

UMA ANÁLISE DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA PARA USO DOMÉSTICO NO BRASIL

Sergio Colle¹ e Luigi A. de A. Passos¹

¹ UFSC/LEPTEN/LABSOLAR

Florianópolis, Santa Catarina, 88040-970, Brasil

RESUMO

Os aquecedores solares são propostos como uma alternativa para minimizar o uso dos chuveiros elétricos e conseqüentemente reduzir o pico de demanda da curva padrão de consumo elétrico residencial. Nesse contexto, o presente trabalho aborda uma metodologia para análise do desempenho térmico de sistemas de aquecimento solar de água para uso doméstico no Brasil. Três diferentes configurações de sistemas são simuladas no software TRNSYS e os desempenhos são apresentados em termos de fração solar mensal e anual, para diferentes cidades brasileiras. Os resultados mostram que todas as configurações analisadas são satisfatórias para o território brasileiro, com destaque para a primeira configuração analisada, onde o sistema de aquecimento auxiliar é composto por um aquecedor de passagem. Como complemento deste estudo, os resultados apresentados devem ser utilizados para uma posterior análise econômica, a fim de estabelecer a economia financeira decorrência da redução no consumo elétrico dos chuveiros e o tempo de retorno associado ao investimento aplicado na aquisição dos aquecedores solares.

Palavras-chave: aquecedor solar, chuveiro elétrico, economia de energia, simulação transiente.

ABSTRACT

Domestic solar hot water systems are proposed as an alternative to reduce the use of electric showerheads and therefore reduce the peak of the daily residential electricity consumption curve. In this context, this paper focuses on a methodology for analyzing the thermal performance of domestic solar hot water systems for Brazil. Three different system configurations are simulated in TRNSYS software and the performances are presented in terms of monthly and annual solar fraction for different cities. The results show that all configurations are considered satisfactory for the Brazilian territory, especially the first configuration analyzed, where the auxiliary heating system consists of a heated passage. In addition to this study, the results presented should be used for further economic analysis in order to establish the financial savings due to reduced consumption of electric showerheads and payback time associated with the investment made in the acquisition of solar water heaters.

Keywords: solar hot water system, electric showerheads, energy savings, transient simulation.

I. INTRODUÇÃO

O aquecimento de água para uso doméstico no Brasil provém predominantemente do uso dos chuveiros elétricos. Tal dispositivo é responsável por cerca de 25% do consumo de energia elétrica no setor doméstico brasileiro e 43% do pico de demanda na curva diária de consumo residencial. No segmento de consumidores de baixa renda ele é o principal fator de consumo de energia. Estima-se que o custo de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica para assegurar o pico de demanda dos chuveiros elétricos no Brasil varia entre US\$ 900,00 e US\$ 2.000,00 por chuveiro elétrico instalado (COLLE *et al.*, 2003; SALAZAR, 2004). O pico de demanda nesse horário é ilustrado na Fig. 1.

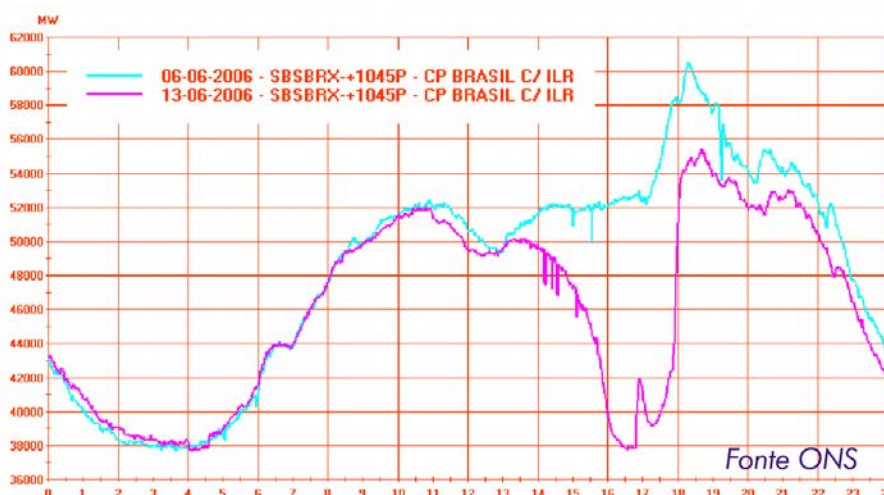


Figura 1: Curvas de demanda de energia elétrica no Brasil fornecidas pelo SIN para os dias 06/06/2006 e 13/06/2006.

Tal figura ilustra as curvas de demanda correspondentes aos dias 06/06/2006 (dia normal) e 13/06/2006 (dia em que o Brasil jogou com a Croácia na Copa 2006). Consta-se que a diferença entre as curvas de demanda no horário de pico correspondentes ao dia 06/06 e 13/06 é da ordem de 3,8GW. Para aquela data especial, é plausível admitir a hipótese de que os consumidores brasileiros, dispensados de seu trabalho para assistir, em casa, confortavelmente, o primeiro jogo, puderam tomar seus banhos antes do horário de pico. Admitindo-se como válida essa premissa, pode-se supor que a diferença de pico de demanda decorreu basicamente dos chuveiros elétricos, uma vez que esses podem não ter sido intensivamente utilizados naquele horário. A sobrecarga de chuveiros elétricos é o principal fator de degradação da qualidade do fornecimento de energia elétrica no meio urbano além do que, causa de avarias e falhas de equipamentos de distribuição.

Por outro lado, um aquecedor solar de 120ℓ de capacidade e 2m² de área de coletor solar plano pode ser produzido no mercado brasileiro a preços variando entre US\$ 700,00 e US\$ 1.000,00. Tal equipamento, na região mais desfavorável do território nacional, pode reduzir o consumo de energia dos chuveiros em no mínimo 50%. Existem inúmeros fabricantes nacionais capazes de produzir aquecedores solares de qualidade compatível as exigências dos consumidores de energia de aquecimento doméstico de água. Todavia, nenhum critério objetivo tem sido oferecido ao setor, na direção de reduzir a demanda de energia elétrica no horário de pico. Nesse sentido, a ANEEL poderia fazer o papel de mediação dos interesses dos consumidores, na direção de conceder ao consumidor de energia elétrica brasileiro, a prerrogativa de optar entre a alternativa de pagar em sua tarifa os custos marginais de geração, transmissão e distribuição associados, e a alternativa de subsidiar a aquisição de aquecedores solares por parte de consumidores de baixa renda no Brasil.

Poucos estudos consistentes de escala foram realizados no Brasil até o presente, na direção de caracterizar a curva de demanda de chuveiros elétricos e determinar efetivamente, o impacto da energia solar sobre o consumo de energia desses chuveiros. No período compreendido entre 2001 e 2004, o autor empreendeu e implementou um projeto financiado com recursos do Programa de P&D da CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina, regulamentados pela ANEEL, no contexto do qual foi realizado um experimento de escala, considerando um conjunto de sessenta consumidores contemplados com aquecedores solares e trinta consumidores não contemplados com o equipamento. Os aquecedores, com 90,5ℓ de capacidade e 1,36m² de área de coletor, foram especialmente projetados para essa finalidade e conjugados a misturadores termostáticos diretamente instalados na tubulação dos chuveiros elétricos. O coletor solar foi testado no ITW – Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, da Universidade de Stuttgart (Müller-Steinhagen, 2002). Um protótipo do aquecedor solar, objeto do estudo, totalmente monitorado e controlado de modo a simular o consumo, foi instalado no LEPTEN/LABSOLAR. Tal protótipo serviu de base para uma dissertação de mestrado (Salazar, 2004), no contexto da qual foi realizada a validação de um modelo de simulação do protótipo, no ambiente do software TRNSYS (2006).

No presente trabalho é realizada uma análise comparativa, considerando-se sistemas de aquecimento solar com um e dois reservatórios, tanto quanto conjugados a chuveiros elétricos (ou qualquer outro aquecedor de passagem). É estudado o cálculo da fração solar resultante das diferentes concepções dos sistemas, dentre quais as modalidades referem-se ao controle do pré-aquecimento.

2. MODELOS DE SIMULAÇÃO

O sistema objeto de simulação consiste de um aquecedor solar composto por um coletor solar de placa plana e um reservatório térmico acoplado, havendo ainda a opção de associar um o outro reservatório ao sistema, denominado de reservatório de backup, o qual opera em série entre o primeiro reservatório e o usuário consumidor. O coletor solar é caracterizado por três fatores, quais sejam, o fator de ganho $F_R(\tau\alpha)_n$, o fator de perda térmica $F_R U_L$ e o fator modificador de ângulo $K_{\tau\alpha} = 1 - b_o / \cos\theta$, onde b_o é uma constante a determinar e θ é o ângulo de incidência solar em relação ao plano inclinado do coletor. Esses parâmetros podem ser determinados através de testes quase-dinâmicos ou estacionários normatizados por Kratzenberg (2005) e Kratzenberg *et al* (2006). Muito embora a eficiência de um coletor possa ser expressa através de um polinômio de segundo grau, como função da diferença entre a temperatura da água de entrada e a temperatura ambiente, no presente trabalho adota-se uma correlação linear, é expressa pela seguinte expressão:

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n K_{\tau\alpha} - F_R U_L (T_e - T_a) / G_T \quad (1)$$

onde G_T é a radiação total (W/m^2) incidente no plano inclinado do coletor, T_e é a temperatura da água na entrada do coletor e T_a é a temperatura ambiente.

Os sistemas considerados no presente trabalho são simulados no TRNSYS e a modalidade de operação do coletor é operando por termosifão (convecção natural induzida). Os itens seguintes apresentam os modelos matemáticos referentes a cada componente do sistema simulado.

2.1. TERMOSIFÃO

Neste modelo, primeiramente é assumida a hipótese de regime permanente para o escoamento. Em seguida, o ciclo do movimento é dividido em um número N de segmentos normais a direção do fluxo e a equação de Bernoulli é aplicada em cada segmento destes. Desta forma, a variação de pressão em qualquer segmento, i, pode ser determinada através da seguinte equação:

$$\Delta P_i = \rho_i g \Delta h_i + \rho_i g h_{Li} \quad (2)$$

onde ρ_i é a massa específica da água, g a aceleração da gravidade, Δh_i a altura vertical do segmento e h_{Li} é as perdas por atrito na tubulação. Em cada instante de tempo a soma das variações de pressão durante todo o ciclo do movimento é nula, de modo que a seguinte equação deve ser satisfeita:

$$\sum_{i=1}^N \rho_i \Delta h_i = \sum_{i=1}^N \rho_i h_{Li} \quad (3)$$

Portanto, sob as condições impostas, o fluxo do escoamento no sistema termosifão pode então ser determinado.

2.2. COLETOR SOLAR

Para o coletor solar, a distribuição de temperatura é estimada de acordo com a equação de Hottel-Whillier, conforme segue:

$$T_{ck} = T_a + \left(T_{ci} - T_a - \frac{I_T F_R(\tau\alpha)}{F_R U_L} \right) \exp \left[- \frac{F_R U_L A_c (k - 0,5)}{\dot{m} c_p N_c} \right] + \frac{I_T F_R(\tau\alpha)}{F_R U_L} \quad (4)$$

Onde T_{ci} é a temperatura do fluido na entrada do coletor, T_a a temperatura ambiente, N_c o número fixo de segmentos no coletor, A_c a área do coletor, I_T a radiação total incidente na superfície coletora e o

$F_R U_L$, $F_R(\tau\alpha)$ e $F'U_L$ parâmetros de eficiência do coletor obtidos a partir do seu teste experimental de caracterização.

A taxa do ganho energético útil no coletor solar é calculada através da seguinte equação:

$$\dot{Q}_u = A_c [F_R(\tau\alpha)I_T - F_R U_L(T_{ci} - T_a)] \quad (5)$$

2.3. TUBOS DE CONEXÃO

Admite-se a hipótese de que os tubos de conexão entre o coletor solar e o reservatório podem ser considerados um único segmento com capacitância térmica desprezível. Logo, aplicando um balanço de energia neste segmento, obtêm-se as seguintes equações para temperatura média do fluido no interior da tubulação e para temperatura do fluido na saída desta, respectivamente:

$$\bar{T}_p = T_a + (T_{pi} - T_a) \left[\frac{\dot{m}c_p}{(UA)_p} \right] \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-(UA)_p}{\dot{m}c_p} \right] \right\} \quad (6)$$

$$T_{po} = T_a + (T_{pi} - T_a) \cdot \exp \left[\frac{-(UA)_p}{\dot{m}c_p} \right] \quad (7)$$

onde T_a é a temperatura ambiente, T_{pi} a temperatura de entrada do fluido na tubulação e $(UA)_p$ é o coeficiente global de transferência de calor da tubulação para o ambiente.

2.4. RESERVATÓRIO TÉRMICO

A estratificação no reservatório térmico é analisada adotando-se o modelo de estratificação *plug-flow*. A figura 2 ilustra o conceito desse modelo.

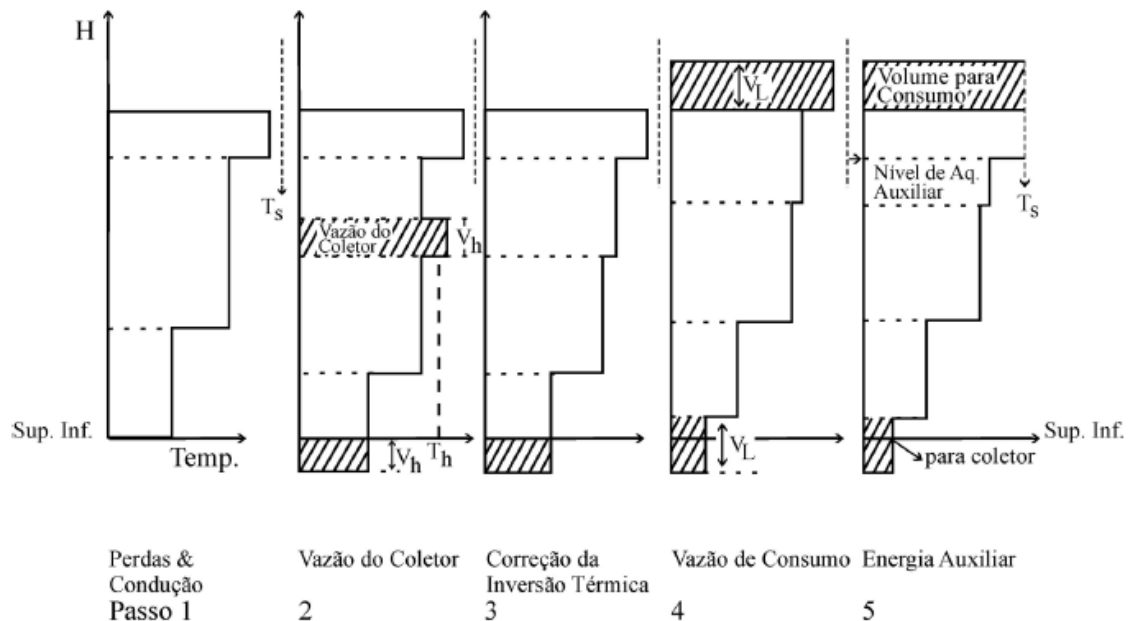


Figura 2: Exemplo ilustrativo do modelo de estratificação *plug-flow* (SALAZAR, 2004)

Primeiramente avalia-se o ganho decorrente do coletor, no qual durante o intervalo de tempo t_1 , chega ao reservatório térmico uma porção de fluido de volume V_h e temperatura T_h . Esta porção de fluido que chega se instala na parte superior do tanque. Com isso, os segmentos que se encontram abaixo dessa nova porção fluída movem-se no sentido do fundo do tanque em uma quantidade equivalente àquela circulando no coletor.

Por conseguinte, avalia-se a demanda energética retirada do tanque para consumo, no qual durante o mesmo instante de tempo t_1 uma nova porção de fluido é simultaneamente adicionada ao reservatório, proveniente da rede de abastecimento. Logo, esta porção que chega com um volume V_L e temperatura T_L se instala no fundo do tanque. Com isso, os segmentos que se encontram acima dessa nova porção de fluido movem-se no sentido do topo, em uma quantidade equivalente àquela que foi consumida. Portanto, o deslocamento total de líquido no reservatório será V_L na parte superior e $(V_h - V_L)$ na parte inferior.

Após todo o procedimento ser realizado, finalmente um novo perfil de temperatura e volume é estabelecido no reservatório e todo o processo é repetido no intervalo de tempo seguinte, $t_1 + \Delta t$.

A temperatura média do fluido consumido pela demanda é determinado através da seguinte equação:

$$T_D = \frac{1}{V_L} \left[aT_j V_j + \sum_{i=1}^{j-1} T_i V_i \right] \quad (8)$$

Onde

$$V_L = aV_j + \sum_{i=1}^{j-1} V_i \quad (9)$$

Satisfazendo ainda a seguinte condição: $0 \leq a < 1$.

Já a temperatura média do fluido que entra no coletor solar é determinada pela equação:

$$T_R = \frac{1}{V_h} \left[bT_k V_k + \sum_{i=k+1}^N T_i V_i \right] \quad (10)$$

Onde

$$V_h = bV_k + \sum_{i=k+1}^N V_i \quad (11)$$

Satisfazendo a seguinte condição: $0 \leq b < 1$.

2.5. PERDAS DE CARGA

A perda de carga nos tubos de conexão é determinada a partir do fator de atrito laminar possibilitando ainda considerar a região de entrada em cada tubo, conforme Morrison & Ranatunga (1980). Se o número de Reynolds para a tubulação, estimado a temperatura local, for maior que 2000, então o fator de atrito é calculado para um número de Reynolds igual a 2000. No coletor é a perda de carga é calculada teoricamente, assumindo uma distribuição uniforme do fluxo entre os cabeçotes, e no interior do reservatório é desprezada.

3. CASOS SIMULADOS E RESULTADOS

As simulações foram realizadas considerando-se um coletor solar plano com $F_R(\tau\alpha)_n = 0,67$, $F_R U_L = 5,74 W / m^2 K$ e $b_o = 0,16$. Configuraram-se os sistemas objetos para a presente análise, considerando-se o volume do reservatório conjugado ao aquecedor solar igual a 200 ℓ. Todavia, no caso

em que houver dois reservatórios, cada um deles será de 100 ℓ. Os reservatórios são isolados termicamente com uma camada uniforme de lã de vidro de espessura $e_s = e_b = 5\text{cm}$, cuja condutibilidade térmica é de $0,04\text{W/mK}$. A razão do diâmetro pela altura do reservatório é de 0,5. A temperatura mínima de controle de pré-aquecimento é de 40°C . A área de coletor é de $1,36\text{m}^2$. A inclinação do coletor é igual a latitude local. A distribuição horária de consumo de energia é igual a distribuição medida resultante do experimento de escala referido por Salazar (2004). Nesse contexto, três configurações distintas foram analisadas, conforme apresentado a seguir:

- Caso 1: Aquecedor solar com apenas um reservatório e aquecimento auxiliar de passagem;

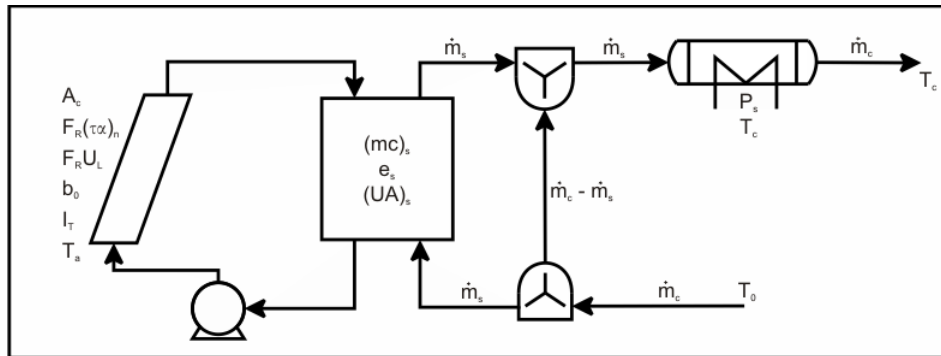


Figura 3 – Esquema ilustrativo do caso 1

- Caso 2: Aquecedor solar com apenas um reservatório e aquecimento auxiliar de acumulação no tanque;

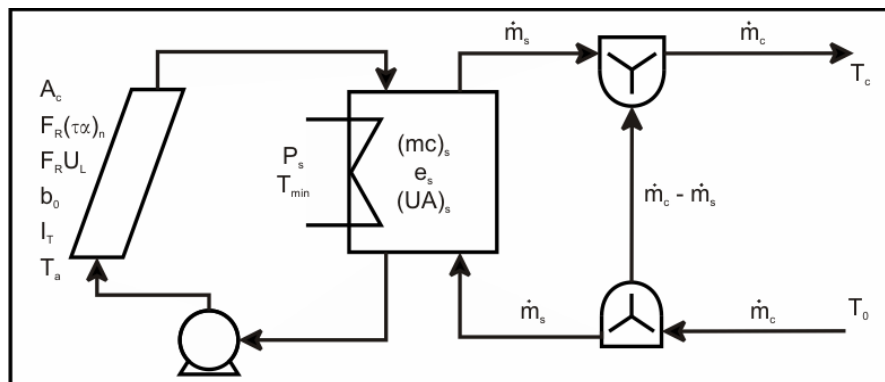


Figura 4 – Esquema ilustrativo do caso 2

- Caso 3: Aquecedor solar com dois reservatórios, com aquecimento auxiliar de acumulação apenas no segundo reservatório.

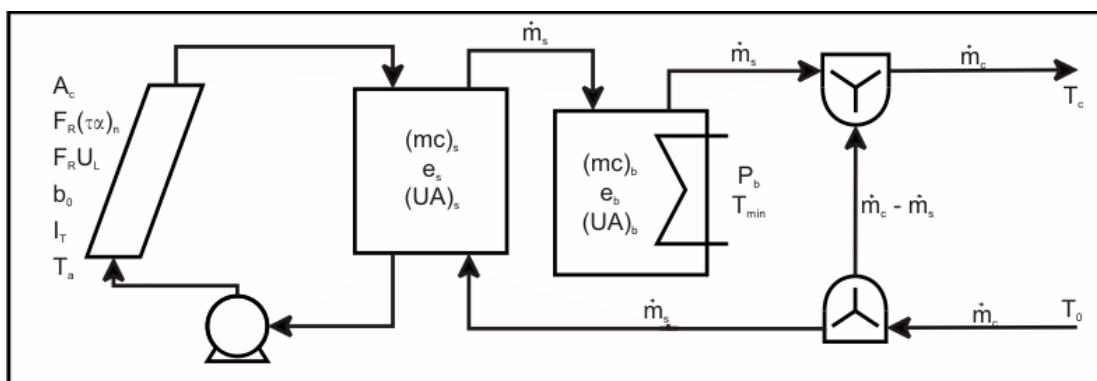


Figura 5 – Esquema ilustrativo do caso 3

Por conseguinte, as figuras 6, 7 e 8 mostram os resultados de fração solar para cada um dos casos simulados, em diferentes regiões do Brasil.

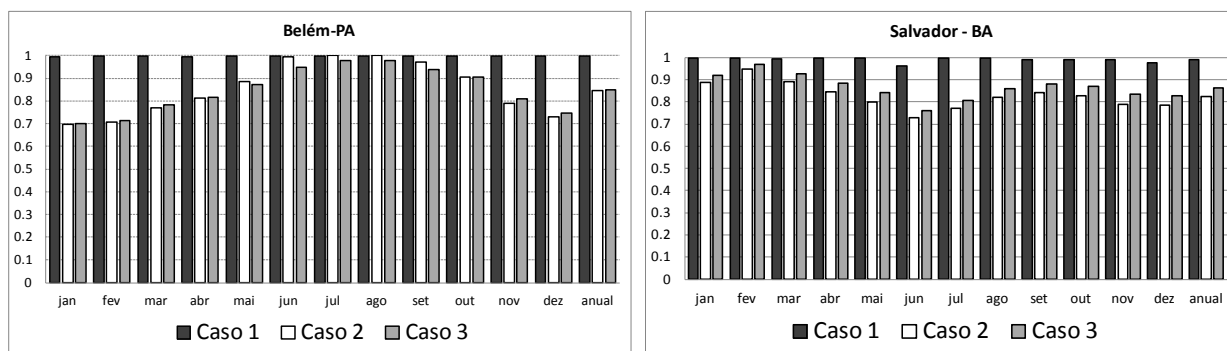


Figura 6 – Resultados de fração solar para as cidades de Belém-PA e Salvador-BA

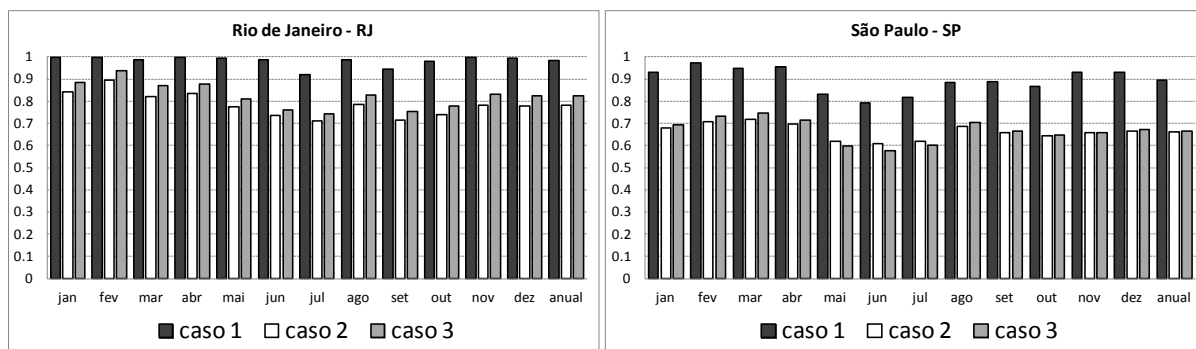


Figura 7 – Resultados de fração solar para a cidade de Rio de Janeiro-RJ e São Paulo-SP

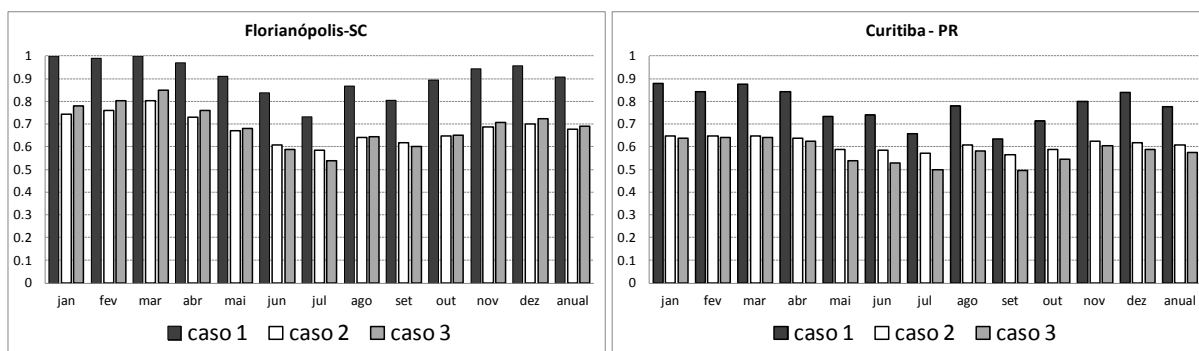


Figura 8 – Resultados de fração solar para a cidade de Florianópolis-SC e Curitiba-PR

Comparando os três casos considerados, constata-se que o sistema definido como caso 1 é aquele que apresenta os melhores resultados, sobretudo devido ao modo como é realizado o aquecimento auxiliar, através de um dispositivo de aquecimento de passagem, requerendo assim um consumo menor de energia para atingir a temperatura estabelecida para consumo. Todavia, os casos 2 e 3 oferecem a possibilidade do controle temporal do acionamento da resistência elétrica, ao invés do controle em função da temperatura, como foi efetuado no presente estudo.

Observa-se que nos três casos simulados o desempenho térmico é satisfatório em todas as cidades consideradas, apresentando uma fração solar anual mínima de cerca de 57%, referente a cidade de Curitiba-PR. Desse modo, os resultados demonstram o potencial de economia de energia associado aos sistemas de aquecimento solar analisados.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentada uma metodologia de análise do desempenho térmico de sistemas de aquecimento solar, no sentido de estimar o potencial de economia de energia elétrica no aquecimento de água para o banho nas residências do Brasil. Os resultados demonstraram que o desempenho térmico dos sistemas considerados é satisfatório em todas as regiões do país, o que já era esperado, sobretudo devido as características climáticas do Brasil.

Observou-se que o sistema definido no caso 1 a princípio seria o mais adequado tecnicamente. Todavia os casos 2 e 3 podem ser considerados mais atrativos no contexto de um programa de estratégias de controle temporal e redução das práticas tarifárias associadas.

Uma vez que os resultados técnicos foram determinados, a análise econômica é um estudo complementar fundamental, visto que através dele é possível estabelecer a econômica financeira obtida pelos sistemas e o tempo de retorno associado ao capital inicial investido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Colle, S., Glitz, K. L. Z., Salazar, J. P., Abreu, S. L.. Cost Optimization of Low-Cost Solar Domestic Hot Water Systems Assisted by Electric Energy, ISES - International Solar Energy Society Conference, Göteborg. 2003.

Kratzenberg, M. G., 2005. Método para Avaliação de Incertezas de Ensaio de Coletores Solares Baseados nas Normas EN12975 e ISO9806, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.

Kratzenberg, M. G., Beyer, H. G., Colle, S., 2006. Uncertainty Calculation Applied to Different Regression Methods in the Quasi-dynamic Collector Test, Solar Energy, vol. 80, pp. 1453 - 1462.

Morrison, G. L., Ranatunga, D. B.. Transient response of thermosyphon solar collectors. Solar Energy. Vol 24. 1980.

SALAZAR, J. P. Economia de Energia e Redução do Pico da Curva de Demanda para Consumidores de Baixa Renda por Agregação de Energia Solar Térmica. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2004.

TRNSYS, 2006. The Transient Energy System Simulation Tool, version 16.01.003, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin – Madison.