

MONITORAMENTO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO COM CARACTERÍSTICAS DA ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA SOB CONDIÇÕES DE CLIMA DESÉRTICO

E. L. Krüger

Prof. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Prof. Departamento de Construção Civil,
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) E-mail: ekruger@utfpr.edu.br

RESUMO

O objetivo deste artigo é apresentar resultados de um monitoramento térmico realizado ininterruptamente em uma edificação com características da arquitetura bioclimática durante um longo período, abrangendo assim diversas estações do ano. O monitoramento deu-se através de uma estação registradora acoplada a diversos sensores temperatura do ar e de superfícies em um apartamento dormitório de cerca de 55m² de área interna, localizado em Sede Boqer (latitude 30,8°N e altitude de 480m acima do nível do mar), Deserto do Negev, em Israel. O clima local se caracteriza por extrema aridez, com grandes oscilações diárias e sazonais da temperatura ambiente, céus predominantemente claros e radiação solar intensa. No verão, a radiação global diária situa-se em torno de 7,7kWh/m². Pôde-se observar diversas qualidades da edificação quanto ao uso de aberturas para aproveitamento adequado de ganhos solares no inverno, operação das aberturas e de elementos isolantes (venezianas externas do tipo sanduíche, com isolante térmico entre chapas de alumínio), uso adequado de ventilação seletiva, dentre outros aspectos. 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. Desta forma, os resultados puderam comprovar alguns preceitos correntes da área denominada Arquitetura Bioclimática.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to present results of a long-term temperature monitoring in a passive house (between January and August 2006), encompassing different seasons of the year. Thermal monitoring was carried out by means of copper-constantan thermocouples attached to a Campbell 21X data logger. The monitored building has an internal area of approximately 55m² and is located at Sede Boqer (latitude 30,8°N and elevation 480 m above sea level), Campus of the Ben-Gurion University of the Negev, Israel. The climate of the region is characterized by strong daily and seasonal thermal fluctuations, dry air and clear skies with intense solar radiation. Different performances of the building could be verified throughout the monitoring period, regarding: the use of openings, the operation of glazing and insulating elements, the effective use of cross-ventilation, among other aspects. Several modes of operation took place, most of the time a small family of two adults and one infant occupied the building. Results showed some of the guidelines suggested in Bioclimatic Architecture.

1. INTRODUÇÃO

A denominada Arquitetura Bioclimática recomenda soluções de projeto adequadas ao clima da região onde se constrói. Neste sentido, em climas quente-úmidos dever-se-ia adotar 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, por exemplo, que mostram a utilização de grande massa térmica na envoltória da edificação, de modo a manter um padrão estável da temperatura interna, enquanto que, 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).

O objetivo deste artigo é apresentar resultados de um monitoramento térmico realizado ininterruptamente em uma edificação com características da arquitetura bioclimática em clima desértico durante um longo período (de janeiro a agosto de 2006), abrangendo assim diversas estações do ano. O presente trabalho se insere numa pesquisa maior, desenvolvida como tema de projeto de pós-doutorado, realizado junto ao *Department of Man in the Desert, Ben-Gurion University of the Negev*, Israel. Esse projeto envolveu diversas etapas e teve como finalidade analisar os efeitos de alterações da configuração urbana no consumo de energia para condicionamento térmico de edificações.

2. METODOLOGIA

2.1 Clima local

Sede Boqer 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 7,7kWh/m² em junho e julho. O vento dominante vem consistentemente do noroeste e torna-se mais forte ao final da tarde e nas primeiras horas da noite (BITAN & RUBIN, 1991).

2.2 Condições de Conforto Térmico para Sede Boqer

Neste estudo, adotou-se os critérios do Conforto Adaptativo - ACS (*Adaptive Comfort Standard*), método inicialmente proposto por Nicol & 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 & 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:

$$T_{\text{conf}} = 0,31 * T_{\text{média ext}} + 17,8 \quad [\text{Eq. 01}]$$

A zona de conforto pode ter uma variação de até 5°C para 90% de aceitabilidade e até 7°C para 80%, com valor central igual à temperatura de conforto calculada. Para Sede Boqer, nos meses abrangidos pelo monitoramento, as temperaturas limite (inferior e superior) são apresentadas na Tabela 1 para uma aceitabilidade de 90%.

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

MÊS	T _{média ext}	T _{conf}	Limite inferior	Limite superior
jan	10,1	20,9	18,4	23,4
fev	12,0	21,5	19,0	24,0
mar	14,5	22,3	19,8	24,8
abr	17,5	23,2	20,7	25,7
mai	20,4	24,1	21,6	26,6
jun	23,9	25,2	22,7	27,7
jul	24,58	25,4	22,9	27,9
ago	26,0	25,9	23,4	28,4

2.3 Descrição da edificação monitorada

A edificação monitorada faz parte de um complexo de apartamentos para estudantes, situado no Campus de Sede Boqer da *Ben-Gurion University* (Figura 1). 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 venezianas com isolamento térmico, o uso de massa térmica, com camada isolante, dentre outras. Os planejadores do complexo tomaram o cuidado em proporcionar ganhos solares aos apartamentos de forma a se ter um funcionamento passivo dos ambientes no inverno. Assim, o espaçamento entre prédios com fachada principal voltada ao sul (hemisfério norte) é significativo: a altura dos prédios é de aproximadamente 6m e o espaçamento entre os mesmos de 10m, o que nos dá uma relação H/W=0,6.

As medições foram realizadas em um apartamento destinado a famílias (Figuras 2 e 3), construído com concreto armado coberto por camada de material isolante (*Rondopan*, com uma condutividade térmica de 0,026 W.m⁻¹.K⁻¹) e revestido externamente nas fachadas com pedra (5cm). O apartamento situa-se numa fileira com apartamentos de família, possuindo apenas duas fachadas externas. Possui dois pisos e uma área aproximada de 55m². A relação entre área de janela e área de fachada (WWR) é menor na fachada norte, com WWR=0,05, de forma a evitar perdas de calor no inverno, e significativamente maior na fachada sul, com WWR=0,14. As características dos elementos construtivos do apartamento de família, valores médios obtidos da literatura na área, estão apresentadas na Tabela 2.



Figura 1: Complexo de apartamentos de estudantes, com a localização dos apartamentos de família em negrito



Figura 2: Fachada sul do bloco de apartamentos analisado (foto tirada em dezembro de 2005)

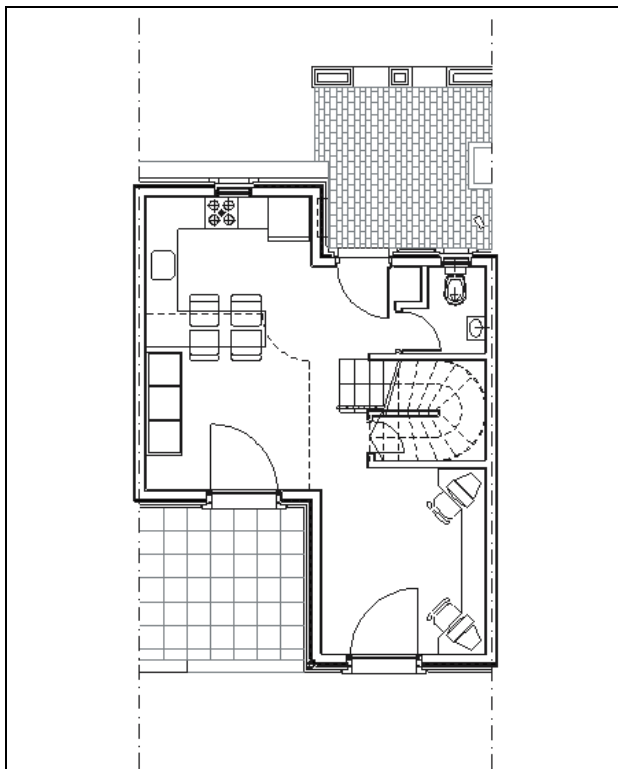


Figura 3_a: Piso inferior

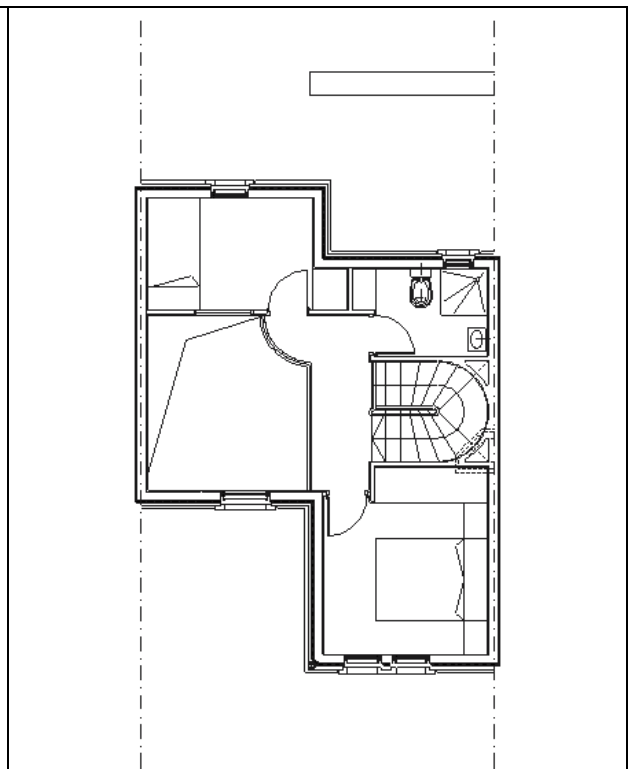


Figura 3_b: Piso superior (com mezanino)

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

Elemento	Condutividade ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Densidade ($kg.m^{-3}$)	Calor específico ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
Paredes Externas			
2cm argamassa	0,48	1400	880
20cm concreto armado	2,1	2400	970
4cm Rondopan	0,026	35	142
5cm pedra	2,3	2515	790
Paredes Internas			
2cm argamassa	0,48	1400	880
16cm concreto armado	2,1	2400	970
2cm argamassa	0,48	1400	880
Piso			
2cm ceramic tile	0,84	1922	0,92
20cm poured concrete	2,1	2400	970
Cobertura			
2cm argamassa	0,48	1400	880
20cm concreto armado	2,1	2400	970
5cm Rondopan	0,026	35	142
2cm argamassa	0,48	1400	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

2.4 Equipamento e calibração

Termopares do tipo cobre-constantan para registro da temperatura ambiente foram preparados, conectados a uma estação Campbell 21X e posicionados em diversos pontos no apartamento: na cozinha, a 2,10m; na sala, a 2,10m; na área com pé-direito elevado – mezanino, a 2m e a 5m do piso (Figura 4). A temperatura superficial foi tomada em alguns pontos do ambiente. Neste caso, os sensores foram afixados 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). Três outros termopares foram afixados a um mastro de monitoramento de aproximadamente 5,5m de altura, de modo a se coletar dados da temperatura externa a três alturas distintas. O mastro foi posicionado inicialmente ao lado da parede norte, a uma distância de 50cm, e removido mais tarde para entre fileiras de prédios, protegendo-se os sensores contra radiação direta. (No presente estudo, porém, consideraremos apenas dados de temperatura externa coletados na estação meteorológica local situada a cerca de 500m do apartamento, uma vez que as medições externas se prestaram a uma outra etapa do projeto de pós-doutorado).

Após calibração dos sensores, cujos resultados mostraram diferença média entre sensores de aproximadamente 0,2K, com desvio padrão de 0,06K, 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.



Figura 4_a: Sensor para medição da temperatura do ar



Figura 4_b: Sensor para medição da temperatura superficial



Figura 4_c: Sensores usados para medição do efeito de estratificação do ar



Figura 4_d: Data logger Campbell 21X

3. MONITORAMENTO

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 18/01/2006 a 30/08/2006, englobando períodos de inverno, primavera e verão.

3.1 Operação do apartamento

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

- 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;

- Primavera: venezianas foram mantidas semi-abertas durante o dia e as janelas máximo-ar permaneceram levemente inclinadas durante todo o tempo, de modo a garantir uma ventilação permanente do ambiente;
- 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 ventilação cruzada no ambiente.

3.2 Efeito do Sombreamento e das Venezianas com Isolante Térmico (*Insulating Shutters*)

Duas semanas sem ocupação (Figura 5) são ilustrativas para mostrar o efeito da utilização eficiente das venezianas externas para maximização dos ganhos solares no inverno. Durante 8 dias, tais venezianas foram operadas consistentemente: abertas durante o dia e fechadas à noite. Após isso, durante 6 dias, as mesmas foram mantidas permanentemente fechadas.

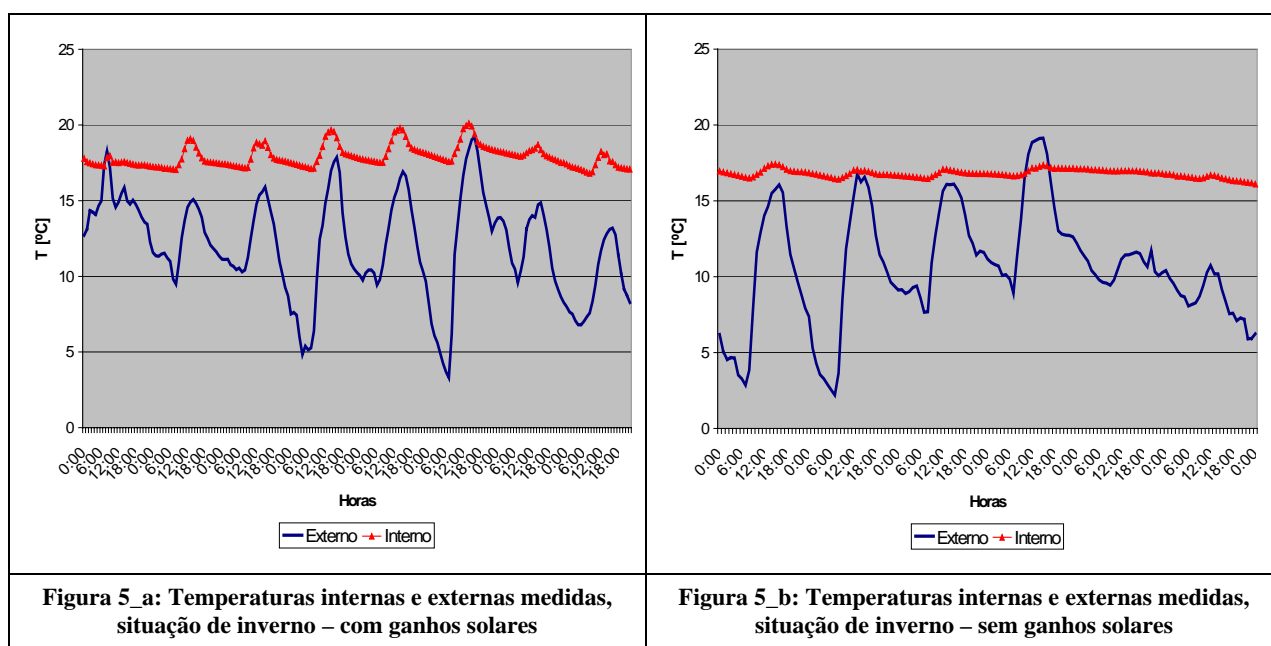


Figura 5_a: Temperaturas internas e externas medidas, situação de inverno – com ganhos solares

Figura 5_b: Temperaturas internas e externas medidas, situação de inverno – sem ganhos solares

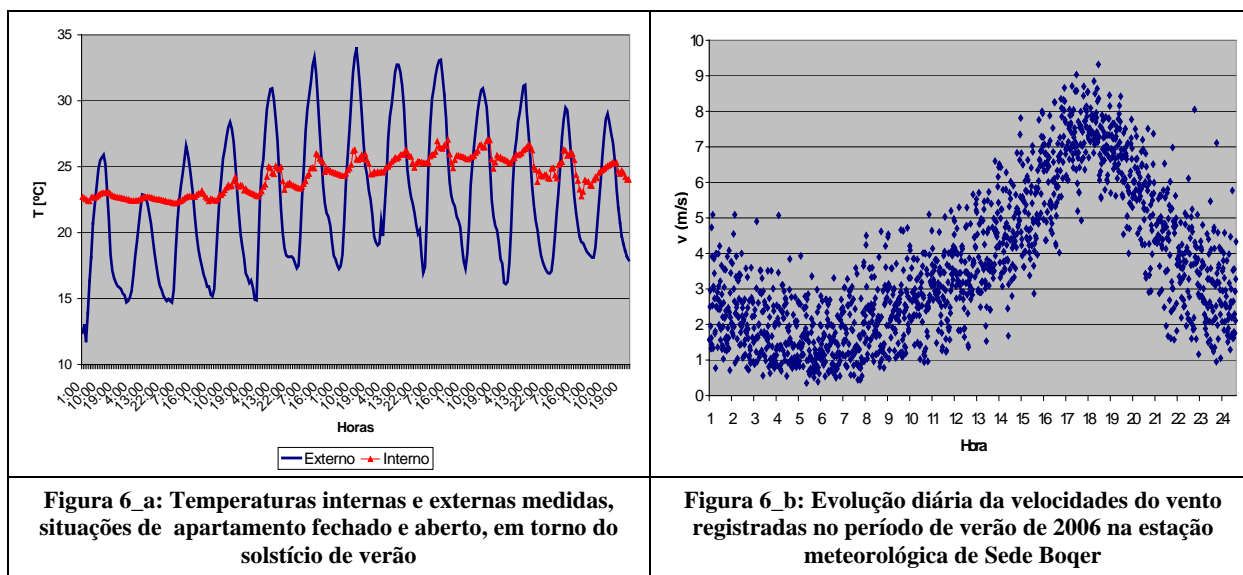
Apesar da grande oscilação da temperatura externa no período, as temperaturas internas seguem um padrão relativamente invariável, devido à massa térmica empregada no envelope. Uma operação efetiva das venezianas externas permite ganhos solares, que tornam confortáveis as condições internas durante boa parte do dia. Fechando as venezianas isolantes à noite, a radiação de onda longa emitida pelas superfícies internas pode ser retida internamente durante o período noturno. Neste período com ganhos solares, a temperatura externa teve média de 12°C com uma amplitude diária de 9 graus, enquanto que a média interna esteve em torno de 18°C com flutuação de 2 graus.

Devido ao fato de haver considerável massa térmica no envelope, uma avaliação mais cuidadosa da diferença horária entre temperaturas (interna e externa) mostrou que o efeito do calor armazenado pode ser mais significativo e durar mais que a quantidade de calor solar recebida em algumas horas do dia. Essa diferença de temperaturas foi mais alta no primeiro dia com o apartamento todo fechado do que em qualquer um dos dias com a proteção solar aberta durante as horas de insolação. Para o período com o apartamento fechado, a temperatura externa teve média de 11°C com uma amplitude diária de 9 graus, enquanto que a média interna esteve em torno de 17°C com flutuação de menos de 1 grau.

O fator “aclimatação” da edificação pode ter sido responsável pela temperatura relativamente alta de 17°C para o período fechado, entretanto observe-se que a temperatura ambiente não se reduz substancialmente, mesmo após alguns dias com o apartamento fechado.

3.3 Efeito da Ventilação

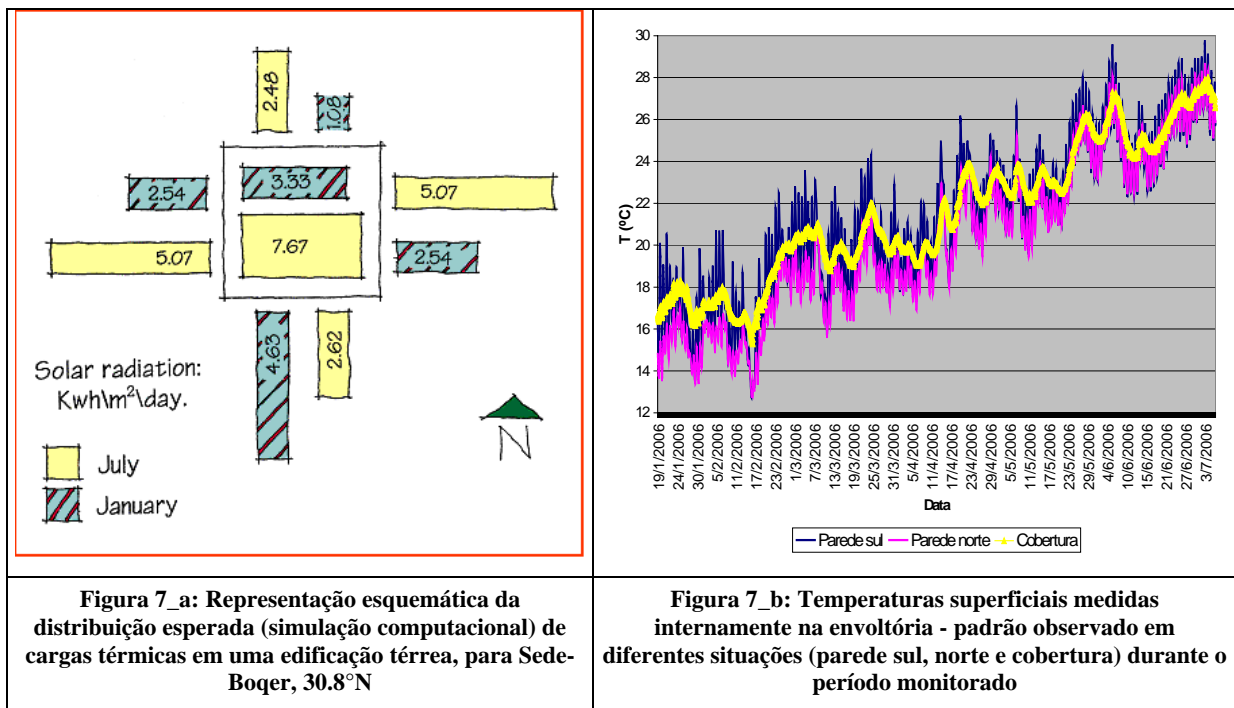
O uso de ventilação noturna ou seletiva é recomendado como medida passiva para condições de verão em climas de grande amplitude térmica diária. O efeito esperado dessa estratégia é o de uma redução das temperaturas do ar interno, quando há uma queda significativa da temperatura externa particularmente após o período de maior insolação. O gráfico mostra dois diferentes padrões de ocupação: 3 dias com o apartamento fechado e os dias seguintes com ventilação noturna. Quando se dá o último caso, nota-se quedas repentinas da temperatura interna do ar em determinado instante. Entretanto, contrariamente ao esperado, não se observa uma redução contínua da temperatura interna paralela ao que ocorre externamente. Isso ocorre por duas razões: 1) há um decréscimo substancial da velocidade do vento durante o período noturno; 2) é necessário um longo tempo para resfriar a estrutura da edificação, devido a sua massa térmica.



A Figura 6_b mostra o padrão diário da velocidade do vento para Sede Boqer, cuja direção predominante é de noroeste. Pode ser verificado que a velocidade é mínima durante o período noturno. A queda brusca na velocidade é observada no apartamento pela redução brusca da temperatura ambiente. Outro aspecto que impede a ventilação cruzada de ser eficaz é o fato de haver aberturas de ventilação na fachada norte muito pequenas, de modo a minimizar perdas de calor no período frio. Nesse caso, um compromisso deve ser feito quanto ao desempenho esperado da edificação num horizonte anual.

3.4 Distribuição das temperaturas superficiais e padrões de relacionamento durante as estações

A relação entre temperaturas superficiais, medidas internamente em paredes com orientações opostas (sul e norte, piso e cobertura) se alterou ao longo dos meses, refletindo os ganhos térmicos esperados para a localidade, conforme a Figura 7.



A temperatura horária para as 3 superfícies (parede sul, parede norte e cobertura) num período de 8 meses mostra que, enquanto em janeiro as mais altas temperaturas eram registradas na parede sul, em junho/julho, a parede norte também contribui para o aumento das temperaturas do ar interno da edificação. A cobertura contribui então com a maior carga térmica, sendo suas temperaturas em média superiores que as da fachada sul ou norte. As flutuações diárias entre as duas fachadas, inicialmente bem distintas, uma vez que a fachada sul é a que recebe mais radiação no inverno, tornam-se quase que equivalentes no período quente. O efeito das temperaturas superficiais foi notado pelos ocupantes, nos quartos de dormir e trouxe conseqüências para o não-resfriamento do envelope no período de calor.

3.5 Avaliação de conforto

Adotando-se o método ACS, conforme sugerido no *Standard ASHRAE 55* de 2004, analisou-se os níveis de conforto resultantes para o apartamento monitorado. Adotando-se as faixas de temperatura de conforto apresentadas na Tabela 1, plotou-se num gráfico as temperaturas internas e externas sobre essas faixas, mês a mês (Figura 8).

A porcentagem de horas abaixo e acima das linhas limite de conforto oferece uma indicação do stress térmico geral do apartamento. Cerca de 10% do total de horas monitoradas corresponderam a uma situação de frio e apenas metade disso àquela de calor. Externamente, obteve-se 56% das horas em frio e 21% em calor. Com exceção dos meses mais frios de Janeiro e Fevereiro, as temperaturas internas estiveram próximas aos limites de conforto ou dentro da faixa de ACS.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O apartamento de família respondeu com bom desempenho às condições climáticas locais. Um refinamento do padrão construtivo envolveria análise de sensibilidade quanto ao tamanho apropriado das aberturas e à espessura dos materiais empregados na envoltória, dado que a massa térmica empregada “anula” em parte tanto o aproveitamento solar através das aberturas no inverno, quanto às vantagens de uma ventilação seletiva no período de verão.

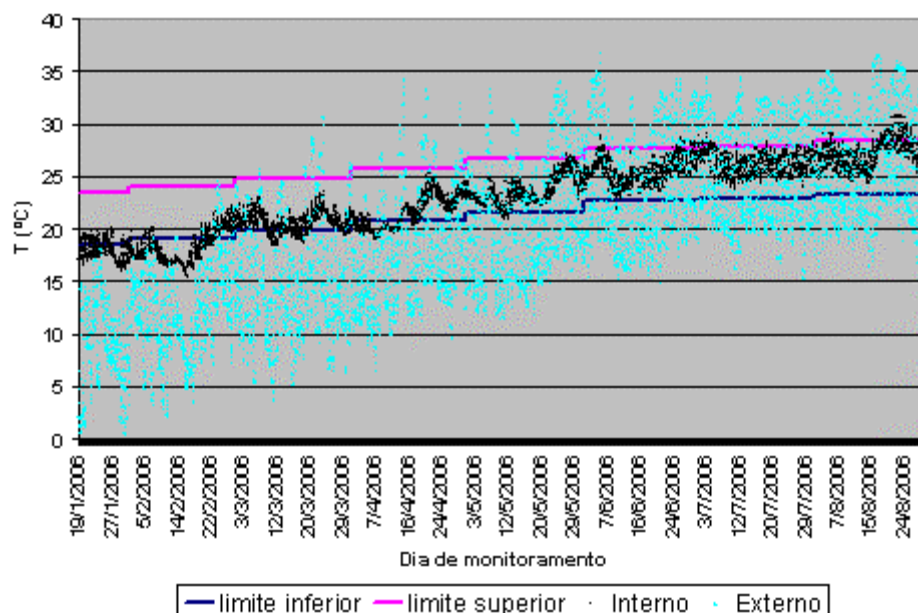


Figura 8: Faixas determinadas pelo critério de Conforto Adaptativo para o período monitorado a partir de temperaturas externas e flutuação das temperaturas medidas interna e externamente (19/1/2006 a 30/8/2006)

5. AGRADECIMENTOS

Ao técnico Wolfgang Motzafi-Haller pela ajuda prestada quando da instalação e programação dos equipamentos de medição e à CAPES pela bolsa pós-doutoral.

6. REFERÊNCIAS

- ASHRAE *Handbook of Fundamentals*. 2005 I-P Edition w/ CD
- 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*. Proceedings, Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century, Windsor, UK, April 2001.
- De DEAR, R.; BRAGER, G.S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings* 34(6), 2002: 549-563,
- EQUA SIMULATION. *IDA Indoor Climate and Energy 3.0 Manual*. EQUA Simulation AB, 2002.
- GIVONI, B. *Climate considerations in building and urban design*. Nova Iorque: ITP, 1997.
- NICOL, J.F.; HUMPHREYS, M.A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings* 34(6), 2002: 563-572