

SISTEMA AUTOMATIZADO DE TESTES DE COLETOR SOLAR PLANO

Wesley de Almeida Souto – wesley@ifba.edu.br

Universidade Federal da Paraíba – UFPB/Inst. Fed. de Ed., Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA

Douglas Bressan Riffel - dougbr@ufs.br

Universidade Federal de Sergipe – UFS

Francisco Antônio Belo – belo@pesquisador.cnpq.br

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. Este trabalho apresenta um sistema automatizado de levantamento de desempenho de coletor solar plano, baseado em recomendações da NBR-10184-1988. Foram projetadas e implementadas unidades de refrigeração e de aquecimento de líquido, as quais proporcionaram os ajustes dos valores de temperatura do líquido circulante. A vazão mássica do sistema foi controlada por um conversor de frequência que atuou sobre um conjunto motor-bomba a partir de uma calibração de vazão versus tensão e temperatura versus tensão. Nesse sistema, interfaces gráficas informam em tempo real valores de temperatura da água, temperatura do ar ambiente, vazão do sistema e o estado dos atuadores acionados por relés de estado sólido. Para validação do sistema utilizou-se um coletor solar de 1,7 m², com superfície de absorção de alumínio e cobertura de vidro. Os dados, amostrados através de duas placas de aquisição de dados de 12 bits em conjunto com todo sistema de instrumentação, revelaram os seguintes parâmetros da curva característica resultante: 0,61 para $F_R(\tau\alpha)$ e 6,64 W/m²°C para $F_R(U_L)$.

Palavras-chave: Sistema automatizado, Coletor solar plano, Aquisição de dados

1. Introdução

Os coletores solares são dispositivos responsáveis pela absorção e transferência da radiação solar para a água sob a forma de energia térmica. São instalados em casas, edifícios, hospitais, hotéis e similares e podem substituir com vantagens o uso dos chuveiros elétricos. Uma das vantagens é a economia proporcionada ao consumidor, haja vista que o chuveiro é um dos equipamentos que mais consomem energia nas residências brasileiras. Outra vantagem é a economia para o sistema elétrico, que geralmente fica sobrecarregado no início da noite, no horário em que boa parte dos brasileiros está com seus chuveiros ligados. Além disso, a redução no consumo de eletricidade promove atenuação nos danos ambientais gerados pela expansão do sistema elétrico.

De acordo com a ABRAVA (2005) o aproveitamento térmico da energia solar é uma das alternativas mais viáveis para substituição ou redução do uso de chuveiros elétricos. A adoção da energia solar para o aquecimento da água de banho contribui para uma redução no consumo de energia elétrica, visto que os chuveiros elétricos são responsáveis por mais de 5% do consumo nacional de energia elétrica e por cerca de 18% da demanda de ponta do sistema elétrico (Rodrigues, 2005). Essa parcela economizada, portanto, pode ser analisada como uma geração virtual de energia elétrica.

Os sistemas de aquecimento de água com aproveitamento da energia solar têm sido cada vez mais considerados nos projetos e no gerenciamento das novas edificações, seja pela obrigatoriedade de instalação de aquecedores solares em edificações públicas, como acontece em algumas cidades brasileiras tais como São Paulo e Rio de Janeiro, ou pela conscientização pessoal do uso racional e da conservação de energia.

Nota: O presente trabalho foi desenvolvido no período 2006-2009, antes da substituição da ABNT NBR 10184:1988 pela ABNT 15747:2009.

2. Materiais e métodos

Os ensaios experimentais dos coletores solares buscam estabelecer informações sobre a eficiência térmica média e a produção mensal de energia, sob condições que permitam a comparação e a avaliação dos resultados. No Brasil, um exemplo de laboratório capaz de realizar esses ensaios está no Grupo de Estudos em Energia Solar (GREEN SOLAR) da PUC-MG, em Belo Horizonte. Os pontos referenciais adotados são: a inclinação de 25° para os coletores e o mês de setembro para a cidade de Belo Horizonte, onde se realizam os ensaios indoor (Pereira et al., 2003).

Segundo a ABNT NBR-10184:1988 (Coletores solares planos para líquidos – Determinação do rendimento térmico), para se determinar o rendimento do coletor solar, um regime quase permanente deve estar presente. É considerado regime quase permanente quando as seguintes condições são atendidas:

- A diferença entre picos de irradiação solar total sobre o plano do coletor solar for inferior a 50 W/m²;
- A variação da temperatura de entrada do fluido no coletor não pode exceder 0,3°C;
- Não existir flutuação da temperatura ambiente superior a 1°C;

- A flutuação máxima da vazão mássica média do fluido não for superior a 2% do valor fixado para a área total de superfície em estudo;
- A flutuação na diferença de temperatura do fluido entre as seções de entrada e saída do coletor solar deve ser, no máximo, de 0,6°C;

Em função das necessidades requeridas para os ensaios, desenvolveu-se uma bancada de testes de coletores solares no Laboratório de Energia Solar – LES, da Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

Para um melhor aproveitamento da incidência da radiação solar posicionou-se o coletor analisado com angulação que corresponde à soma de 15° a latitude no município de João Pessoa do estado da Paraíba, ou seja, 22° em relação à horizontal, voltado para o Norte. Na Fig. 1 é apresentado um detalhe do coletor solar plano e do radiômetro Eppley usados nos ensaios. Na Fig. 2 encontra-se o esquema simplificado do sistema automatizado de testes de coletores solares planos – SATECOL (Souto, 2009).



Figura 1 – Detalhe do coletor solar plano e radiômetro usados nos ensaios

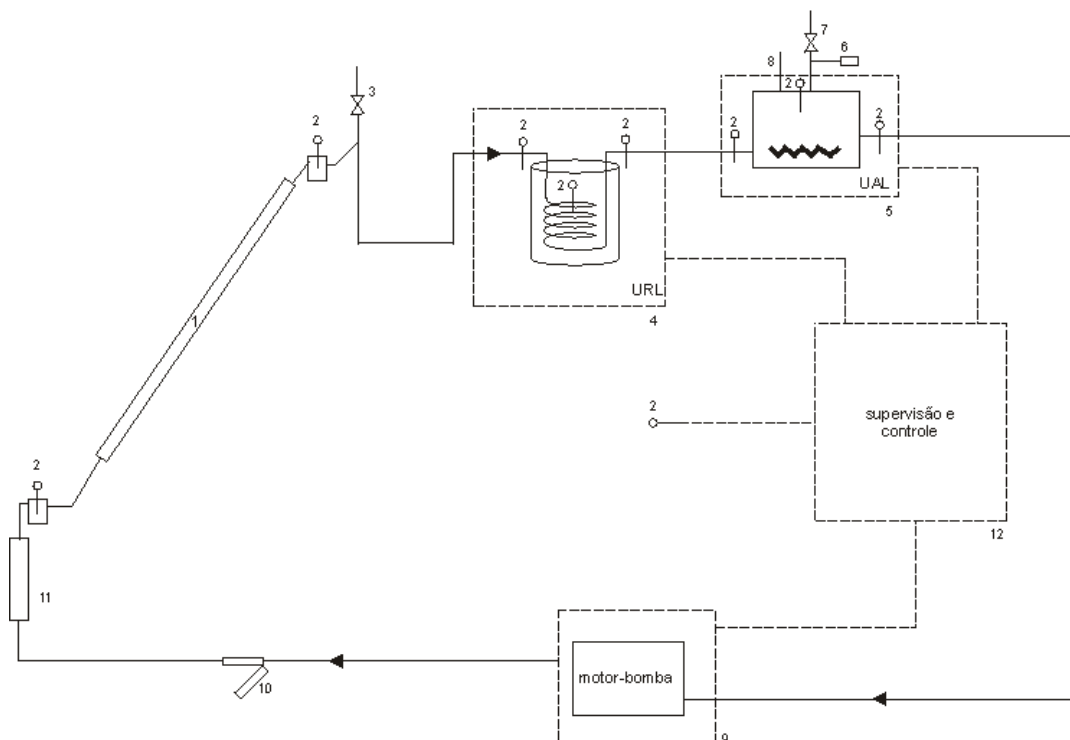


Figura 2 - Esquema simplificado do sistema automatizado de testes de coletores solares planos – SATECOL.

Legenda:

- | | | |
|--|--------------------------|---------------------------------------|
| 1 - coletor solar | 6 - tanque de expansão | 11- medidor de vazão |
| 2 - sensor de temperatura | 7 - válvula de alívio | 12 – sistema de supervisão e controle |
| 3 - purgador | 8 - reposição de líquido | |
| 4 - unidade de resfr. de líquido – URL | 9 - conjunto motor-bomba | |

5 - unidade de aquec. de líquido – UAL 10 - filtro

A unidade de refrigeração de líquido (URL) foi especialmente desenvolvida para reduzir a temperatura de saída do coletor solar sob teste e proporcionar a reutilização da água circulante no circuito, sob temperatura controlada. O compressor de vapor utilizado na URL foi do tipo rotativo, 60 Hz, 208/230 VCA, 9,6 A, 45/370 μ F/V, R-22, modelo Matsushita 2K32S3R236A, capaz de produzir 6,16 kW de potência frigorífica. Nas Fig. 3 e Fig. 4 são apresentados detalhes da unidade de refrigeração de líquido (URL).

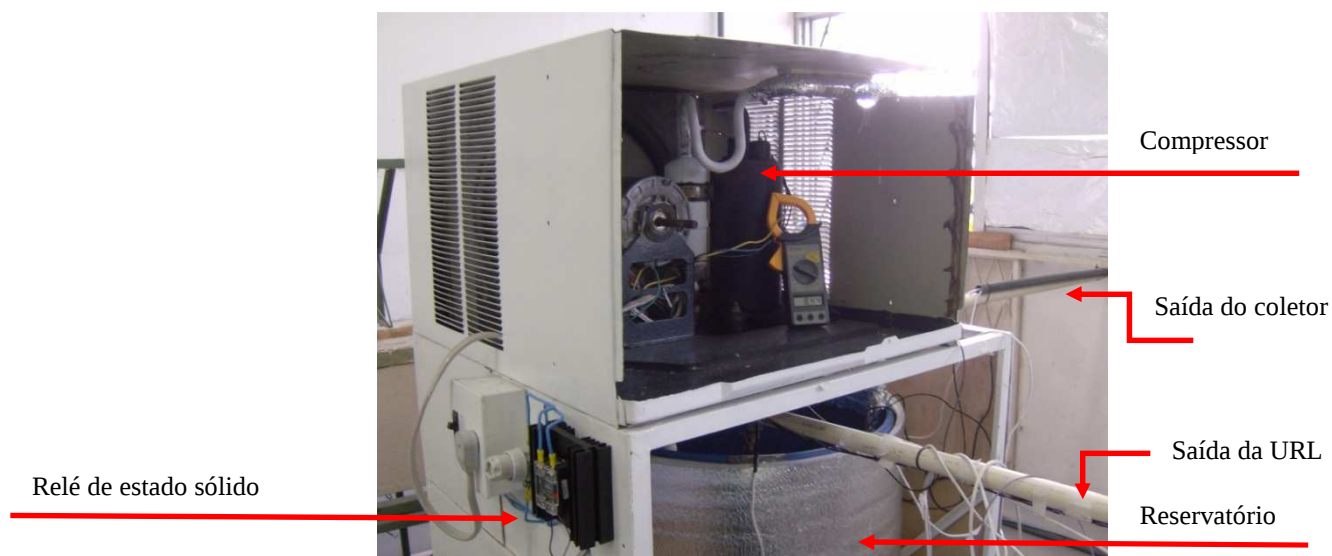


Figura 3 – Unidade de refrigeração de líquido – URL

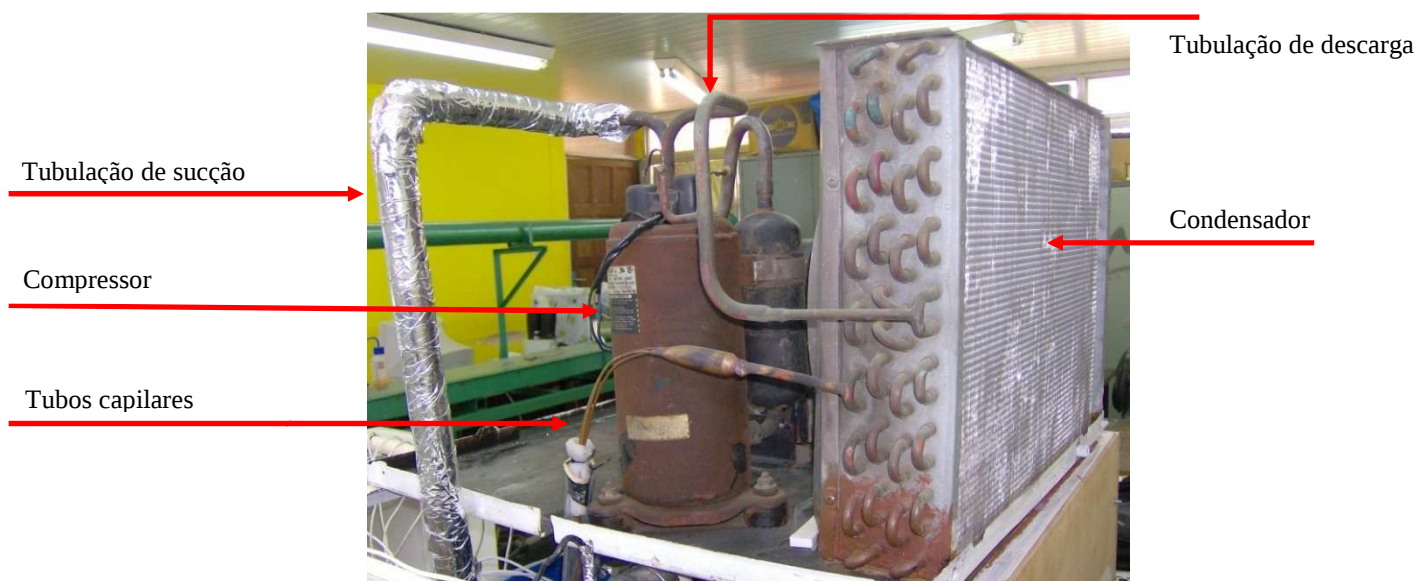


Figura 4 – Vista do condensador

A URL é capaz de reduzir a temperatura do reservatório em até 16 °C, com a habilitação controlada do compressor. No interior desse reservatório instalou-se ainda uma serpentina de cobre de 10 mm de diâmetro e com 7 m de comprimento proposta por Souto *et al.* (2008). O objetivo é resfriar água aquecida oriunda da conexão de saída do coletor solar sob teste, proporcionando uma troca de calor adequada para sua reutilização no ensaio, sem haver mistura de massa, conforme ilustrado na Fig. 5.



Figura 5 – Evaporador e serpentina de cobre no reservatório da URL

A água aquecida pelo coletor solar, ao passar pela serpentina imersa no reservatório da URL, sofre uma variação de temperatura, que irá depender da temperatura da água da URL e da vazão mássica, conseguindo-se redução de até 40 °C. Para armazenamento e aquecimento auxiliar de água, desenvolveu-se uma unidade de aquecimento de líquido (UAL) com capacidade para 23 litros, feito de aço carbono com tratamento anti-corrosivo e isolamento térmico. Esse isolamento é garantido com uma manta de polietileno expandido com poliéster aluminizado de 5 mm de espessura adicionada à superfície externa. Um sensor de temperatura tipo Pt-100, ligado a três fios, com bainha inox, fica em contato com a água que é aquecida através de uma resistência elétrica de imersão revestida em inox e com capacidade de 4 kW/220 VCA. O sensor e a resistência auxiliar estão ilustrados na Fig. 6.

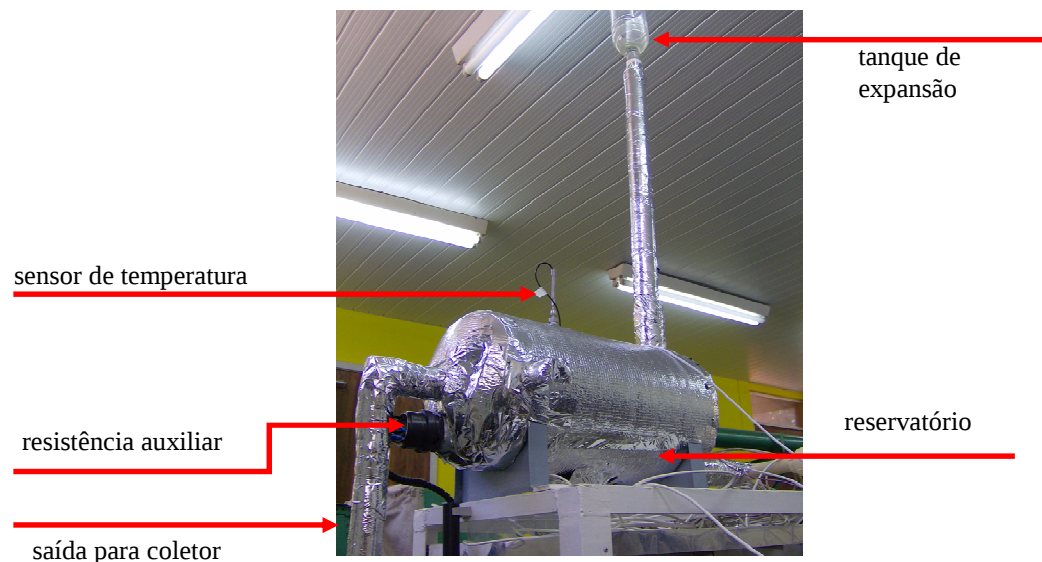


Figura 6 – Unidade de aquecimento de líquido

Na UAL, o aquecimento se dá diretamente no fluido, diminuindo assim as perdas de energia e tornando o sistema mais eficiente. Três relés de estado sólido energizam os elementos da resistência, conforme a necessidade de potência térmica definida pelo controlador para o ajuste da temperatura da água na entrada do coletor.

Para o cálculo de potência elétrica necessária para aquecimento no boiler levou-se em consideração a viabilidade técnica de instalação e a elevação da temperatura do fluido no interior do reservatório, segundo os seguintes cálculos. A vazão mássica, que é a massa de fluido que atravessa uma determinada seção por unidade de tempo, é dada na Eq. (1).

$$\dot{m} = \rho \times Q \quad (1)$$

Sendo:

$\dot{m}$: vazão mássica (kg/s);

ρ : massa específica do fluido (kg/m³);

Q : vazão volumétrica do fluido (m³/h).

A quantidade de calor necessária para variar a temperatura do fluido é dada na Eq. (2).

$$q_1 = \dot{m}.c_p.\Delta T \quad (2)$$

Sendo:

q_1 : calor de convecção transferido ao fluido (W);

$\dot{m}$: vazão mássica do fluido (kg/s);

c_p : calor específico do fluido (kJ/kg°C);

ΔT : elevação da temperatura do fluido (°C).

Adotando-se uma variação de 34 °C, calcula-se que é necessário uma resistência elétrica capaz de fornecer 3,98 kW de potência.

2.1 Distribuição axial da temperatura no tubo

A distribuição axial da temperatura média para a condição em que a temperatura superficial permanece constante é representado na Eq. (3) e na Eq. (4) (Incropera, 2003).

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{P}{\dot{m} c_p} . h . \Delta T \Rightarrow \dot{m} . c_p . dT_m = h . P dx . \Delta T \quad (3)$$

e

$$\Delta T = T_b - T_s \quad (4)$$

Sendo:

$\dot{m}$: vazão mássica [kg/s];

c_p : calor específico [kJ/m³];

T_m : temperatura média do fluido [°C];

h : coeficiente de convecção;

P : posição axial do tubo [m];

ΔT : diferença entre as temperaturas de banho e de superfície [°C].

A taxa total de transferência de calor por convecção, para a condição em que a temperatura superficial permanece constante é dada pela Eq.(5).

$$q_{conv} = \bar{h} A_s \Delta T_{ml} \quad (5)$$

Sendo:

$\bar{h}$: coeficiente médio de transferência de calor por de convecção;

A_s : Área de superfície do tubo;

ΔT_{ml} : diferença de temperatura média logarítmica.

A Eq. (3) pode ser solucionada separando-se as variáveis e integrando da entrada para um ponto qualquer ao longo do eixo do tubo, chegando-se a Eq. (6).

$$\int_{\Delta T_e}^{\Delta T_x} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = - \frac{P}{\dot{m} c_p} \int_0^x h dx \quad (6)$$

O resultado desta equação é usado para encontrar uma expressão na qual se determina a temperatura num ponto x (qualquer) do comprimento axial do tubo e serviu para o correto dimensionamento da serpentina usada na URL.

2.2 Sistema de controle

Através de uma interface gráfica (supervisório) desenvolvida em ambiente LabVIEW™ (National Instruments, 2003) ajustou-se a saída analógica de 0 a 10 VCC de uma placa de aquisição de dados de 12 bits, da National Instruments™, de modo a controlar remotamente o conversor de frequência e conseqüentemente, a variação da vazão do sistema. A amplitude da tensão analógica foi previamente calibrada com um medidor de vazão tipo rotâmetro para atuação numa faixa de 0,01 a 0,033 l/s, correlacionando tensão versus vazão e tensão versus temperatura. Deste modo, um controlador envia os sinais de tensão analógica para o conversor de frequência a partir do setpoint de vazão e da leitura em tempo real da temperatura da água promovendo as devidas compensações.

Analogamente, no controle das unidades de resfriamento e de aquecimento de líquido foram utilizados sinais elétricos de 0 a 10 VCC provenientes de outra placa de aquisição de dados de 12 bits para energização dos relés de estado sólido atuantes no compressor da URL e na resistência de aquecimento da UAL, sob o mesmo supervisório.

Na Fig. 7 é apresentado o esquema simplificado da unidade de refrigeração de líquido e, na Fig. 8, o esquema simplificado da unidade de aquecimento de líquido (UAL).

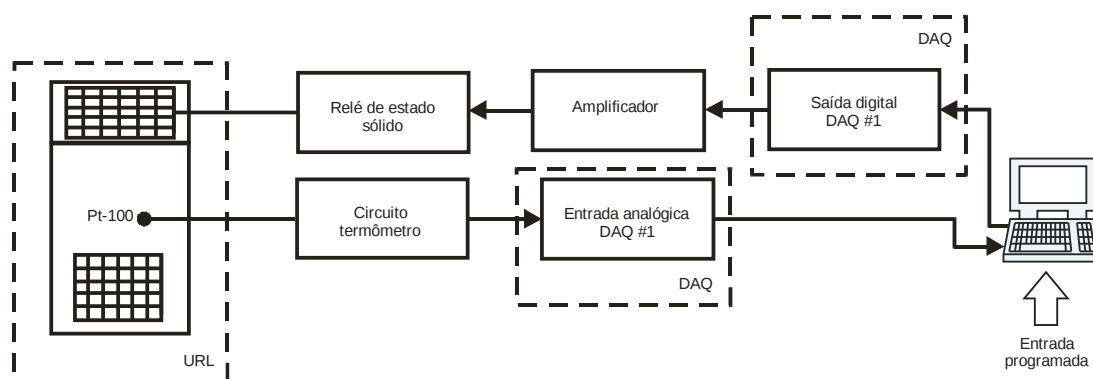


Figura 7. Esquema simplificado da unidade de refrigeração de líquido

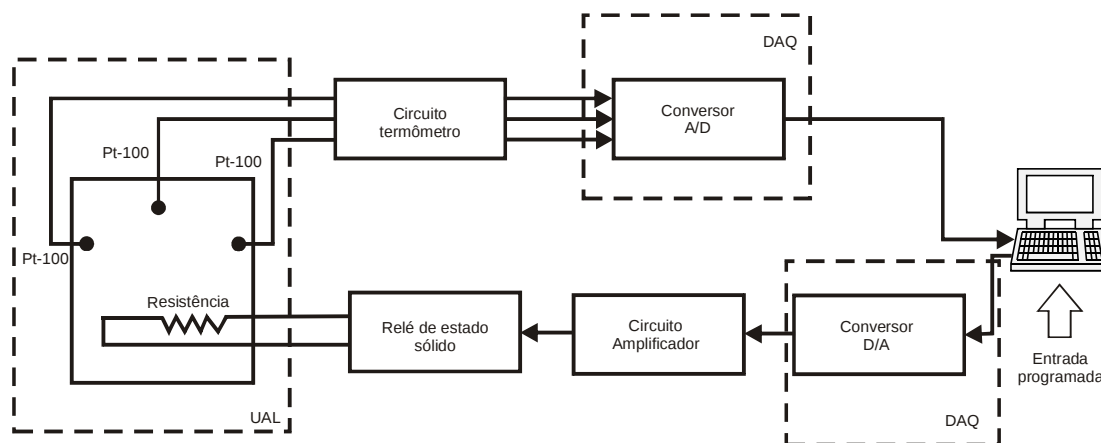


Figura 8 – Esquema simplificado da unidade de aquecimento de líquido

A interface de supervisão e controle da unidade de resfriamento de líquido é apresentada na Fig. 9. Neste ambiente o usuário define o valor desejado de temperatura de resfriamento do líquido contido no reservatório.

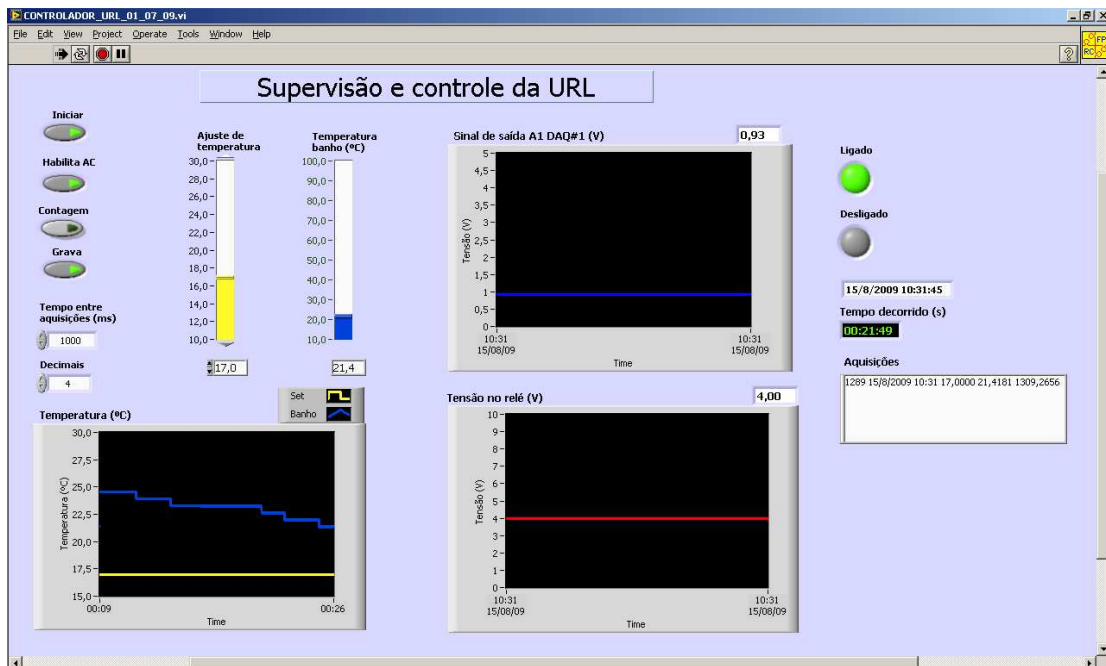


Figura 9 - interface de supervisão e controle da unidade de resfriamento de líquido

2.3 Aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados operou em regime contínuo no intervalo de 10:00 às 14:30. Amostragens foram registradas para cada novo ajuste desejado no valor de temperatura da água na entrada do coletor solar com duração de 8 minutos.

O menor valor de temperatura da água na entrada do coletor solar foi de 27,0 °C e o máximo, de 64,3 °C. Os sensores usados na medição de temperatura foram do tipo Pt-100, ligados a três fios que após calibração apresentaram coeficiente médio de determinação, $R^2 = 0,99998$, indicando, portanto, boa linearidade.

Durante o período de ensaio não houve uma diferença entre picos de fluxo de radiação solar total sobre o plano do coletor solar superior a 50 W/m², a flutuação da temperatura de entrada do fluido no coletor manteve-se estável para cada valor selecionado e não excedeu um valor de 0,3°C, a flutuação máxima da vazão mássica média do fluido manteve-se em 2% do valor ajustado.

Desse modo, a análise de eficiência do coletor solar foi obtida através da Eq. (7).

$$\eta = \frac{\rho \cdot V \cdot c_p (t_s - t_e)}{A \cdot H} \quad (7)$$

Sendo:

ρ : densidade do fluido na temperatura de fluxo [kg/m³];

V : volume de fluido que circulou pelo coletor solar durante a execução do ensaio [m³];

c_p : calor específico do fluido a uma temperatura de $0,5 \times (t_s - t_e)$ [kJ/kg°C];

t_e : temperatura da água na seção de entrada do coletor [°C];

t_s : temperatura da água na seção de saída do coletor [°C].

$(t_s - t_e)$: diferença entre temperatura do fluido entre as seções de saída e entrada do coletor [°C];

H : energia solar incidente total sobre o plano do coletor durante o tempo de ensaio [J/m²];

A : área do coletor [m²];

2.4 Potência absorvida instantânea

O cálculo da potência absorvida instantânea pelo coletor solar por unidade de área foi realizado através da Eq. (8).

$$P_{abs} = \frac{\rho \times \dot{m} \times c_p \times (t_s - t_e)}{A_c} \quad (8)$$

Sendo que:

P_{abs} : Potência absorvida instantânea pelo coletor por unidade de área [W/m^2];

ρ : Densidade da água [kg/m^3];

$\dot{m}$: Vazão mássica da água [kg/s];

c_p : Calor específico da água [$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$];

t_s : Temperatura da água na saída do coletor [$^\circ\text{C}$];

t_e : Temperatura da água na entrada do coletor [$^\circ\text{C}$];

A_c : Área superficial do coletor [m^2].

3. Resultados

Para densidade e calor específico da água foram adotados os valores de 1000 kg/m^3 e $4,187 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, respectivamente. Durante os ensaios, manteve-se em média, uma vazão mássica de $0,0000283 \text{ m}^3/\text{s}$, uma temperatura ambiente de $28,2^\circ\text{C}$ e uma irradiância solar máxima de $934,5 \text{ W/m}^2$.

De acordo com a segunda lei da termodinâmica, confirmado por Duffie e Beckmann (1991), os sistemas de aquecimento solar de água operam com mais eficiência quanto mais baixa for a temperatura da água na entrada dos coletores e isto pode ser notado através da Fig. 10 onde a potência absorvida instantânea por unidade de área, atingiu valores mais elevados nas situações onde os valores de temperatura da água na entrada do coletor foram mais baixos. Observa-se também na Fig. 10 que para o período de 4 h de ensaio, a potência média horária absorvida por unidade de área pelo coletor solar foi cerca de 500 Wh/m^2 .

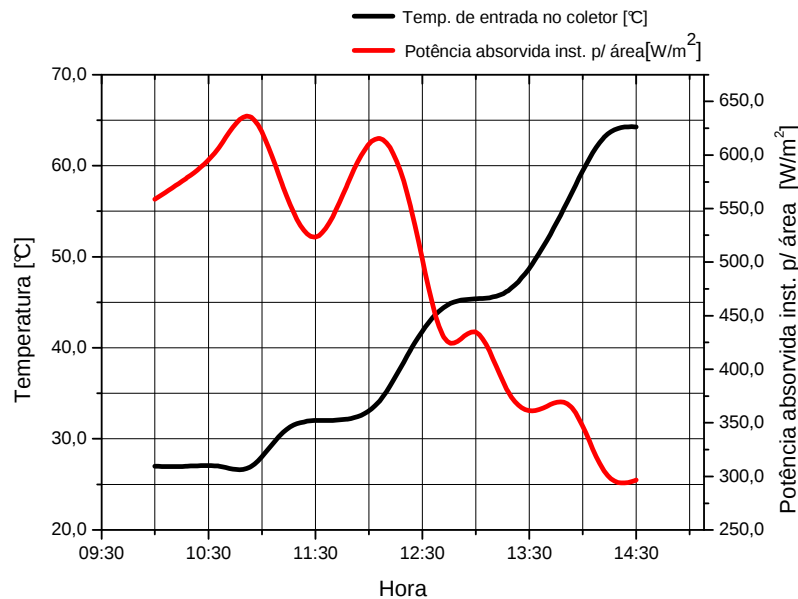


Figura 10 - Potência instantânea por unidade de área absorvida pelo coletor

Neste ensaio, para o conhecimento do comportamento do coletor sob teste, inicialmente controlou-se a temperatura da água na entrada do coletor solar, tendo como referência a temperatura do ar ambiente durante os quatro primeiros pontos amostrados e, na sequência, ocorreu um crescimento gradual conforme ilustrado na Fig. 11.

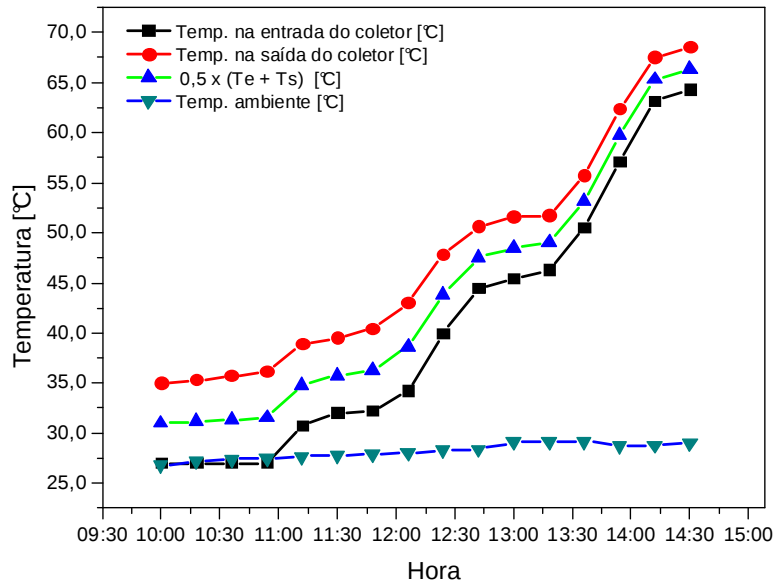


Figura 11 - Comportamento do coletor solar em função das temperaturas de entrada

A curva característica ajustada aos pontos de ensaios está ilustrada na Fig. 12 e é representada pela Eq. (9). Nessa figura, observa-se uma significativa dispersão de alguns valores. Isso se deve, principalmente, ao radiômetro que acumula mais de uma década sem calibração e que deve apresentar uma incerteza de, no mínimo, 10%.

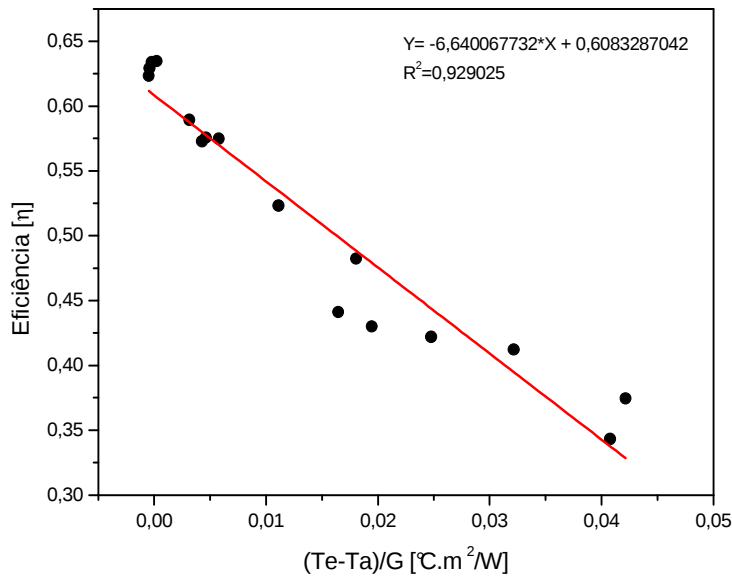


Figura 12 – Curva de eficiência térmica instantânea e a reta ajustada

$$\eta = -6,64 \left(\frac{te - ta}{G} \right) + 0,61 \quad (9)$$

Sendo:

η : eficiência instantânea;

G : radiação solar [W/m^2];

te : temperatura do fluido na entrada do coletor [$^{\circ}\text{C}$];

ta : temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$].

Por analogia, a partir da Eq.(9), obtêm-se os valores de $F_R(U_L)$ e $F_R(\alpha\tau)$.

$$\eta = -F_R(U_L) \left(\frac{t_e - t_a}{G} \right) + F_R(\alpha\tau) \quad (10)$$

Que representam:

t_e : temperatura do fluido na entrada do coletor [$^{\circ}\text{C}$];

t_a : temperatura do ambiente [$^{\circ}\text{C}$];

G : radiação solar incidente no coletor [W/m^2];

$F_R(U_L) = 6,64 \text{ W/m}^2\text{C}$ (perdas térmicas);

$F_R(\alpha\tau) = 0,61$ (rendimento óptico ou eficiência máxima).

4. Conclusões

Este trabalho apresentou alternativas nos processos descritos na NBR-10184-1988, projetando e especificando elementos necessários aos sistemas de testes de coletores, incluindo a sua instrumentação virtual. Para tal, desenvolveram-se circuitos eletrônicos para instrumentação e aquisição de dados, um sistema de refrigeração de líquido, por compressão de vapor, e uma fonte de aquecimento auxiliar de água, necessários para o controle da temperatura da água na entrada do coletor solar.

A vazão mássica do sistema foi controlada através da associação de um conjunto motor-bomba comandado por um conversor de frequência, eliminando o emprego das tradicionais válvulas tipo agulha para o controle de vazão. O medidor de vazão foi calibrado para uma faixa de vazão versus tensão analógica e também correlacionado a uma faixa de temperatura do líquido circulante para o controlador promover compensações devido à variações de temperatura da água e/outras variáveis.

Através do aparato experimental, conseguiu-se obter a razão entre a energia útil ganha pelo coletor e a irradiação solar incidente no seu plano; ou seja, a eficiência térmica do coletor. Os parâmetros da curva característica resultante do ensaio do coletor testado, de acordo com as condições meteorológicas do dia do ensaio foram 0,61 para $F_R(\alpha\tau)$ e 6,64 $\text{W/m}^2\text{C}$ para $F_R(U_L)$, valores coerentes com similares comercializados no mercado brasileiro.

5. Autorizações

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

Agradecimentos

Os autores são gratos à Universidade Federal da Paraíba – UFPB, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia – IFBA, campus de Vitória da Conquista e ao Programa CAPES/PIQDTec.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10184-1988: Coletores solares planos para líquidos: determinação do rendimento térmico. Rio de Janeiro, 1988.
- ABRAVA - Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. Disponível em: <<http://www.abrava.com.br>>. Acesso em: 20/10/05.
- ASHRAE. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers. Disponível em: <<http://www.ashrae.org>> acessado em: 15/08/2006.
- Dossat, R. J., 2004. Princípios de refrigeração. Editora Hemus, São Paulo.
- Duffie, J.A.; Beckman, W.A., 1991. Solar Engineering of Thermal Processes. 2ª Ed. New York: John Wiley & Sons.
- Incropera, F.P., De Witt, D.P., 2003. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 5ª ed. RJ, Ed LTC.
- National Instruments, 2003., LabVIEW User Manual, April 2003. Edition. by National Instruments Corporation.
- Rodrigues, W., 2007. Critérios para o uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Abastecimento de Água. Tese de Doutorado, FEC/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- Pereira, E. M. D.; Mesquita, L. C. S., 2003, O Programa Brasileiro de Etiquetagem de Coletores Solares Planos. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br>> Acesso:dez/2003.

- Souto, W.A., Nascimento, E.J.J., Belo, F.A., 2008. Instrumentation of a system of refrigeration of liquids. Proceedings of ENCIT 2008, 12th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences., November 10-14, 2008, Belo Horizonte, MG.
- Souto, W.A., 2009. Desenvolvimento de um sistema automatizado de levantamento de desempenho de coletor solar plano. Tese de Doutorado, PPGEM/UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

AUTOMATIZED SYSTEM FOR PERFORMANCE ANALYSIS OF FLAT-PLATE SOLAR COLLECTORS

Wesley de Almeida Souto – wesley@ifba.edu.br

Universidade Federal da Paraíba – UFPB/Inst. Fed. de Ed., Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA

Douglas Bressan Riffel - dougbr@ufs.br

Universidade Federal de Sergipe – UFS

Francisco Antônio Belo – belo@pesquisador.cnpq.br

Universidade Federal de Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica

Abstract. *This work presents the development of an automated test system for performance analysis of flat-plate solar collectors based on recommendations of the NBR-10184:1988. There are designed and implemented units of refrigeration and heating to control the temperature of the collector inlet. The mass flow rate system is controlled by a frequency converter in the place of the traditional valves. In this system, graphical interfaces inform in real-time values of water and ambient temperature, flowrate and the state of actuators driven by solid state relays. To validate the system it was utilized a 1.7 m² solar collector made by aluminum and a glass cover. The results shown a characteristic curve with the followings parameters: 0.61 for $F_R (\tau\alpha)$ and 6.64 W/m² °C for $F_R (U_L)$.*

Key words: *Automatized system, Flat-plate Solar collector, Data acquisition*