

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO SISTEMA DE REGENERAÇÃO DE UM AR CONDICIONADO SOLAR POR ADSORÇÃO BASEADO EM UM CAMPO DE COLETORES PLANOS DE ALTA EFICIÊNCIA

Paulo Vinicius Soares Ramalho Domingos¹ – paulovsrd@gmail.com

Douglas Bressan Riffel – dougbr@ufs.br

Ana Cristina Ribeiro Veloso – anacrisveloso@yahoo.com.br

Núcleo de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Sergipe, Aracajú, Brasil

Celina Maria Cunha Ribeiro – celinamariaribeiro@hotmail.com

Francisco Antonio Belo – belo@les.ufpb.br

Antonio Pralon Ferreira Leite – antpralon@yahoo.com.br

¹Laboratório de Energia Solar – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, Brasil

Resumo. Este trabalho tem como objetivo apresentar a simulação numérica do “sistema de regeneração” de uma central de ar condicionado por adsorção, com energia solar e gás natural como fonte térmica. Ela utiliza o programa de cálculo no ambiente Simulink, com funções criadas no software Matlab®, para simular a operação do campo de coletores solares conectado ao tanque de armazenamento de água quente e ao chiller de adsorção. Para os coletores e o chiller, são utilizadas correlações empíricas e equações de balanços de energia. Para o tanque, a função obtida é baseada no método dos volumes finitos. Os resultados da simulação são apresentados em diversas curvas de resposta térmica, geradas para períodos de 24 horas, bem como das variações de volume do gás natural para a escolha do volume do tanque de água quente, necessário para que o sistema atinja a temperatura de regeneração.

Palavras-chave: Refrigeração Solar, Ar Condicionado por Adsorção, Coletores de Alta Eficiência, Simulação.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho representa uma etapa importante na busca de dados para a otimização dos componentes de uma central de ar condicionado por adsorção de 20 kW, em desenvolvimento no Laboratório de Energia Solar (LES) da UFPB em João Pessoa, a qual utiliza energia solar e gás natural como fontes térmicas para a regeneração do sistema.

Para o dimensionamento do sistema de ar condicionado adsorativo em questão, recorreu-se a estudos detalhados tanto dos componentes individualmente quanto do sistema todo. Nesses estudos, desenvolveu-se uma simulação computacional, inicialmente com a análise individual de cada componente para o dimensionamento dos mesmos, e depois de todo o sistema integrado.

A simulação para o sistema completo tem como objetivo verificar as variações sazonais de diversos parâmetros de funcionamento tais como temperaturas, rendimento dos coletores solares, coeficiente de performance (COP) e potência frigorífica específica (PFE). Esses dados possibilitarão ajustar os tempos de operação e outros parâmetros de operação do sistema.

Em relação aos coletores solares (Figura 1), o modelo matemático teve como base diversas referências sobre simulações de sistemas de aquecimento solar de água para consumo residencial, as quais foram adaptadas para a realidade do projeto da central de ar condicionado adsorativo.



Figura 1. Campo de coletores planos com cobertura MIT instalado no Labrads/LES/UFPB.

A unidade central de ar condicionado, cujo esquema está mostrado na Figura 2, proverá ar condicionado para quatro salas do Laboratório de Instrumentação e Controle Térmico (LICT) do LES, com uma área de planta total de

110m². O ar ambiente é insuflado através de uma serpentina resfriadora e desumidificadora, para ser, então, distribuído nas salas através de uma rede de dutos.

O equipamento em estudo baseia-se em um ciclo de adsorção com recuperação de calor, em que as etapas de regeneração e de produção do efeito frigorífico ocorrem simultaneamente. O fluido de trabalho empregado é o metanol, que circula em um evaporador formado por um trocador de calor de placas, no qual a água é resfriada.

A regeneração é feita com energia térmica solar acumulada em um tanque de água, com suprimento complementar pela combustão de gás natural. A termoacumulação da água gelada é produzida por uma unidade resfriadora de líquido denominada de *chiller* de adsorção, baseada no par carvão ativado e metanol. Destina-se às edificações de médio e grande porte e representa uma tecnologia alternativa à dos sistemas de compressão de vapor. A abrangência dessa tecnologia envolve não só os setores de comércio e de serviço, mas também o industrial, abrindo via para o uso em larga escala da trigeração (produção combinada de calor, eletricidade e refrigeração).

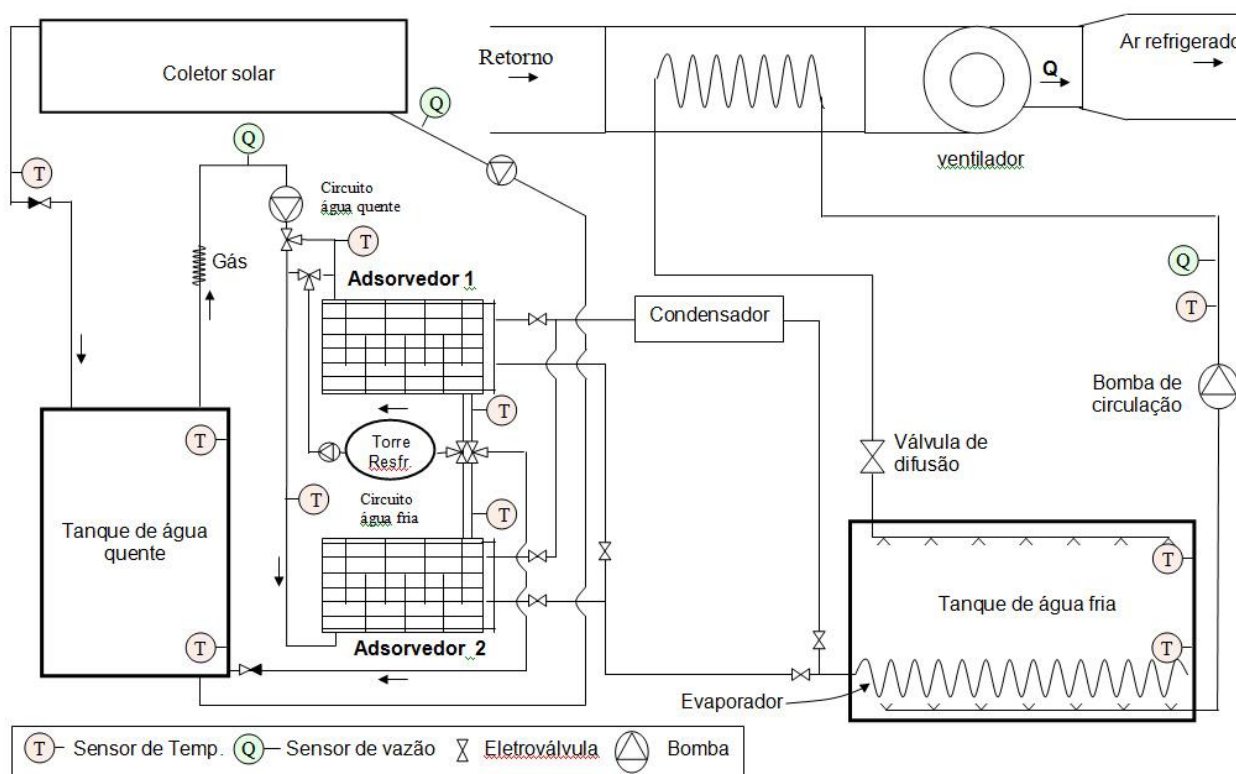


Figura 2. Esquema de funcionamento do *chiller* de adsorção a energia solar e gás natural, com termoacumulação de água gelada.

2. SISTEMA DE REGENERAÇÃO

O sistema de regeneração é composto por um campo de coletores solares especiais acoplados a um tanque de termoacumulação, no qual a água é aquecida até a temperatura de projeto (105°C), com auxílio de um pequeno aquecedor a gás natural. O campo de coletores foi instalado segundo um arranjo paralelo-série, em dois blocos simétricos cada um composto de 38 unidades de coletores planos comerciais, de 1,58 m² cada, perfazendo uma área de captação total de 120 m². Os coletores são adaptados com coberturas de material isolante transparente de alta eficiência (MIT), mostrado na Figura 3.

A cobertura MIT empregada consiste de um duplo vitral com um filme de Teflon – com tratamento especial para resistir aos raios UV – inserido no plano médio entre as placas de vidro (Fig. 3). A adaptação das coberturas MIT a coletores comerciais, foi realizada de modo a se deixar os espaços acima e abaixo do filme de Teflon com uma altura de cerca de 25mm, distância considerada ótima para se minimizar as perdas de calor, levando em conta efeitos de condução térmica e de convecção.

A cobertura MIT provoca uma diminuição considerável das perdas térmicas por convecção, com uma atenuação mínima da radiação solar incidente (Rommel e Wagner, 1992). Em um estudo anterior, simulações numéricas foram efetuadas com dados meteorológicos de João Pessoa-PB, para comparar valores diários médios do coeficiente global de perda de calor (U) para superfícies seletivas com cobertura simples (placa única de vidro) e com cobertura MIT de policarbonato alveolar, obtendo-se 5,2 W/m²K e 2,1 W/m²K, respectivamente (Leite, 2000). Já um estudo experimental feito no mesmo local com o mesmo tipo de cobertura MIT de um coletor bifacialmente irradiado mostrou que o coeficiente U variou de 0,54 a 1,90 W/m²K (Leite, 2003, 2004, 2005 e 2006).

O telhado sobre o qual foram instalados os coletores, foi construído com uma inclinação de 9° voltado para o Sul, que corresponde ao valor médio ótimo para os 6 meses mais quentes em João Pessoa-PB (Outubro a Março), visando

maximizar a performance global do sistema de climatização neste período e a minimização do consumo de gás natural, sendo que 75% da energia necessária para a regeneração do sistema adsorvivo provém dos coletores solares.

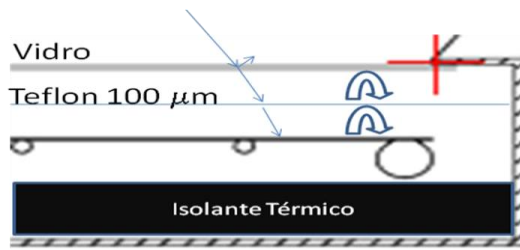


Figura 3 - Esquema da cobertura MIT dos coletores solares da instalação de ar condicionado por adsorção.

3. METODOLOGIA

Para a elaboração da simulação do sistema de regeneração (denominado de “sistema” neste artigo) foram estudados diversos modelos existentes. O ambiente utilizado foi o Simulink, que permite integrar os diversos componentes e controlar certos parâmetros externos, com as funções dos diversos componentes do projeto criadas no software Matlab®. A integração da simulação do sistema é mostrada na Figura 4. As Figuras 5 e 6 mostram os dois subsistemas utilizados, o subsistema coletor solar com o tanque de água quente, e o subsistema adsorvedor com o aquecedor a gás. Para cada componente estudado, os modelos são apresentados seguir.

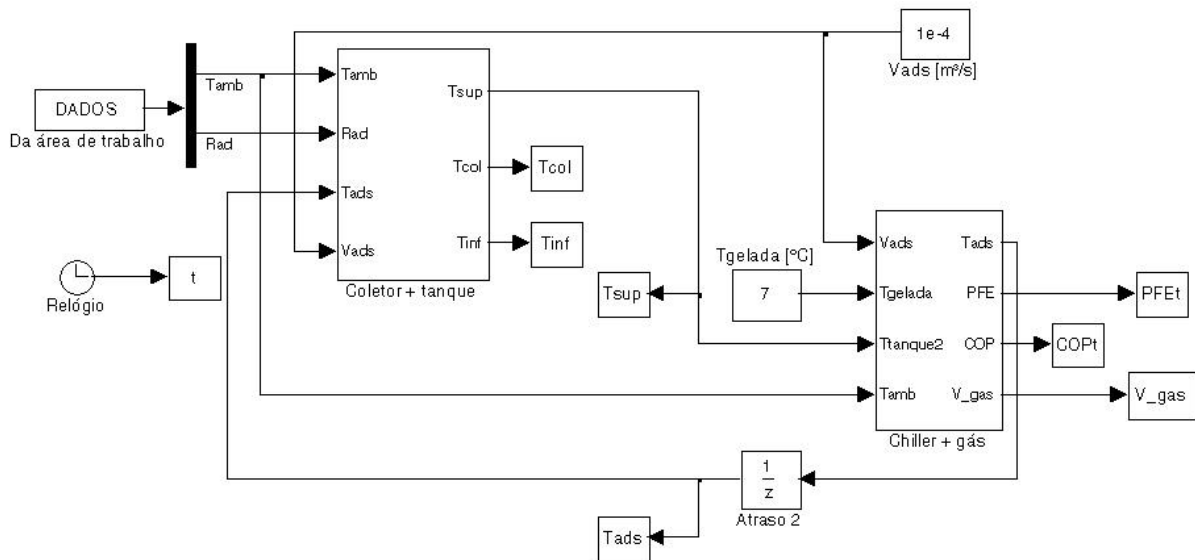


Figura 4 - Algoritmo da simulação completa.

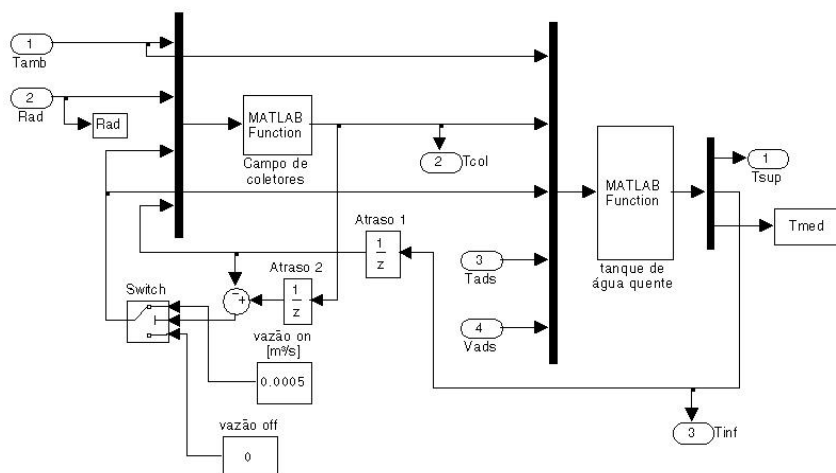


Figura 5 - Subsistema coletor solar com tanque de água quente.

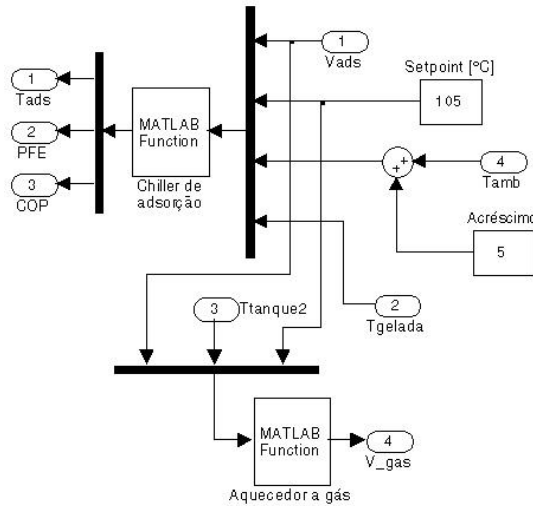


Figura 6 - Subsistema adsorvedor com aquecedor a gás.

3.1. Coletor Solar

Para o modelo do coletor solar, foi utilizada a equação dos coletores de eficiência quadrática, apresentada por Duffie e Beckman (1980):

$$\eta = a_0 - a_1 \frac{T - T_{amb}}{Rad} - a_2 \frac{(T - T_{amb})^2}{Rad} \quad (1)$$

Esta equação estima a eficiência média de um coletor solar num dado instante a partir da diferença de temperatura entre o coletor (T) e o ambiente (T_{amb}) e da radiação solar (Rad) naquele instante. As constantes a_0 , a_1 e a_2 presentes nessa equação dependem de características próprias do coletor, como coeficiente de perdas térmicas para o ambiente e relação entre área transparente e total, e podem ser inferidas experimentalmente. O modelo desenvolvido corresponde ao coletor S-81 da empresa Solar Tech, e simula o fluxo de água através dos coletores a uma vazão que é ligada ou desligada, dependendo da diferença de temperatura entre a parte superior do tanque de água quente e os coletores. Ele também leva em consideração a disposição dos coletores, nesse caso, dois conjuntos de 38 coletores cada, associados em paralelo. A Eq.(2) representa um balanço de energia simples feito para cada coletor.

$$T_i = T_{i-1} + \frac{\eta A \cdot Rad}{\dot{V}_{col} c_p \rho} \quad (2)$$

Onde, T_i é a temperatura do i -ésimo coletor em série, A é a área transparente, \dot{V}_{col} é a vazão de água em cada coletor em paralelo, c_p é o calor específico da água e ρ a densidade da água (propriedades tomadas na temperatura de entrada).

3.2. Tanque de água quente

O modelo abordado para o tanque de armazenamento de água quente possui geometria cilíndrica, com aberturas na base e no topo, para a troca de água com os coletores e os adsorvedores. Pode ser considerado, sem grandes desvios de aproximação, como um tanque estratificado com transferência de calor unidimensional. O método dos volumes finitos foi utilizado nos cálculos das trocas de calor no tanque. Ele apresenta uma solução numérica que possibilita resolver problemas sob quaisquer condições iniciais e consiste em dividir o tanque em um número finito de nós longitudinais de mesma temperatura e mesmo volume. Desta forma, foram obtidas as equações de transferência de calor e massa para cada um dos volumes de controle, aplicando as respectivas condições de contorno. A solução das equações é executada pela formulação implícita e o método de inversão de matrizes. O modelo do tanque de água quente foi desenvolvido por Riffel (2007), alterando-se apenas a resposta da simulação para fornecer valores de temperatura tanto na base como no topo do tanque. A Figura 7 apresenta as equações em um volume de controle do tanque em estudo.

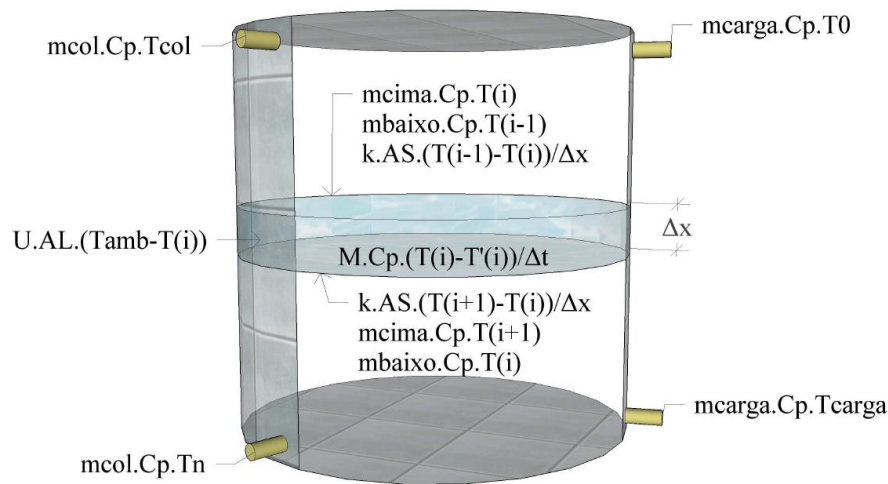


Figura 7 – Balanço de energia no tanque de água quente estratificado.

Os modelos dos coletores solares e do tanque de água quente necessitam de dados de temperatura ambiente e irradiação solar, esta última, já considerando a inclinação do campo de coletores.

Para isso, foi utilizado o *software* RadiaSol2¹, desenvolvido por pesquisadores da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. O *software* que conta com interface simples, permite a seleção do local, da inclinação dos coletores e sua orientação (desvio azimutal), bem como a reflexão percentual do solo. O programa utiliza dados de medições realizadas em diversas localidades do Brasil e também cálculos probabilísticos para obter os dados necessários ao caso em estudo.

Os dados do ambiente, que são obtidos para serem utilizados na simulação, incluem temperaturas ambiente máxima, mínima e média; radiação solar direta na direção vertical, radiação solar na direção perpendicular à escolhida e umidade relativa do ar. Todos os dados são para períodos de uma hora e é gerado um gráfico para o período de 1 (um) ano. Como citado, a orientação escolhida é o sul. Isto é feito com o objetivo de aumentar a energia recebida pelos coletores no verão, época em que a demanda por climatização ambiente é maior, ao contrário do que normalmente é feito quando o objetivo da instalação é o simples aquecimento de água residencial. A inclinação dos coletores utilizada é de 9°, feita com base em um cálculo da média da inclinação ideal para os seis meses mais quentes do ano

3.3. Chiller de adsorção

O *chiller* de adsorção é simulado utilizando um modelo estatístico desenvolvido por Riffel (2008). São levados em consideração diversos parâmetros do sistema de refrigeração, como as temperaturas das fontes quente, fria e gelada e; dados dos módulos adsorvedores, como parâmetros geométricos e materiais utilizados. Obtém-se com isso o coeficiente de performance (COP), e a potência específica de refrigeração (PFE). A Equação (3) representa um balanço de energia para a água que circula no adsorvedor. Perdas na tubulação e o atraso na resposta térmica no trocador de calor (adsorvedor) foram desconsideradas.

$$T_{sai} = T_{ent} - \frac{PFE}{COP} \cdot \frac{m_{ads}}{\dot{V}_{ad} c_p \rho} \quad (3)$$

Onde T_{sai} e T_{ent} são, respectivamente, as temperaturas da água na saída e na entrada dos adsorvedores, m_{ads} é a massa total de adsorvente (carvão ativado), \dot{V}_{ad} é vazão da água no adsorvedor.

3.4. Aquecedor de passagem a gás natural

Um dos objetivos da simulação é estudar como os parâmetros do projeto influenciam no consumo de gás natural. O modelo para simulação do aquecedor a gás natural considera que este aquece a água até a temperatura de 105°C, recebendo a água do tanque de água quente.

Partindo desta consideração, a simulação cria um gráfico com a vazão de gás natural necessária em cada instante para se atingir essa temperatura. Podendo este gráfico ser utilizado para calcular a quantidade total de gás natural consumida em um mês, bem como servir de base para a configuração do sistema de controle para o aquecedor.

¹ Disponível para *download* na URL: <http://www.solar.ufrgs.br/#radiasol>

3.5. Propriedades do sistema utilizadas na simulação

Para a simulação foram tomadas algumas considerações relativas às temperaturas em alguns pontos. A temperatura da água gelada que entra no adsorvedor é considerada constante e igual a 7 °C. A temperatura da água fria é tomada 5 °C acima da temperatura ambiente e a temperatura do gás é tomada igual a 378K.

A massa do adsorvente (carvão ativado) é considerada igual a 116 kg e a vazão de água para os adsorvedores igual a 0,0001m³/s. A vazão de água em cada coletor em paralelo é considerada constante, cujo valor de 0,0005 m³/s é assumido por uma decisão operada por um controle on/off que liga a bomba quando existe uma diferença de temperatura maior do que 5 °C, entre a saída inferior do tanque e a dos coletores. Quando esta diferença de temperatura é menor do que 5 °C, ela é tomada igual a 0m³/s (Figura 5).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da simulação foram obtidos considerando um dia típico de verão, representado pelos dados do dia 01 de janeiro de 2010. Com as funções definidas para todo o sistema, pode-se levantar diversas curvas para a investigação das variações com o tempo das propriedades do mesmo.

A Figura 8 apresenta a vazão do gás natural necessária para aquecer a água de regeneração, correspondente a uma temperatura média no tanque de água quente de 1m³ de volume, em um intervalo de tempo de 24 horas.

Analisando as curvas da Figura 8, pode-se observar a coerência de comportamento entre a temperatura média do tanque de 1m³ e a vazão de gás necessária para que a temperatura se mantenha no valor desejado para o processo de regeneração, definido como 105°C. Como o aquecimento da água é contínuo, durante os intervalos entre 0:00h até 7:00h e após as 21:00h até 24:00h, a temperatura média permanece estável em torno de 50°C, e a vazão do gás natural também se mantém estável, cujo valor máximo aproximado é de 0,000731m³/s. No período entre 7:00h até 21:00h, verifica-se um aumento da temperatura média e, conseqüentemente, uma diminuição da vazão de gás natural, que atinge valor nulo durante o pico da radiação solar. Verifica-se também que há uma queda na utilização do gás (entre 15:30h e 17:30h), mesmo que a temperatura média apresente uma diminuição contínua. Isto se deve à inércia térmica do tanque, o que dispensa o uso do gás, mesmo com a radiação solar diminuindo; às 17:30h é reiniciado o aquecimento a gás, alcançando o máximo às 21:00h, permanecendo neste patamar até as 7:00 do dia seguinte.

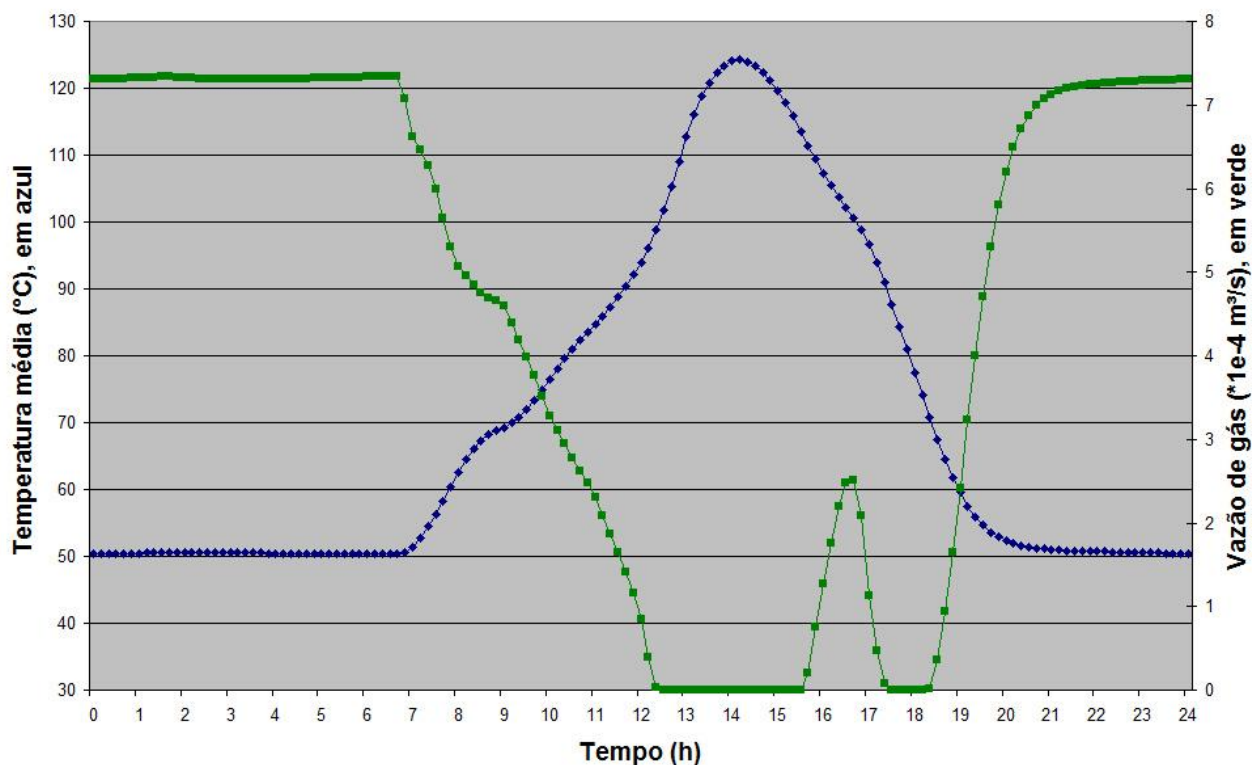


Figura 8 – Vazão de gás natural (10⁻⁴ m³/s) para o tanque de água quente de 1m³, aquecido por energia solar.

A Figura 9 apresenta a comparação entre as vazões de gás natural necessárias para aquecer a água de regeneração, para os volumes de tanque de 1m³ a 9 m³, em um intervalo de tempo de 24 horas. Com base nesta análise, será definido o volume do tanque de água quente para a obtenção de um consumo mínimo de gás.

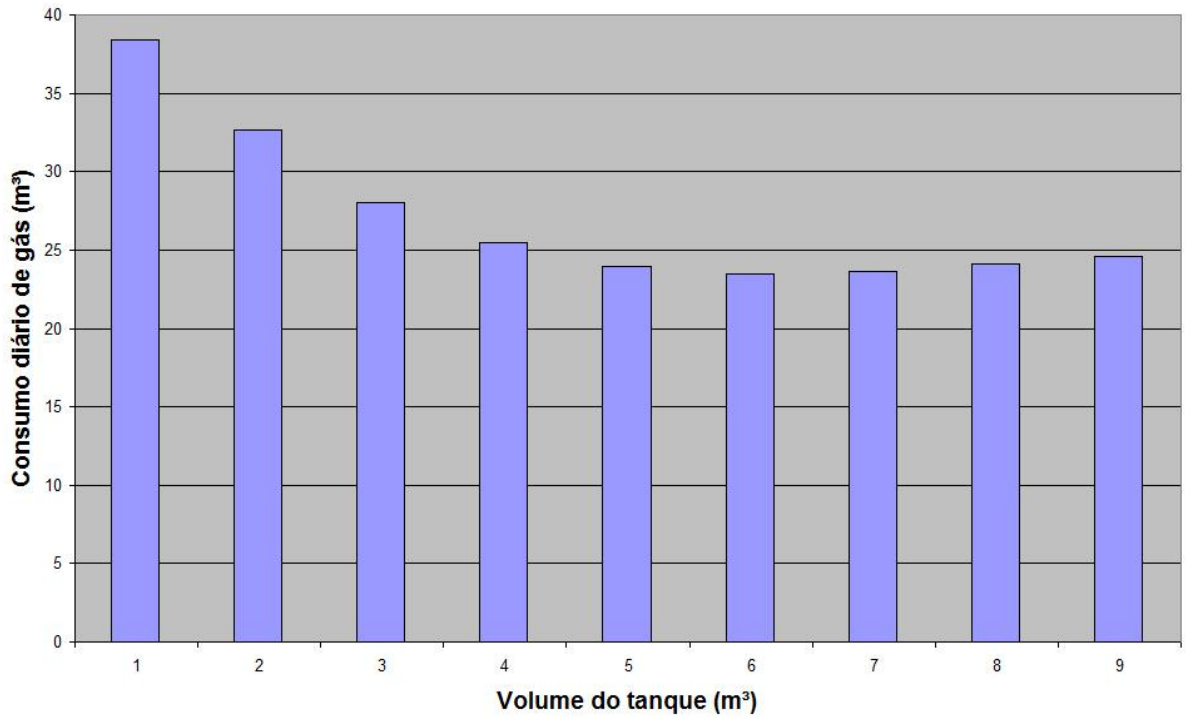


Figura 9 – Comparação entre os consumos de gás natural para os volumes do tanque de água quente de 1m³ a 9m³, em 24 horas.

À medida que o volume do tanque de água quente aumenta, diminui o consumo diário de gás, mantendo-se a temperatura de regeneração de projeto. Entre 5m³ e 7m³, tem-se o limite mínimo de vazão, definindo-se pela adoção de um tanque de 7m³.

A Figura 10 apresenta a vazão do gás necessária para aquecer a água, correspondente a uma temperatura média no tanque de estocagem de 7m³, em um intervalo de tempo de 24 horas.

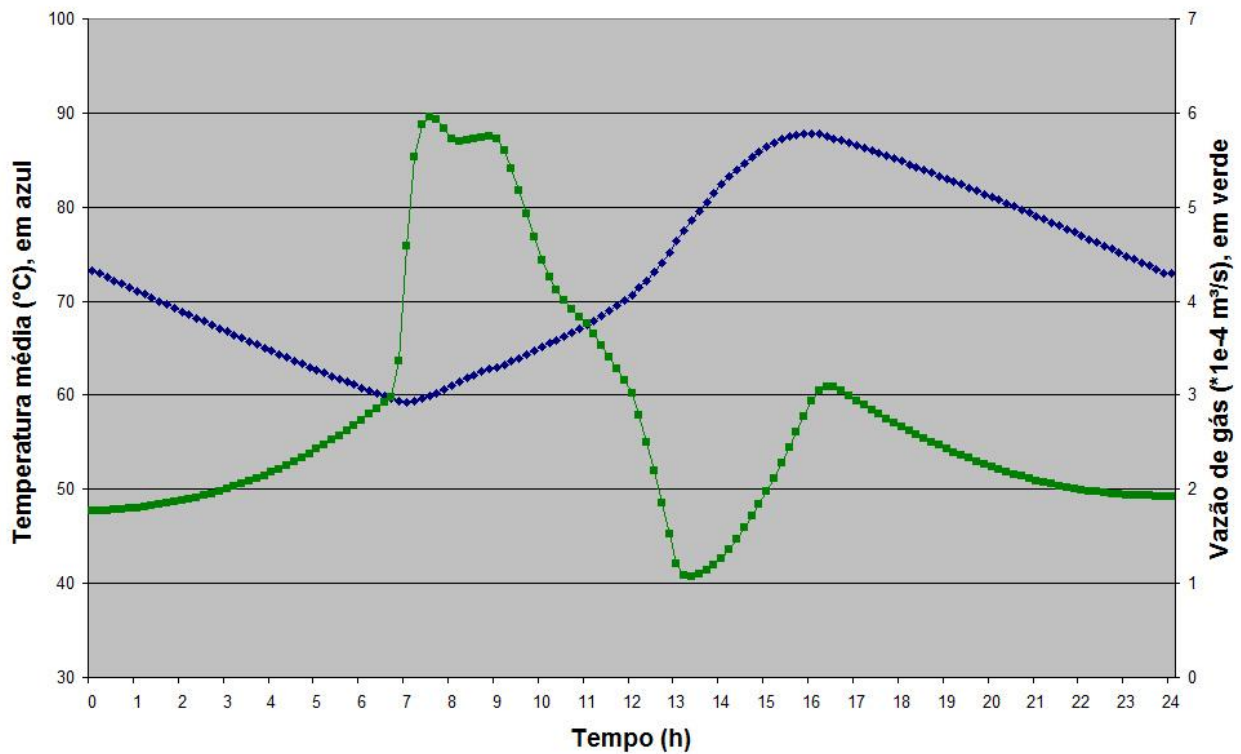


Figura 10 – Vazão de gás natural (10⁻⁴ m³/s) para o tanque de água quente de 7m³, aquecido por energia solar.

Como o volume do tanque é bem maior do que aquele da Figura 8, o consumo de gás é requerido a partir das 6:30h, ocorrendo o pico às 7:30h, uma vez que a temperatura diminuiu até o seu mínimo, às 7:00h. Com o aumento da radiação solar e o conseqüente aumento da temperatura da água no tanque, verifica-se uma queda de consumo do gás, atingindo um mínimo às 13:00h. Mesmo com a temperatura do tanque aumentando, o uso de gás foi necessário até às 16:00h, horário em que o consumo de gás diminui, mesmo com a radiação solar declinando.

As curvas da Figura 11 representam a resposta térmica do sistema (temperaturas T_{sup} , T_{inf} e T_{col} ,) para a situação real (tanque de $7m^3$) em um período de 24 horas, com a vazão de $0,0001 m^3/s$ no *chiller* de adsorção.

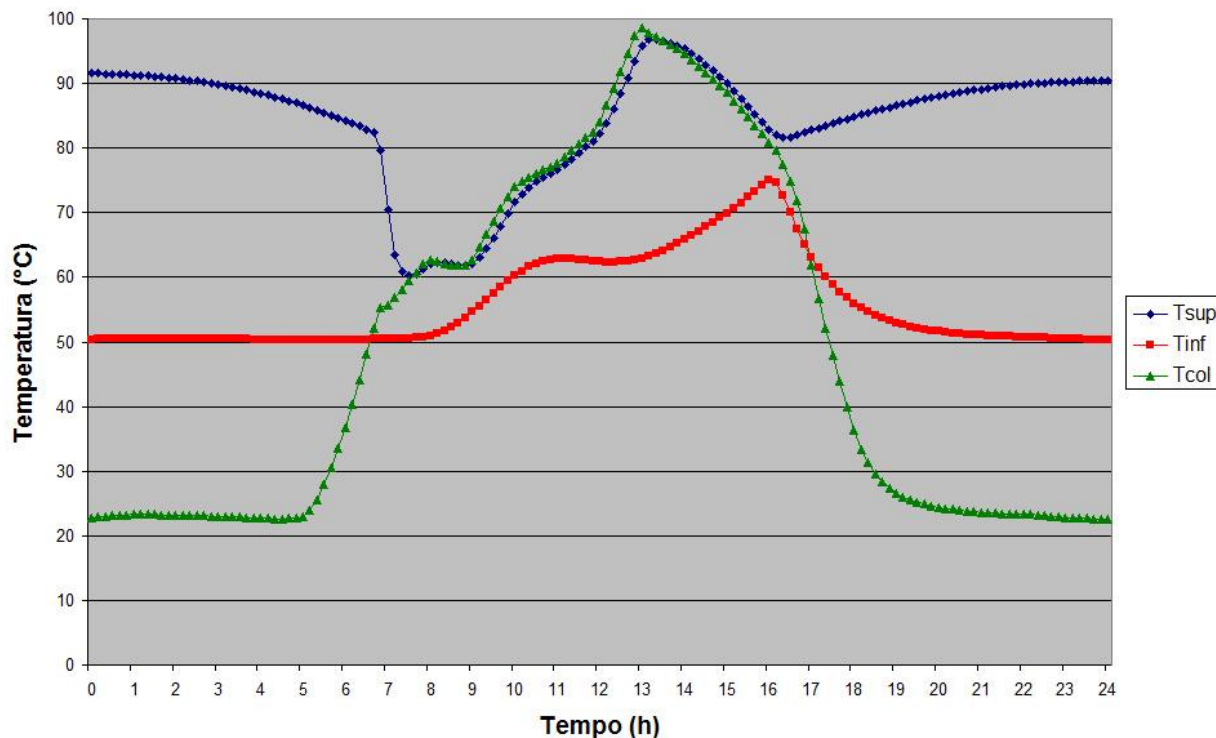


Figura 11 – Resposta térmica do sistema para a situação real.

Verifica-se então que à 0:00h a temperatura na saída dos coletores é a mínima ($23^{\circ}C$), aumentando das 5:00h com o início da incidência solar até às 13:00h, alcançando $98^{\circ}C$, completando o ciclo. Devido à inércia térmica, pode-se observar que a temperatura na parte inferior do tanque permanece constante até às 8:00h, quando então começa a aumentar, e diminui a partir das 16:00h. Na parte superior do tanque, observa-se que no começo do ciclo a temperatura é de $92^{\circ}C$, decaindo suavemente até as 7:00h, quando sofre uma queda brusca para cerca de $60^{\circ}C$ e, a partir daí acompanha a temperatura de saída do coletor solar até 16:30h, crescendo com o aquecimento a gás até os $90^{\circ}C$, no final do ciclo.

5. CONCLUSÃO

Os modelos matemáticos empregados na simulação fornecem respostas instantâneas aos dados de entrada, sem considerar o atraso resultante do fluxo de água em cada equipamento. Por esse motivo, a simulação não pode produzir resultados para curtos intervalos de tempo. O objetivo principal é a obtenção de respostas sazonais, com resultados médios do funcionamento do sistema ao longo de um ano.

Segundo testes preliminares, com o campo de coletores acoplado ao tanque de termoacumulação sem conexão aos adsorvedores, a temperatura máxima da água na saída dos coletores, em um dia de céu claro (durante o último mês de Abril) foi de $89^{\circ}C$. Considerando que a temperatura de projeto do sistema de regeneração (na entrada dos adsorvedores) é de $105^{\circ}C$, estima-se um consumo mínimo de gás natural no sistema auxiliar de aquecimento, conforme pré-dimensionamento da instalação de ar condicionado, no qual a fração solar máxima para as condições de projeto foi de 75% (Leite, 2006).

Baseado nos resultados iniciais das simulações, foi adotado um tanque de água quente de $7m^3$, o qual deverá ser conectado a um tanque de 500 litros, este último com a finalidade de prover a temperatura de $105^{\circ}C$ da água de regeneração, minimizando, assim, o consumo do gás natural.

A pesquisa tem continuidade com o aperfeiçoamento das técnicas utilizadas para todos os componentes do sistema de refrigeração, assim como os atrasos nas respostas térmicas comuns aos sistemas hidráulicos. A etapa atual em que se encontra o projeto é a inclusão de uma função para simular o tanque de 500 litros, possibilitando, assim, utilizá-la para obter as respostas térmicas do sistema completo em regime permanente.

REFERÊNCIAS

- Domingos, P.V.S.R., 2010. Relatório de Estágio Supervisionado, UFPB/CT/DTM-UFPB/LES.
- Riffel, D. B., Andrade, R. R. D., Domingos, P. V. S. R., Belo, F. A., Leite, A. P. F., 2009. Comparative study on transmittance of transparent coverings for solar collectors. ISES Solar World Congress, África do Sul.
- Riffel, D. B., 2008. Estudo Teórico e Experimental da Dinâmica e da Otimização de Refrigeradores Térmicos por Adsorção, Tese de Doutorado (Eng. Mecânica), PPGEM/UFPB.
- Riffel, D. B., Leite, A. P. F., Belo, F. A., 2007, Simulação do aporte térmico de coletores solares planos em um tanque cilíndrico estratificado. In: I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, CE.
- Leite APF, Martins MM, Riffel DB, Belo FA, Meunier F., 2006. Central air conditioning based on adsorption and solar energy, Proc. 2nd Int. Solar Cities Congress, Oxford, England, 13-16 April.
- Leite APF, Belo FA, Grilo MB, Andrade RRD, Meunier F., 2005. An improved multi-tubular solar collector applied to adsorption refrigeration, Proc. ISES Solar World Congress, Orlando, Florida, USA, 6-12 Aug.
- Leite APF, Grilo MB, Belo FA, Andrade RRD., 2004. Dimensioning, thermal analysis and experimental heat loss coefficients of an adsorptive solar icemaker, Renewable Energy, Vol. 29, No 10, pp. 1643-1663.
- Leite APF, Belo FA, Grilo MB, Andrade RRD., 2003. Avaliação experimental de um adsorvedor multitubular coberto com material isolante transparente, Anais do VI Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica (CIBEM6), Coimbra, Portugal, 15-18 Out. 2003, Vol. I, pp. 253-258.
- Leite APF, Daguene M., 2000. Performance of a new solid adsorption ice maker with solar energy regeneration, Energy Conversion & Management, Vol. 41, pp. 1625-1647.
- Rommel M, Wagner A., 1992. Application of transparent insulation materials in improved flat-plate collectors and integrated collector storages, Solar Energy (49), pp. 371-380.
- Duffie, J. A. e Beckman, W. A., 1980. Solar Engineering of Thermal Processes, J. Wiley & Sons.

NUMERICAL SIMULATION OF THE REGENERATION SYSTEM OF AN ADSORPTION SOLAR AIR CONDITIONING BASED ON A FIELD OF HIGH EFFICIENCY FLAT PLATE COLLECTORS

Abstract. *This paper aims to present a numerical simulation of the "regeneration system" for a central air conditioning by adsorption with solar energy and natural gas as a heat source. For the calculation program, the Simulink interface with functions created in Matlab® was used for the field of solar collectors, the hot water storage tank and the adsorption chiller. For the collectors and the chiller, they were used empirical correlations and simple methods of energy balance. For the tank the function was based on the finite volume method. The simulation results are presented in different response curves generated for periods of 24 hours, as well as the changes of natural gas volume for the choice of the hot water tank volume, needed for the system to reach a regeneration temperature.*

Keywords. *Solar Refrigeration, Adsorption Air Conditioning, High Efficiency Flat Plate Collectors, Simulation.*