AR CONDICIONADO SOLAR – CICLO DE ADSORÇÃO

Rafael de Oliveira Barreto – rbarreto.eng@gmail.com
Mestrando em Engenharia de Materiais- CEFET MG
Pollyanne de Oliveira Carvalho Malaquias – pollyannem7@gmail.com
Matheus de Mendonça Herzog– matheus.herzog@cemig.com.br
Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG
Luciana Carvalho Penha – luciana@vert.arq.br
VERT Arquitetura e Consultoria
Lucio Cesar de Souza Mesquita – mesquita@thermosolconsulting.com
Thermosol Consulting
Elizabeth Marques Duarte Pereira– bethduarte00@gmail.com
Minas Gerais Educação/UNA, Grupo de Estudos e Pesquisa em Energia (GEPEN)

Resumo. *O uso de sistemas de ar condicionado solar vem crescendo em países como Estados Unidos, China e membros da União Europeia. Entretanto, a despeito dos altos níveis de insolação e do aumento do uso de sistemas convencionais no país, tal tecnologia ainda se encontra restrita ao ambiente acadêmico. Este trabalho apresenta o dimensionamento, projeto, instalação e monitoração de um sistema piloto de ar condicionado solar que utiliza um chiller de adsorção de 10 kW, sem unidade de backup. A carga térmica foi calculada através de simulação computacional no programa EnergyPlus, sendo consideradas as características do ambiente, conforme parâmetros estabelecidos pela ASHRAE. O pré-dimensionamento e avaliação do desempenho de instalações solares para refrigeração e aquecimento de água foram realizados com o programa PISTACHE, ferramenta livre, desenvolvida por TECSOL e CEA/ INES. Nessa simulação, foram utilizados parâmetros de sete modelos de seis diferentes fabricantes de coletores solares comercializados no país e com mais alto desempenho térmico, para atender aos níveis de temperatura necessários no AC Solar. Os coletores solares instalados são de fabricação nacional com área total de 44 m² e classificação A no Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO. Para monitoração da operação e avaliação do desempenho do sistema foi desenvolvido um supervisório que utiliza o programa LABVIEW, sendo medidos: temperatura (11 pontos); vazão (4 pontos), temperatura e umidade do ar no espaço refrigerado e irradiação solar incidente no plano dos coletores. A aquisição de dados é feito por multímetro de varredura AGILENT 34972A. O coeficiente de desempenho (COP) medido é da ordem de 0,63. O sistema piloto foi instalado no Laboratório de Monitoração do Grupo de Estudos e Pesquisa em Energia – GEPEN – no Campus Estoril do Centro Universitário Belo Horizonte – UNIBH .*

Palavras-chave: *Ar condicionado solar, Ciclo de adsorção, Coeficiente de desempenho*.

---

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica para acionamento dos condicionadores de ar é fortemente dependente das condições climáticas e da conjuntura econômica. Segundo levantamento da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), o consumo de energia elétrica no setor residencial aumentou 3,2% em relação ao ano anterior, com destaque para a região Sul e as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro. Este aumento é justificado pelas elevadas temperaturas que ocorreram principalmente no mês de março/2017. Destaca-se que essa correlação entre elevados níveis de irradiação solar incidente, durante o verão, e de temperaturas ambientes aponta para adequação do emprego da tecnologia solar em sistemas de condicionamento de ambiente.

Infelizmente, nas regiões Norte e Centro-Oeste, as famílias consumiram menos energia do que em 2016, ou seja, os consumidores abriram mão do conforto em função da situação econômica.

Para o setor Comercial e de Serviços, outro usuário potencial dos sistemas de condicionamento solar, no primeiro trimestre de 2017, o aumento no consumo de energia elétrica foi de apenas 0,5% em relação à igual período de 2016.

Segundo ELETROBRAS, 2009, 47% do consumo energético comercial é proveniente de sistemas de Ar-condicionado. Dos quais segundo (Alexandre,2016) cerca de 70% do consumo elétrico são devidos aos Chiller's.

Em relação uso de sistemas de condicionamento solar de ambientes, as maiores obras declaradas estão localizadas no Arizona/, EUA e em Singapura (Solid,2017). A obra americana tem capacidade de 3,4 MWth e área coletora de 4.865 m². O ciclo de absorção utiliza de brometo de lítio como fluido absorvente. O sistema entrou em operação em maio de 2014 e sua capacidade de refrigeração por absorção é de 1,75 MW (500 TR).

Em Singapura, o sistema de resfriamento solar de 1,76 MWth foi instalado em agosto 2011 com uma capacidade total de 2,73 MWth e 3.900 m² de área coletora, fornecendo água quente e refrigeração para cerca de 2.900 alunos que vivem e estudam no recém-criado campus.

2. TECNOLOGIAS AC SOLAR

A energia solar para uso em resfriamento pode ser convertida de duas maneiras principais, conforme apresentado na Fig. 1: eletricidade gerada por painéis fotovoltaicos, que será utilizada posteriormente em equipamentos convencionais que operam em ciclos de compressão de vapor e a refrigeração solar térmica, produzida a partir do aquecimento do fluido de trabalho em coletores solares.

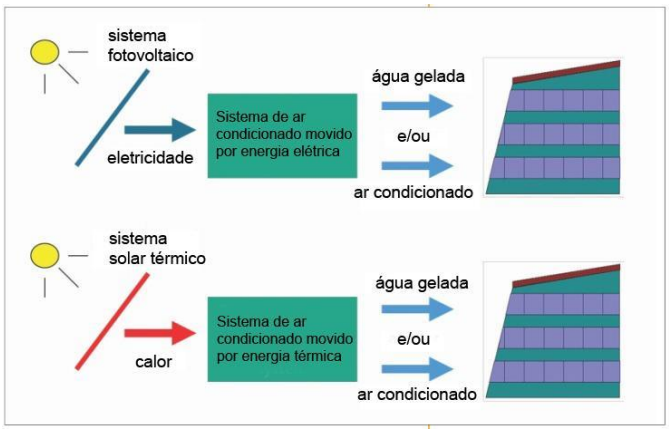


Figura 1- Tipos de AC solar

Os sistemas de AC Solar térmico são compostos por coletores solares de alto desempenho operando em temperatura entre 90º C e 150º C. Nessa aplicação, podem ser utilizados coletores solares planos especiais ou de tubos evacuados, além de coletores concentradores e refletores lineares de Fresnel.

A radiação solar disponível no local da instalação é absorvida pelos coletores solares que conduzem o calor, geralmente para um fluido de trabalho (água, ar ou outros). Em seguida, o chiller usa o calor desse fluido para geração de frio.

O princípio da refrigeração solar, proposto por Pridasawas e Lundqvist (2003), baseia-se em que todo calor, trabalho mecânico e eletricidade podem ser utilizados para movimentar um ciclo de refrigeração. Do ponto de vista termodinâmico, existem vários processos concebíveis para a transformação de irradiação solar em efeito de refrigeração. A escolha do tipo apropriado para uma aplicação em particular vai depender da demanda de refrigeração e da forma em que a energia de entrada (calor, eletricidade) esteja disponível, como é mostrado na Fig. 2.

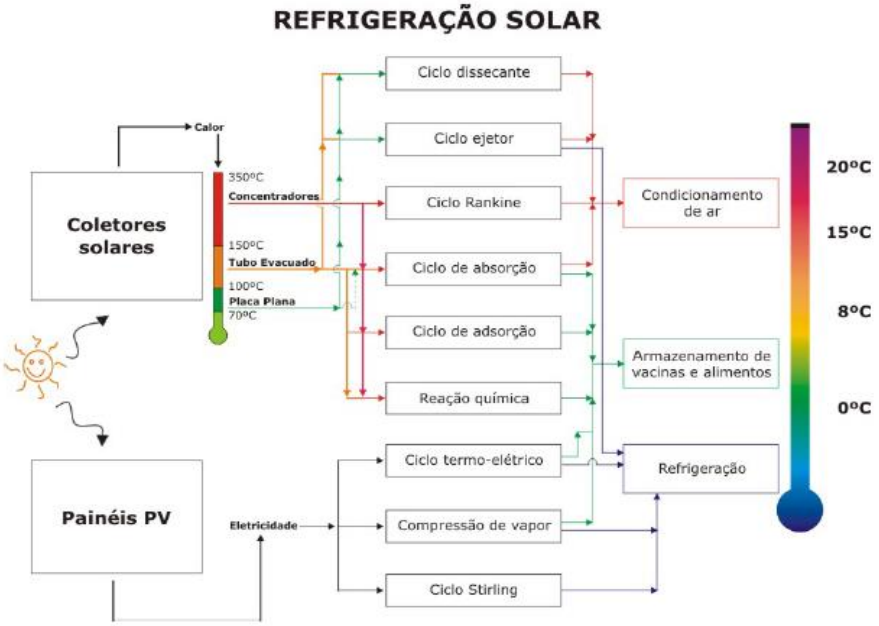


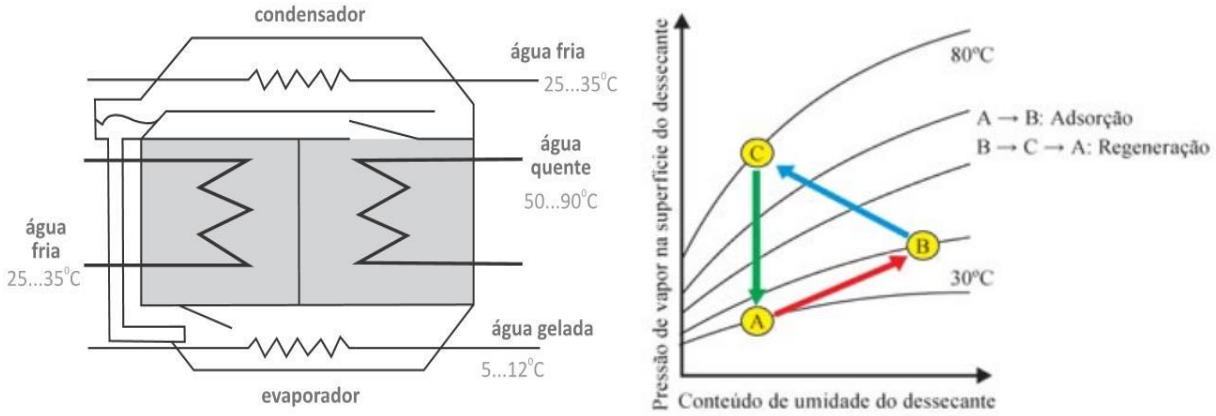
Figura 2 - Sistemas de Refrigeração Solar

2.1 Ciclo de Adsorção

Na tecnologia de Refrigeração Solar por meio de ciclo de adsorção, são empregados adsorventes sólidos, sendo que os sistemas mais comuns utilizam os seguintes pares: sílica gel-água e zeolita-água. Esses materiais resolvem os problemas de corrosão e toxicidade associados às soluções comumente empregadas em absorção. Outra vantagem da adsorção é que ela possibilita trabalhar com temperaturas de geração em torno de 55°C.

A desvantagem é que tais ciclos não são contínuos, pois não se pode mover o adsorvente em suas diferentes etapas. Usualmente são usados dois compartimentos com adsorvente, como mostrado na Fig. 3a e, dessa forma, tem-se um ciclo semicontínuo (Fig. 3b). Enquanto o adsorvente em um compartimento está sendo regenerado com a entrada de calor (lado direito da Fig. 3a), o outro compartimento está sendo usado para adsorver o vapor proveniente do evaporador.

Por suas características, os chillers por adsorção são mais caros, ocupam um espaço maior para a mesma capacidade e são menos eficientes que os chillers por absorção. Seu COP varia de 0,3 a 0,7. Por outro lado, eles são mais confiáveis e de maior vida útil e podem operar a temperaturas de geração mais baixas, o que facilitaria o uso de coletores solares planos.



(a) (b)

Figura 3 - Ciclo de refrigeração por adsorção

3. LEVANTAMENTO DE CARGAS TÉRMICAS

As dependências do laboratório do GEPEN estão estabelecidas em uma área de 13,44 m^2, no piso do estacionamento descoberto do nível C do Campus da UNIBH Buritis (Belo Horizonte- MG). A Fig. 4 mostra a localização do laboratório anterior à instalação do sistema de refrigeração.

(a) (b)

Figura 4 – Fotos do laboratório GEPEN antes da instalação do AC-Solar
Fonte: os autores

A sala é composta de apenas um ambiente. Para avaliar as condições do local, visando o recebimento do sistema de condicionamento de ar solar, foram levantadas as características construtivas da edificação (dimensões, localização e tipos de janelas, materiais de paredes, teto e piso); bem como as cargas internas previstas (pessoas, sistema de iluminação e equipamentos). O resumo das características está disponível na Tab. 1.

Tabela 01 – Características das cargas térmicas internas
e características construtivas do espaço refrigerado

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE
Equipamentos	10,8 W/m² de Potência Instalada
Iluminação	64 W de Potência Instalada
Maquina AC	100 W de Potência Instalada
Pessoas	2
Nível de atividade	120 W por pessoa
Paredes em chapa de aço galvanizado com 40mm de poliestireno expandido e chapa de PVC de acabamento interno	
Janelas simples vidro com espessura de 3mm	

A carga térmica da sala de pesquisa foi calculada através de simulação computacional no programa EnergyPlus, onde todas as características do ambiente foram consideradas e foram seguidos os parâmetros estabelecidos no *Handbook of Fundamentals* da ASHRAE.

Os resultados da simulação computacional para as condições descritas são mostradas na Fig. 5. A maior demanda pelo resfriamento ocorre em Dezembro, Março, Janeiro e Fevereiro, respectivamente.

Figura 5 - Carga de pico para resfriamento anual – Sala de pesquisa/trabalho
Fonte: os autores

3.1 Dimensionamento do sistema de aquecimento solar

Inicialmente, foi realizada simulação com o *software (Presizing tool for solar cooling, heating and DHW)* PISTACHE, ferramenta livre, desenvolvida por TECSOL e CEA/ INES, no âmbito do projeto MeGaPICS. Esse programa destina- se ao pré-dimensionamento e avaliação do desempenho anual de instalações solares para refrigeração e aquecimento de água. O *software* PISTACHE utiliza como dados de entrada: parâmetros geométricos e materiais dos coletores solares selecionados; médias horárias anuais das informações meteorológicas do local em questão; cargas de resfriamento e de aquecimento, além da demanda de água quente requerida.

Nas simulações, foram utilizados parâmetros de sete modelos de seis diferentes fabricantes de coletores solares comercializados no país e com mais alto desempenho térmico, para atender aos níveis de temperatura necessários no AC Solar. Para o modelo de menor custo, foi estimada uma área coletora total de 44 m² com classificação A no Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO, mostrada na Fig. 6. As principais características do sistema de ar condicionado solar instalado no laboratório são apresentadas na Tab.2.

Tabela 2- Características do Sistema de Ar Condicionado Solar

EQUIPAMENTO	**COLETOR SOLAR**	**RT**	**CHILLER**	**FAN COIL**
TIPO	Plano fechado	Horizontal	Adsorção	Expansão Indireta
MARCA/MODELO	PROSOL /Blue 8 1,0V	SOLIS- 1000 BPN	INVENSOR - LTC 10 Plus	FCTB-3
CAPACIDADE	1 m²	1000 L	1,0 TR	1,0 TR
DIMENSÕES (LXCXH)	100x100 cm	2996x840mm	110x75x137cm	52x28x24 cm

EFICIÊNCIA (COP OU ENCE)	84,8 kWh-mês/m² ENCE Nível A	0,10 kWh-mês/litro-	0,65	-

Figura 6- Planta de aquecimento solar composta por 44m² de área coletora

3.2 Sistema de resfriamento

Nessa instalação, não foi previsto um sistema auxiliar ao AC Solar (backup) para entrada em operação em períodos de baixa insolação ou chuvosos. Tal decisão será reavaliada após investigação sobre as condições de conforto do ambiente climatizado. Tal avaliação tem grande potencial para definir novas formas de projetar sistemas de condicionamento ambiental, com vistas ao alcance de níveis de eficiência energética maiores, já que o controle de temperatura passa a ser mais dinâmico e ativado pelos próprios usuários. A Fig. 7 ilustra as características do chiller de adsorção utilizado.

GENERAL TECHNICAL SPECIFICATIONS		
Output range cooling	kW	4-14
COP maximum		0,75
Maximum overpressure	bar	4
Electrical connection	V~ | Hz | A	230 | 50/60 | max. 8,5
Approx. electrical power consumption	W	395 (inkl. pumps)

SPECIFICATIONS AT NOMINAL CONDITIONS		CHILLING CIRCUIT	RECOOLING CIRCUIT	DRIVE CIRCUIT
COP maximum		0,65 / 0,7		
Performance values (nominal data / Hi-eFF)	kW	10 / 9	25,4 / 21,9	15,4 / 12,9
Temperatures - cooling system inlet (IN)	°C	18	27	72
Temperatures - cooling system outlet (OUT)	°C	15	31	67
Temperatures - possible application	°C	10-25	20-37	45-100
Volume flows	l/h	2.900	5.100	2.500
Available ext. pressure head	mbar	400	400	300

Figura 7- Características do Chiller de Adsorção - INVENSOR

O sistema recebe calor de uma fonte quente (*heating buffer vessel*), que corresponde a um reservatório térmico com capacidade de 1.000 litros, no circuito de alimentação (*driving circuit*). O chiller fornece frio através do circuito de água gelada (*chilled water circuit*) para alimentação do fancolet. A troca de calor para condicionamento do ar no container é feita com ajuda de um ventilador que opera em conjunto com o fancolet.

O rejeito do calor excedente (proveniente do sistema de resfriamento do chiller) é desprezado no circuito de recirculação (*re-cooling circuit*), através de um trocador de calor Ar-Água (*re-cooling unit*), parte integrante do chiller. O controle eletromecânico do sistema é bem simples e realizado por contatores. O sistema inicia a operação caso o termostato de parede seja acionado em uma das três posições possíveis. O termostato aciona o ventilador e habilita o chiller que, por sua vez, envia um sinal ao contator. Atendidas às condições de operação, o fancolet é ligado e o chiller aciona os circuitos de água quente, água gelada e rejeito de calor. Sempre que o usuário desligar manualmente o termostato, o ventilador também é desligado.

O sistema de aquecimento solar utilizado como fonte de calor opera ininterruptamente, utilizando controlador MICROSOL PLUS II para que a água circule nos coletores solares sempre que ocorrer níveis adequados de insolação.

Para instrumentação e aquisição de dados do sistema, foram utilizados os sensores de: Temperatura (termorresistências de platina (PT-100) com hastes de 200 mm e cabeçote de alumínio da marca Alutal); Vazão (medidor tipo turbina com transmissão de sinal pulsada da marca Tecnofluid); Termohigrômetro (medidor de temperatura e umidade do ar com transmissor e indicador da marca Warme (transmissão 4 mA a 20 mA) para o monitoramento do ambiente climatizado) e Aquisição de dados (multímetro de varredura AGILENT 34972ª). A monitoração e tratamento dos dados coletados é realizado via *software* LABVIEW. A Fig. 8a apresenta o reservatório e o sistema de rejeito e a Fig.8b mostra o supervisório para acompanhamento e monitoração dos dados.

(a) (b)

Figura 8- Sistema de rejeito de calor e supervisório de controle

4. ANÁLISE

A partir dos dados obtidos na monitoração, foram realizados os balanços de massa e de energia para determinação do desempenho dos sistemas. Em todos os casos, foram desprezadas as variações de energia cinética e potencial nos equipamentos. A Eq. 1 e a Eq. 2 fornecem, respectivamente, o calor útil e o trabalho de cada componente do sistema:

$$\dot{Q}_{util} = \sum_{Saída} (\dot{m}\, h)_{SAÍDA} - \sum_{ENT} (\dot{m}\, h)_{ENT} \quad (1)$$

$$\dot{W}_{util} = \sum_{ENT} (\dot{m}\, h)_{ENT} - \sum_{Saída} (\dot{m}\, h)_{SAÍDA} \quad (2)$$

sendo $\dot{m}$: vazão mássica; h: entalpia específica, nos pontos de entrada ($_{ENT}$) e saída de cada equipamento. $\dot{Q}$ e $\dot{W}$ significam a taxa de transferência de calor e a potência consumida em compressores e ventiladores, respectivamente.

Para se determinar o Coeficiente de Desempenho (COP) do sistema de refrigeração foi utilizada a Eq. 3, aplicada em períodos de tempo (Δt_i):

.

$$COP = \frac{\sum_i \dot{Q}_f \, \Delta t_i}{Q_{RT}} \quad (3)$$

sendo $\dot{Q}_f$ a taxa de geração de frio e Q_{RT} energia transferida do reservatório térmico no mesmo período.

A definição do EER "*Energy Efficiency Ratio*" inclui o consumo de energia elétrica (W) devido à utilização de bombas e ventiladores, sendo calculada pela Eq 4:

$$EER = \frac{\sum_i \dot{Q}_f \, \Delta t_i}{\sum_i \dot{W} \, \Delta t_i} \quad (4)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para exemplificar os resultados gerados, foi selecionado um dia de elevada irradiação solar incidente, apresentado na Fig. 9. As medições foram feitas com intervalo de 1 minuto e as temperaturas medidas no circuito de água quente para alimentação do chiller solar, água fria para a refrigeração do ambiente, rejeito e temperatura ambiente são mostradas na Fig. 10 .

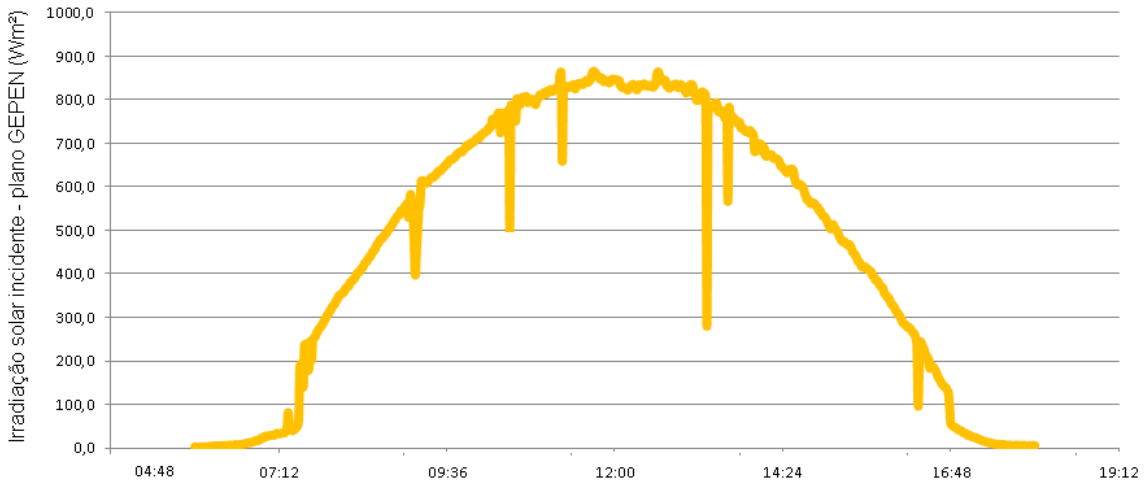


Figura 9- Irradiação solar incidente no plano dos coletores

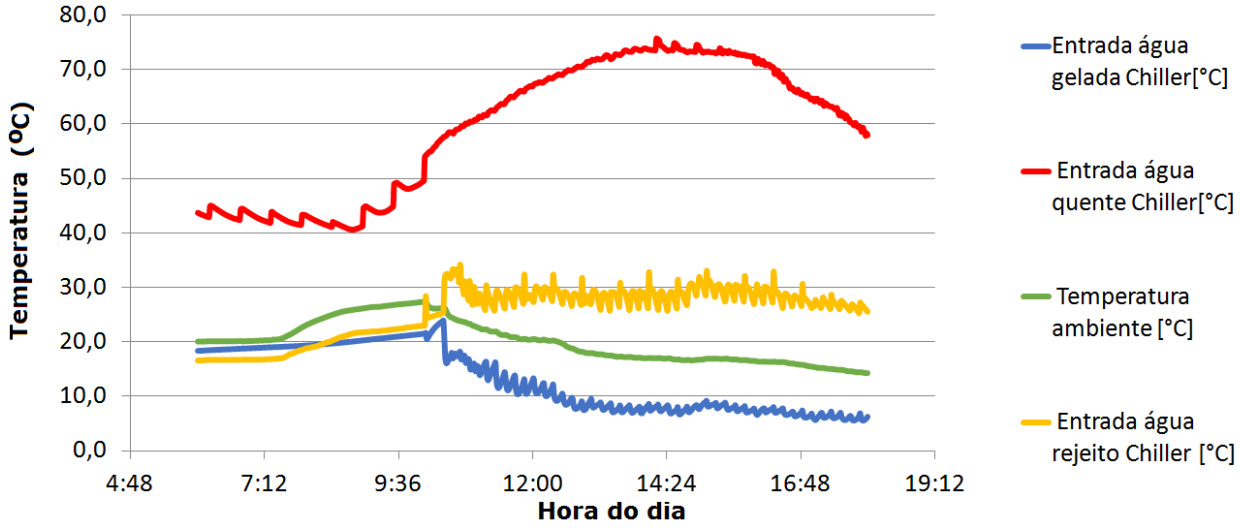


Figura 10- Evolução temporal dos valores das temperaturas em diferentes pontos da instalação

Os resultados obtidos estão consolidados na Tab.3, a partir do uso das Eqs. 1 a 4, para o dia selecionado.

Tabela 3- Características do sistema AC - Solar medido durante 24 horas

DESCRIÇÃO	VALORES
Carga Térmica do Frio	115.266,02 [kJ]
Geração de Energia Total	142.370,98 [kJ]
Calor Útil	181.525,06[kJ]
COP (Térmico)	0,63
Energia Elétrica consumida	59.868 [kJ]
CEE	1,93
EER	0,48

A Fig. 11 apresenta um gráfico com a temperatura ambiente medida durante parte do mês de julho de 2017. Por depender das variáveis climáticas os resultados relacionados à geração específica de frio/calor bem como o consumo elétrico variam em função da temperatura externa e da disponibilidade da radiação solar.

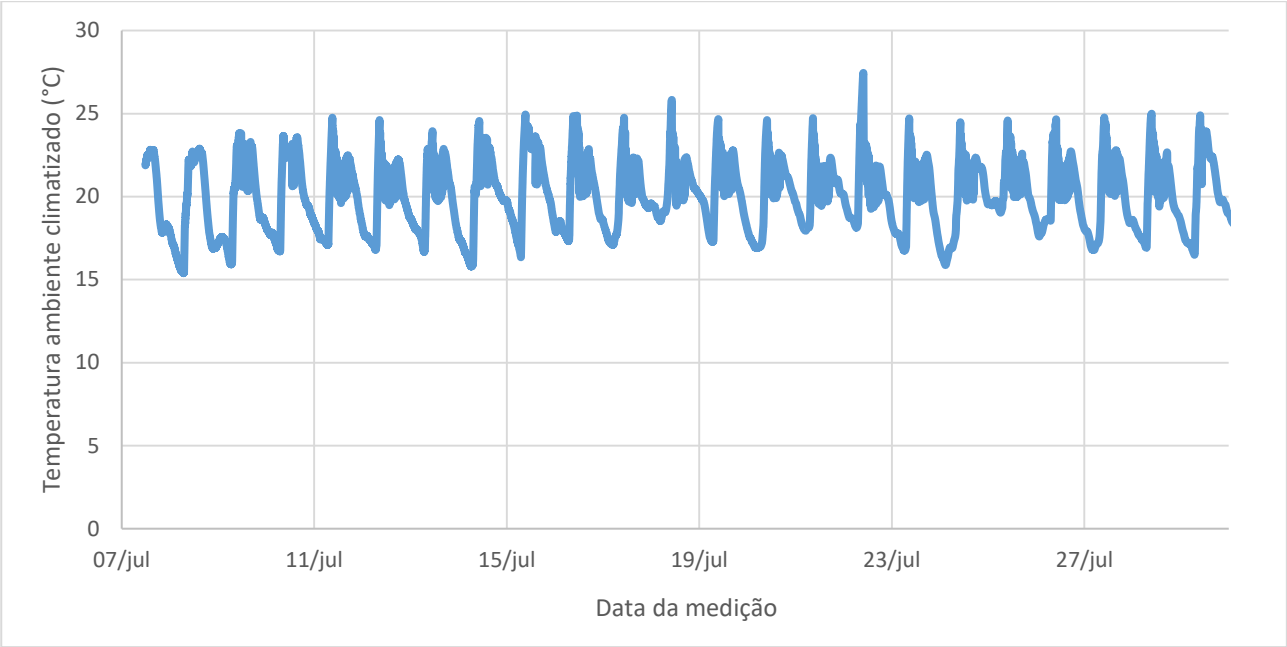


Figura 11- Evolução da temperatura ambiente entre os meses de julho de 2017

6. CONCLUSÕES

O sistema foi considerado eficaz durante todo o período avaliado, mantendo a temperatura ambiente em condição de conforto térmico. Foram identificados alguns picos de temperatura no início da manhã (períodos em que não havia água quente no sistema devido à baixa radiação solar do horário).

O valor do COP igual a 0,63 é muito próximo aos valores de placa entre 0,65 e 0,67, conforme mostrado nas especificações técnicas da Fig.7.

Durante o desenvolvimento e implantação do projeto foram identificadas dificuldades e barreiras para a instalação dos sistemas piloto de Ar-condicionado solar, que possivelmente podem ser extrapoladas para outras inciativas. Dentre eles deve-se considerar o alto custo dos chillers solares; elevadas taxas de impostos para importação de máquinas e componentes; falta de profissionais especializados em condicionamento de ar solar e em integração de sistemas de engenharia envolvidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CEMIG e ANEEL pelo financiamento do projeto P&D 438, à equipe de professores e bolsistas; a Minas Gerais Educação/UNA, ao CEFET-MG e ao Centro Universitário Belo Horizonte /UNIBH, assim como aos fornecedores IMAX Energia, PROTHERM, ATAC e LINK.

REFERÊNCIAS

Alexandre, Fabio. Nista, Diego. O Futuro em Chillers Centrífugos de Alta Eficiência Energética e Livres de Óleo nas Condensações a Ar e a Água até 2.500tr. XVI Encontro Nacional de Empresas Projetistas e Consultores da ABRAVA, 2016.

DASOL-ABRAVA. Mesquita, L. Ar condicionado movido a energia solar. Revista SolBrasil - 1ª Edição. Julho, 2010

ELETROBRAS. Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005: classe Residencial Relatório Brasil - Sumário Executivo. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2009. 187 p.

European Photovoltaic Technology Platform, 2007 ELETROBRÁS, Relatório Anual e de Sustentabilidade 2015. EPE – Boletim de Estatística Mensal de Energia Elétrica 2004-2016. EPE. Nota Técnica DEA 13/14 - Demanda de Energia 2050. Agosto de 2014.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE) – Consumo de Energia no Brasil. Análises Setoriais. Rio de Janeiro, Junho de 2014

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Balanço Energético Nacional - Relatório Síntese, 2016. Ano Base 2015.

IEA. Mautner, F; Weiss, W; Spork-Dur, M. Solar Heat Worldwide. Market and Contribution to the Energy Supply. Solar Heating and Cooling Programme, International Energy Agency. Austria, 2016.

Neto, Ardile Bacchi . Ar condicionado por adsorção: Tecnologia e desenvolvimento. Disponível em: <http://www.engenhariaearquitetura.com.br/noticias/impressao/Default.aspx?noticia=997>

Pridasawas, W.; Lundqvist, P. Technical options for a solar-driven cooling system. Proceeding of the International Solar Energy Congress 2003, Gothenburg, 2003.

Pereira, E. M. D.; Mesquita, L. C. S.; Pereira, C. M. D. Aquecimento Solar no Brasil. 25 de julho de 2014. PERÉZ-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. A review on buildings energy consumption information. Energy and Buildings 40, 2008, p.394-398. 87

Solid. Singapore: Second Largest Solar Cooling Installation Worldwide. Disponível em: http://www.solarthermalworld.org/, 2017

SHC Solar Update. Task 53 The Future of Solar Cooling. May 2016.

SOLAR ASSISTED AIR CONDITIONING SYSTEM - ADSORPTION CYCLE

Abstract. *The use of solar air conditioning systems has been growing in countries like the United States, China and members of the European Union. However, despite high levels of solar irradiance and increased use of conventional systems in Brazil, such technology is still restricted to the academic environment. This work presents the design installation and monitoring of a solar air conditioning pilot system that uses a 10 kW adsorption chiller, without backup unit. The thermal load was calculated through using energyplus simulation software considering the characteristics of the environment, according to the parameters established by ASHRAE. The pre-sizing and evaluation of the performance of solar installations for water cooling and heating were carried out with the PISTACHE program, free tool, developed by TECSOL and CEA / INES. In this simulation, parameters of seven models of six different solar collector manufacturers marketed in the country and with the highest thermal performance were used to meet the temperature levels required in AC Solar. The installed solar collectors are of national manufacture with total area of 44 m² and classification A in the Brazilian Program of Labeling of INMETRO. To monitor the operation and evaluate the performance of the system, a supervisory using the LABVIEW program was developed, measuring: temperature (11 points); (4 points), temperature and humidity of the air in the refrigerated space and solar irradiation incident on the plane of the collectors. Data acquisition is done by AGILENT 34972A scanning multimeter. The measured coefficient of performance (COP) is of the order of 0.63. The pilot system was installed in the Monitoring Laboratory of the Group of Studies and Research in Energy - GEPEN - at the Estoril Campus of the University Center Belo Horizonte - UNIBH.*

Key words*: Solar air conditioning, Adsorption cycle, Coefficient of performance*.