

ESTIMATIVAS DE REDUÇÃO DA TEMPERATURA DO AR: USO DO RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO NO SEMI-ÁRIDO ALAGOANO

Juliana Oliveira Batista (1); Roberto Lamberts (2)

(1) Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo/ PósArq – Departamento de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de Santa Catarina, Brasil – e-mail: juliana@labeee.ufsc.br

(2) Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo/ PósArq – Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Santa Catarina, Brasil – e-mail: lamberts@ecv.ufsc.br

RESUMO

O resfriamento evaporativo é uma das principais estratégias de condicionamento ambiental passivo recomendáveis para climas quentes e secos, podendo ser empregado de forma indireta ou direta. Neste caso, o potencial de resfriamento da temperatura do ar é diretamente proporcional à diferença psicrométrica entre a temperatura de bulbo seco (TBS) e de bulbo úmido (TBU), denominada dTBU. O clima quente e seco caracteriza o sertão nordestino, predominando no estado de Alagoas, onde aproximadamente 43% de seu território pertence ao semi-árido. Tem-se como exemplo o município de Santana do Ipanema, o qual apresenta amplitudes térmicas anuais de até 19°C. A partir de dados de monitoramento ambiental, verificaram-se os valores de dTBU alcançados durante o verão em residências localizadas no município. Foram estimadas as temperaturas do ar resultantes do emprego do resfriamento evaporativo direto (RED), considerando-se um potencial de resfriamento da TBS variando entre 60% e 80% do valor da dTBU, segundo GIVONI (1994). As estimativas indicaram a possibilidade de redução na TBS interna, variando entre 2°C e 10°C, além de uma significativa elevação da umidade relativa do ar. Tais resultados demonstram a possibilidade de associar o RED à ventilação natural, beneficiando as condições de conforto, especialmente em residências.

ABSTRACT

Evaporative cooling of air is an attractive passive technique for application in buildings located at hot and dry climates. There are two kinds of its application: direct evaporative cooling and indirect evaporative cooling. In case of a direct evaporative cooling its efficiency depends on difference between Dry Bulb Temperature (DBT) and Humid Bulb Temperature (HBT), named dTBU. In Brazil, the hot and dry zone covers about 43 percent of Alagoas territory, a state located in Northeast Region. This work assesses the potential for direct evaporative cooling usage in dwellings, by a study developed in Santana do Ipanema, a hot and dry city located in Alagoas, Brazil. It was estimated that by direct evaporative cooling application, the internal temperatures were lower than data collected in the dwellings during summer period. The reductions estimated were about 2°C to 10°C. These results also shows that direct evaporative cooling can be associated with natural ventilation and can lead to design thermally acceptable buildings in hot and dry locations, especially in dwellings.

1. INTRODUÇÃO

Reduzir a temperatura do ar e diminuir o desconforto térmico devido à baixa umidade são metas almejadas pelo desenho bioclimático no projeto de edificações em climas quentes e secos. Dentre as técnicas de resfriamento passivo, pode-se citar o resfriamento evaporativo.

O resfriamento evaporativo tem como princípio a evaporação da água e a troca de calor sensível por calor latente que ocorre entre o ar e a água, resultando na redução da temperatura de bulbo seco (TBS) (SILVA, 2004). O resfriamento evaporativo pode ser direto ou indireto. Denomina-se resfriamento direto quando o ar resfriado por evaporação é introduzido no ambiente interno, e indireto quando se dá através do resfriamento de um elemento da edificação, o qual assume a função de absorver o calor que penetra na mesma ou é gerado internamente (GIVONI, 1994).

O resfriamento evaporativo indireto pode ser favorecido pela criação de fluxos de água na superfície externa das paredes (paredes úmidas) ou por meio da cobertura, com o uso de tanques com água localizados acima da mesma (roof ponds) ou aspersão de água sobre as telhas.

Dentre as formas de aplicação do resfriamento evaporativo direto, a estratégia pode ser efetuada de forma natural, com o auxílio do vento, diferença de temperatura, sprays ou torres de resfriamento passivo. A torre de resfriamento consiste em uma torre onde a água, contida em jarras, almofadas ou pulverizada, é precipitada. O ar ambiente introduzido na torre é resfriado por evaporação e depois transferido para o interior do edifício (SILVA, 2004). Givoni (1994) desenvolveu um modelo matemático para descrever o desempenho do sistema, observando um elevado grau de resfriamento do ar interno obtido com o emprego deste dispositivo. Outra opção é o uso de equipamentos mecânicos, compostos por uma espécie de “caixa” de plástico ou metal contendo um ventilador centrífugo e 3 ou 4 almofadas de fibra nas laterais, onde a água circula (Figura 1). Tais equipamentos apresentam como vantagem o consumo de energia inferior ao dos condicionadores de ar convencionais, semelhante a uma lâmpada incandescente (ECOBRISA, 2007), uma vez que a energia necessária destina-se apenas à operação dos ventiladores e pequenas bombas de água (SANTAMUOURIS, ASIMAKOPOULOS, 1996).

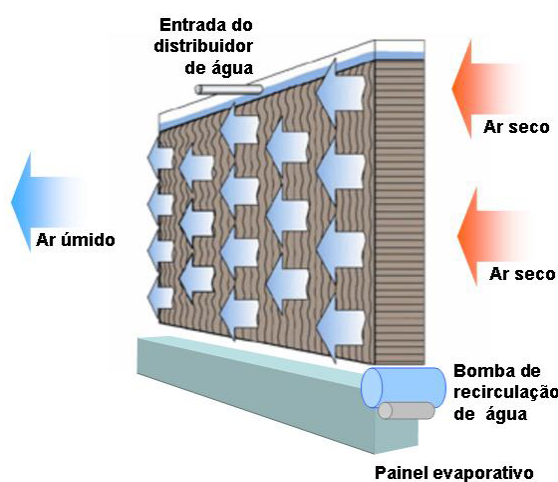


Figura 1 -Esquema do funcionamento de um sistema de resfriamento evaporativo direto.
(Fonte: adaptado de <<http://www.jshumidifiers.com>>)

No caso do resfriamento evaporativo direto, é possível estimar o potencial de redução na TBS em função da diferença psicrométrica entre as temperaturas externas TBS e a TBU, denominada dTBU (GIVONI, 1994). Quanto maior essa diferença, maior o potencial de resfriamento alcançado. Desse modo, trata-se de uma estratégia recomendável para climas quentes e secos, onde se verificam diferenças psicrométricas significativas.

A Região Nordeste ocupa aproximadamente 18,3% do território brasileiro, com uma área de 1.561.177,8 km² (IBGE, 2005), caracterizando-se pela irregularidade de distribuição das chuvas

(NIMER, 1979). Tomando-se como exemplo o estado de Alagoas, cerca de 43% do seu território encontra-se inserido no semi-árido (CODEVASF, 2005), correspondendo a 35 de seus 102 municípios. Dentre eles, pode-se citar Santana do Ipanema (Figura 2). Distante 207,3 km de Maceió, a 9°22' de latitude, 37°14' de longitude e 250 m de altitude. Possui uma estação seca, ocupando o período entre outubro e abril, e uma estação chuvosa, entre os meses de maio e agosto. A temperatura anual varia entre 20°C e 39°C (FUNESA, 2001). A precipitação média anual corresponde a 847,2 mm, porém este valor costuma apresentar variações (SEMARHN/ NMRH/AL, 2004). O quadro sócio-econômico do município complementa a imagem típica de grande parte do sertão nordestino: cerca de 74% da população possui renda domiciliar per capita inferior a meio salário mínimo (PNUD, 2000).

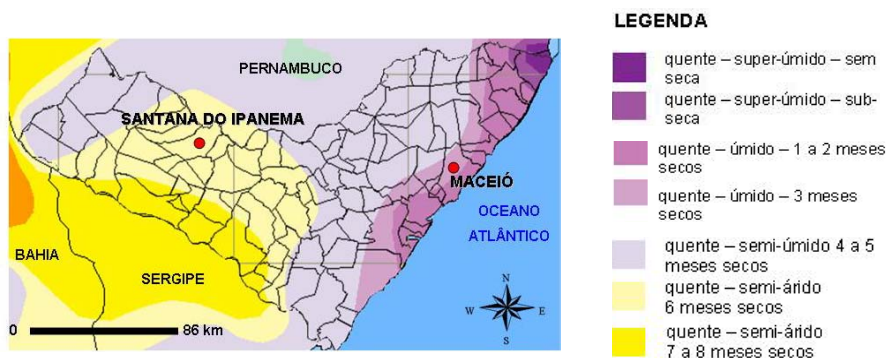


Figura 2 - Mapa de climas do estado de Alagoas, destacando-se o município de Santana do Ipanema. (Fonte: Adaptado de IBGE, 2005)

A adoção de processos e técnicas que possibilitam a diminuição das temperaturas internas através do uso de fontes naturais de energia, a exemplo do resfriamento evaporativo, representa a possibilidade de se obter um incremento o desempenho ambiental do edifício. Além disso, tem-se como vantagem a possibilidade de redução no consumo de energia, o que é desejável em localidades onde a renda da maioria da população é baixa, como no caso de Santana do Ipanema.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar o potencial de resfriamento da temperatura do ar nos ambientes internos (TBS), resultante do emprego do resfriamento evaporativo direto (RED), como forma de estratégia de condicionamento ambiental passivo aplicável ao clima quente e seco do sertão alagoano. Para tal, foram realizadas estimativas utilizando dados de monitoramento ambiental, realizados no município de Santana do Ipanema.

3. MÉTODO

3.1 Monitoramento ambiental *in loco*

A fim de se avaliar o potencial de uso do resfriamento evaporativo direto, foram selecionadas duas residências com características arquitetônicas distintas, tendo em vista seus comportamentos térmicos diferenciados. O monitoramento ambiental foi realizado durante o período de 29/01/2005 a 03/03/2005.

A Edificação R1 representa a tipologia “casa em fita”, característica do vocabulário arquitetônico de Santana do Ipanema, a exemplo de outras cidades do sertão alagoano (BATISTA, 2006), (SILVA, 1991). Esta residência apresenta cobertura em telha cerâmica sem fôrro e limitações quanto ao emprego da ventilação natural, uma vez que apenas nos ambientes voltados para a rua ou para o quintal dos fundos há a possibilidade de abertura de janelas. Já a Edificação R2 diferencia-se por apresentar afastamentos em relação aos limites do lote, possibilitando o emprego da ventilação cruzada, além de fazer uso de fôrro de madeira sob cobertura em telha cerâmica no pavimento superior. O ambiente escolhido para monitoramento neste caso foi um dormitório localizado no

pavimento térreo (Figuras 3 e 4). O monitoramento ambiental foi realizado com o auxílio de sensores HOBO H8 RH/ TEMP (Onset Corporation Ltda). No ambiente externo, o HOBO permaneceu acondicionado dentro de uma maquete quadrangular, posicionada sob um beiral na fachada sul de uma edificação próxima à Edificação R2 (Figura 3c).

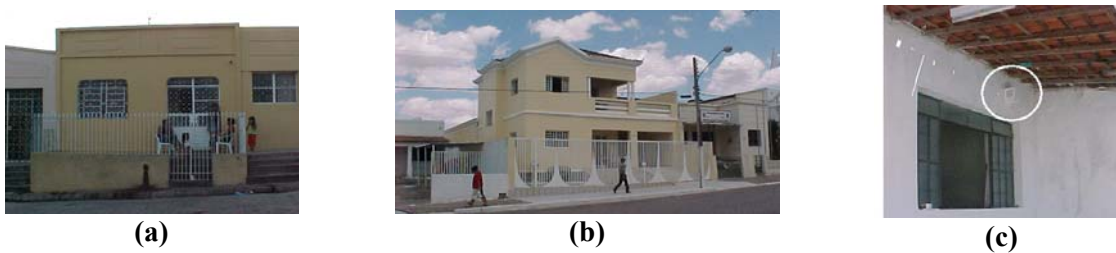


Figura 3 – Vistas externas das edificações R1 (a) e R2 (b) e HOBO posicionado no exterior (c).

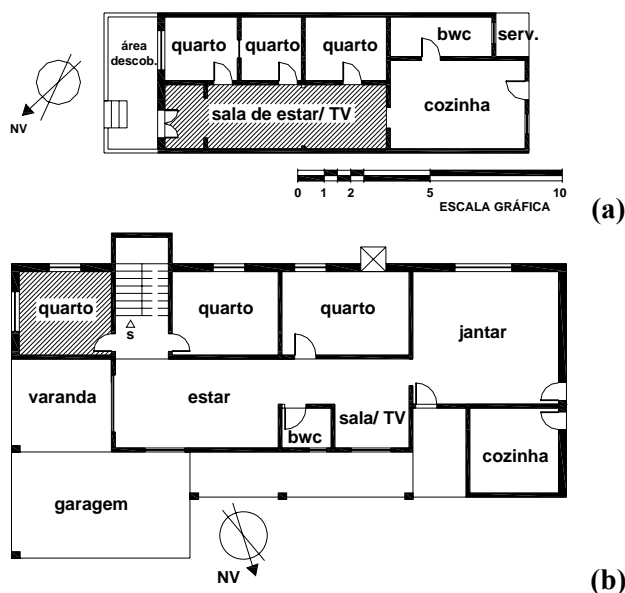


Figura 4 – Plantas baixas das edificações R1 (a) e R2 (b), destacando-se os ambientes monitorados.

As Figuras 5 e 6 indicam a variação das temperaturas e umidades relativas internamente nas residências e no ambiente externo, destacando-se os valores máximos e mínimos verificados.

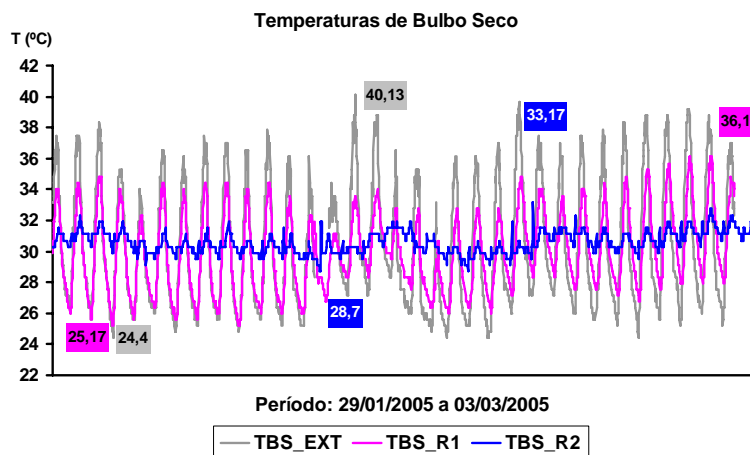


Figura 5 – Valores de TBS obtidos durante o período de monitoramento (29/01/2005 a 03/03/2005).

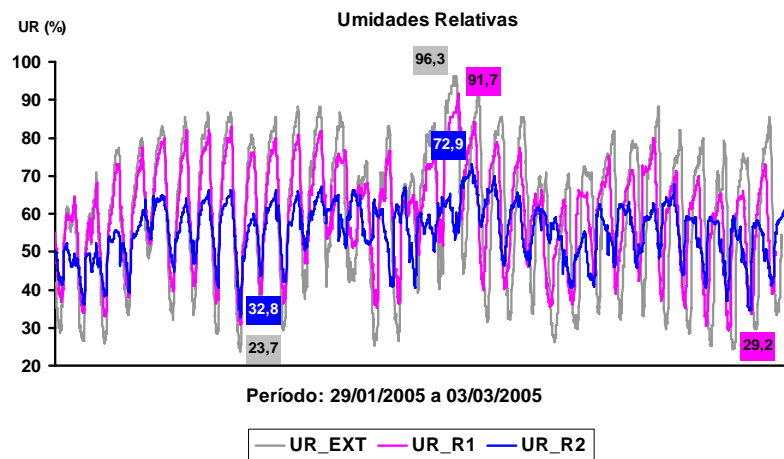


Figura 6 – Valores de UR obtidos durante o período de monitoramento (29/01/2005 a 03/03/2005).

3.2 Tratamento dos dados: estimativas do potencial de redução da temperatura

De acordo com Givoni (1994), é recomendável empregar o resfriamento evaporativo direto quando os valores de TBS_{máx} e TBUs_{máx} no ambiente externo se mantêm inferiores aos limites de 44°C e 24°C, respectivamente. Com base em tais limites, identificaram-se os períodos nos quais a referida estratégia seria aplicável, de acordo com os dados obtidos no período de monitoramento *in loco* (BATISTA; 2006). Considerou-se o intervalo compreendido entre as 8h e 18h, período no qual as temperaturas externas mantêm-se com valores mais elevados.

Os dados de temperatura de bulbo seco (TBS) e umidade relativa do ar (UR) foram processados com o auxílio do programa computacional *Analysis Bio* (LabEEE, 2003), possibilitando a determinação das temperaturas de bulbo úmido (TBU) no interior das residências e no ambiente externo a partir dos dados de TBS e UR mensurados.

Quanto aos potenciais de refrigeração evaporativa (redução da temperatura), as estimativas foram realizadas de acordo com o procedimento de cálculo descrito por Roriz (2000), obedecendo-se as seguintes etapas:

- 1 – Cálculo das diferenças psicrométricas (dTBU) entre os valores externos da TBS e TBU, para cada horário;
- 2 – Determinação do valor da dTBS, correspondente ao produto entre a dTBU e a eficiência de umidificação do sistema (EFu). Com base na literatura consultada (GIVONI, 1994) (SANTAMUOURIS, ASIMAKOPOULOS, 1996) (GIVONI, 1997), as eficiências do sistema hipotético foram fixadas em 60%, 70% e 80% da dTBU.
- 3 – Cálculo da TBS resultante por efeito da refrigeração (temperatura que emerge do sistema), correspondente à diferença entre a TBS inicial e a queda ocorrida na temperatura do ar (dTBS).

3.3 Temperaturas estimadas versus temperatura neutra de conforto

A fim de se obter uma indicação da possibilidade de atendimento às exigências de conforto térmico dos usuários, os valores de TBS estimados foram comparados ao valor da temperatura neutra de conforto (T_{neutra}), calculada conforme a equação proposta por Humphreys para países de clima quente (NICOL, 2000):

$$T_{neutra} = 11,9 + 0,534 TME \quad [\text{Eq. 01}]$$

Onde:

T_{neutra} = Temperatura neutra ou temperatura média confortável em ambiente interior ($^{\circ}\text{C}$);

TME = Temperatura média exterior, mensal ou anual ($^{\circ}\text{C}$).

A estimativa da T_{neutra} foi realizada considerando-se a temperatura média externa correspondente à média histórica do mês de fevereiro, com base em dados das Normais Climatológicas disponíveis para cidades próximas a Santana do Ipanema e também localizadas na Zona Bioclimática 7 (Ministério da Agricultura, 1961). O valor correspondente à temperatura média externa desse período foi igual a $27,1^{\circ}\text{C}$. Utilizando-se este dado, a T_{neutra} resultante foi igual a $26,4^{\circ}\text{C}$.

De posse dos valores estimados das TBS resultantes do emprego do RED (TBS_{RED}) e das temperaturas neutras de conforto (T_{neutra}), foram estimados também os somatórios de graus.h ($\Sigma^{\circ}\text{Ch}$) de resfriamento nas edificações R1 e R2, considerando-se o valores da T_{neutra} como limite de aceitabilidade. No entanto, em torno dessa média, Szokolay define uma faixa de tolerância, cujo valor é igual a 2°C , caso se adote a TME = temperatura média externa mensal. Desse modo, considerou-se no presente trabalho o valor de $28,4^{\circ}\text{C}$ como limite de referência para a temperatura neutra.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Redução da TBS = 60% da dTBU ($EFu = 60\%$)

De acordo com as estimativas realizadas, os valores da TBS resultantes do emprego do resfriamento evaporativo (TBS_{RED}) manter-se-iam acima da T_{neutra} na maior parte do tempo, conforme indicado na Figura 7. Já o total de horas nos quais os valores da TBS_{RED} ultrapassariam a estimativa da T_{neutra} corresponderia a 27% do total de 340h do período de monitoramento. No entanto, a diferença máxima entre o valor da nova TBS e a T_{neutra} seria inferior a 2°C .

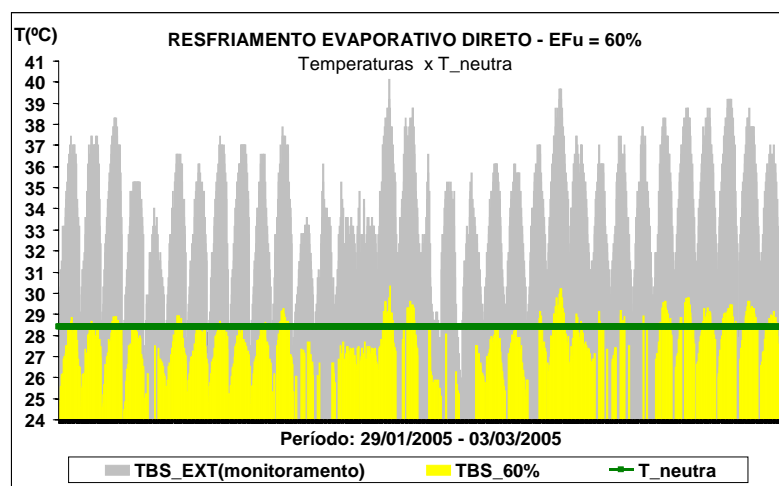


Figura 7 – T_{neutra} e estimativa da variação das temperaturas resultantes do emprego do resfriamento evaporativo direto ($EFu = 60\%$).

4.2 Redução da TBS = 70% da dTBU ($EFu = 70\%$)

Neste caso, a diferença máxima entre os valores de TBS_{RED} estimados e a T_{neutra} seria inferior a $0,5^{\circ}\text{C}$ (Figura 8). Por conseguinte, haveria uma redução nos totais de horas nos quais as temperaturas neutras seriam ultrapassadas, em relação ao caso anterior ($EFu = 60\%$), que passaria a corresponder a menos de 2% do total de 340h do período de monitoramento

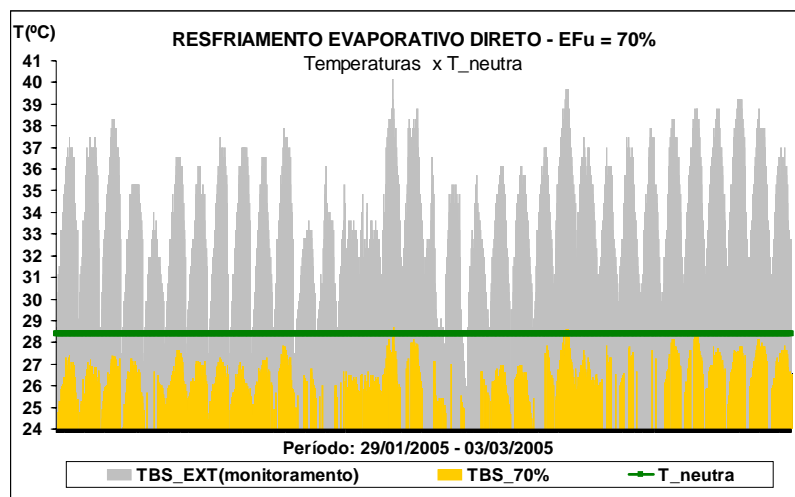


Figura 8 – T_{neutra} e estimativa da variação das temperaturas resultantes do emprego do resfriamento evaporativo direto ($EFu = 70\%$).

4.3 Redução da TBS = 80% da dTBU ($EFu = 80\%$)

Considerando-se o valor de $EFu = 80\%$, os valores de TBS_{RED} resultantes manter-se-iam sempre inferiores à temperaturas neutras de conforto (Figura 9). As temperaturas resultantes do emprego do resfriamento evaporativo seriam bastante inferiores às temperaturas registradas durante o monitoramento, observando-se reduções entre $2^{\circ}C$ e $10^{\circ}C$.

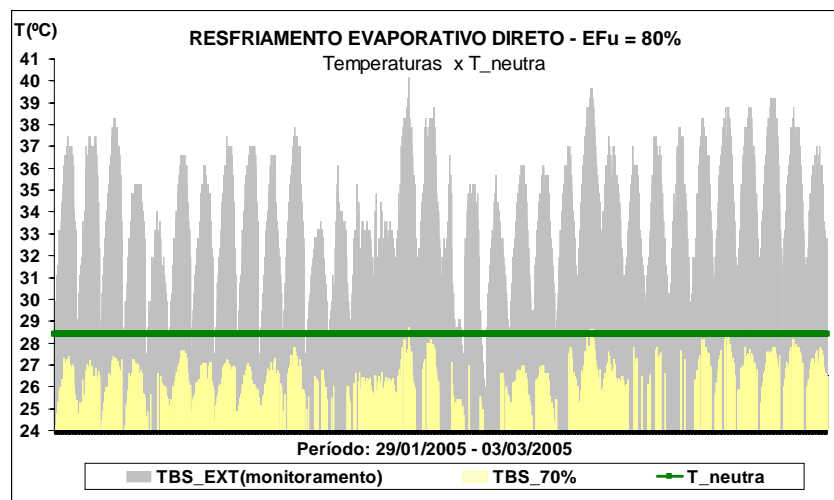


Figura 9 – T_{neutra} e estimativa da variação das temperaturas resultantes do emprego do resfriamento evaporativo direto ($EFu = 80\%$).

As Figuras 7 a 9 acima indicam que as diferenças entre os valores estimados da TBS_{RED} e as temperaturas neutras de conforto seriam inferiores a $2^{\circ}C$. Comparando-se os somatórios de graus.h necessários para o resfriamento, resultante do emprego da referida estratégia, com aqueles verificados para as Edificações R1 e R2 durante o período de monitoramento, verifica-se que seria possível obter reduções significativas.

No caso da Edificação R1, estima-se um percentual de redução no somatório de graus.h de resfriamento de no mínimo $58,8\%$, enquanto na Edificação R2 o percentual de redução poderia alcançar até $49,4\%$ (Tabela 1).

Tabela 1 – Somatórios de graus.h das residências monitoradas sob as condições reais registradas (1) e nas estimativas dos valores da TBS (2).

Temperaturas neutras de conforto	$\Sigma^{\circ}\text{Ch}$ de resfriamento			
	(1)	(2) % Redução (estimativas)		
		EFu = 60%	EFu = 70%	EFu = 80%
Edificação R1	1290,1	58,8	63,5	63,7
Edificação R2	937,97	42,7	49,2	49,4

Em se tratando do uso do resfriamento evaporativo direto, deve-se evitar que a umidade relativa do ar resultante seja demasiadamente elevada, o que pode prejudicar o conforto térmico dos usuários. A Figura 10 mostra a inserção dos valores de temperatura e umidade do ar estimados na carta psicrométrica. Considerando-se os valores de EFu correspondentes a 60% (a), 70% (b) e 80% (c), verifica-se que os percentuais de umidade relativa do ar seriam bastante elevados, aproximando-se de 100%. No caso de ambientes cuja carga térmica latente (ocupação) seja elevada, o uso do RED torna-se desaconselhável.

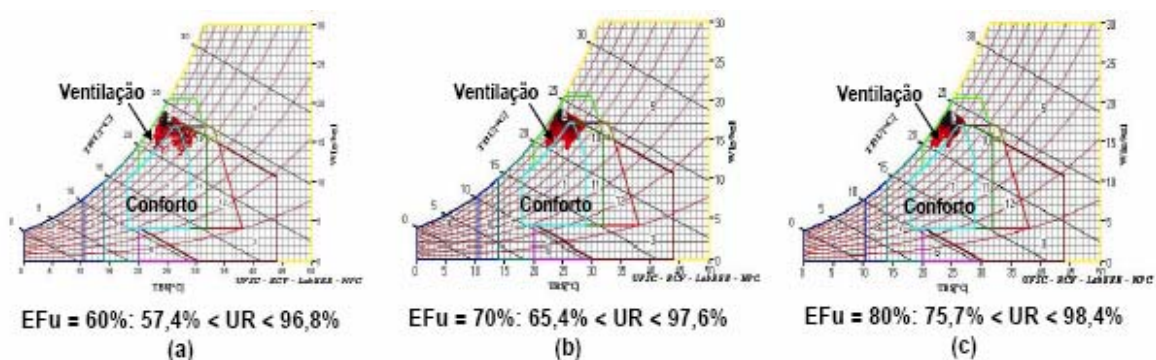


Figura 10 – Resultados estimados do emprego do RED, destacando-se os percentuais de umidade relativa resultantes: (a) EFu = 60%;(b) EFu = 70% e (c) EFu = 80%.

No caso das residências em estudo, seria necessário fazer uso da ventilação durante períodos acima de 80% do total de horas nas quais o resfriamento evaporativo direto seria aplicável, para assegurar a renovação do ar ambiente. Observa-se ainda que a adoção de um sistema com EFu = 60% (Figura 10 a) apresenta-se como a opção mais indicada, pois os valores de UR alcançados são menores, embora as temperaturas resultantes sejam mais elevadas do que nas outras estimativas (Vide Figuras 7 e 8).

No caso de tipologias semelhantes à Edificação R1, a introdução de um jardim interno ou pergolado apresenta-se como uma alternativa interessante para adaptar o uso de sistemas mecânicos de resfriamento evaporativo direto e associá-los ao aproveitamento da ventilação natural (Figura 11). A criação de tais espaços internos possibilita o aproveitamento da ventilação à noite, enquanto durante o dia o ar externo aquecido seria resfriado em um espaço sombreado e vegetado antes de circular pelos demais ambientes internos, favorecendo o conforto térmico dos usuários. Além disso, no caso de ambientes que não estejam voltados para o exterior, torna-se possível adaptar sistemas mecânicos de resfriamento evaporativo direto, uma vez que tais equipamentos necessitam manter contato com áreas externas ou algum tipo de abertura para garantir seu funcionamento adequado.

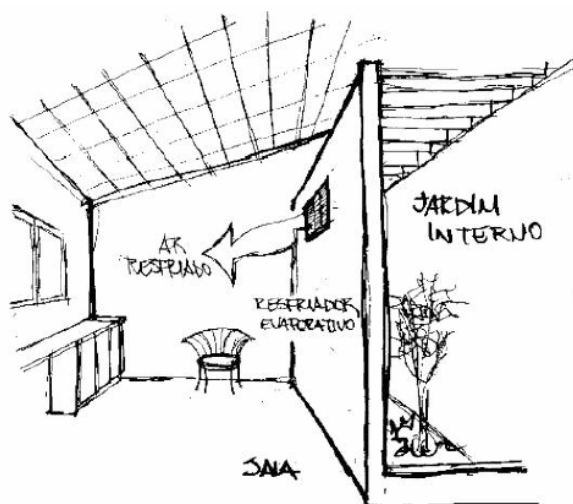


Figura 11 – Uso de sistemas de resfriamento evaporativo na tipologia residencial “casa em fita”.

5. CONCLUSÕES

As estimativas do desempenho do resfriamento evaporativo direto como estratégia de condicionamento ambiental passivo indicam que se trata de uma alternativa interessante para promover o conforto térmico em residências em Santana do Ipanema. Os períodos de utilização corresponderiam às horas mais quentes do dia, quando o resfriamento da temperatura é mais desejável. Além disso, as estimativas do potencial de redução da temperatura indicaram que seria possível manter as temperaturas internas abaixo dos limites estimados da temperatura neutra, durante a maior parte do tempo, caso fosse utilizado o resfriamento evaporativo direto, mesmo considerando-se uma eficiência de umidificação (Efu) mais baixa.

Por fim, diante de um contexto social no qual o padrão de renda é reduzido, o resfriamento evaporativo direto representa uma alternativa de baixo consumo de energia, principalmente quando comparada aos condicionadores de ar convencionais. Produtos disponíveis no mercado brasileiro apresentam consumo equivalente a uma lâmpada de 100 W (ECOBRIISA, 2007). (CLIMASYSTEM, 2007).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LabEEE (2003). “ANALYSIS Bio”. Versão 2.1.1. UFSC – ECV – NPC – LabEEE. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br>
- BATISTA, J. O. (2006). 161 f. “A arquitetura e seu desempenho térmico no contexto do semi-árido alagoano: Estudos de caso em Santana do Ipanema – AL”. Dissertação de mestrado (Programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Depto. de Arquitetura e Urbanismo, Programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- CLIMASYSTEM (2007). “Climatização: Sistema, Indicação, Vantagens, Requisitos, Aplicação”. Apresenta especificações técnicas de sistemas de refrigeração evaporativa. Disponível em: <<http://www.climasystem.com.br> > Acesso em: 02 março 2007.
- CODEVASF (2005). “Companhia de Desenvolvimento do Vale do Rio São Francisco”. Apresenta o percentual da área dos estados brasileiros incluídos no semi-árido. Disponível em: <<http://www.codevasf.gov.br>>. Acesso em: 08 novembro 2005.

- ECOBRIISA (2007). “Sala de Imprensa”. Apresenta especificações técnicas de sistemas de refrigeração evaporativa. Disponível em: <<http://www.ecobrisa.com.br>> Acesso em: 02 março 2007.
- FUNDAÇÃO Universidade Estadual de Alagoas – FUNESA (2001). “Santana do Ipanema – AL: gênese, desenvolvimento e caracterização atual”. Escola Superior de Ciências Humanas, Físicas e Biológicas – ESSER. Santana do Ipanema, AL.
- GIVONI. (1994). “Passive and low energy cooling of buildings”. Van Nostrand Reinhold Publishing Company, New York. USA.
- GIVONI (1997). “Climate considerations in building and urban design”. John Wiley & Sons Inc., New York. USA.
- IBGE (2005). “Instituto Brasileiro de Geografia e estatística”. Área territorial oficial. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 19 outubro 2005.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA (1961). “Normais Climatológicas (1931-1960)”. Escritório de Meteorologia Escritório de Meteorologia do Ministério da Agricultura. Rio de Janeiro. RJ 1961.
- NICOL, Fergus. (2000) “International Standards Don’t Fit Tropical Buildings: What Can We Do About It?”. in: Conferencia Internacional Sobre Confort y Comportamiento Térmico de Edificaciones, COTEDI-2000, Maracaibo.
- NIMER, E. (1979). “Climatologia do Brasil”. FIBGE. Rio de Janeiro. RJ.
- PNUD. (2000) “Atlas do desenvolvimento humano do Brasil”. Disponível em: <<http://www.pnud.org.br>>. Acesso em: 19 outubro 2005.
- RORIZ, M. (2000). “Potencial do uso de refrigeração evaporativa no estado de São Paulo”. In: NUTAU 2000. Anais. NUTAU, p. 1103 - 1110. São Paulo. SP.
- SANTAMOURIS, M; ASIMAKOPOULOS, D. (1996). “Passive cooling of buildings”. James & James Science Publishers, 1996
- SECRETARIA DE EXECUTIVA DE MEIO AMBIENTE RECURSOS HÍDRICOS E NATURAIS - SEMARHN/AL. Dados diários de chuva para os anos de 1999, 2000, 2002 e 2003. Maceió: Banco de Dados Hidrometeorológicos – BDHM. Meio digital.
- SILVA, A. C. S. B. da. (2004). “Simulação de resfriamento evaporativo por microaspersão d’água”. Tese de doutorado (Programa de pós-graduação em Engenharia de Civil) - Depto. de Engenharia Civil, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. SC. 183 f.
- SILVA, M. A. da. (1991). “Arquitetura moderna: a atitude alagoana”. SERGASA. Maceió. AL.

AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, pela bolsa de estudos concedida durante os dois anos de mestrado.