



ESTUDO DA APLICABILIDADE DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO INDIRETO PARA OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM RESIDÊNCIAS NO TERRITÓRIO BRASILEIRO

GONZÁLEZ CRUZ, Eduardo (1); KRÜGER, Eduardo (2); GIORDANO, Dominique E. (3)

(1) UFSC, edugoncruz@gmail.com, (2) UTFPR, ekruger@etfp.edu.br, (3) IFPR, dominique.giordano@ifpr.edu.br

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo determinar a aplicabilidade de um Sistema Passivo de Resfriamento Evaporativo Indireto (SPREI) como estratégia de climatização passiva de moradias no território brasileiro. Analisa-se aqui o desempenho térmico do SPREI, originalmente aplicado em uma habitação (*Vivienda Bioclimática Prototipo - VPB-1*) no clima quente e úmido de Maracaibo, Venezuela. Por meio de predição de temperaturas internas, ou seja, pela aplicação de equações preditivas desenvolvidas e avaliadas em estudos prévios, são apresentados resultados do SPREI para 411 cidades brasileiras (arquivos climáticos de Ano Meteorológico Típico -TMY). A eficiência do sistema passivo de resfriamento foi avaliada em cada uma destas cidades quanto à sua capacidade de reduzir a temperatura interna em relação à externa, e também da quantidade e porcentagem de Graus-dia/ano acima do limite superior da faixa de conforto térmico adaptativo. Os resultados indicam que o SPREI é capaz de proporcionar conforto térmico entre 90% e 100% do total de cidades avaliado. Observou-se que as temperaturas médias internas alcançam valores de até 2,5°C abaixo das condições externas, e que tais reduções dependem fundamentalmente da diferença entre a temperatura de bulbo seco e a temperatura de bulbo úmido. Considera-se que, à luz destes resultados, o SPREI apresenta grande aplicabilidade e potencial para melhoria das condições de conforto térmico interno, contribuindo para a redução da demanda por energia em climatização em todo o território brasileiro.

Palavras-chave: resfriamento passivo, resfriamento evaporativo indireto, predição de temperatura interna, conforto térmico.

ABSTRACT

*The purpose of this study is to assess the applicability of a passive system of indirect evaporative cooling ‘Sistema Passivo de Resfriamento Evaporativo Indireto’ (SPREI) as a viable passive cooling strategy in dwellings located across the Brazilian territory. The thermal performance of SPREI is analysed, which was originally developed for a dwelling located in hot-humid Maracaibo, Venezuela (*Vivienda Bioclimática Prototipo -VPB-1*). By means of predictive formulas, which were developed and evaluated in previous studies, results for SPREI are shown for 411 cities (from Typical Meteorological Year -TMY-climate files). The efficiency of the passive cooling system was evaluated for each city with regard to its capability in reducing indoor temperatures relative to outdoors as well as Degree-Day percentages above the upper limit of the adaptive comfort zone. Results suggest that SPREI is capable of ensuring thermal comfort conditions for 90-100% of the total of cities evaluated. Average indoor temperatures reached reduction up to 2.5°C below outdoor conditions; such reductions depend fundamentally on the wet bulb temperature depression. From such results, SPREI presents a great applicability and potential for improving indoor comfort conditions, which contributes to a reduced energy demand on HVAC for all the Brazilian territory.*

Keywords: passive cooling, indirect evaporative cooling, indoor temperature prediction, thermal comfort.

1 INTRODUÇÃO

Um problema de grande relevância no setor energético é o alto consumo de energia destinada a satisfazer as condições de conforto térmico em ambientes residenciais a partir do uso de equipamentos de ar condicionado. A necessidade de resfriamento pode ser observada em boa parte do território brasileiro durante todo o ano, e em algumas zonas do país essa situação é observada apenas durante o período de verão. De acordo com este estudo, mais da metade das 411 cidades analisadas apresenta condições climáticas com temperaturas externas superando o limite superior da faixa de conforto adaptativo em mais de 800 Graus-dia/ano. Este valor supera 2.000 Graus-dia/ano em algumas cidades da região nordeste do país. Finalmente, no restante das cidades analisadas, embora o somatório de Graus-dia para resfriamento anual seja inferior ao mencionado, o resfriamento é necessário apenas em certas épocas do ano.

O resfriamento evaporativo indireto, aplicado de forma passiva, constitui uma forma interessante de enfrentar as condições de desconforto por calor. González e Krüger (2013) apresentaram resultados da aplicação de um Sistema Resfriamento Evaporativo Indireto (SPREI), utilizado em uma moradia de pequeno porte ‘Vivienda Bioclimática Prototipo’ (VBP-1), em Maracaibo, Venezuela (GONZÁLEZ et al., 2006), para quatro cidades brasileiras. Nesse estudo, indicou-se a capacidade do sistema de reduzir a temperatura média interna relativamente à média externa (entre 1,1 °C e 2,1 °C) e a capacidade de reduzir a temperatura máxima interna relativamente à externa, com diferenças médias encontradas de 3,4 °C em Fortaleza, 4,0 °C em Natal, 5,7 °C em Petrolina e 6,6 °C em Teresina.

O comportamento térmico do SPREI, quanto às temperaturas máximas, médias e mínimas, pode ser estimado a partir de equações preditivas, desenvolvidas tendo como base valores empíricos de monitoramento térmico do sistema (GIVONI; GONZÁLEZ, 2009). Em outro estudo, demonstrou-se ser possível predizer o comportamento térmico do SPREI em condições climáticas diferentes das utilizadas na geração das equações preditivas que caracterizam o sistema (KRÜGER; GONZÁLEZ; GIVONI, 2010).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo determinar a aplicabilidade de um Sistema Passivo de Resfriamento Evaporativo Indireto (SPREI) como estratégia de climatização passiva de moradias no território nacional brasileiro. Neste trabalho são apresentados os resultados da aplicação das equações preditivas do SPREI em 411 cidades brasileiras (arquivos climáticos de Ano Meteorológico Típico -TMY), distribuídas em todo o país. A eficiência do sistema passivo de resfriamento foi avaliada em cada uma destas cidades quanto à sua capacidade de reduzir a temperatura interna em relação à externa, e também quanto à quantidade e porcentagem de Graus-dia/ano acima do limite superior da faixa de conforto térmico em relação às condições climáticas existentes.

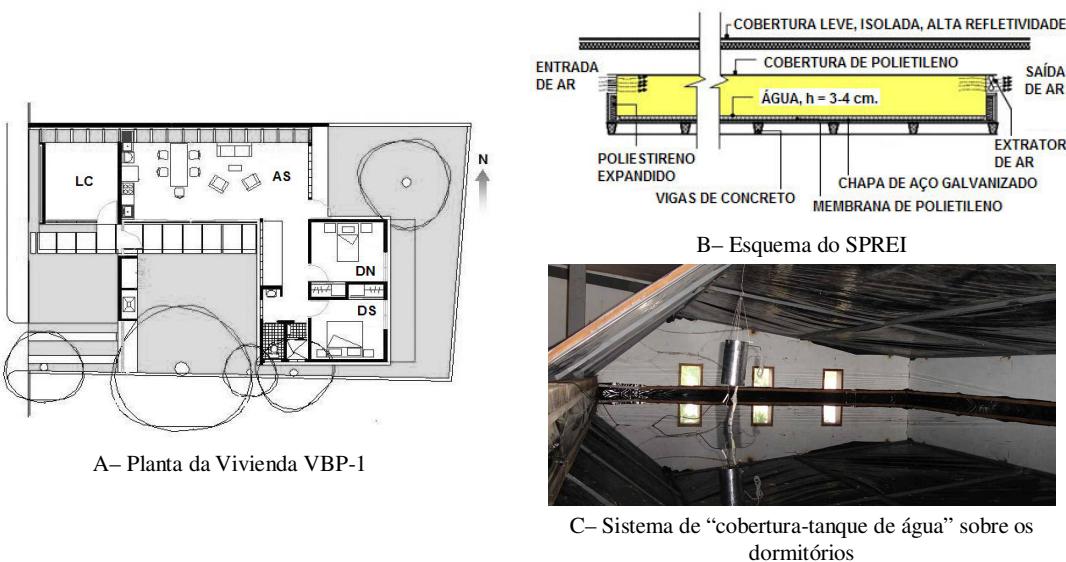
2 A ‘VIVIENDA EXPERIMENTAL VBP-1’

A ‘Vivienda Bioclimática Prototipo’ (VBP-1) foi projetada e construída em Maracaibo, Venezuela, como parte de uma pesquisa da Universidad del Zulia (LUZ) com objetivo de integrar estratégias bioclimáticas e de resfriamento passivo (GONZÁLEZ et al., 2000). Esta moradia experimental de 87 m² de construção está localizada na zona norte da cidade em um setor em processo de consolidação. É composta de uma área comum com cozinha, sala de jantar e área social, dois dormitórios (NB e SB), área de serviço com banheiro separado e espaço independente, que pode ser utilizado pela família para atividades comerciais. Conta com um pátio central e outro de menor tamanho a nordeste

do terreno. O sistema construtivo utilizado baseia-se em estrutura de concreto armado com uma cobertura à base de vigas e elementos pré-fabricados em concreto leve. As vedações verticais são compostas por blocos de concreto leve, rebocados em ambas as faces e blocos de ventilação.

A área de dormitórios está coberta pelo Sistema de Resfriamento Evaporativo Indireto (SPREI) (Figuras 1-B e 1-C). Trata-se de um teto-reservatório de água (com 3~4 cm de espessura) apoiada sobre lâmina metálica coberta por uma película de polietileno. O tanque de água possui, assim, cobertura dupla: a película de polietileno, que limita o acesso de insetos e poeira, e a cobertura externa, com lâmina metálica isolada da superfície interna com uma camada de poliestireno de 10 mm de espessura. A lâmina d'água está exposta a um fluxo de ar controlado com um pequeno extrator, que auxilia no processo de evaporação da água, ao mesmo tempo que garante a redução de sua temperatura.

Figura 1 – Planta da Vivienda VBP-1, esquema e foto do SPREI



Fonte: próprio autor (2014)

2.1 Clima de Maracaibo

O clima de Maracaibo (latitude 10° 34' N, longitude 71°44' W, altitude 66 m acima do nível do mar) é classificado como quente e úmido. Caracterizado por temperaturas e umidades relativas com pouca variação anual, e valores médios em torno de 27,6 °C com 70% a 80% de umidade relativa. A amplitude média diária de temperatura é de 7 a 9 °C. Durante o ano, observam-se os períodos de vento bem definidos. Um primeiro período com regime de ventos alísios, nos meses de dezembro a abril, com velocidades médias de 3 a 5 m/s. E um segundo período, de maio a novembro, com ventos mais fracos, variáveis em direção e intensidade com predomínio de calmaria, especialmente durante o dia. A precipitação anual média varia entre 450 e 550 mm e a irradiação solar global média diária é de 4,2 kWh/m².

2.2 Equações preditivas

As equações de predição de temperatura interna nos dormitórios foram desenvolvidas para o SPREI de acordo com o procedimento descrito em GIVONI e GONZÁLEZ

(2009), com base em dados de monitoramento obtidos durante nove meses na construção experimental. Os dados se dividem em duas seções: para geração e para validação dos modelos. Observa-se que o conjunto de equações utilizado fornece a temperatura interna nos dormitórios norte e sul (NB e SB), a partir de uma primeira estimativa da temperatura no tanque de água (Pond).

O tanque de água sobre os dormitórios proporciona resfriamento evaporativo indireto naqueles ambientes. As variáveis de entrada para a equação que prediz a temperatura da água do sistema de cobertura-tanque de água (Pond) incluem a temperatura média diária do ar (Tavg), a temperatura de bulbo úmido (WBT), a amplitude da temperatura externa diária (Swing), a disponibilidade de água no tanque (Water) e o funcionamento do extrator (Fans). A equação gerada para a temperatura do “Pond”, assim como as de predição para cada dormitório, foram geradas a partir dos dados experimentais por análise de regressão múltipla (Tabela 1). Os coeficientes de correlação entre as temperaturas medidas e as calculadas variaram dentro de uma faixa 0,85-0,96. O dormitório norte (NB) permaneceu sem utilização durante o período de monitoramento, enquanto o dormitório sul (SB) esteve ocupado (por duas pessoas durante a noite e por algumas horas durante o dia), por isso, introduziu-se a variável de uso (Use).

Tabela 1 – Equações preditivas das temperaturas de água do sistema (pond) e dos dormitórios norte (NB) e sul (SB).

Pond = 3,67 + 0,6449*WBT + 0,3261*Tavg – 0,0638*Swing – 1,68*Water – 0,5*Fans	Eq.1
SB_Max = -0,15 + 0,1333*Tavg + 0,6477*Pond + 0,2312*RnAvg + 0,1985*Swing + 0,8*Use	Eq.2
	Eq.3
SB_Avg = -1,0 + 0,1568*Tavg + 0,5925*Pond + 0,2899*RnAvg + 0,0406*Swing + 0,7*Use	Eq.4
SB_Min = 1 + 0,5414*Pond + 0,3298*RnAvg+0,0932*Tmin + 0,41*Use-0,0668*Tdrop	
NB_Max = -1,8 + 0,1616*Tavg + 0,5455*Pond + 0,3732*RnAvg + 0,113*Swing	Eq.5
NB_Avg = -2,3 + 0,1744*Tavg + 0,5319*Pond + 0,381*RnAvg + 0,0011*Swing	Eq.6
NB_Min = 1 + 0,5414*Pond + 0,3298*RnAvg+0,0932*Tmin -0,0668*Tdrop	Eq.7

Fonte: próprio autor (2014)

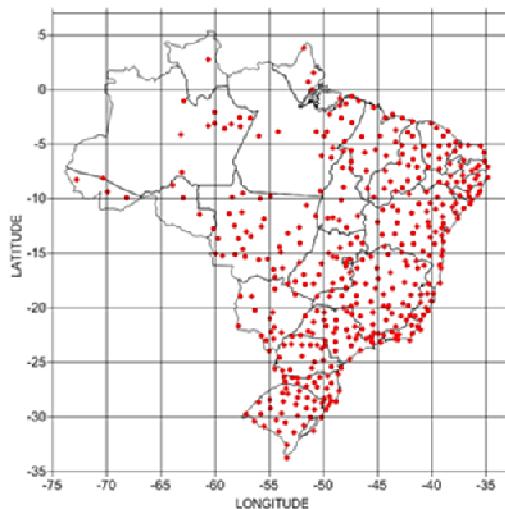
Legenda:

- WBT = Temperatura de bulbo úmido
- Tavg = Temperatura média diária externa
- Tmin = Temperatura mínima diária externa
- RnAvg = Temperatura média externa de 10 dias anteriores
- Swing = Amplitude da temperatura diária (Tmax-Tmin)
- Pond = Temperatura da água no sistema cobertura-tanque de água (Eq.1)
- Tdrop = Tmax(n-1) -Tmin – Diferença de temperatura entre máxima do dia anterior e mínima do dia atual
- Use = (uso do dormitório sul): 1 = com uso; 0 = sem uso
- Fans = 0 = extrator desligado; 1 = Uso de extrator de 8"; 2 = Uso de extrator de 8" e Uso de extrator de 14"
- Water = 0 = sem água no sistema cobertura-tanque de água; 1 = com água no sistema cobertura-tanque de água

3 APLICANDO O SPREI NO TERRITÓRIO BRASILEIRO

A base de dados meteorológicos utilizada neste estudo são os arquivos de Ano Meteorológico Típico (TMY) de 411 cidades distribuídas por todo o território brasileiro (Figura 2), no formato EPW disponibilizados pela ANTA (RORIZ, 2012).

Figura 2 – Distribuição espacial das 411 cidades integrantes da base de dados meteorológicos (TMY)

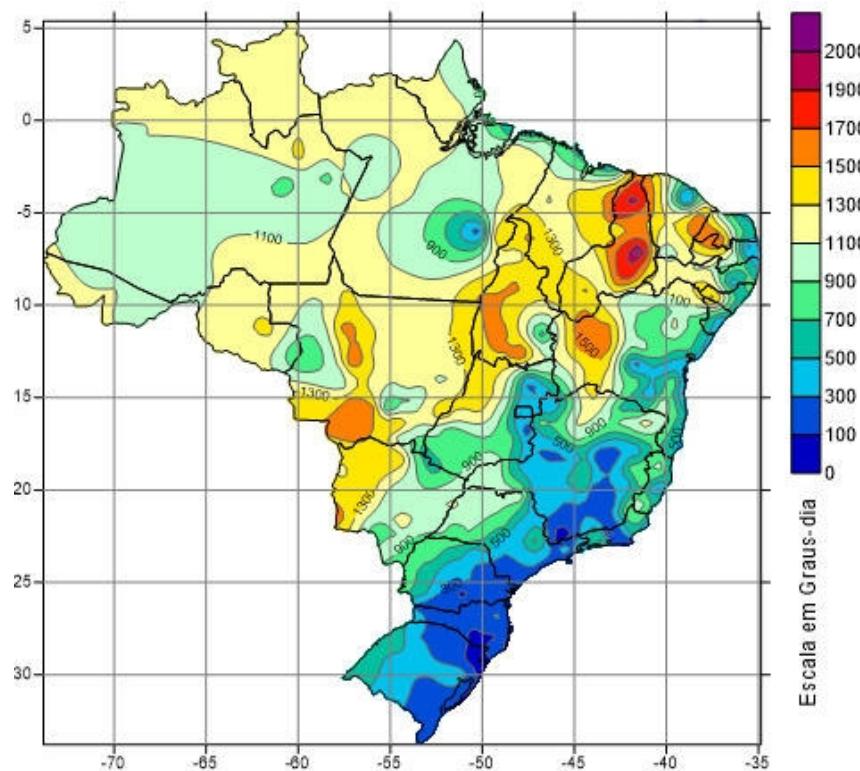


3.1 Desconforto por calor

Dados horários de temperatura e umidade relativa dos arquivos TMY foram utilizados para gerar os dados horários da temperatura de bulbo úmido, extraíndo-se então a base de dados para determinar temperaturas máximas, médias e mínimas diárias do ano todo para cada localidade. A análise comparativa dos valores de temperatura externa de cada uma das cidades para a referência adotada, ou seja, a zona de conforto adaptativo, permitiu estabelecer o somatório de Graus-dia acima do Limite Superior da zona de Conforto (LSC). O somatório dos Graus-dia por ano representa a soma algébrica da diferença entre a temperatura máxima e o limite superior da zona de conforto para todos os dias do ano. Os limites da zona de conforto adaptativo foram adotados para cada cidade e cada mês do ano segundo a norma ASHRAE Standard 55-2004 para edificações ventiladas naturalmente (DE DEAR; BRAGER, 2002) e com base nos dados climáticos de cada cidade. A partir dos valores das 411 cidades foram então extrapolados os valores para todo o território nacional, estimando-os por interpolação, com o método de krigagem. Na Figura 3, apresenta-se a distribuição de isolinhas de Graus-dia/ano em todo o território nacional, podendo-se identificar algumas regiões ao sul do país com valores inferiores a 300 Graus-dia (acima do LSC), sendo estes, climas temperados cuja estação de verão apresenta temperaturas máximas superando a faixa de conforto. Por outro lado, em grande parte do país (152 cidades/411 cidades analisadas) se supera os 1000 Graus-dia, chegando-se a valores de até 2.153 Graus-dia, como no caso de Picos, PI.

Pode-se concluir desta análise que existe uma importante necessidade de resfriamento ou climatização artificial de edificações em todo o país.

Figura 3 – Graus-dia acima do limite superior de conforto (desconforto por calor)



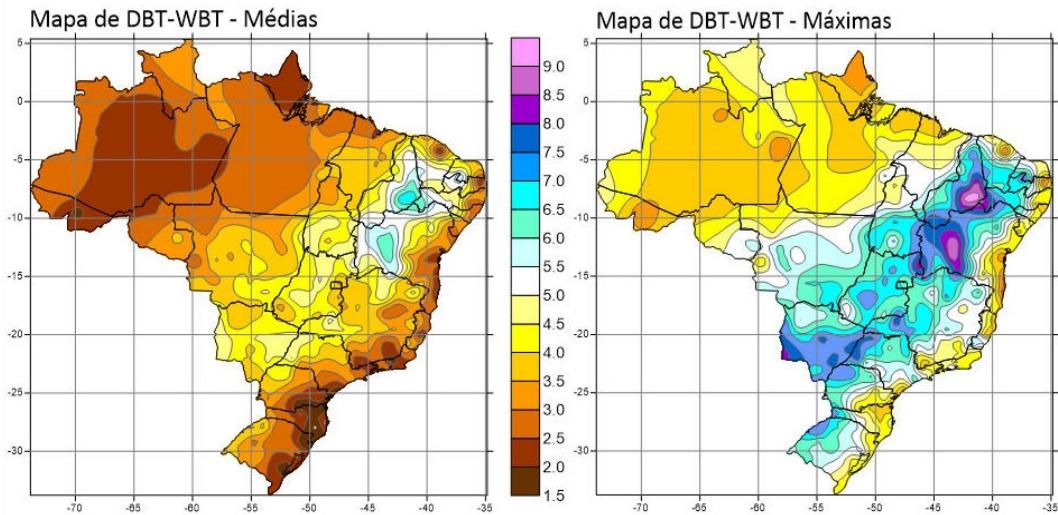
Fonte: próprio autor (2014)

3.1 Potencial de resfriamento evaporativo

O potencial de resfriamento do SPREI é dado pela diferença entre a temperatura de bulbo seco (TBS) e a temperatura de bulbo úmido (TBU), ou depressão de temperatura de bulbo úmido “wet bulb temperature depression” (DWBT) (GIVONI, 1994). Na Figura 3, são mostradas isolinhas com médias anuais de DWBT e de médias de valores máximos mensais de DWBT. Os estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Bahia, Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná e o Distrito Federal, apresentam as maiores diferenças entre TBS e TBU e, portanto, mostram grande potencial de aplicação de sistemas que usam resfriamento evaporativo direto ou indireto. Dentre esses, a região Nordeste e principalmente a região de clima semiárido (interior dos estados do Piauí e Bahia) têm o mais alto potencial de arrefecimento via resfriamento evaporativo. A distribuição dos valores máximos de DWBT na Figura 4 sugere o grande potencial de resfriamento evaporativo oferecido pelas condições climáticas da vasta região que atravessa o país de nordeste a sudoeste.

Um aspecto importante a ser observado é a clara relação entre as regiões com a maior quantidade de Graus-dia acima do limite superior de conforto e o potencial de resfriamento que elas oferecem.

Figura 4 – Valores médios anuais e médios máximos mensais de “wet bulb temperature depression” (DWBT)



Fonte: próprio autor (2014)

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

As equações preditivas foram aplicadas à base de dados das 411 cidades, sendo determinadas as temperaturas máximas médias e mínimas diárias para cada dia, para os dormitórios norte e sul (NB e SB).

4.1 Diferença entre a temperatura média externa e interna aos dormitórios

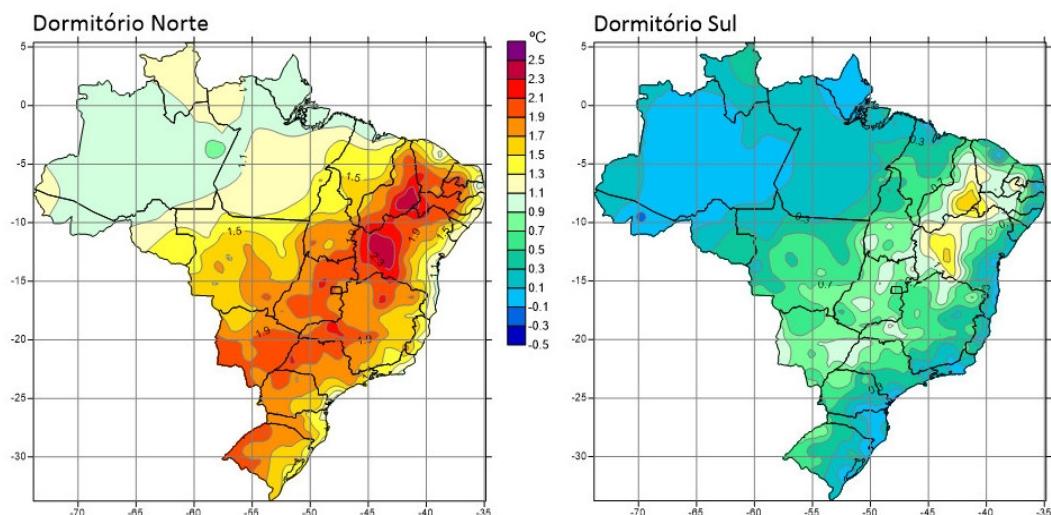
A eficiência de resfriamento de um SPREI pode ser avaliada de duas formas: 1) pela capacidade de reduzir a temperatura interna em relação à temperatura externa; 2) relativamente ao caso-base sem o sistema de resfriamento evaporativo indireto. Na Figura 5, são mostradas as diferenças de temperatura (internas versus externas) para cada dormitório. O dormitório sul, por ter ocupação, apresenta diferenças menos evidentes entre interior versus exterior, porém neste dormitório chega-se a temperaturas médias internas inferiores ao exterior na maior parte do país (380 cidades – 92,5% da amostra). Em mais de 50% das cidades, obtiveram-se diferenças superiores a 0,5 °C (0,5 °C ~ 1,72 °C) no dormitório sul. Em 31 cidades (7,5% da amostra) as diferenças são praticamente nulas entre interior e exterior (região amazônica) nesse dormitório. No caso do dormitório norte, o sistema permite manter temperaturas médias internas sempre inferiores à temperatura média externa, em todo o território nacional (entre 0,8 °C y 2,5 °C de diferença média). As maiores diferenças se observam na região Nordeste e no centro do país. Pode-se notar que as maiores diferenças de temperatura correspondem às zonas climáticas com maior DWBT (conf. Figura 4). O valor mais alto atingido para as diferenças internas versus externas (em termos de média anual) chega a aproximadamente 2,5 °C no NB e 1,7 °C no SB.

4.2 Porcentagem de redução do total de Graus-dia em desconforto

Aqui são apresentadas porcentagens de redução do total de Graus-dia de desconforto no ambiente externo, nos ambientes internos (NB e SB). A Figura 6 mostra isolinhas com as porcentagens obtidas no dormitório norte e no dormitório sul. No caso do dormitório

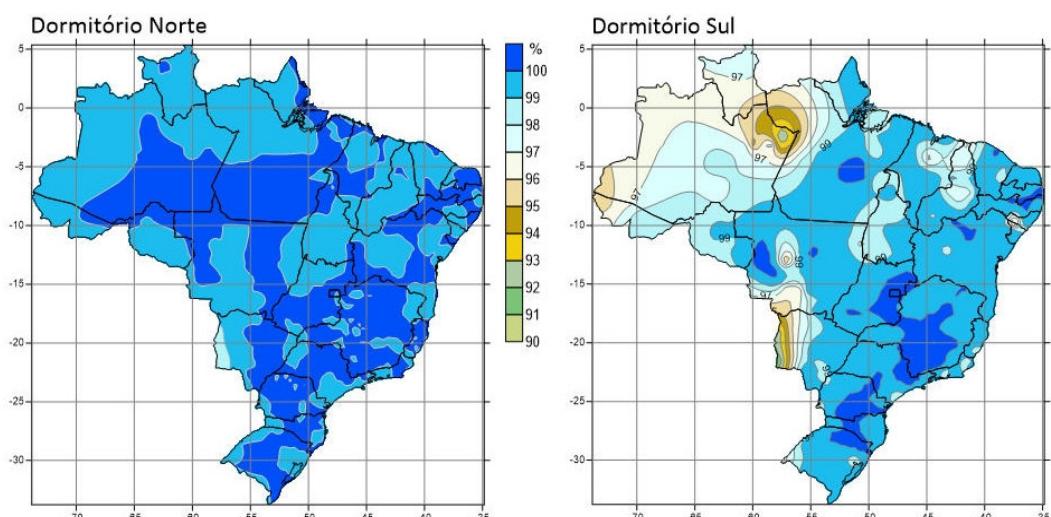
norte, considerado sem ganhos térmicos internos (sem ocupação), nota-se que o SPREI reduz praticamente a zero o tempo de desconforto anual em todo o território nacional. Neste caso, o SPREI proporciona entre 99% e 100% de conforto térmico para temperaturas externas acima do LSC. Em relação ao dormitório sul, pode-se observar que, na maior parte do território nacional, é proporcionado entre 97% e 100% de conforto térmico anual. A porcentagem de redução do total de Graus-dia em desconforto devido à introdução do SPREI é apenas ligeiramente mais baixa (entre 90% e 96%) em algumas zonas pontuais do Pará, Amazonas e Roraima, na região norte, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, na região Centro-Oeste, e alguns lugares de Alagoas, na região Nordeste.

Figura 5 – Diferença entre a temperatura média externa e interna aos dormitórios



Fonte: próprio autor (2014)

Figura 6 – Porcentagem de redução do total de Graus-dia em desconforto



Fonte: próprio autor (2014)

5 CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho são apresentados os resultados da aplicação das equações preditivas do SPREI em 411 cidades brasileiras distribuídas em todo o país. A eficiência do sistema passivo de resfriamento foi avaliada em cada uma destas cidades quanto à sua capacidade de reduzir a temperatura interna em relação à externa, e também quanto à quantidade e porcentagem de Graus-dia/ano acima do limite superior da faixa de conforto térmico para condições climáticas existentes.

Os resultados indicam que o SPREI é capaz de reduzir o desconforto térmico entre 95% e 100% do total de dias anuais, em todo o território nacional. Observou-se que as temperaturas médias internas alcançam valores de até 2,5 °C abaixo das condições externas, e que tais reduções dependem fundamentalmente da diferença entre a temperatura de bulbo seco e a de bulbo úmido.

Ao se introduzir um SPREI como o aqui avaliado, pode-se obter benefícios para o condicionamento passivo de edificações residenciais em todo o território brasileiro. Evidentemente, algumas regiões contam com maior potencial para sua aplicabilidade, como discutido acima, porém, em geral, pode-se cogitar em aplicá-lo mesmo em regiões úmidas ou semi-úmidas, onde normalmente não se recomendaria o resfriamento evaporativo.

Considera-se que, à luz destes resultados, o SPREI avaliado apresenta grande aplicabilidade e potencial para melhoria das condições de conforto térmico, podendo, portanto, contribuir para a redução do consumo de energia das edificações em todo o território brasileiro.

AGRADECIMENTOS

À CAPES pelo apoio financeiro concedido ao Prof. Eduardo Manuel González Cruz, dentro do Programa CAPES/Professor visitante do exterior – PVE”, para participar no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina, durante os anos de 2013 e 2014.

REFERÊNCIAS

- DE DEAR R, BRAGER GS. **Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE standard 55**. Energy and Buildings 2002;34:549–63.
- GIVONI B, GONZÁLEZ E. **Thermal Performance of Indirect Evaporative Cooling in a Tropical Climate**. Proceedings, ASES 2009, Buffalo, USA, 2009.
- GIVONI B. **Passive and Low-Energy Cooling of Buildings**. New York: Van Nostrand Reinhold; 1994.
- GONZÁLEZ E, MACHADO MV, RODRÍGUEZ L, LEÓN G, SOTO MP, ALMAO N. VBP-1: **A Sustainable Urban House for Low-Income Family in a Tropical Climate**. PLEA 2000. Cambridge, UK, 2000.
- GONZÁLEZ E., KRÜGER, E., **Enfriamiento evaporativo indirecto: predicción del comportamiento térmico en ciudades brasileñas**. Anais do, ENCAC 2013, Brasilia, Brasil, 2013.
- GONZÁLEZ, E., ROJAS A., BRAVO G., GALLARDO M., GONZÁLEZ R., PÉREZ L., TSOÍ E, FALCÓN R. **Desempeño térmico de la VBP-1: temperaturas características, factor decremental e retraso térmico**. Memorias de la 30 Semana Nacional de Energía Solar, ANES 2006, Veracruz, México.

KRÜGER, E., GONZÁLEZ, E., GIVONI, B. **Effectiveness of indirect evaporative cooling and thermal mass in a hot arid climate.** Building and Environment 45 (2010) 1422–1433

RORIZ, M. **Base de dados climáticos de 411 municípios brasileiros.** [S.l.]: ANTAC, 2012. Disponível em: http://www.rORIZ.eng.br/epw_9.html. Acesso em: 12/04/2013.