

USO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS NA CLIMATIZAÇÃO

Genyr Kappler – genyrkappler@gmail.com

Fernanda Haeberle – fernandahaeberle@gmail.com

João Batista Dias – joabdb@unisinos.br

Paulo Roberto Wander – prwander@unisinos.br

Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Laboratório de energia solar fotovoltaica.

A3 - Fontes Energéticas: Energia Geotérmica; Uso de Energia Solar

Resumo. Este trabalho apresenta as linhas gerais de um Sistema bioclimático ativo Terra-Água-Ar (STAR). Na pesquisa foi avaliado o uso da estabilidade térmica do solo na climatização de ambientes. O solo a uma determinada profundidade conserva sua temperatura equivalente à temperatura média anual do clima local. O uso desta estabilidade térmica é feita através de uma cisterna enterrada que funciona como uma bateria térmica. Para possibilitar as trocas de calor entre o solo e a edificação, uma bomba de água faz a água circular por um trocador de calor com ventilador acoplado instalado no interior de um protótipo de ambiente climatizado (AC). A bomba e o ventilador são alimentados por energia solar fotovoltaica, e estes movimentam os fluidos água e ar, respectivamente. A unidade experimental foi construída e gerou dados das temperaturas do solo, da cisterna e do ambiente climatizado (AC) entre os meses de setembro de 2015 e fevereiro de 2016. O sistema apresentou variação da temperatura no AC em padrões mais estreitos que os sugeridos pela norma ASHRAE 55-2004 para ambientes naturalmente climatizados, no entanto mostrou-se adequado para manter as temperaturas do AC em condições satisfatórias para o mês de outubro. Os dados gerados em dezembro e janeiro também foram analisados para a validação do sistema, e por fim, foi realizado um modelamento teórico em escala real do STAR.

Palavras-chave: Energia geotérmica, Energia solar fotovoltaica, Energias renováveis, Climatização, Sustentabilidade

1. INTRODUÇÃO

Energia é considerada a coluna dorsal da economia moderna, e seu consumo se intensifica nas sociedades emergentes a medida que sua qualidade de vida melhora. O consumo da energia residencial tem crescido 1,5% ao ano, de 52 quadrilhões de BTU em 2010, para 82 quadrilhões de BTU em 2040 (EIA, 2013). Apenas para condicionar o ar de ambientes residenciais e comerciais, se estima um aumento no consumo de energia entre 79% e 84% de 2010 à 2050 (BEN, 2014). Atualmente, tanto aquecimento e refrigeração do ar, assim como geração de água quente, são responsáveis por cerca de metade do consumo global de energia em edifícios (EIA, 2013).

Neste contexto WorldGBC (2015) sugere que o projeto, construção e operação das edificações estejam em harmonia com o ambiente natural. A agência ambiental norte americana, *EPA-green buildings*, encoraja o uso de fontes energéticas renováveis locais (Kwork e Grondzik, 2007) e, surgido na Europa, o conceito *Netzeb* defende que as edificações produzam ao menos a energia que consumam numa base anual (Letti, 2012).

O uso da inércia térmica do solo como fonte geotérmica para condicionar o ar de edificações já é bem desenvolvido. A temperatura do solo em certa profundidade é definida, entre outras variáveis, pela temperatura média local do ambiente, e sofre pouca variação ao longo do dia e do ano. Em relação ao aquecimento, o melhor uso é esperado em cidades com temperatura média anual entre 13 °C e 18 °C. Já para refrigeração, ainda não foi definida uma convenção, mas se sabe que quanto mais baixa a temperatura do solo na estação quente, e quanto maior a amplitude do ar ambiente, melhor é a performance do sistema (Kwork e Grondzik, 2007). Dentre as diversas estratégias de condicionamento natural do ar por geotermia, a maior parte dos trabalhos focam no Sistema Terra-Ar (TA), no qual dutos são enterrados e o ar troca calor com o solo enquanto passa nos dutos e entra na edificação condicionando a mesma (Wu, 2007; Zkowski, 2017; Bansal, 2009; Lee, 2007; Tiwari, 2014; Bisoniya, 2014; Choorapulakkal, 2014). Em trabalhos mais recentes o elemento água é incorporado ao sistema, no qual os dutos são submersos, em lagos, por exemplo, num procedimento similar ao sistema TA, ou ainda fazendo uso de tubulações de menor diâmetro que transportam água e que são enterrados em poços verticais com profundidades em torno de 50 m, onde o calor é trocado em trocadores tipo *fan-coil* na edificação (Deng, 2011).

Este trabalho busca analisar o potencial de climatização do STAR, fazendo uso de tanques de água enterrados para facilitar o uso do potencial geotérmico do solo para climatização natural, tendo ainda um sistema de geração de energia solar fotovoltaica para alimentar os componentes eletromecânicos do sistema, que promovem a circulação dos fluidos água e ar, evitando assim o uso de energia da rede da concessionária para esse fim.

2. DESCRIÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL

A Figura 1 mostra o esquema do STAR, com a fonte de energia solar fotovoltaica, o AC com o trocador de calor e a cisterna. Mostra ainda as ligações elétricas que acionam o sistema e os dutos de água que permitem a circulação da água.

O funcionamento do STAR consiste na troca de calor entre a água de um reservatório, enterrado em certa profundidade, com o ar do interior do AC. Uma bomba faz a água circular entre a cisterna e um trocador de calor tipo *fan coil* no interior do AC. Para que a água da cisterna troque calor com o ar no interior do AC, o ventilador do trocador de calor é acionado. Tanto a bomba, quanto o ventilador, são alimentados por energia elétrica produzida por um sistema solar fotovoltaico.

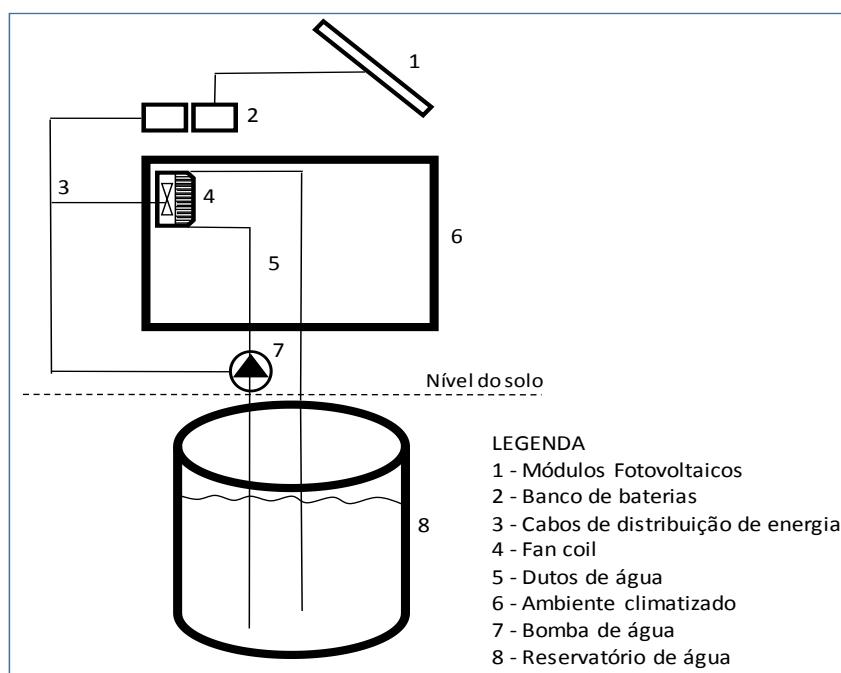


Figura 1. Esquema do STAR

A unidade experimental foi organizada em três seções. A primeira seção discute as fontes de energia elétrica: a rede da concessionária e geração solar fotovoltaica. Esta segunda fonte é uma microrrede híbrida fotovoltaica para atendimento de energia em locais remotos, a qual foi utilizada para alimentar parte da energia utilizada neste experimento. A segunda seção discute as trocas térmicas entre o AC e o solo, onde temos reservatório, uma bomba de água, um trocador de calor com ventilador, o AC e doze sensores de temperatura RTD PT 100. A terceira seção trata dos equipamentos de aquisição e gerenciamento de dados. Um sistema de aquisição de dados *Agilent*, um variador de tensão *Variac*, uma fonte estabilizada *Goldstar* e um computador.

Na seção 1 são descritas as duas fontes de energia elétrica utilizadas na unidade experimental. A da rede da concessionária que alimentou a resistência elétrica, os equipamentos de controle e o computador. Já para o acionamento da bomba de água e o ventilador, ora era utilizada a energia solar fotovoltaica, ora a rede da concessionária. A decisão do gerenciamento do uso da fonte fotovoltaica foi arbitrária, conforme os ensaios desejados. A Fig. 2 mostra o sistema utilizado durante alguns ensaios.



Figura 2. Microrrede híbrida fotovoltaica para locais remotos

Na seção 2 ocorrem as interações e trocas térmicas. A Fig. 3 mostra o reservatório, o *fan coil* e o AC. O AC tem um volume de $0,6 \text{ m}^3$ e em seu interior foi gerado uma potência térmica, tanto pela dissipação térmica do ventilador, como pela resistência elétrica que teve sua potência ajustada pelo variador de tensão *Variac*. A medida que a temperatura no interior do AC aumentava, a troca térmica no *fan coil* se intensificava até a temperatura atingir um ponto de equilíbrio. A bomba de água e o ventilador do trocador de calor foram mantidos acionados em ciclo contínuo promovendo troca de calor entre a água e o ar no interior do AC, enquanto a cisterna dissipa este calor para o solo. A cisterna tem capacidade de $0,38 \text{ m}^3$ e foi instalado a uma profundidade média de 1 m, com sua base a 2 m e topo a 0,5 m da superfície, respectivamente. A água foi captada no fundo da cisterna e circulada pelo *fan coil* removendo calor.



Figura 3. Da esquerda para a direita: o Reservatório, o *fan coil* e o ambiente climatizado

Ainda na seção 2, sensores de temperatura foram responsáveis por monitorar a temperatura do sistema, permitindo obter tanto dados qualitativos, quanto dados quantitativos. Assim, pôde-se averiguar os valores de temperatura em relação à norma ASHRAE e validar o sistema, permitindo dimensionar a cisterna para uso em escala real.

Na seção 3 são descritos os equipamentos de controle mostrados na Fig. 4. O variador de tensão foi utilizado para ajustar a tensão desejada na resistência elétrica, enquanto o sistema de aquisição de dados registrava as temperaturas e a tensão em um software da *Agilent* instalado no computador. Por fim foram geradas as planilhas de dados e gráficos.



Figura 4. Equipamento de aquisição de dados Agilent e fontes de tensão a.c. e c.c.

3. METODOLOGIA

O STAR gerou dados entre setembro de 2015 e fevereiro de 2016. O sistema permaneceu ativo, bomba e ventilador funcionando, ininterruptamente, salvo em experimentações específicas. Já a resistência elétrica era acionada em períodos específicos para a verificação do comportamento do sistema. Foram destacados três eventos que caracterizam o sistema, sendo o mês de outubro o primeiro evento, seguido pelos eventos 2 e 3 em dezembro e janeiro, respectivamente.

Pelas observações no evento 1, pôde-se detectar algumas limitações para se determinar com acuracidade a remoção de calor do AC e o do comportamento das trocas de calor com o solo. Isso permitiu adequações e ajustes nos parâmetros para sanar as dificuldades.

Os dois eventos subsequentes, dos meses de dezembro de 2015 e janeiro de 2016 foram definidos especificamente para uma análise térmica do sistema. Para o mês de janeiro utilizou-se as mesmas configurações de dezembro, visando validar os valores do mês anterior. No final do mês de novembro foi instalado no solo o décimo segundo sensor de temperatura, possibilitando avaliar com melhor exatidão a interferência do calor proveniente do AC.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta a variação das temperaturas do solo (T_{solo}) e do ar ambiente ($T_{ar,amb}$) ao longo do período do estudo, sendo que a partir do mês de novembro foi adicionado o sensor de temperatura de referência do solo $T_{solo,ref}$. O sensor de medição da $T_{solo,ref}$ foi instalado em um ponto distante 4 m da cisterna, possibilitando avaliar com melhor exatidão a variação do calor proveniente da cisterna com a T_{solo} no entorno.

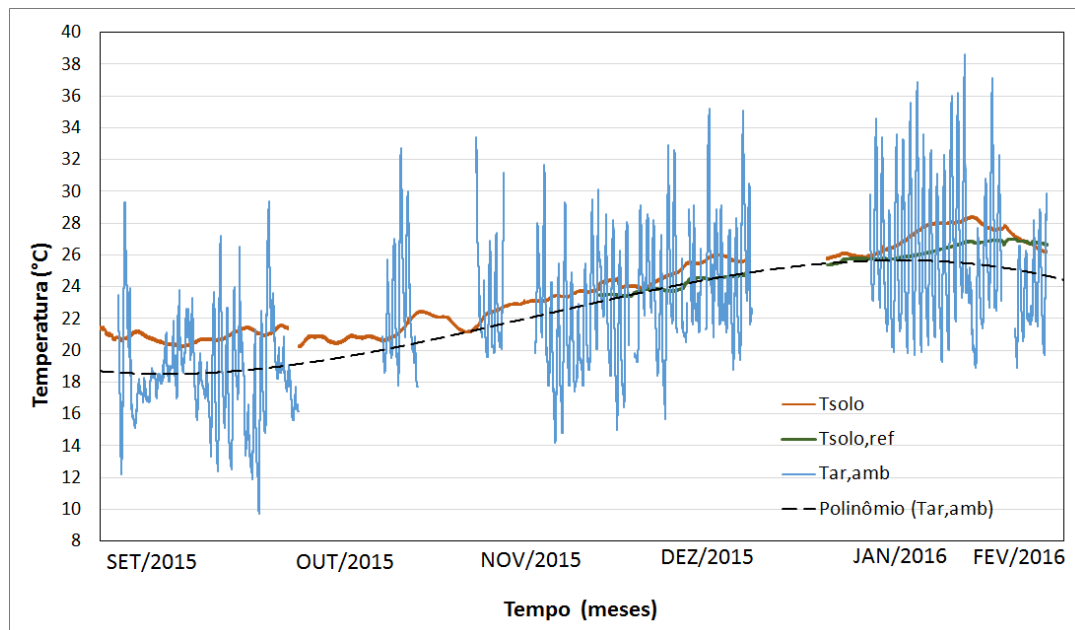


Figura 5. Variação da temperatura do solo, temperatura do solo de referência, temperatura do ar ambiente e temperatura média do ar ambiente em São Leopoldo

Quanto ao comportamento da T_{solo} , pode-se afirmar que ela acompanhou a temperatura média do ar ambiente, que pode ser observada pela curva do polinômio $T_{ar,amb}$. Tomando como referência dados da Fig. 6, que mostra as temperaturas do solo para três profundidades durante o período de um ano para a cidade de Porto Alegre, previa-se que a temperatura T_{solo} máxima não ultrapassasse os 24 °C no período mais quente do ano. No entanto, foi observado que $T_{solo,ref}$ superou os 27,5 °C no final do mês de janeiro e início de fevereiro. Este comportamento da temperatura, acima da média para a profundidade de 1 m, é atribuído principalmente a dois fatores; primeiro, ele foi caracterizado como resultado de um aterro, arenoso, úmido e com baixa resistência térmica, em torno de 0,03 °CW⁻¹; e segundo, a sua orientação geográfica está voltada para a face norte e sem proteção de sombreamento, que o expõe a um grande período de insolação.

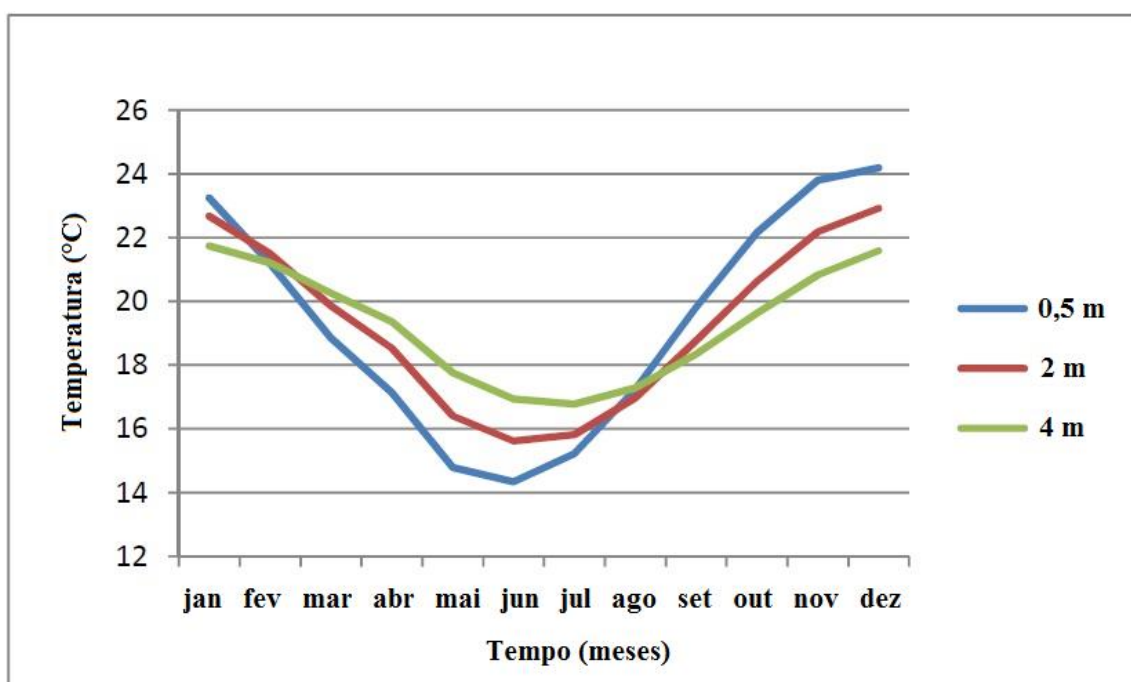


Figura 6. Temperaturas do solo em Porto Alegre para três profundidades. Fonte: Horbach, 2010

A Figura 6 mostra ainda que, à medida que aumenta a profundidade, diminui a oscilação térmica do solo. Com base nos dados obtidos e a partir de um estudo térmico na cisterna de água e no solo, foram determinadas variáveis necessárias para obter-se a profundidade ideal do solo, ou seja, onde sua temperatura permanece inalterada durante o ano. A Fig. 7 mostra o intervalo de variação da temperatura em relação a profundidade. Assim, para o solo analisado, a profundidade ideal para o aproveitamento geotérmico se encontra a partir dos 6 m, onde a temperatura ao longo do ano deve ficar em torno de $18^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

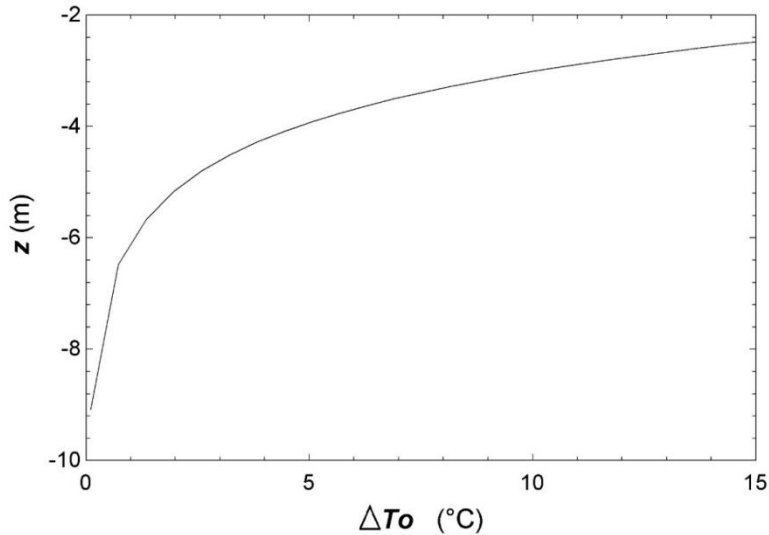


Figura 7. Variação da temperatura (ΔT_o) em relação à profundidade (z)

A Figura 8 mostra a temperatura no interior do ambiente climatizado (T_{AC}), temperatura no fundo da cisterna (T_{cf}), T_{solo} , $T_{solo,ref}$, $T_{ar,amb}$ e da temperatura média do ar ambiente, o polinômio ($T_{ar,amb}$), com os três eventos que representam o comportamento das trocas térmicas no sistema, destacados nos oblongos.

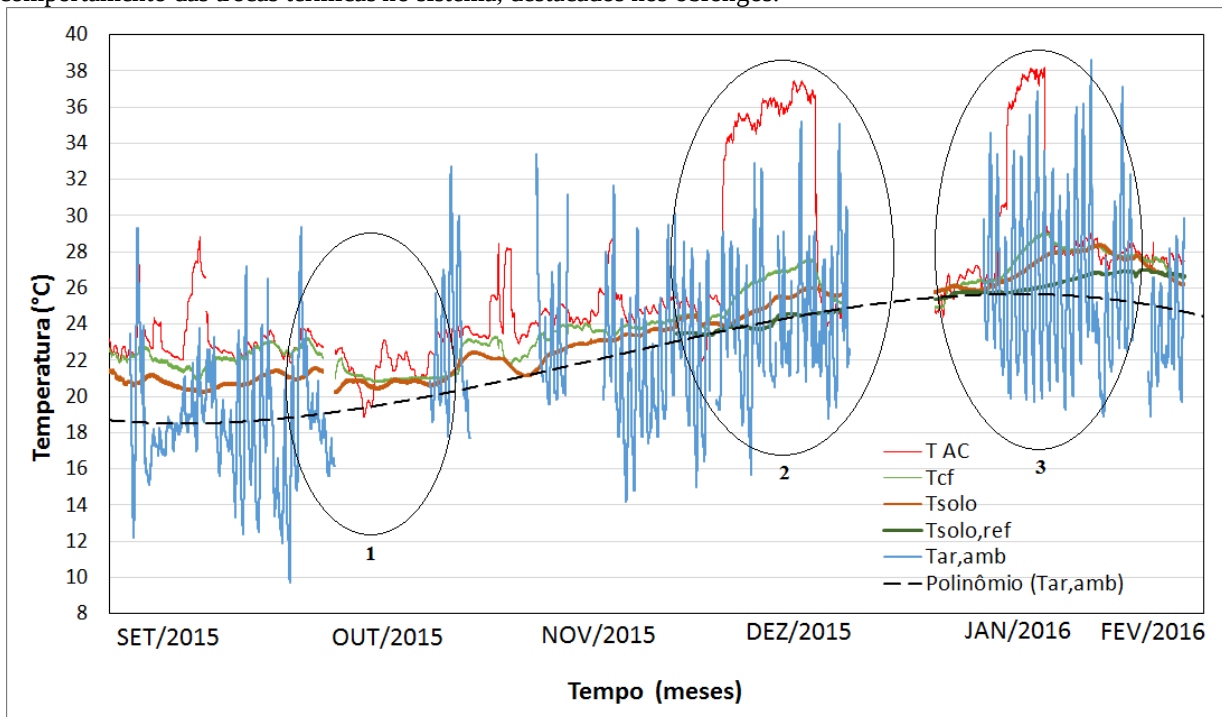


Figura 8. Temperaturas do experimento no período de setembro de 2015 a fevereiro de 2016, em São Leopoldo

No evento 1, representado pela Figura 9, procedeu-se um experimento com o sistema operando de modo contínuo, com uma vazão de água de $5,5 \times 10^{-2} \text{ kg s}^{-1}$ e taxa de entrada de calor em torno de 12 W. As observações permitiram uma análise qualitativa, por se observar a remoção de calor e a manutenção da qualidade da temperatura no AC, porém, os dados obtidos não se mostraram confiáveis para uma análise quantitativa, pois os valores das diferenças de temperatura entre entrada e saída de água no trocador de calor estavam muito próximos dos valores da incerteza dos equipamentos de medida. A remoção de calor fica evidente quando, ao se desligar a circulação de água pelo trocador de calor em setembro e novembro, visto na Fig. 8, a temperatura T_{AC} aumenta. A troca de calor no solo foi possível analisar ao se instalar mais

um sensor de temperatura, $T_{solo,ref}$, à partir do mês de dezembro, conforme observado na Fig. 8. O modelo experimental mostrou que o STAR manteve a temperatura do AC entre 18,9 °C e 23,6 °C durante o mês de outubro de 2016, enquanto que a $T_{ar,amb}$ variou entre 9,9 °C até 32,6 °C no mesmo período. Este resultado foi obtido para a temperatura T_{solo} próxima a 21 °C e para T_{cf} próxima a 23 °C. Verifica-se assim que o sistema manteve a temperatura do ar do AC dentro dos padrões ASHRAE para espaços naturalmente condicionados (ASHRAE, 2004).

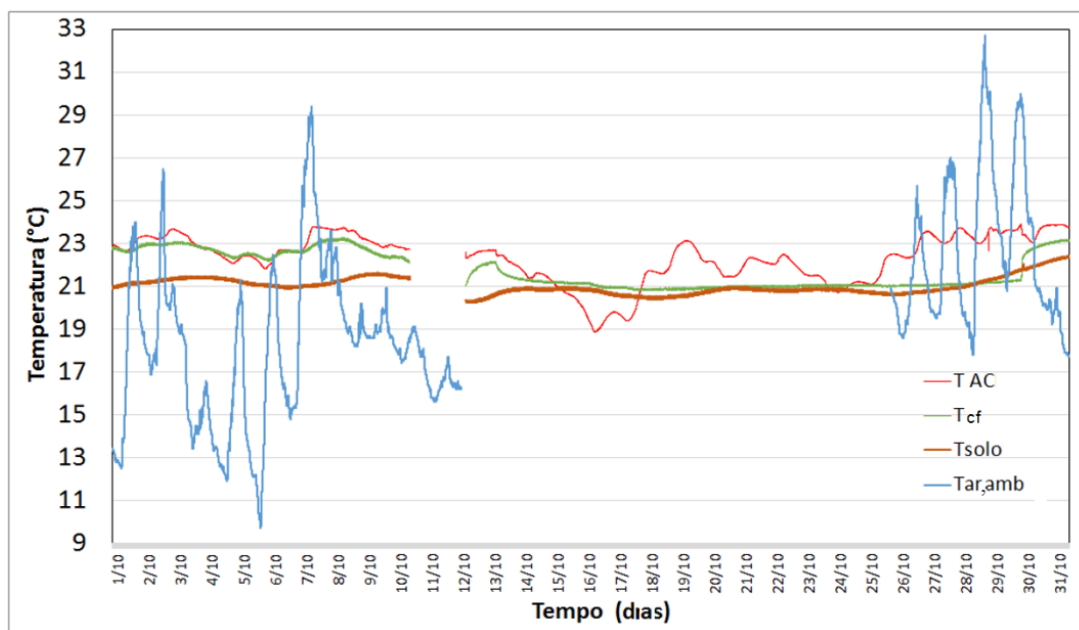


Figura 9. Temperaturas do STAR no mês de outubro de 2015

Devido às limitações oferecidas no experimento de outubro, foi redefinida a vazão na bomba para $8,7 \times 10^{-3} \text{ kgs}^{-1}$ e a taxa de calor gerada pela resistência foi aumentada para 119,35 W para o mês de dezembro e 117,04 W para o mês de janeiro, buscando aumentar o diferencial da temperatura no trocador de calor para valores próximos a 3 °C, possibilitando assim validar o desempenho térmico do sistema. Ainda, foi instalado o sensor $T_{solo,ref}$ para avaliar o comportamento do calor no solo.

As Figuras 10 e 11 mostram os eventos de dezembro e janeiro, respectivamente. O evento de dezembro transcorreu por onze dias, nele pode-se observar que T_{AC} aumenta e estabiliza próxima a 36,5 °C e, assim que a resistência elétrica é desligada, sua temperatura reduz ficando próxima ao nível das temperaturas do solo e água. Em janeiro, o experimento é repetido por um período de cinco dias e, conforme esperado, os resultados são idênticos. Neste último a temperatura no interior do AC ficou em torno de 37,5 °C, um pouco mais alta comparada ao mês anterior, devido a temperatura $T_{solo,ref}$ também estar mais alta, pois na profundidade de 1 m ela ainda acompanha a variação da temperatura ambiente.

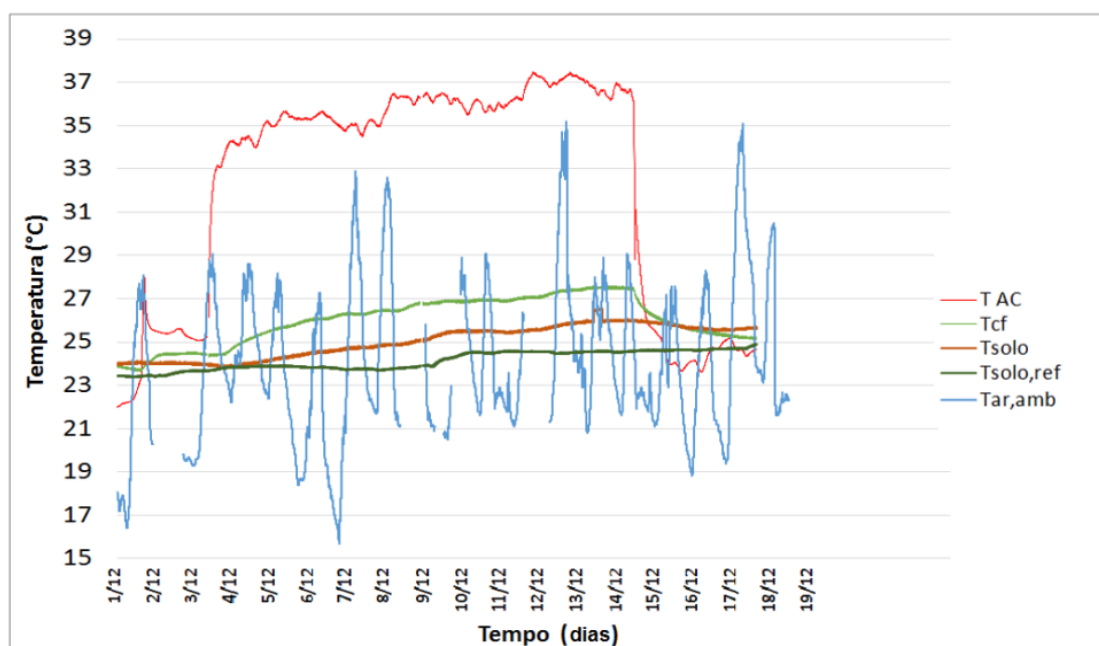


Figura 10. Temperaturas do STAR em dezembro

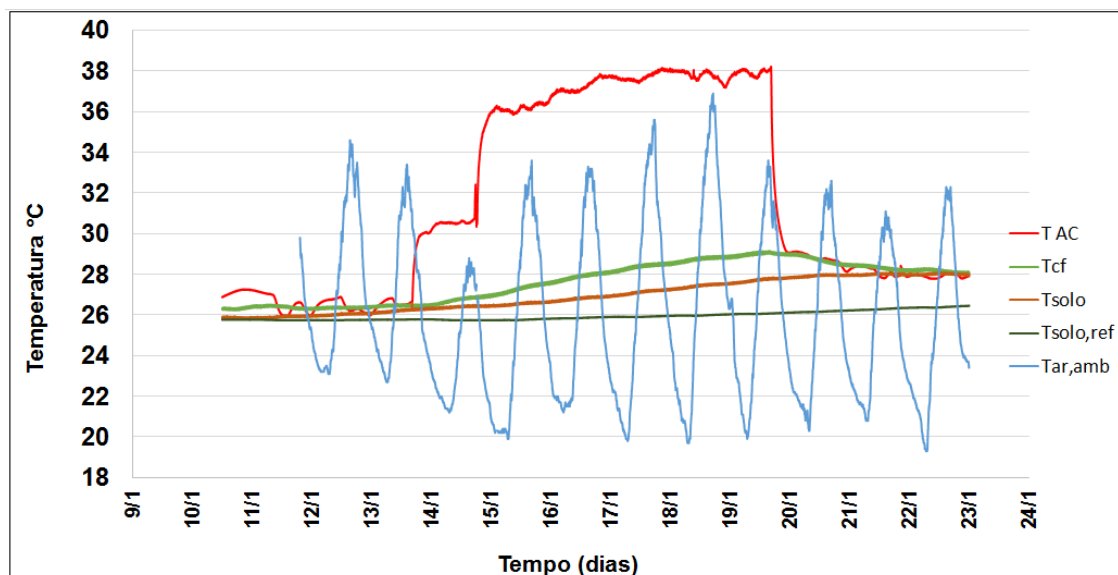


Figura 11: Temperaturas do STAR em janeiro

Em ambos eventos, dezembro e janeiro, se observa aumento nas temperaturas T_{cf} e T_{solo} , que é consequência da remoção de calor AC, sua transferência para a cisterna e dissipação para o solo do entorno. A dissipação do calor pode ser observada quando do desligamento da resistência elétrica, a temperatura T_{cf} começa a reduzir até chegar próxima a temperatura T_{solo} . Observa-se também que surge uma diferença entre as temperaturas T_{solo} em relação a $T_{solo,ref}$, possibilitando equacionar o dimensionamento do sistema para taxas específicas.

Depois de validado, o STAR foi teoricamente previsto para uma aplicação em escala real. Para isso se considerou três taxas de calor a serem removidas de edificações com isolamento perfeito. Estas taxas foram propostas como sendo equivalentes a sistemas de condicionamento eletro mecânico comercialmente disponíveis no mercado. Assim, se determinou o tamanho da cisterna de água e a vazão da bomba para a condição geográfica e de solo do experimento. A Tab. 2 traz o resumo dos valores calculados.

Tabela 1. Modelamento teórico em escala real para três diferentes taxas de calor

Equipamento comercial (BTU)	Potência (W)	Tempo de operação (h)	ΔT entre reservatório e solo ($^{\circ}C$)	Vazão da bomba ($Lmin^{-1}$)	Volume do reservatório (m^3)
7500	2198	12	4	10	5,4
10000	2930	12	4	14	7,3
18000	5275	12	4	26	13,4

5. CONCLUSÃO

Foi proposto neste trabalho a montagem e análise do comportamento térmico de um sistema bioclimático ativo Terra-Água-Ar (STAR). No STAR buscou-se avaliar o uso de recursos renováveis localmente disponíveis, como o geotérmico e o solar fotovoltaico, visando futuramente climatizar edificações. Através de uma unidade experimental, o uso de uma cisterna enterrada foi avaliado para climatizar um ambiente isolado em pequena escala pelo uso de um trocador de calor tipo *fancoil*. O STAR se mostrou adequado para manter a temperatura do AC em boas condições térmicas durante o mês de outubro, período em que foi avaliado para este fim. Ainda, em ensaios realizados nos meses de dezembro e janeiro o sistema foi validado.

O STAR pode também ser instalado em regiões onde não exista o fornecimento de energia por parte da rede elétrica da concessionária, fazendo uso da energia solar fotovoltaica ou ainda, reduzir a demanda por energia para climatização em locais onde a rede elétrica esteja presente, desonerando os sistemas de geração e liberando recursos energéticos para fins mais nobres.

Agradecimentos

Somos gratos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos que permitiu a dedicação necessária para o desenvolvimento da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- ANSI/ASHRAE STANDARD 55. ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2004 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ANSI/ASHRAE. Atlanta, p. 30. 2004.
- BANSAL, V. et al. Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating. Energy and Buildings, Jaipur, India, 29 Maio 2009.
- BEN, 2014. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2014. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Brasília. 2014. <http://www.mme.gov.br>
- BISONIYA, T. S.; KUMAR, A.; BARENDAR, P. Study on Calculation Models of Earth-Air Heat Exchanger Systems. Journal of Energy, Bhopal, India, 04 set. 2014.
- CHORAPULAKKAL, A.; NOGUCHI, M. A proposal 'Water tube heat exchanger' space cooling system performance analysis. Civil Engineering and Architecture, Glasgow, UK, 2014.
- DENG, N. et al. Numerical analysis of three direct cooling systems using underground energy storage: A case study of Jinghai County, Tianjin, China. Energy and Buildings, Tianjin, PR China, 26 out. 2011. 7 pgs.
- EIA, 2013. International Energy outlook 2013: with projections to 2040. U.S. Energy Information Administration. Washington. 2013. DOE/EIA 0484(2013). www.eia.gov/ieo/. Accessed in October 2015.
- HORBACH, C. S. Estudo de sistemas de ventilação por tubos enterrados. UFRGS. Porto Alegre, p. 23. 2010.
- KWORK, A. G.; GRONDZIK, W. T. The Green Studio Handbook: Environmental Strategies for Schematic Design. [S.l.]: Elsevier. 2007.
- LEE, K. H.; STRAND, R. K. The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. Science Direct – Energy and Buildings, Champaign, IL, United States, 13 Abril 2007.
- LETTI, A. A. Simulação do desempenho termo-energético de uma casa protegida pela terra. UFRGS. Porto Alegre, p. 28. 2012.
- TIWARI, G. N. et al. Design of an earth air heat exchanger (EAHE) for climatic condition of Chennai, India. Open Environmental Sciences, New Delhi, India, 26 June 2014.
- WorldGBC. World Green Building Council. Available: <http://www.worldgbc.org/infocenter/drive-toward-healthier-buildings/>. Assessed 12/2015.
- WU, H.; WANG, S.; ZHU, D. Modelling and evaluation of cooling capacity of earth-air-pipe systems. Science Direct Energy Conversion and Management, Guangzhou, P.R. China, 22 Fevereiro 2007. 10.
- Zukowski, M., Sadowska, B., Saroslek, W. Assessment of the cooling potential of an earth-tube heat exchanger in residential buildings. Environmental engineering. The 8th International Conference. Vilnius, Lithuania. May 19–20, 201. ISSN 2029-7106.

RENEWABLE ENERGY USE IN CONDITIONING AIR

Abstract. *This paper presents the outlines of an Earth-Water-Air active bioclimatic system (STAR). The survey assessed the use of soil thermal stability in conditioning the air of buildings. The soil at a given depth maintains its temperature equivalent to the annual average temperature of the local climate. The use of this temperature stability is made by using a submerged cistern that acts as a thermal battery. To perform heat exchange between the ground and the building, a water pump causes water to circulate through a heat exchanger coupled with a fan installed inside an air-conditioned environment prototype (AC). The water pump and the fan are powered by photovoltaic solar energy, moving the fluids water and air, respectively. An experimental unit was built and generated data of soil temperatures, the cistern and the air-conditioned environment (AC) throughout the months of September 2015 and February 2016. The system demonstrated that the temperature variations in the AC were narrower than the standards ASHRAE 55-2004 to naturally air-conditioned environments, proving its suitability in keeping room temperature adequate in October. The data obtained during December and January were assessed for system validation, and at last, a theoretical real scale model was made.*

Key words: Geothermal energy, Solar photovoltaic energy, Renewable energies, Air conditioning, Sustainability