. Em cidades, o projetista terá que lidar com um clima modificado, não o da estação meteorológica, mas com o clima urbano. Como menciona Givoni (1998), há por vezes uma interação complexa e mecanismos de *feedback* entre as edificações e o clima exterior a elas. Por um lado, o ambiente interno é afetado pelas condições climáticas do entorno da edificação; por outro, a própria edificação e, especialmente, grupos de edificações modificam o clima local. Em condições de calor, Johansson (2006) cita ainda o fato de que os próprios equipamentos de climatização, enquanto resfriam o ar interno, emitem calor sensível ao entorno da edificação, criando *feedback* positivo.

A razão preponderante segundo a qual áreas urbanas se tornam desnecessariamente desconfortáveis deve-se ao fato de que a questão de conforto em espaços abertos recebe pouca atenção por parte de planejadores urbanos (ELIASSON, 2000). Estudos comprovam que o conhecimento acerca de climatologia urbana entre

planejadores urbanos é praticamente inexistente, havendo poucas ferramentas acessíveis para o planejamento (ELIASSON, 2000; JOHANSSON, 2006). Assim, os planejadores urbanos ficam inabilitados por diversas vezes em prever os efeitos negativos do desenho urbano.

Diversos autores nos fornecem diretrizes gerais para se construir sob condições climáticas tropicais, entre eles Olgyay (1963), Givoni (1976) e Lippsmeier (1980), apresentando igualmente recomendações gerais para um planejamento urbano climaticamente orientado. De Waal (1993) cita três limitações dessas recomendações:

- (a) são (parcialmente) incorretas, não distinguindo entre edificações baixas e altas; entre edificações que usam sistemas passivos daquelas climatizadas; e entre moradias permanentemente habitadas e edifícios comerciais (uso diurno);
- (b) diretrizes não são descritas quantitativamente; e
- (c) distinção feita entre dois tipos básicos de clima: trópico-úmido e quente-seco.

Para climas quente-úmidos, por exemplo, recomendações podem englobar (LIPPSMEIER, 1980): grande espaçamento entre prédios, de modo a favorecer fluxos de ar; uso de sombreamento para vias de pedestres; uso de vegetação; vias retas e prédios baixos; e orientação das fachadas para um eixo norte-sul, etc.

Landsberg (*apud* DE WALL, 1993) sugere uma série de recomendações adicionais para a melhoria do clima urbano em regiões tropicais como uso de vegetação e fontes d'água distribuídas em diferentes setores da cidade, de modo a promover a evapotranspiração, obtendo-se temperaturas mais baixas, aumento do coeficiente de albedo nas superfícies edificadas, etc.

Segundo Givoni (1998), através de políticas urbanas e do desenho urbano, pode-se interferir no clima de determinada localidade, promovendo o conforto térmico dentro e fora das edificações e, dessa forma, reduzir a demanda de energia em climatização artificial. Os fatores que devem ser pensados no planejamento urbano são: (a) escolha do local para a implantação da cidade ou de loteamentos de grande porte; (b) tamanho das cidades ou do empreendimento; (c) densidade da área construída e distância entre as edificações; (d) cobertura do solo: a elevação de temperatura nas cidades é causada em parte pelo lento resfriamento da massa edificada, que durante o dia armazenou calor e durante a noite o perde de maneira mais lenta, em comparação com as áreas vegetadas e cultivadas; (e) a orientação e as larguras das caixas das vias; (f) altura média das edificações; e (g)

desenho das edificações. O mesmo autor (GIVONI, 1994) faz algumas recomendações para o desenho urbano em climas tropicais do tipo quente-úmido, entre as quais se pode citar: orientação das vias e grande espaçamento entre prédios no sentido de se aproveitarem os fluxos de ar, sugerindo o posicionamento oblíquo em relação à direção predominante do vento; uso de sombreamento de vias de pedestres através de áreas vegetadas; e evitar edifícios altos, que bloqueiem o vento.

Katzschner (1997) utiliza uma avaliação bioclimática (índice denominado PET – *physiological equivalent temperature*) para a elaboração de mapas climáticos urbanos, para daí extrair recomendações para o planejamento urbano.

Entretanto, comum a todas as recomendações e corroborando a segunda limitação mencionada por De Waal, nota-se a falta de diretrizes quantitativas, no sentido de se oferecerem percentuais recomendáveis para área edificada ou vegetada e recomendações de limites para a relação entre altura de prédios e largura das vias (H/W), por exemplo. Verifica-se uma necessidade premente de haver um aprofundamento experimental na área de climatologia urbana, devendo as recomendações ser contrastadas com dados experimentais e esses embasarem estratégias para o planejamento urbano.

Metodologia

O artigo agrupa seis etapas realizadas ao longo de um período experimental de aproximadamente oito meses, conduzido no *Department of Man in the Desert, Ben-Gurion University of the Negev*, Israel. Essas etapas, em ordem cronológica, foram as seguintes:

- (a) monitoramento térmico de uma edificação solar passiva;
- (b) simultaneamente, monitoramento térmico do cânion periurbano adjacente à edificação monitorada;
- (c) simulação computacional e calibração do modelo matemático da edificação com o software *IDA Indoor Climate and Energy (ICE)*;
- (d) simulação computacional e calibração do modelo matemático do cânion urbano com a ferramenta de modelagem de clima urbano *Canyon Air Temperature (CAT)*;
- (e) simulações de desempenho/consumo de energia em climatização artificial da edificação de referência em função de variações da geometria urbana quanto ao adensamento e à orientação solar

do eixo do cânion – a partir de dados de temperatura preditos pela ferramenta CAT; e

(f) simulações de desempenho/consumo de energia em climatização artificial da edificação de referência em função de variações da geometria urbana quanto ao adensamento e à orientação solar do eixo do cânion – não se utilizando predições de CAT, mas observando-se o padrão de uso das aberturas da edificação.

Nesta seção, são descritos o clima local, a edificação e o cânion considerados para análise, os equipamentos empregados e o padrão de uso da edificação ao longo dos oito meses de monitoramento.

Clima local

Sede Boqer (latitude 30°52'0N, longitude 34°46'60E) situa-se na região alta do deserto do Negev, aproximadamente a 480 m acima do nível do mar. O clima é caracterizado por grande variação térmica diária e sazonal, ar seco e céu claro com radiação solar intensa. No verão, a média das temperaturas máximas situa-se em torno de 32 °C, com média diária de 17 °C. A radiação global tem um valor médio diário de 7,7 kW.h.m⁻² em junho e julho. Nesse período, o vento dominante é predominantemente do noroeste, tornando-se mais forte ao final da tarde e nas primeiras horas da noite (BITAN; RUBIN, 1991).

Condições de conforto térmico para Sede Boqer

Neste estudo, adotaram-se os critérios do Conforto Adaptativo – ACS (*Adaptive Comfort Standard*), método inicialmente proposto por Nicol e Humphreys (2002) para o estabelecimento da temperatura operativa ideal para a edificação. Assume-se que, “se uma mudança ocorre produzindo desconforto, as pessoas encontram meios para restaurá-lo”. De Dear e Brager (2002) entendem que o clima e as estações têm grande influência no comportamento e na capacidade de adaptação – física e psicológica – do ser humano ao ambiente térmico que o circunda. Ainda, mostrou-se que o método apresenta grande potencial de redução do consumo energético, comparativamente a outros parâmetros (BRAGER; DE DEAR, 2001). O ASHRAE Standard 55 sugere que a temperatura ideal de conforto (*optimum comfort temperature*) para edificações naturalmente ventiladas leve em conta a temperatura externa do período de interesse, por meio da fórmula:

$$T_{\text{conf}} = 0,31 \times T_{\text{média ext}} + 17,8 \quad (2)$$

A zona de conforto pode ter uma variação de até 5 °C para 90% de aceitabilidade e de até 7 °C para 80%, com valor central igual à temperatura de conforto calculada. Para o ano climático desenvolvido para Sede Boqer a partir de dados de radiação entre 1989 e 1996, as temperaturas-limite (inferior e superior) são apresentadas na Tabela 1 para uma aceitabilidade de 90%.

Descrição da edificação monitorada

A denominada Arquitetura Bioclimática recomenda soluções de projeto adequadas ao clima da região onde se constrói. Nesse sentido, em climas quente-úmidos deveriam ser adotadas moradias leves, enquanto em climas mais áridos o uso apropriado de massa térmica torna-se mais indicado. Há inúmeros exemplos na arquitetura tradicional de regiões do Oriente Médio que mostram a utilização de grande massa térmica na envoltória da edificação, de modo a manter um padrão estável da temperatura interna, enquanto, externamente, ocorre grande variação térmica diária. O uso de massa térmica nessas regiões traz vantagens tanto no período de verão como no inverno. No período frio, o uso da massa térmica deve ser intensificado com ganhos solares, através

de aberturas na edificação para ganho solar direto. No período quente, a massa térmica existente deve ser neutralizada nas horas mais frias do dia, utilizando-se eficientemente a ventilação cruzada. Para ambos os casos, são primordiais uma orientação adequada das aberturas, de modo a proporcionar ganho solar direto, e o controle de suas dimensões e características termofísicas, de modo a poder bloquear ganhos de calor indesejáveis (muitas vezes na forma de radiação refletida do solo) para dentro da edificação (GIVONI, 1998).

A edificação monitorada faz parte de um complexo de apartamentos para estudantes, situado no Campus de Sede Boqer da *Ben-Gurion University*. O complexo de apartamentos consiste de várias fileiras de apartamentos individuais, com orientação leste-oeste. Diversas técnicas de condicionamento passivo foram empregadas nesses apartamentos, como a escolha adequada das fachadas com maior e menor área de aberturas, a orientação da fachada principal para o sul, o uso de vidros duplos e de venezianas com isolamento térmico e o uso de massa térmica com camada isolante, entre outras.

Mês	T _{média ext}	T _{conf}	Limite inferior	Limite superior
Jan	11.1	21.2	18.7	23.7
Fev	8.8	20.5	18.0	23.0
Mar	12.9	21.8	19.3	24.3
Abr	19.8	23.9	21.4	26.4
Mai	21.9	24.6	22.1	27.1
Jun	25.0	25.6	23.1	28.1
Jul	26.0	25.9	23.4	28.4
Ago	26.5	26.0	23.5	28.5
Set	23.7	25.2	22.7	27.7
Out	24.2	25.3	22.8	27.8
Nov	17.0	23.1	20.6	25.6
Dez	7.9	20.3	17.8	22.8

Tabela 1 - Faixa de temperaturas segundo ACS para Sede Boqer - 2006

As medições foram realizadas em um apartamento destinado a famílias (Figuras 1 e 2), construído com concreto armado coberto por camada de material isolante (*Rondopan*, com uma condutividade térmica de $0,026 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) e com as fachadas revestidas externamente com pedra (5 cm). O apartamento situa-se numa fileira de apartamentos de família, possuindo apenas duas fachadas externas. Possui dois pisos e uma área

aproximada de 55 m^2 . A relação entre área de janela e área de fachada (WWR) é menor na fachada norte, com $\text{WWR}=0,05$, de forma a evitar perdas de calor no inverno, e significativamente maior na fachada sul, com $\text{WWR}=0,14$. As características dos elementos construtivos do apartamento de família são apresentadas na Tabela 2.



Fonte: Fotografia de dezembro de 2005

Figura 1 - Fachada sul do bloco de apartamentos analisado

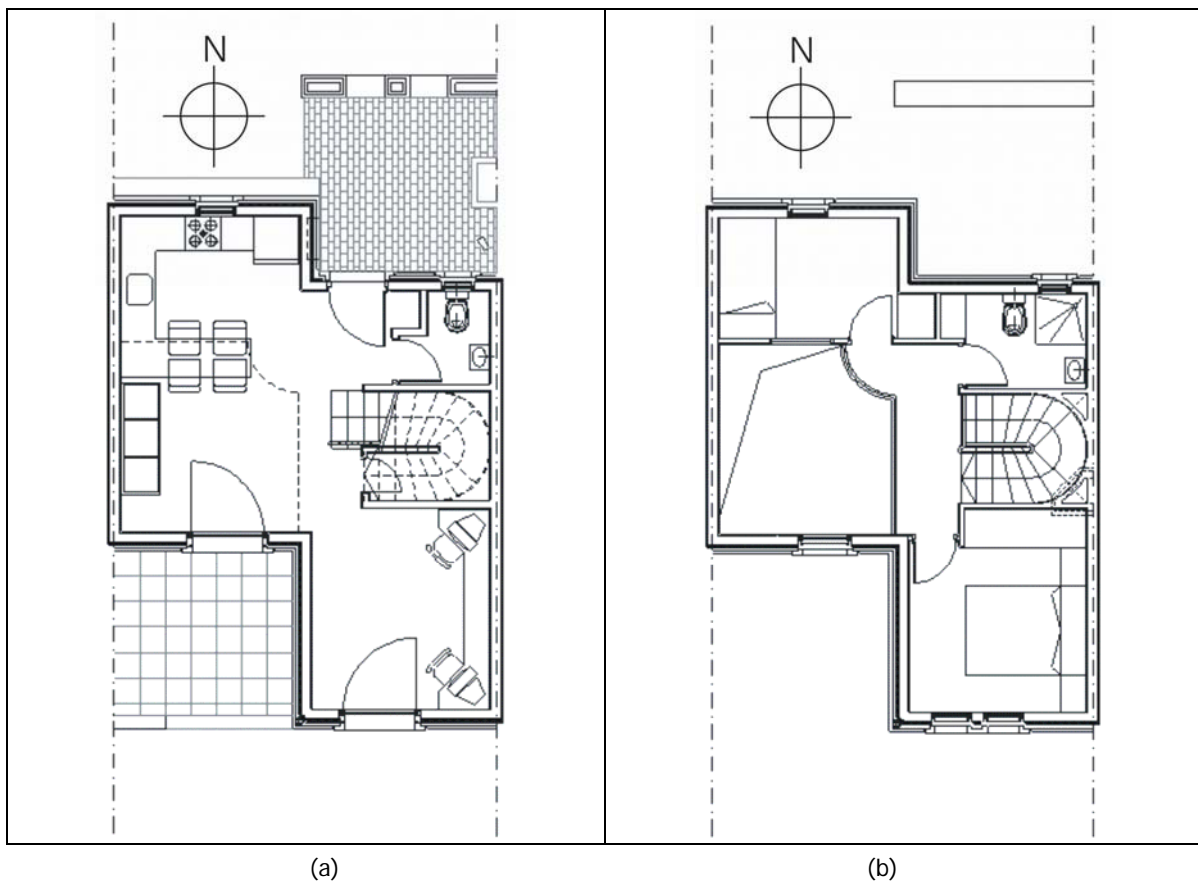


Figura 2 - Piso inferior (a) e piso superior, com mezanino (b)

Elemento	Condutividade (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Densidade (kg.m ⁻³)	Calor específico (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
Paredes Externas			
2 cm argamassa	0,48	1.400	880
20 cm concreto armado	2,1	2.400	970
4 cm Rondopan	0,026	35	142
5 cm pedra	2,3	2.515	790
Paredes Internas			
2 cm argamassa	0,48	1.400	880
16 cm concreto armado	2,1	2.400	970
2 cm argamassa	0,48	1.400	880
Piso			
2 cm revestimento cerâmico	0,84	1.922	0,92
20 cm concreto	2,1	2.400	970
Cobertura			
2 cm argamassa	0,48	1.400	880
20 cm concreto	2,1	2.400	970
5 cm Rondopan	0,026	35	142
2 cm argamassa	0,48	1.400	880
Aberturas	Área vidro (m ²)	U (W.m ⁻² .K ⁻¹)	Transmitância solar (%)
2 portas com vidro duplo	2,30 por unidade	2,8	0,69
4 janelas de abrir/máximo-ar	0,55 por unidade	2,8	0,69
2 janelas máximo-ar	0,30 por unidade	2,8	0,69
1 janela de abrir	0,7	2,8	0,69

Tabela 2 - Características dos elementos construtivos da edificação (ASHRAE, 2005; EQUA, 2002)

Descrição do complexo de apartamentos para estudantes

De modo a se poder usar e calibrar a ferramenta de modelagem de clima urbano CAT para condições climáticas do Deserto do Negev e, por fim, para se poder realizar simulações de cânions de diversas configurações, tomaram-se medições externas entre dois blocos do complexo de apartamentos de estudantes (Figura 3). O local é pouco adensado e possui vegetação rasteira. O complexo de apartamentos consiste de várias fileiras de apartamentos individuais, com orientação do eixo de rua no sentido leste-oeste. Os planejadores do complexo tomaram o cuidado em proporcionar ganhos solares aos apartamentos, de forma a se ter um aproveitamento passivo dos ambientes no inverno. Assim, o espaçamento entre prédios com fachada principal voltada para o sul (hemisfério norte) é significativo: a altura dos prédios (H) é de aproximadamente 6 m, e o espaçamento entre os mesmos (W), de 10 m, o que resulta em uma

relação H/W=0,6. O cânion assim formado tem um comprimento de 25 m, sem presença de automóveis ou demasiado tráfego de pedestres. Uma estação meteorológica experimental está situada a cerca de 500 m dali.

O monitoramento externo foi realizado entre duas fileiras de apartamentos para famílias, com orientação do eixo no sentido leste-oeste, a 3 alturas (1,5 m, 2,5 m e 5,5 m) e ao centro do cânion, a cerca de 15 m de sua extremidade oeste. A comparação entre dados medidos e resultados da ferramenta CAT envolveu permanente avaliação da magnitude e padrão das variações horárias da temperatura no cânion, relativamente aos dados coletados na estação meteorológica. O balizamento dessas variações deu-se por meio de comparações com a ilha de calor esperada no cânion, ou seja, mais consistente com os resultados gerados pela própria ferramenta CAT. Posteriormente, a consistência do padrão de variação das temperaturas no cânion, relativamente aos dados coletados na estação meteorológica, foi checada

em relação a dados coletados num modelo em escala de uma superfície urbana (OASUS) (PEARLMUTTER *et al.*, 2005). Nesse caso, elegeu-se uma fileira no modelo em escala, de mesma orientação e relação H/W, analisando-se suas diferenças horárias quanto a um sensor externo ao modelo.

Equipamento utilizado para monitoramento

Para a edificação monitorada, termopares do tipo cobre-constantan para registro da temperatura ambiente foram preparados, conectados a uma estação Campbell 21X e posicionados em diversos pontos no ambiente: na cozinha, a 2,10 m; na sala, a 2,10 m; na área com pé-direito elevado – mezanino, a 2 m e a 5 m do piso (Figura 4). A temperatura superficial foi tomada em alguns pontos do ambiente. Nesse caso, os sensores foram fixados à superfície e recobertos por pequenos círculos de isopor, de forma a neutralizar a

convecção nos sensores: junto à parede sul (internamente); junto à parede norte (internamente); junto à cobertura (internamente); junto ao piso (interna e externamente).

Após calibração dos sensores, cujos resultados mostraram diferença média entre sensores de aproximadamente 0,2 K, com desvio padrão de 0,06 K, iniciou-se o monitoramento no dia 18 de janeiro. Os dados medidos de temperatura do ar interno, para os quatro pontos mencionados, foram calculados como média única, assumindo-se esse valor médio como sendo representativo da temperatura no apartamento. A edificação ficou submetida durante todo o período a diversos modos de ocupação, sendo, porém, na maior parte do tempo ocupada por uma pequena família (dois adultos e uma criança). O período abrangido compreendeu de 18/01/2006 a 30/08/2006, englobando assim períodos de inverno, primavera e verão.

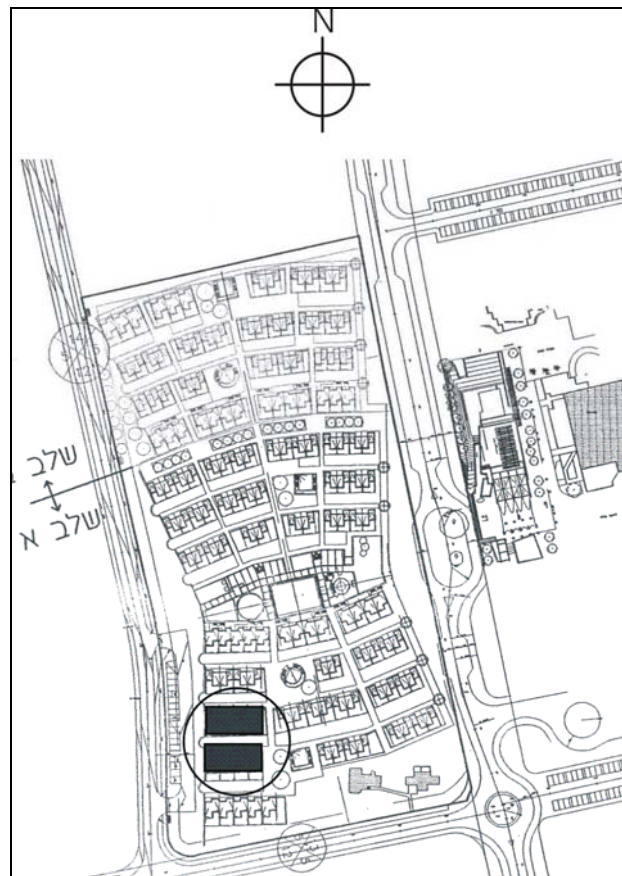


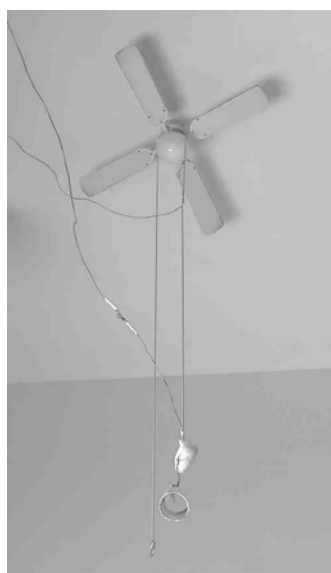
Figura 3 - Complexo de apartamentos de estudantes, com demarcação do cânion analisado



(a) Sensor para medição da temperatura do ar



(b) Sensor para medição da temperatura superficial



(c) Sensores para medição do efeito de estratificação do ar



(d) Data logger Campbell 21X

Figura 4 - Equipamentos de medição utilizados

Uma observação mais minuciosa do posicionamento dos sensores no mastro indicou que, embora os sensores não fossem afetados diretamente pela radiação solar, o próprio mastro, de coloração escura, afetava os sensores por meio de radiação de onda longa. A partir daí, protegeram-se os sensores com tubos de papelão recobertos por folha de alumínio, orientando-se esse conjunto no eixo norte-sul, o que praticamente corresponde à direção do vento dominante. Ao final do mês de junho, posicionou-se o mastro no centro do cânion, entre duas fileiras de apartamentos para famílias, permanecendo essa configuração até o final do mês de agosto (Figura 5). A série de dados coletados externamente para esse último período foi adotada neste estudo, mais

especificamente no capítulo “Monitoramento no cânion e resultados da ferramenta CAT”.

Operação do apartamento

Em cada um dos apartamentos de família, dispuseram-se instruções quanto a uma operação eficiente deles, uma vez que “edificações passivas requerem usuários ativos”. Basicamente, os seguintes modos de operação foram adotados:

(a) inverno: janelas fechadas com venezianas externas (*insulating shutters*) abertas, de forma a proporcionar ganhos solares durante o dia, e fechadas no período noturno, impedindo a saída do calor captado; restrição da ventilação do ambiente,

apenas abrindo parte da janela máximo-ar da cozinha, quando das refeições;

(b) primavera: venezianas mantidas semi-abertas durante o dia e as janelas máximo-ar levemente inclinadas durante todo o tempo, de modo a garantir uma ventilação permanente do ambiente; e

(c) verão: venezianas quase que completamente fechadas durante o dia (possibilitando um mínimo de luz natural) e todas as aberturas abertas a partir do pôr-do-sol, de modo a facilitar a ventilação cruzada no ambiente.

Simulação de desempenho térmico da edificação

Após o período de monitoramento, cuja descrição detalhada é apresentada por Krüger (2007), simulações de desempenho térmico foram realizadas com o software IDA *Indoor Climate and Energy* (ICE) (versão 3.0, Build 15), desenvolvido pela EQUA, Suécia (www.equa.se). Um primeiro modelo de simulação foi criado a partir de dados construtivos e especificidades dos materiais de construção. Alguns ajustes foram então feitos a esse primeiro modelo, relativamente

a refletâncias externas, massa térmica adicionada ao modelo, características termofísicas e espessuras da envoltória, testando-se novas combinações sempre que havia alguma dúvida quanto às especificações da edificação. Tais ajustes foram realizados no intuito de calibrar o modelo.

O modelo resultante foi considerado adequado para simular o desempenho da edificação para diferentes condições de exposição. Uma vez que seja adotada uma longa e contínua operação da edificação para determinado período, como em uma dada estação do ano, resultados consistentes podem ser obtidos.

A Tabela 3 apresenta as diferenças numéricas encontradas entre temperaturas medidas e simuladas na edificação. Pode-se notar que as mais altas correlações foram verificadas para situações específicas em que não havia grande variação na operação da edificação. Assim, para o modo “aberto” no inverno, com exposição solar através das aberturas, e para o modo “ocupado” no verão, quando as aberturas eram operadas à noite, os dados simulados tiveram desempenho reduzido.



Figura 5 - Mastro com termopares cobre-constantan ultrafinos, protegidos contra radiação solar direta, posicionado ao centro do cânion

Modo	Tmédia (medida)	Desvio (medida)	Tmédia (simulada)	Desvio (simulada)	Δ Tmédia	Correlação (R)
Aberto (inverno)	17,9	0,7	18,0	0,9	0,1	0,66
Fechado (inverno)	20,2	0,9	16,5	0,9	3,7	0,95
Ocupado (verão)	26,4	1,1	26,8	1,8	0,3	0,82

Tabela 3 - Diferenças numéricas encontradas entre temperaturas medidas e simuladas na edificação

Para o modo “fechado” (sem ganho solar) no inverno, uma diferença praticamente constante foi verificada entre temperaturas medidas e simuladas, resultante do emprego de massa térmica na edificação. Como o modo fechado foi subsequente ao modo aberto, houve dificuldade de simular o modelo no software sem que os resultados se desestabilizassem¹. O diagrama de dispersão resultante dessa condição é apresentado na Figura 6.

Monitoramento no cânion e resultados da ferramenta CAT

A ferramenta de modelagem de clima urbano *Canyon Air Temperature model* (CAT) (ERELL; WILLIAMSON, 2004; ERELL; WILLIAMSON, 2006) é um programa em FORTRAN criado para prever a temperatura do ar em um cânion urbano com base em dados climáticos obtidos em estações meteorológicas convencionais e em características geométricas e físicas de ambas as localidades (cânion e estação meteorológica). Assumindo-se que ambos os locais estão sujeitos às mesmas condições mesoclimáticas, diferenças em termos de temperatura local devem-se exclusivamente a diferenças morfológicas e de superfície. Assume-se também que há uma distribuição homogênea das temperaturas no cânion.

A temperatura mesoclimática T_b é determinada a partir de cálculos do balanço energético para a localidade de referência (estação meteorológica) e, com base nessa temperatura T_b e na descrição do cânion urbano, prediz-se sua temperatura. As diferenças entre temperaturas locais devem-se a diferenças no balanço energético de superfície (acima da malha urbana) para cada local.

Na equação do balanço energético de superfície (Equação 1), todos os termos são calculados em

CAT a partir de dados disponíveis na estação meteorológica e a partir das características geométricas do cânion. A temperatura no cânion é computada como sendo a soma da temperatura do ar encontrada na estação meteorológica com a diferença líquida em termos de temperatura resultante das características de ambos os sítios (Quadro 1), segundo procedimento detalhado em Erell e Williamson (2006).

A validação do modelo foi realizada a partir de medições de campo em Adelaide, Austrália, para diversos cânions urbanos. A calibração pode ser realizada alterando-se os coeficientes do modelo de histerese (CAMUFFO; BERNARDI, 1982), utilizado para determinação de Δ QS; dados quanto à umidade do solo; e coeficientes que determinam a natureza do fluxo de ar que atravessa o cânion. Entre as diversas aplicações possíveis do modelo, os autores sugerem seu uso para o estudo do efeito de configurações urbanas no consumo energético em edificações.

Resultados do monitoramento realizado no Cânion

A diferença horária entre as temperaturas registradas no cânion e aquelas coletadas na estação meteorológica é representada no gráfico (Figura 7) sob a forma do valor máximo diário da ilha de calor ΔT_{u-r} (diferença de temperatura entre estação “urbana” e “rural”, neste caso, entre o que se mede no cânion relativamente ao que é registrado na estação meteorológica). Nota-se no gráfico que as maiores diferenças são observadas no início da primavera e próximo ao verão. Os picos no gráfico indicam possível incidência direta de radiação solar nos sensores. A partir de fins de junho, os valores máximos da ilha de calor diária tornam-se mais realistas e da ordem de dois graus, em função das correções efetuadas no processo de monitoramento.

¹ Nas simulações com o IDA, pode-se adotar duas diferentes configurações para o início de simulação. O período necessário para se atingir o regime transiente pode se restringir a um mesmo dia simulado várias vezes ou a um período de utilização da edificação antes das datas de interesse. Optou-se pela primeira condição, uma vez que a passagem repentina do “modo aberto” (com ganhos solares) para o “modo fechado” gerou disparidades entre as curvas (medido *versus* simulado).

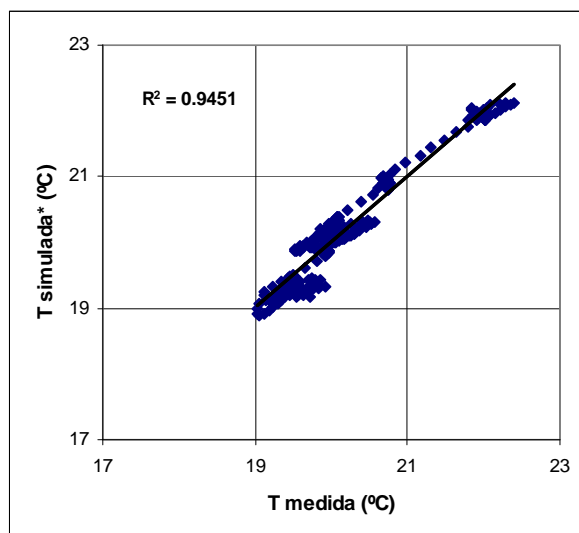


Figura 6 - Diagrama de dispersão entre temperaturas medidas e simuladas (fechado, inverno)

Dados climáticos (meteo_in.txt)	Características da localidade (met_site.txt e urb_site.txt)
Ano	Albedo médio do solo
Mês	Albedo médio das paredes
Dia	Largura do cânion
Hora	Altura da parede 1 do cânion
TBS na estação meteorológica [°C]	Altura da parede 2 do cânion
Umidade relativa na estação meteorológica [%]	Distância de um prédio vizinho 1
Vel. do vento na estação meteorológica [$m s^{-1}$]	Altura do prédio vizinho 1
Direção do vento na estação meteorológica [graus, 360=norte]	Distância de um prédio vizinho 2
Nebulosidade na estação meteorológica [décimos]	Altura do prédio vizinho 2
Precipitação horária [mm]	Orientação do eixo do cânion [graus, 360=norte]
Radiação global em plano horizontal [$W m^{-2}$]	Coefficiente de armazenamento de calor no solo (A1)
Radiação difusa em plano horizontal [$W m^{-2}$]	Coefficiente de armazenamento de calor no solo (A2)
Altura solar [graus acima do horizonte]	Coefficiente de armazenamento de calor no solo (A3)
Azimute solar [graus, 360=norte]	Coefficiente de armazenamento de calor na parede 1 (A1)
TBS no cânion [°C] (quando disponível)	Coefficiente de armazenamento de calor na parede 1 (A2)
Umidade relativa no cânion [%] (quando disponível)	Coefficiente de armazenamento de calor na parede 1 (A3)
	Coefficiente de armazenamento de calor na parede 2 (A1)
	Coefficiente de armazenamento de calor na parede 2 (A2)
	Coefficiente de armazenamento de calor na parede 2 (A3)

Quadro 1 - Dados requeridos pelo modelo CAT (ERELL, 2004)

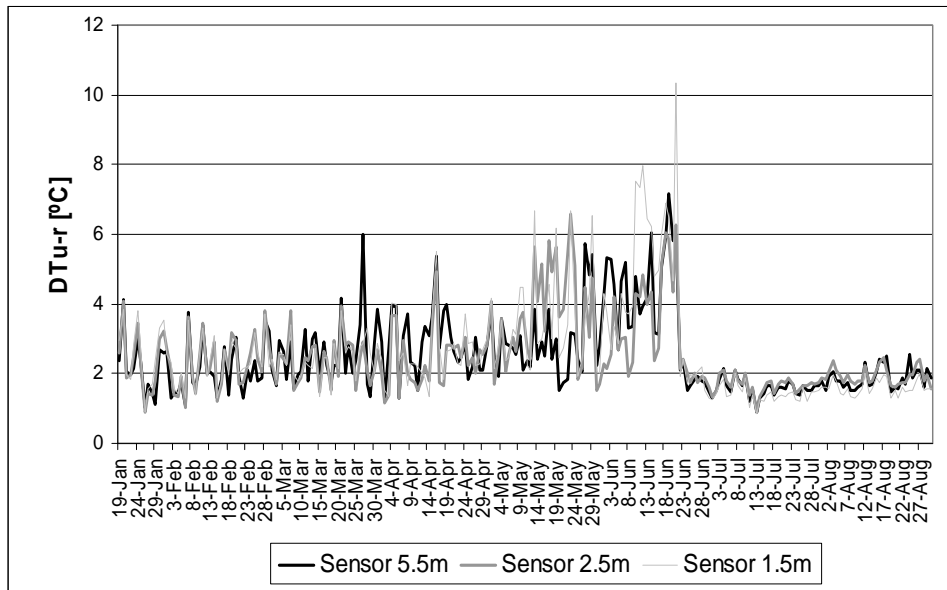


Figura 7 - Máximo valor diário da ilha de calor (ΔT_{u-r}) para as três alturas

Comparações com dados coletados em modelo em escala

Uma análise mais refinada do padrão de relacionamento entre temperaturas registradas no cânion e aquelas coletadas na estação meteorológica mostrou um padrão diário bastante consistente: a máxima diferença ocorrendo por cerca das 19h, enquanto o cânion parecia mais frio que a estação meteorológica às 6h. Esse padrão pouco usual da ilha de calor indicou possível erro de monitoramento, resultante do uso de sensores distintos entre ambos os locais de medição.

De fato, um monitoramento simultâneo de temperaturas do ar em agosto, em modelo em escala para condições semelhantes, indicou um padrão horário da ilha de calor significativamente diferente do observado em escala real.

O modelo em escala de uma superfície urbana, denominado *Open-Air Scaled Urban Surface – OASUS* (PEARLMUTTER *et al.*, 2005), amplia a possibilidade de análise em situações diversas encontráveis em uma malha urbana. O modelo consiste de uma malha de prédios e ruas, construída em espaço aberto. As fileiras de prédios são compostas de blocos de concreto vazados de 0,2×0,2×0,4 m e apresentam características análogas aos materiais encontrados em construções da região do Negev. O sítio experimental está localizado igualmente no Campus da Universidade de Ben-Gurion, em Sede Boqer, a cerca de 500 m do cânion em escala real.

Na Figura 8 observa-se uma série de fileiras repetidas, na qual um mastro para monitoramento

de diversas variáveis está inserido a sotavento, seguido mais a frente por uma disposição desordenada de fileiras, em diversas orientações. As fileiras repetidas são dispostas perpendicularmente ao vento dominante (noroeste), enquanto as demais simulam situações diversas: cânions paralelos ao vento dominante e em disposição leste-oeste e norte-sul. O distanciamento entre as fileiras e sua altura também proporcionam resultados em termos de relações H/W para orientações solares diversas.

Para as comparações em termos de ilha de calor dos resultados obtidos no modelo com os observados em escala real, instalaram-se dois termopares cobre-constantan ultrafinos conectados a uma estação Campbell em duas posições no modelo em escala: a) fora da malha urbana, a barlavento (vento dominante noroeste); e b) em uma fileira de orientação leste-oeste, com relação H/W de cerca de 0,6. As diferenças entre ambos os sensores para a data de 9 de agosto mostram um valor máximo da ilha de calor ocorrendo próximo ao meio-dia, diferentemente do padrão observado em escala real para a mesma data (Figura 9).

Correção empírica de dados registrados na estação meteorológica experimental de sede Boqer

Em comparações entre diferentes proteções radiantes para pequenos sensores de temperatura, Erell *et al.* (2005) mostraram um bom desempenho dos tubos de papelão recobertos de papel-alumínio. Esse tipo de proteção gera temperaturas semelhantes ao que se obtém com as denominadas *StevensonScreens*. Além disso, deve-se atentar

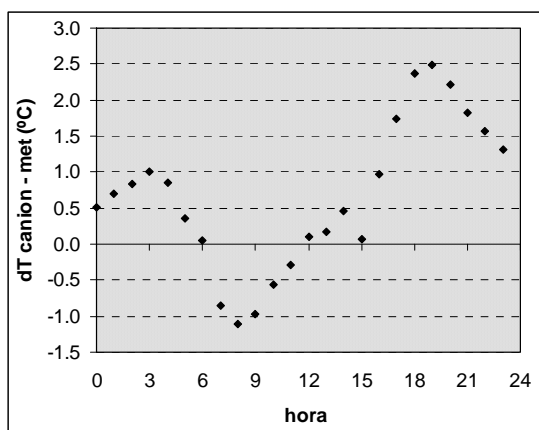
para a direção do eixo do tubo, preferencialmente na direção do vento dominante. Erell *et al.* (2005) sugerem também a adoção de sensores de pequena dimensão.

Considerando-se o padrão não usual verificado no relacionamento entre temperaturas registradas no cânion e aquelas coletadas na estação meteorológica, procedeu-se a uma comparação direta entre dados coletados no mastro de

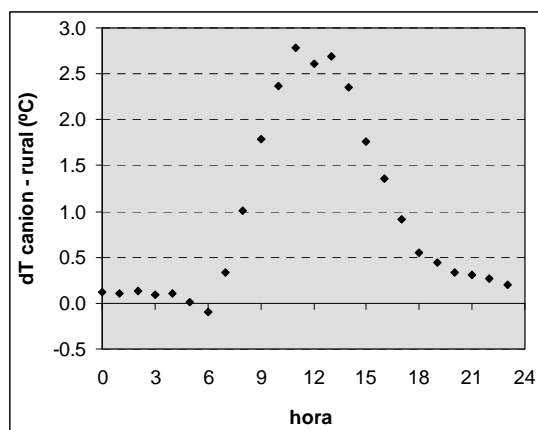
monitoramento e valores registrados na estação (Figura 10). Almejou-se um procedimento de correção, a ser aplicado aos dados da própria estação meteorológica, de modo a corrigir distorções. O período de monitoramento ocorreu durante o mês de setembro. A mesma estação Campbell foi empregada, com os sensores a diferentes alturas. O gráfico mostra as diferenças observadas para os três primeiros dias de monitoramento (Figura 11).



Figura 8 - O modelo reduzido (Open-Air Scaled Urban Surface - OASUS)



(a)



(b)

Figura 9 - Escala real (a) e reduzida (b), em 9 de agosto



Figura 10 - Comparação direta entre dados coletados no mastro de monitoramento e valores registrados na estação meteorológica

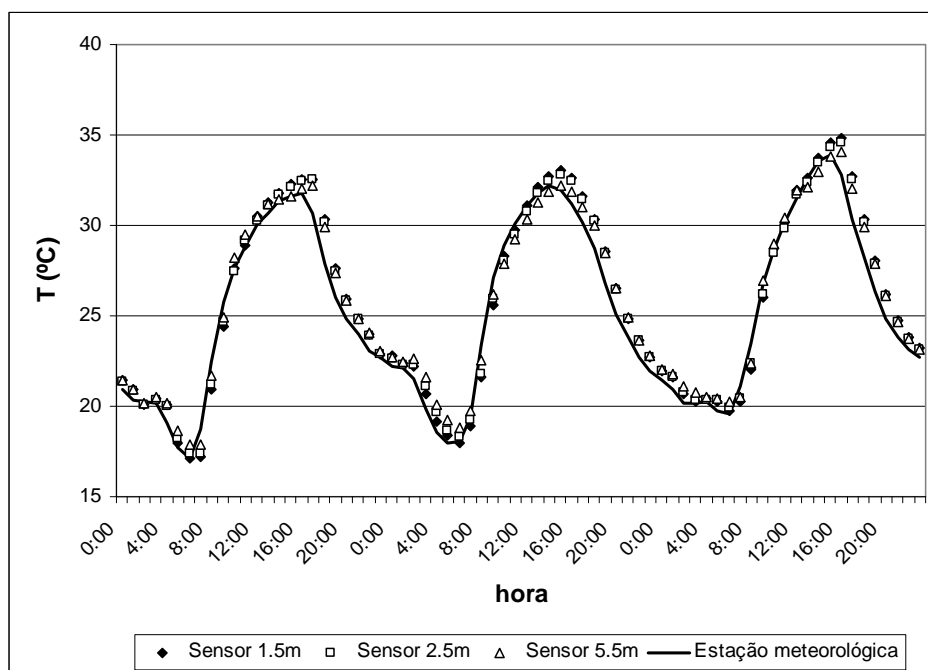


Figura 11 - Diferenças entre temperaturas (primeiros três dias)

Embora as curvas apresentem padrão semelhante, observa-se uma pequena discrepância horária e nas amplitudes diárias, resultante do emprego de diferentes proteções solares: tubos envoltos com papel-alumínio *versus* armário de madeira ventilado. A variação horária entre a média dos sensores a 1,5 m e a 2,5 m (denominada AT~2,0, comparável aos dados medidos à altura de 1,8 m na estação meteorológica experimental) e a temperatura de referência da estação

meteorológica apresentou padrão semelhante ao do cânion, porém com o pico aparecendo pelas 17h e diferenças negativas ocorrendo durante as primeiras horas de sol. O padrão se aproxima de uma senóide. Além disso, a discrepância horária e a dispersão verificada sugerem uma função de *loop*, ou um modelo de histerese, conforme utilizado para descrever a relação não-linear entre armazenagem de calor e radiação líquida em

estudos de climatologia (CAMUFFO; BERNARDI, 1982; GRIMMOND *et al.*, 1991).

Quatro modelos diferentes foram testados para ajuste das temperaturas da estação (MET) às temperaturas medidas nos abrigos compostos de tubos envoltos com papel-alumínio (AT~2,0). Um modelo linear não se aplica, dado que a *loop* é desconsiderado nessa relação. Um modelo senoidal combinado com modelo linear também não resolve, permanecendo as diferenças. Um modelo de histerese combinado com o linear e com a função senóide corrigiu distorções, mas verificou-se que a simples combinação de um modelo linear com a função *loop* (histerese) resolve o problema e basta como modelo corretivo:

$$MET^* = a_1 \times MET + a_2 \times d(MET)/dt + a_3, \quad (3)$$

no qual MET* é a temperatura corrigida para a estação, MET é a temperatura do ar registrada na estação, e t, a hora correspondente. Assim, d(MET)/dt expressa a variação horária da temperatura registrada na estação. Os coeficientes a₁ e a₃ estão relacionados à linha de tendência linear do modelo linear, e o coeficiente a₂ gera a função de *loop*. Obtiveram-se empiricamente a₁=1,014, a₂=-0,95 e a₃=0,0465. O coeficiente de correlação (R²) resultante foi de 0,9984, a diferença máxima encontrada de 0,67 graus e o desvio médio de 0,25. A Figura 13 mostra a curva de dispersão obtida após a correção.

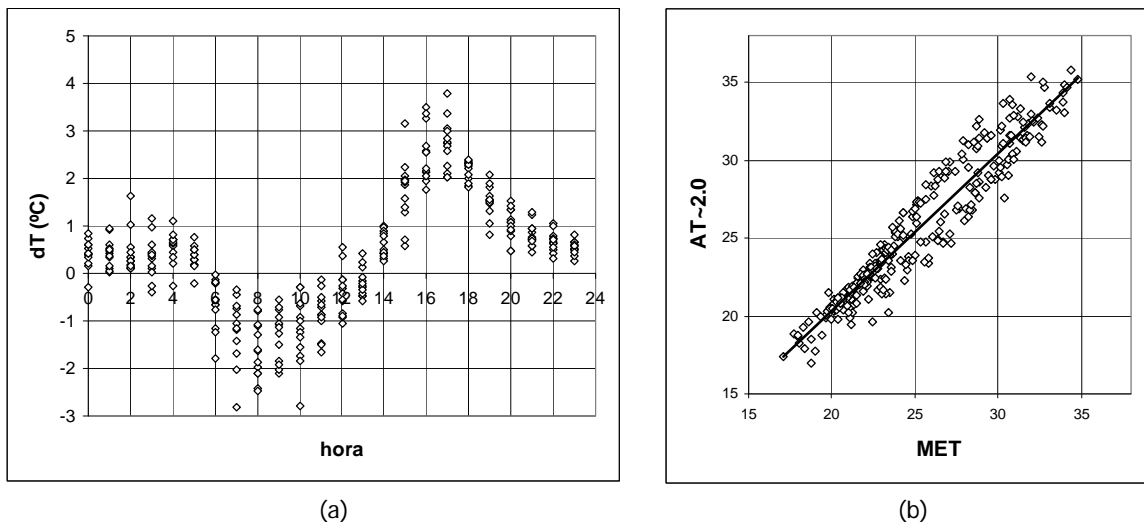


Figura 12 - Diferença horária de temperaturas (a) e temperaturas em °C para ambos os casos (b)

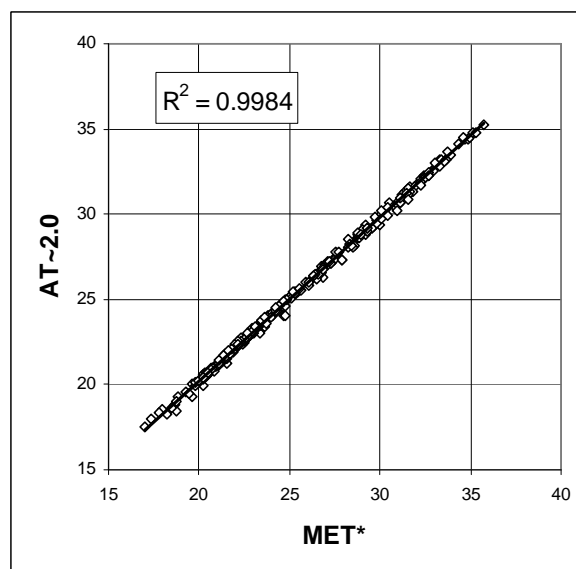


Figura 13 - Diagrama de dispersão - função *loop* (temperaturas em °C)

Emprego da ferramenta CAT e comparações com medições *in loco*

Dados medidos após proteção dos sensores de temperatura e posicionamento do mastro no centro do cânion foram comparados com resultados da ferramenta CAT, após a correção dos dados de temperatura coletados na estação meteorológica. Os coeficientes do modelo de histerese, que descrevem o potencial de armazenamento de calor no solo e nas paredes dos prédios definidores do cânion e ao redor da estação meteorológica, foram obtidos de duas formas. Para a estação, adotaram-se valores empíricos, conforme apresentados em Grimmond e Oke (1999), para solo desértico nu. Para o cânion, esses coeficientes foram alterados por tentativa, de forma a ajustar os resultados em

termos de temperatura no cânion aos dados medidos, calibrando-se assim o modelo de simulação.

Para a comparação entre ambas as séries de dados, avaliaram-se: o erro médio; o desvio padrão; o RMSE (*Root Mean Square Error*), uma medida da variação dos valores preditos ao redor dos valores medidos; o *Willmott index of agreement*, que define a similaridade de ambas as séries; o *Williamson confirmation factor*, que oferece uma indicação da fidedignidade do modelo, quanto à estimativa trivial, no caso, os dados coletados na estação meteorológica; e o coeficiente de correlação. A Figura 14 mostra a comparação gráfica entre dados medidos e previsões de CAT para julho (primeiros 10 dias). A Tabela 5 apresenta os parâmetros extraídos dessa comparação (mês completo).

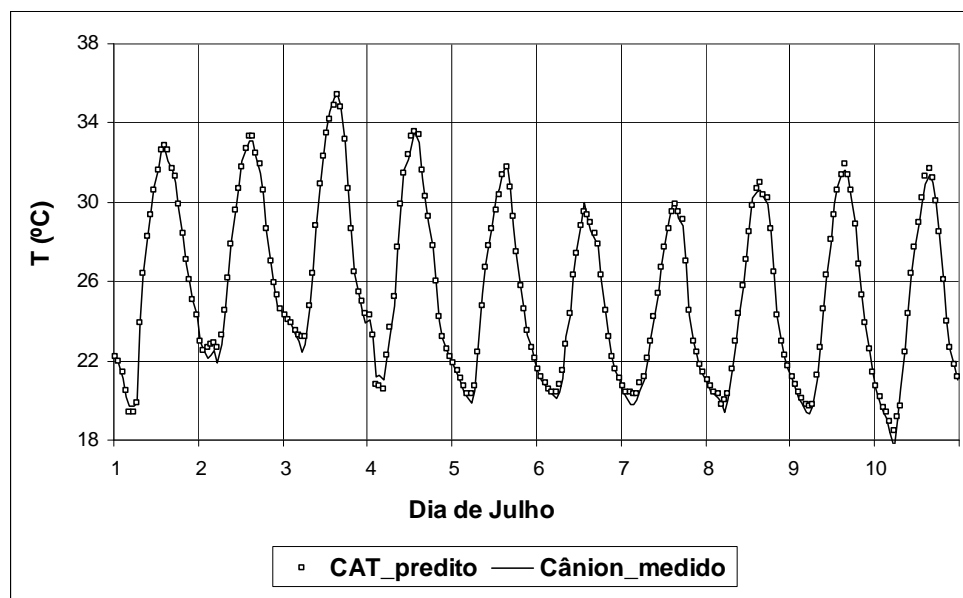


Figura 14 - Dados medidos e previsões de CAT para julho (primeiros 10 dias)

Erro médio (°C)	0,22
Desvio padrão (°C)	0,17
RMSE	0,02
<i>Willmott index of agreement</i>	0,999
<i>Williamson confirmation factor</i>	0,284
Coeficiente de correlação	0,95

Tabela 5 - Parâmetros de comparação (mês de julho completo)

Embora uma boa correspondência entre dados medidos e preditos seja verificada no gráfico, uma comparação simples entre temperaturas medidas no cânion e aquelas registradas na estação meteorológica mostra também boa correlação. Isso é refletido pelo *Williamson confirmation factor*, que teve valor relativamente baixo para o período de análise (a magnitude do índice é de -1 a $+1$), sugerindo que o modelo não apresenta vantagens substanciais além da estimativa trivial. Entretanto, considerando a magnitude da ilha de calor observada, de fraca intensidade (valor médio de $0,2$ graus, com máximo de 2 °C e um mínimo de $-0,6$ °C), o modelo proporciona resultados razoáveis.

Simulações termoenergéticas a partir da temperatura predita no cânion

A partir dos resultados do modelo CAT em termos de temperatura do ar no cânion, realizaram-se simulações de desempenho termoenergético da edificação descrita na Metodologia com o *software IDA Indoor Climate and Energy (ICE)*, tomando-se as temperaturas preditas por CAT e as configurações geométricas de diferentes cânions urbanos. De modo a se verificar o efeito da orientação espacial do eixo do cânion e da relação H/W, diversas situações foram testadas: relações H/W de 0,33, 0,66, 1 e 2 para eixos EW e NS; mesmas relações H/W para um eixo paralelo (PARAL) e para um eixo perpendicular (PERP) à direção do vento dominante; *base-case (as-is)*: H/W 0,6, direção do eixo EW.

As simulações se restringiram ao período de verão por duas razões: a) a validação do software CAT foi feita apenas para essa época do ano; e b) os resultados complementam outros estudos no mesmo local, considerando a situação de verão.

Para a definição de um cânion em IDA, blocos de apartamentos de proporções idênticas ao da edificação simulada foram inseridos como elementos de sombreamento, variando-se apenas as distâncias segundo as proporções H/W definidas anteriormente: 0,33, 0,66, 1 e 2. Dessa forma, a distância entre prédios assumiu os seguintes valores, respectivamente: 18 m, 9 m, 6 m e 3 m.

Tanto para a predição das temperaturas no cânion como para as simulações no IDA, foi utilizado o ano climático TMY local.

Para dois meses de verão (julho e agosto), um condicionador de ar com uma potência de 2.000 W foi adotado para fins de simulação, com as temperaturas de *setpoint* definidas pela Tabela 1 (abordagem de conforto adaptativo). Os resultados são mostrados aqui em termos de consumo de energia para climatização para cada caso estudado (Figura 15). Contudo, como as orientações da edificação se referem não apenas às do eixo do cânion, mas também às da fachada, há as variações: norte (N) e sul (S) para um eixo de rua EW; E e W para NS; e, considerando a direção predominante do vento local de noroeste, NE e SW para PARAL, e NW e SE para PERP. Os resultados são apresentados para a situação da edificação sombreada durante o dia (com venezianas compostas de material isolante) e ventilada durante a noite.

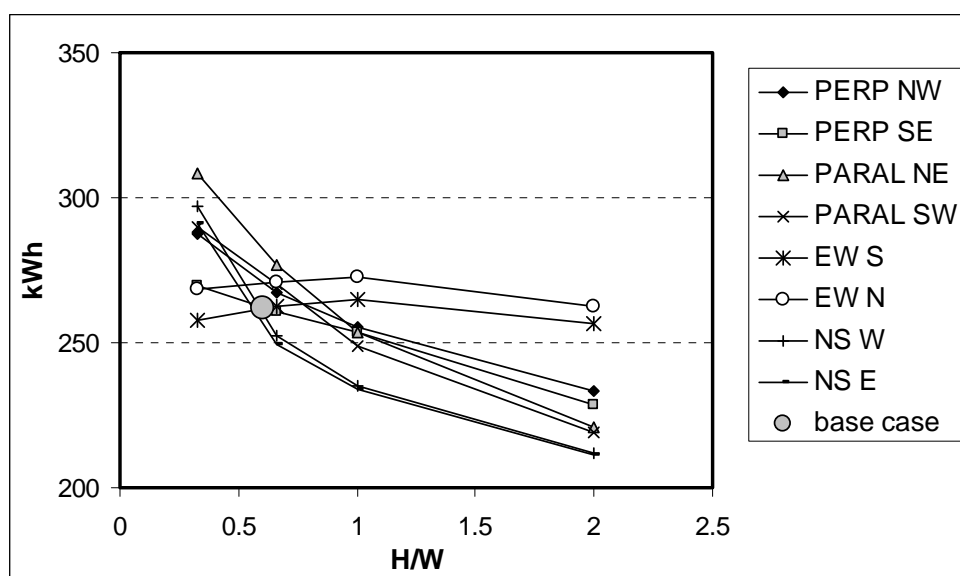
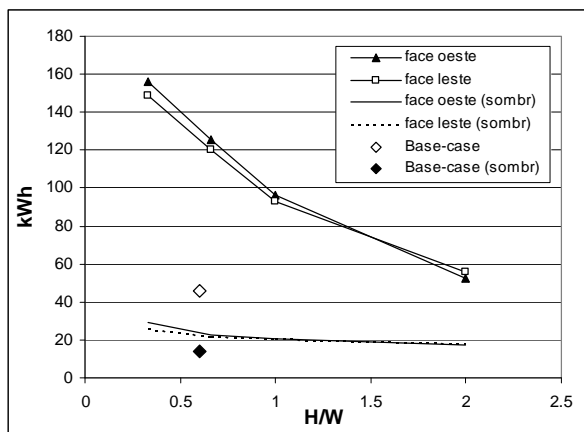


Figure 15 - Consumo de eletricidade para resfriamento ativo

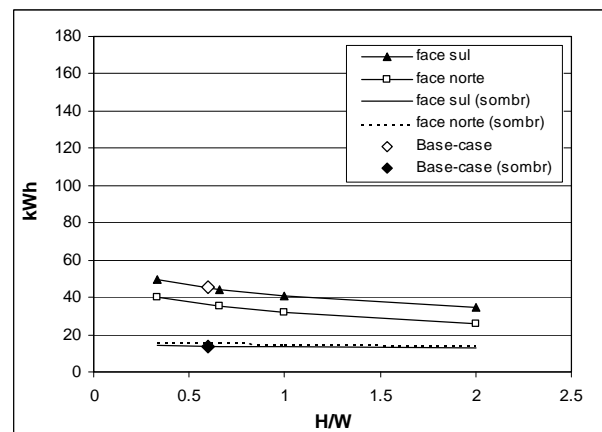
Os resultados indicam uma tendência de diminuição do consumo com o aumento do adensamento urbano, para a grande maioria das situações. Tal fato está de acordo com estudos realizados para esse tipo de clima, reforçando a importância de um desenho urbano compacto em regiões desérticas, uma vez que a compactidade significa menor exposição à radiação (direta e difusa) intensa no verão. A partir das diferenças na taxa de redução de consumo energético, para cada caso particular, seria possível traçar algumas diretrizes para o planejamento urbano. Observa-se, entretanto, que as situações estudadas foram para a edificação sombreada. Considerando que escritórios e prédios de pavimentos geralmente não permanecem “fechados” durante o dia, até pela necessidade de se utilizar de alguma forma a luz natural, mesmo que para proporcionar visão exterior, realizaram-se novas simulações a fim de se avaliar o impacto do adensamento urbano nas situações com e sem ganho solar.

Simulações de diversas configurações de cânion urbano: com e sem ganho solar

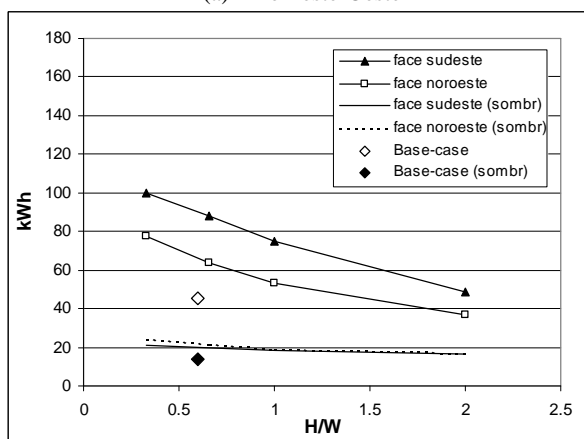
Para essa etapa de simulação, os dados de entrada utilizados em IDA basearam-se na geometria e orientação solar dos cânions, não sendo inseridas as predições de CAT, rodando-se apenas o mês de agosto. As condições de operação das aberturas foram: a) edificação “aberta” durante o dia (sem ventilação, mas com venezianas abertas) e com ventilação noturna; e b) edificação “fechada” ou sombreada (sem ventilação, com venezianas fechadas) e com ventilação noturna. Os resultados (Figura 16) são mostrados em termos de demanda de energia para resfriamento para cada configuração, modo fechado e modo aberto. Novamente, *base-case* se refere à orientação e espaçamento original do cânion onde está localizada a edificação real.



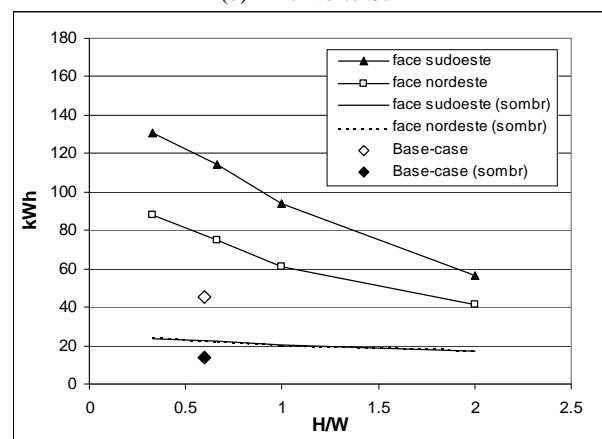
(a) Eixo Leste-Oeste



(b) Eixo Norte-Sul



(c) Perpendicular à direção do vento dominante



(d) Paralelo à direção do vento dominante

Figura 16 - Consumo de eletricidade para resfriamento ativo para diferentes orientações de cânion e espaçamentos

Novamente, nota-se uma redução consistente do consumo com o aumento do adensamento, em concordância com outros estudos realizados sob condições quente e secas (JOHANSSON, 2006; PEARLMUTTER *et al.*, 2006).

O eixo com menor variação no consumo é o EW, como verificado por Pearlmutter *et al.* (2006) na análise do estresse térmico de um pedestre para as mesmas configurações de cânion. Além disso, em uma rua EW, direcionar a fachada principal para norte significa menor consumo, como esperado. Como a relação entre adensamento urbano e consumo é menos evidente nesse caso, eixos EW poderiam ter edificações mais espaçadas ou de baixos pavimentos, possibilitando ainda maior aproveitamento solar no inverno.

A maior variação no consumo para resfriamento para um aumento do adensamento é observado para o eixo NS. Novamente, esse fato se conforma com resultados de Pearlmutter *et al.* (2006) para a região alta do Negev. Em uma avaliação de estresse térmico de um pedestre utilizando o índice de Givoni ITS (*Index of Thermal Stress*), uma rua situada em eixo NS apresentou uma redução drástica do ITS como consequência da diminuição do espaçamento entre prédios. Em tais ruas, uma vez que a exposição solar será idêntica para ambas as orientações de fachada, o consumo de energia será praticamente o mesmo, independentemente da fachada exposta (aqui com uma pequena diferença devido à exposição ao vento dominante, de noroeste). Dessa forma, do ponto de vista do potencial de resfriamento no verão, ruas NS

deverão ter menor espaçamento entre prédios, ou seja, permitirão maior adensamento.

Para os outros dois eixos, uma comparação entre um eixo perpendicular e outro paralelo à direção do vento dominante sugere que, nesse caso, a orientação solar é mais significativa em termos de desempenho energético da edificação que a exposição ao vento. Diferenças no eixo paralelo (PARAL), variando a posição da fachada, podem ser mais significativas que aquelas verificadas entre fachada exposta e protegida (PERP). Nesse caso, observa-se que as simulações foram realizadas para edificação sem ventilação no período diurno – apenas no período noturno –, sendo o efeito disso verificado internamente, predominantemente nas condições iniciais de temperatura (quando a temperatura de *setpoint* é alcançada).

Quanto à operação da edificação (sombreada e não-sombreada/aberta), pode ser verificado que um uso apropriado das venezianas isolantes, fechando-as durante o dia, reduz a demanda por resfriamento a um nível semelhante em torno de 20 kWh para todas os casos estudados. A redução média no consumo de uma condição “aberta” à sombreada foi em torno de 70% para os quatro conjuntos de orientações do eixo de rua.

Uma avaliação do aumento ou da redução relativos no consumo por condicionamento térmico à condição *base-case* (Figuras 17 e 18) mostra resultados mais contundentes do que os valores absolutos de consumo obtidos.

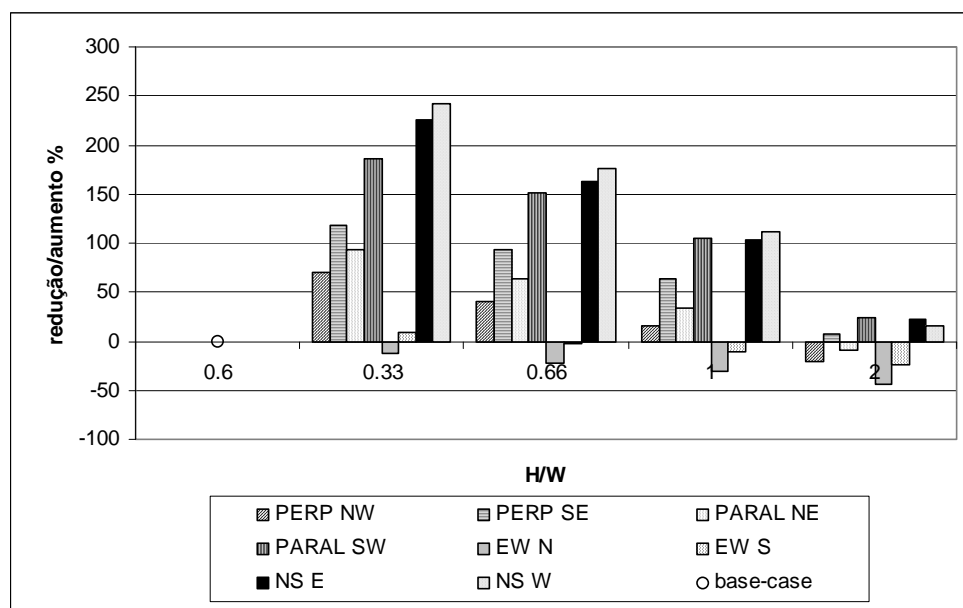


Figura 17 - Redução ou aumento (no consumo de eletricidade para resfriamento ativo para diferentes orientações de cânion e espaçamentos, modo aberto/não-sombreado - *base-case*: EW, H/W=0,6

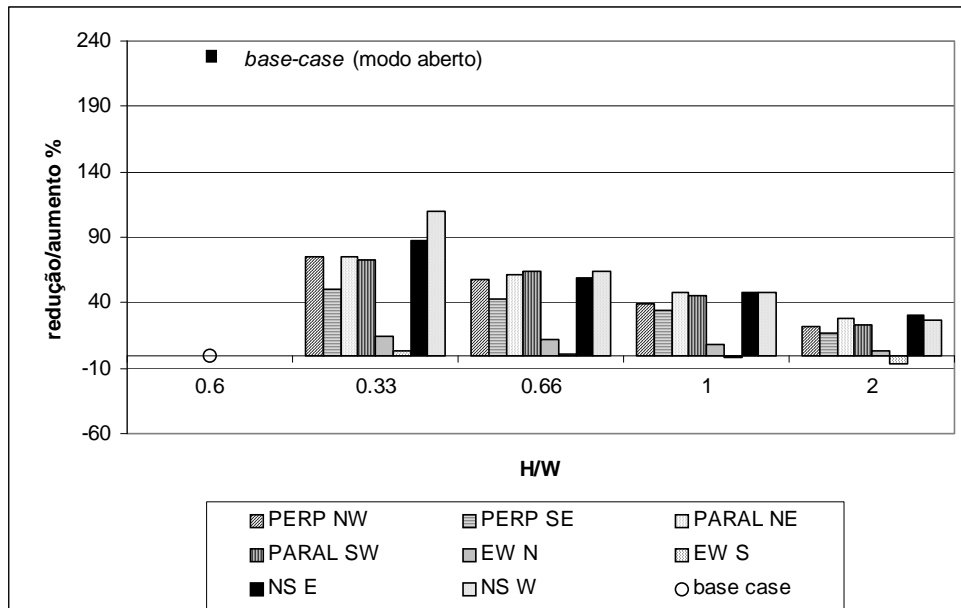


Figura 18 - Redução ou aumento no consumo de eletricidade para resfriamento ativo para diferentes orientações de cânion e espaçamentos, modo sombreado - *base-case*: EW, H/W=0,6

Na Figura 17, os cânions mais inapropriados são identificados para condição de grande espaçamento entre prédios (H/W=0,33). Especialmente para o eixo NS, um desenho urbano mais aberto significaria um aumento de quase 250% na carga de resfriamento em relação à condição *base-case*. Uma otimização da condição atual (*base-case*) poderia ocorrer com um aumento do adensamento urbano: uma redução em cinco vezes do espaçamento entre prédios traria uma redução de consumo de 40%. Entretanto, há que se considerar a situação de inverno, não contemplada neste estudo, na qual os ganhos solares assumem grande importância.

Para a situação sombreada, na qual as venezianas isolantes permanecem fechadas durante o dia e ganhos solares (diretos e indiretos) são restringidos, o mesmo padrão se repete: o eixo EW mostra-se menos sensível a variações na taxa de adensamento que o eixo NS e, em geral, quanto maior a razão H/W, menor o consumo energético para resfriamento. Nota-se na Figura 18 um aumento significativo no consumo em relação à condição *base-case* quando a edificação permanece sem sombreamento (e isolamento térmico) durante o dia. Tal fato está relacionado ao gerenciamento da edificação e sugere que, neste tipo de construção com grande massa térmica, um manuseio apropriado das aberturas durante o dia é mais relevante que a própria orientação da edificação e a natureza do agrupamento urbano. Entretanto, ressalta-se que, como prédios de escritórios e de pavimentos apresentam em geral

elevado percentual de área envidraçada e reduzida massa térmica, tanto a orientação do eixo do cânion quanto o espaçamento entre prédios poderão assumir grande relevância.

Considerações finais

A partir dos resultados encontrados com as simulações, algumas diretrizes gerais podem ser sugeridas para o planejamento urbano sob condições de clima desértico:

para regiões destinadas a prédios baixos, mais espaçados, recomenda-se a adoção de ruas cujos eixos seguem o alinhamento leste-oeste (EW), pois nestas o impacto do adensamento é baixo no período de verão e, no inverno, não haverá impedimento a ganhos solares diretos;

para áreas destinadas a prédios de pavimentos, mais adensadas, ruas com orientação de eixo norte-sul (NS) são mais recomendáveis; e

em geral, uma orientação perpendicular ao vento dominante deveria gerar consumo mais reduzido em climatização que outra paralela a este. Embora nesses dois eixos a relação entre consumo e adensamento urbano não é tão pronunciada como em ruas NS, deve-se almejar menor espaçamento entre prédios.

Como se trata de ambiente climatizado apenas para situações de desconforto, a ventilação trará algum impacto ao fim do dia e antes de a temperatura-limite de conforto ser superada, com consequências para as condições térmicas internas

antes e após o período de condicionamento térmico.

Quanto ao gerenciamento da edificação, pode-se verificar que uma operação adequada das aberturas pode trazer reduções significativas no consumo energético em climatização artificial. Considerando, porém, que escritórios e prédios de pavimentos geralmente não permanecem “fechados” durante o dia, até pela necessidade de se utilizar de alguma forma a luz natural, e que, além desse fato, estes em geral apresentam elevado percentual de área envidraçada e reduzida massa térmica, tanto a orientação do eixo do cânion quanto o espaçamento entre prédios poderão assumir grande relevância.

Uma otimização da condição atual (*base-case*) da edificação e do cânion onde esta se encontra poderia ocorrer com um aumento do adensamento; entretanto, há que se considerar a situação de inverno, não contemplada neste estudo, na qual os ganhos solares assumem grande importância. O nível ótimo de sombreamento/potencial de aproveitamento de ganhos solares deverá ser determinado em função da necessidade de aquecimento solar passivo no período frio e será dado, neste caso, pela interseção entre o aproveitamento solar máximo possível e o mínimo consumo previsto para climatizar a edificação no período quente.

Referências

- ASHRAE **Handbook of Fundamentals**. 2005 I-P Edition. CD-ROM.
- BITAN, A.; RUBIN, S. **Climatic Atlas of Israel for Physical Planning and Design**. Israel Meteorological Service and Ministry of Energy and Infrastructure, 1991.
- BRAGER, G. S.; DE DEAR, R. J. Climate, comfort & natural ventilation: a new adaptive comfort standard for ASHRAE Standard 55. In: MOVING THERMAL COMFORT STANDARDS INTO THE 21ST CENTURY. **Proceedings...** Windsor, 2001.
- CAMUFFO, D.; BERNARDI, A. An observational study of heat fluxes and their relationships with net radiation. **Boundary Layer Meteorology**, n. 23, p. 359-368, 1982.
- DE DEAR, R.; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 549-563, 2002.
- DE WAAL, H. B. New Recommendations for Building in Tropical Climates. **Building and Environment**, v. 28, n. 3, p. 271-285, 1993.
- ELIASSON, I. The use of climate knowledge in urban planning. **Landscape and Urban Planning**, n. 48, p. 31-44, 2000.
- EQUA SIMULATION. **IDA Indoor Climate and Energy 3.0 Manual**. EQUA Simulation AB, 2002.
- ERELL, E. **CAT (Canyon Air Temperature) Version 1.2 - A User Manual**. Ben-Gurion University of the Negev / University of Adelaide, 2006.
- ERELL, E.; LEAL, V.; MALDONADO, E. Measurement of air temperature in the presence of a large radiant flux: an assessment of passively ventilated thermometer screens. **Boundary-Layer Meteorology**, n. 114, p. 205-231, 2005.
- ERELL, E.; WILLIAMSON, T. Simulating air temperature in an urban street canyon in all weather conditions using measured data at a reference meteorological station. **International Journal of Climatology**, n. 26, p. 1671-1694, 2006.
- ERELL, E.; WILLIAMSON, T. The CAT model: Predicting air temperature in city streets on the basis of measured reference data. In: CONTEXTS OF ARCHITECTURE – THE ANNUAL CONFERENCE OF THE ARCHITECTURAL SCIENCE ASSOCIATION ANZASCA AND THE INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE ASSOCIATION, 38., Australasia, Launceston, Australia. **Proceedings...** Nov.10-12, 2004.
- GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. New York: ITP, 1998.
- GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. Barking, Essex, England: Applied Science Publishers, 1976.
- GIVONI, B. Urban design for hot humid regions. **Renewable Energy**, v. 5, n. 2, p. 1047-1053, 1994.
- GRIMMOND, C. S. B.; CLEUGH, H. A.; OKE, T. R. An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. **Atmospheric Environment**, n. 25B, p. 311-326, 1991.
- JOHANSSON, E. **Urban design and outdoor thermal comfort in warm climates**. Tese de Doutorado. Lund University: Lund, Suécia, 2006.

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: ANTAC, 1997. p. 49-58.

KRÜGER, E. L. Monitoramento térmico de uma edificação com características da arquitetura bioclimática sob condições de clima desértico In: ENCONTRO NACIONAL, 9., e ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 2007, Ouro Preto. *Anais...* Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. v. 1, p. 1-10.

LIPPSMEIER, G. **Tropenbau**. München: Callwey, 1980.

NICOL, J.F.; HUMPHREYS, M.A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 563-572, 2002.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. London, Methuen & Co., 1978.

OKE, T. R. Observing urban weather and climate using 'standard' stations. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BIOMETEOROLOGY & INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATOLOGY (*ICB-ICUC '99*), 15., Sydney, Australia. **Proceedings...**, Macquarie University, 1999.

OLGYAY, V. **Design with climate**. New Jersey: Princeton University Press, 1963.

PEARLMUTTER, D.; BERLINER, P.; SHAVIV, E. Evaluation of urban surface energy fluxes using an open-air scale model. **Journal of Applied Meteorology**, v. 44, n. 4, p. 532-545, 2005.

PEARLMUTTER, D.; BERLINER, P.; SHAVIV, E. Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy. **Building and Environment**, v. 41, n. 6, p. 783-795, 2006.

RATTI, C.; BAKER, N. *et al.* Energy consumption and urban texture. **Energy and Buildings**, n. 37, p. 762-776, 2005.

Agradecimentos

À toda a equipe de pesquisadores e técnicos do *Department of Man in the Desert/BGU* e à CAPES, pela bolsa pós-doutoral.