

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

Sergio Colle – colle@emc.ufsc.br
Allan Ricardo Starke – allan.starke@gmail.com
Luigi Antonio de Araujo Passos - luigi@lepten.ufsc.br
Carlos Eduardo da Veiga - bta_veiga@yahoo.com.br

LEPTEN – Laboratórios de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia / LABSOLAR
Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina
www.lepten.ufsc.br

Resumo. *O presente trabalho aborda aspectos técnicos e econômicos relacionados a questão da redução do pico de demanda de energia de chuveiros elétricos nas residências de baixa renda do Brasil. O aquecedor solar convencional proposto como solução no Brasil para desagregar ou reduzir totalmente o pico de demanda de chuveiros elétricos não é uma solução efetiva, uma vez que o perfil de demanda de energia dos chuveiros permanece virtualmente inalterado, sempre que ciclos climáticos desfavoráveis se repetirem. Propõe-se como solução, um sistema de aquecimento solar cuja energia auxiliar elétrica ou oriunda do gás natural é controlada, de modo que a água quente seja reservada nas primeiras horas da manhã, quando a tarifa de energia elétrica atingiria seu mínimo, na circunstância de um mercado efetivamente regulado. A implementação dessa solução será possível, com o desenvolvimento de algoritmos de base neural para previsão do dia solar, ancorados em sistemas de previsão de tempo de meso-escala. Essa solução poderá beneficiar os consumidores de baixa renda do Brasil além do que, oferecer ao setor elétrico informações objetivas para subsidiar uma política efetiva de disseminação de aquecedores solares, através de práticas tarifárias ponderadas à luz dessas informações. O trabalho aborda também a otimização do isolamento térmico de reservatórios, para diferentes concepções e modalidades de operação do sistema de aquecimento solar.*

Palavras-chave: Aquecedor Solar Doméstico, Chuveiro Elétrico, Fração de Energia Solar, Otimização Econômica.

1. INTRODUÇÃO

O chuveiro elétrico compõe cerca de 25% do consumo de energia elétrica no setor doméstico brasileiro. 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). 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.

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 e tal equipamento, na região mais desfavorável do território nacional, pode reduzir o consumo de energia dos chuveiros em mais de 70%. Por conseguinte, a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 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, especialmente projetados para desagregar o pico de demanda dos chuveiros elétricos.

O mercado brasileiro de energia solar tem crescido graças exclusivamente a iniciativa privada, à revelia portanto de eventuais políticas públicas para o setor. Nos últimos vinte anos, o governo federal praticamente não deu atenção ao desenvolvimento tecnológico do setor no Brasil. 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 integralmente a demanda de energia elétrica no horário de pico situado entre 18:00 e 21:00 horas. O pico de demanda nesse horário é ilustrado na Fig. 1. A 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). Constatou-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.

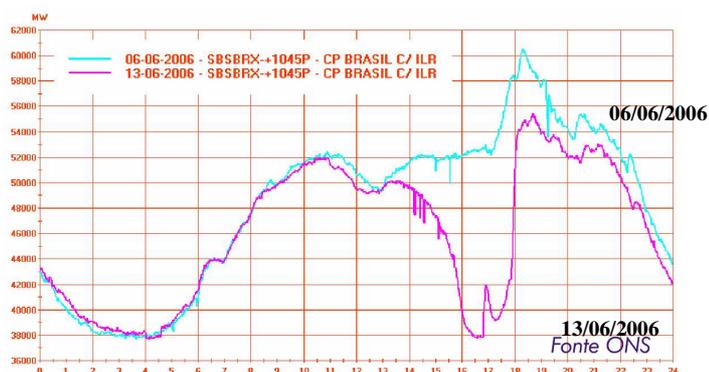


Figura 1 – Curvas de demanda de energia elétrica no Brasil fornecidas pelo SIN para os dias 06/06/2006 e 13/06/2006.

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). A demonstração foi realizada no contexto de uma parceria com a Caixa Econômica Federal, no Condomínio Residencial Solar Buona Vita, na localidade do Balneário de Canasvieiras, Florianópolis. A Fig. 2 ilustra uma foto de um setor do Condomínio Solar Buona Vita.



Figura 2 – Vista parcial do Condomínio Residencial Solar Buona Vita, propriedade da Caixa Econômica Federal, na localidade de Canasvieiras, Florianópolis.

A radiação solar foi medida no laboratório e no local da demonstração, de modo que a correlação das médias mensais dessas localidades foi consolidada. O consumo de cada chuveiro elétrico foi medido automaticamente e totalizado em cada seis minutos. Esses dados foram também totalizados na base horária, com os quais foram realizadas médias no período de dois anos. A temperatura da água quente para banho foi regulada para 38°C.

Na Fig. 3 são apresentados os resultados para os consumidores usuários de energia solar e consumidores não-usuários. Essa figura, estatisticamente representativa, deve refletir a realidade do perfil de consumo dos usuários de chuveiros elétricos na região sul do Brasil. Note-se que em uma parte substancial do período diurno esses usuários fazem uso do chuveiro elétrico. Entretanto, em muitas regiões do Brasil, sobretudo nas grandes cidades, o chuveiro elétrico é utilizado mais intensamente durante o horário de pico.

Trabalhos anteriores publicados no Brasil, não focalizaram efetivamente o impacto da energia solar sobre os chuveiros elétricos e tampouco a importância do isolamento dos reservatórios térmicos na economia de energia. Um primeiro trabalho abordando a otimização econômica, com base numa formulação puramente analítica, é reportado por Colle *et al.* (2001). Todavia, a teoria apresentada nesse trabalho, considera a otimização de isolamento térmico com base nos dados solares de Florianópolis, apenas no subconjunto de 18% de dias para os quais a radiação solar é inferior

ao nível de radiação utilizável. Esse trabalho considera um aquecedor solar igual aquele adotado no experimento de escala mencionado, qual seja, um aquecedor que não considera energia auxiliar no reservatório. O custo ótimo determinado nesse trabalho resulta numa espessura de isolamento ótimo de lã de vidro para o reservatório, da ordem de doze centímetros, valor muito acima do isolamento adotado pelo setor industrial que é da ordem de cinco centímetros.

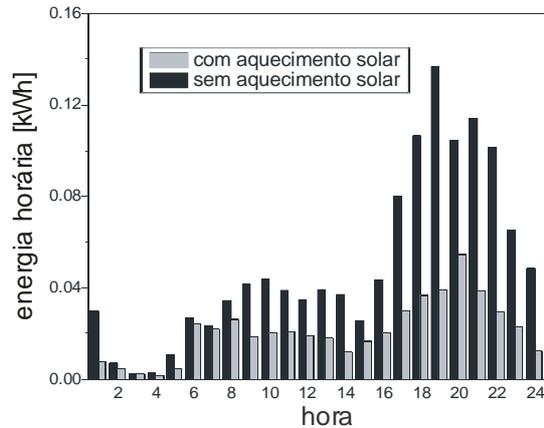


Figura 3 – Distribuição horária de consumo totalizado de energia dos chuveiros elétricos para o conjunto dos usuários e não-usuários de aquecedores solares.

Como consequência do experimento de escala mencionado, foi também realizado um estudo de otimização de rabate, qual seja, a otimização de uma função de custos com dois objetivos econômicos conflitantes. A função foi otimizada de modo a se determinar uma tarifa de energia de pico que maximize o benefício econômico do consumidor e o benefício econômico da concessionária. Nesse contexto, considerou-se que é do interesse da concessionária atrair os usuários dos chuveiros elétricos, através de tarifas de horário de pico economicamente interessantes. Por outro lado, é do interesse do consumidor, reduzir esse consumo e, portanto, adquirir um aquecedor solar com tal finalidade. O resultado desses estudos são reportados por Borges *et al.* (2003).

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). O chuveiro elétrico pode ser considerado como caso particular de um reservatório com aquecimento de backup, para o qual a capacidade térmica é nula. Dois aspectos são estudados, a saber, o cálculo da fração solar resultante das diferentes concepções e a otimização econômica para diferentes modalidades de operação dessas concepções. As modalidades referem-se ao controle do pré-aquecimento. São também apresentados dados econômicos referentes aos casos em que o pré-aquecimento do reservatório de backup é realizado nas primeiras horas da manhã, com tarifa diferenciada, de modo a dispensar o uso do chuveiro elétrico no horário de pico. Esse caso foi estudado com o objetivo de justificar pesquisas na direção de controlar o pré-aquecimento através de informações meteorológicas oriundas de sistemas de previsão de tempo de meso-escala, presentemente acessíveis a usuários da internet no Brasil.

2. MODELOS DE SIMULAÇÃO

O sistema objeto de simulação consiste de um aquecedor solar com dois reservatórios, sendo que um reservatório é conjugado diretamente a um coletor solar plano e o outro reservatório, denominado de reservatório de backup, opera entre o primeiro reservatório e o usuário. 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 (Kratzenberg, 2005), (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. Por conseguinte, a eficiência do coletor é expressa pela equação linear que segue:

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

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 ambiente do software TRNSYS. Entretanto, um modelo simplificado de simulação é aqui apresentado, com o qual foi realizada a otimização econômica do isolamento

térmico dos reservatórios. Tal modelo é baseado na hipótese de que a temperatura do fluido nos reservatórios térmicos não é estratificada (*full mix model*), conforme descrito por Duffie e Beckman (2006), de modo que o processo termodinâmico possa ser admitido como quase-estático. Na presente abordagem não se considera a capacitância térmica do coletor e também as perdas térmicas nas tubulações de conexão dos componentes. Admite-se que a energia térmica do coletor é transportada para o reservatório sempre que o saldo entre o ganho decorrente da radiação e a perda térmica do coletor seja positivo. O modelo adotado, como será constatado nos resultados, subestima a fração solar. Todavia, a discrepância dos resultados não é fator determinante para a otimização, cujos resultados podem ser considerados como referência para o projeto de sistemas de aquecimento solar com o objetivo de reduzir totalmente a demanda de energia de chuveiros elétricos. Note-se que a presente simulação pode ser utilizada independentemente da latitude, uma vez que os ganhos são programados pelo saldo de energia do coletor. Em simulações com o TRNSYS, no entanto, deve-se especificar a modalidade de operação do coletor, qual seja, operando por termossifão (convecção natural induzida) ou por bombeamento. Nesse particular deve-se considerar que a operação de um sistema de aquecimento solar na modalidade de termossifão depende fortemente da latitude, de modo que para latitudes de regiões próximas ao Equador, somente a modalidade de bombeamento pode ser considerada, visto que os coletores solares são instalados com um ângulo de inclinação referenciado a latitude. Considerando-se que a modelação no ambiente do TRNSYS retrata a realidade dos sistemas, espera-se do presente modelo resultados crescentemente discrepantes, na medida em que a latitude é reduzida.

As equações básicas do modelo simplificado utilizado, apresentadas a seguir, correspondem ao sistema mostrado na Fig. 4.

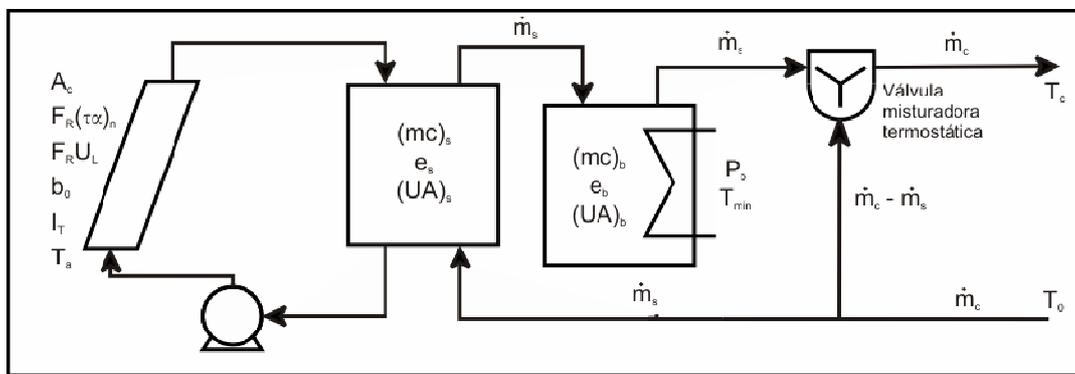


Figura 4 – Sistema de aquecimento solar com reservatório de backup e misturador termostático.

Com base nas hipóteses consideradas, o balanço de energia no sistema constituído do coletor solar e do reservatório conjugado, como mostrado na Fig. 4 resulta na equação diferencial que segue:

$$(mc)_s \frac{dT_s}{dt} = \dot{L}_s + A_c [F_R(\tau\alpha)_n K_{\tau\alpha} G_T - F_R U_L (T_s - T_a)] - (UA)_s (T_s - T_a) - \dot{m}_s c_p (T_s - T_o) \quad (2)$$

onde T_s é a temperatura do reservatório térmico conjugado ao coletor solar, que é igual a temperatura de entrada da água no coletor, T_a é a temperatura do ambiente para o coletor e para o reservatório térmico, T_o é a temperatura da água na entrada do sistema, $(mc)_s$ é a capacitância térmica do líquido no reservatório térmico, \dot{L}_s é a potência auxiliar de aquecimento do reservatório (kW), A_c é a área efetiva do coletor solar, $(UA)_s$ é o fator de perda térmica do reservatório térmico (kW/K), que é o produto do coeficiente global de transferência de calor U_s pela área efetiva de troca de calor do reservatório A_s , \dot{m}_s é a taxa mássica que alimenta o reservatório térmico (kg/s), c_p é o calor específico da água (kJ/kgK) e $(UA)_s = k_s \pi \{ 2L_o / \ln[(D_o + 2e)/D_o] + D_o^2 / 2e \}$ (W/K), onde $L_o(m)$ é o comprimento do reservatório de diâmetro $D_o(m)$ e $e(m)$ a espessura da camada de isolante térmico. Note-se que a energia subtraída do reservatório térmico corresponde ao último termo do segundo membro dessa equação.

Semelhantemente, o balanço da energia do reservatório de backup resulta na equação diferencial conjugada que segue:

$$(mc)_b \frac{dT_b}{dt} = \dot{L}_b - (UA)_b (T_b - T_a) - \dot{m}_s c_p (T_b - T_s) \quad (3)$$

onde T_b é a temperatura da água no reservatório de backup, $(mc)_b$ é a capacitância térmica do líquido no reservatório, $(UA)_b$ é o fator de perda térmica do reservatório e \dot{L}_b é a potência auxiliar de backup. Note-se que a energia subtraída do reservatório de backup é representada pelo último termo do segundo membro dessa equação.

O balanço de energia na conexão de separação de fluxos de massa é governado pela equação $(\dot{m}_c - \dot{m}_s)c_p T_o + \dot{m}_s c_p T_b = \dot{m}_c c_p T_c$, a qual pode ser escrita na forma que segue:

$$\dot{m}_c c_p (T_c - T_o) = \dot{m}_s c_p (T_b - T_o) \quad (4)$$

onde \dot{m}_c é a taxa mássica de consumo e T_c é a temperatura da água de consumo.

O sistema mostrado na Fig. 4 pode representar particularmente um sistema sem reservatório de backup, conjugado a chuveiro elétrico. Para tanto, basta na Eq. (2) fazer opcionalmente $\dot{L}_s = P_a$ (que é a potência de pré-aquecimento), substituir o último termo do segundo membro dessa equação pela expressão $\dot{m}_c c_p (T_c - T_o)$ e por fim, desconsiderar as equações (3) e (4).

As equações (2), (3) e (4) formam um sistema de equações não-lineares, figurando como incógnitas T_s , T_b e \dot{m}_s , uma vez que \dot{m}_c , T_c , T_a e G_T são dados. Tais equações podem ser resolvidas explicitamente através do método de Euler e suas variantes, como adotado no software TRNSYS. Todavia, no presente trabalho propõe-se um método implícito baseado no método de Crank-Nicholson (Carnahan et al, 1969). Primeiramente, as equações (2), (3) e (4) são integradas no intervalo de tempo de discretização Δt , durante o qual considera-se que a temperatura T_s varia de $T_s^- = T_s(t)$ a $T_s^+ = T_s(t + \Delta t)$, enquanto que a temperatura T_b varia de $T_b^- = T_b(t)$ a $T_b^+ = T_b(t + \Delta t)$. As integrais das taxas mássicas resultam em $\Delta m_c = \int_0^{\Delta t} \dot{m}_c dt$, $\Delta m_b = \int_0^{\Delta t} \dot{m}_b dt$ e $\Delta m_s = \int_0^{\Delta t} \dot{m}_s dt$. As integrais referentes a potência de energia auxiliar são expressas por parâmetros definidos pela integral $\Delta L = \int_0^{\Delta t} \dot{L} dt$. A integral referente ao termo de capacitância dos reservatórios é substituída por expressões lineares do tipo $(mc)(T^+ - T^-)$, enquanto que as integrais de expressões contendo a temperatura são substituídas pelo valor médio expresso pelo produto $T_m \Delta t$, onde T_m é a média ponderada entre T^+ e T^- (conforme o método de Crank-Nicholson), expressa por $T_m = \alpha T^+ + (1 - \alpha) T^-$, onde $0 < \alpha < 1$. Para $\alpha = 0$ o esquema numérico reduz-se ao método de Euler. Uma boa solução numérica convergente pode ser conseguida fazendo-se $\alpha = 0,5$. A integral da Eq. (4), adotando-se a média ponderada na aproximação da integral do segundo membro dessa equação, resulta na equação que segue:

$$\Delta m_c c_p (T_c - T_o) = \Delta m_s c_p [\alpha T_b^+ + (1 - \alpha) T_b^- - T_o] \quad (5)$$

Das integrais respectivas as equações diferenciais (2) e (3) resultam, respectivamente, expressões da forma $\Delta m_s [\alpha T_s^+ + (1 - \alpha) T_s^- - T_o]$ e $\Delta m_s [\alpha T_b^+ + (1 - \alpha) T_b^- - \alpha T_s^+ - (1 - \alpha) T_s^-]$. Substituindo-se as respectivas expressões nos termos das integrais das equações (2) e (3), resultam as equações respectivas que seguem:

$$\begin{aligned} (mc)_s (T_s^+ - T_s^-) &= \Delta L_s + A_c [F_R(\tau_\alpha)_n K_{\tau\alpha} I_T - F_R U_L \Delta t [\alpha T_s^+ + (1 - \alpha) T_s^- - T_a]] \\ &- (UA)_s \Delta t [(\alpha T_s^+ + (1 - \alpha) T_s^- - T_a)] - \Delta m_s c_p [\alpha T_s^+ + (1 - \alpha) T_s^- - T_o] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} (mc)_b (T_b^+ - T_b^-) &= \Delta L_b + (UA)_s \Delta t [\alpha T_b^+ + (1 - \alpha) T_b^- - T_a] \\ &- \Delta m_s c_p [\alpha T_b^+ + (1 - \alpha) T_b^- - \alpha T_s^+ - (1 - \alpha) T_s^-] \end{aligned} \quad (7)$$

onde $I_T = \int_0^{\Delta t} G_T dt$ é a radiação totalizada no intervalo Δt .

Os termos de conjugação que introduzem a não-linearidade no sistema de equações são os últimos termos do segundo membro das mesmas, os quais contêm a incógnita Δm_s . No sentido de eliminar essa incógnita, as equações (6) e (7) são multiplicadas membro a membro pelo fator $[\alpha T_b^+ + (1 - \alpha) T_b^- - T_o]$, de modo que o produto da incógnita pelo fator, conforme a Eq. (5), é eliminado em favor do produto $\Delta m_c c_p (T_c - T_o)$, que é conhecido. Os resultados dessa operação são condensados nas equações implícitas que seguem:

$$\varphi_s(T_s^-, T_s^+, T_b^-, T_b^+) = \{ (mc)_s (T_s^+ - T_s^-) - \Delta L_s - A_c [F_R(\tau\alpha)_n K_{\tau\alpha} I_T - F_R U_L \Delta t (\alpha T_s^+ + (1-\alpha) T_s^- - T_a)] + (UA)_s \Delta t [(\alpha T_s^+ + (1-\alpha) T_s^- - T_a)] [\alpha T_b^+ + (1-\alpha) T_b^- - T_o] - \Delta m_c c_p (T_c - T_o) [\alpha T_s^+ + (1-\alpha) T_s^- - T_o] \} = 0 \quad (8)$$

$$\varphi_b(T_s^-, T_s^+, T_b^-, T_b^+) = \{ (mc)_b (T_b^+ - T_b^-) - \Delta L_b + (UA)_b \Delta t [(\alpha T_b^+ + (1-\alpha) T_b^- - T_a)] [\alpha T_b^+ + (1-\alpha) T_b^- - T_o] - \Delta m_c c_p (T_c - T_o) [\alpha T_b^+ + (1-\alpha) T_b^- - \alpha T_s^+ - (1-\alpha) T_s^-] \} = 0 \quad (9)$$

Uma vez especificados T_s^- e T_b^- num estado inicial, as equações (8) e (9) podem ser resolvidas implicitamente em termos de T_s^+ e T_b^+ , utilizando-se o método de Newton-Raphson. O processo de cálculo seqüencial pode ser continuado, considerando-se como estado inicial o estado final correspondente ao passo anterior. O processo converge rapidamente. A solução numérica pode ser obtida considerando-se Δt como fração inteira da hora, desde que os dados solares sejam disponíveis com resolução temporal compatível com essa fração. Note-se que o termo $\Delta m_c c_p (T_c - T_o)$ é a energia consumida no intervalo de tempo Δt , correspondente a demanda. As equações (8) e (9) foram resolvidas utilizando $\Delta t = 3.600s$. As simulações foram realizadas para a cidade de Florianópolis, para a qual o LEPTEN/LABSOLAR dispõe de praticamente dezessete anos de dados medidos e totalizados a cada minuto, da radiação solar direta, global e difusa. Os dados foram coletados na estação BSRN – Florianópolis (www.bsrn.awi.de/en/stations). É digno de nota que para essa localidade e para as capitais do Brasil, a base de dados SWERA (www6.cptec.inpe.br/swera) disponibiliza, além das médias mensais da radiação solar incidente, também a série sintética TMY.

3. CASOS SIMULADOS E RESULTADOS

As simulações foram realizadas considerando-se um coletor solar plano com $F_R(\tau\alpha)_n = 0,67$, $F_R U_L = 5,74W / m^2 K$ e $b_o = 0,16$. Primeiramente, o software de simulação configurado no ambiente TRNSYS foi validado com dados obtidos da simulação do aquecedor solar utilizado no experimento de escala reportado por Salazar (2004). A seguir, o software foi configurado para os sistemas objetos da presente análise, considerando-se o volume do reservatório conjugado ao aquecedor solar igual a 90,5l e o volume do reservatório de backup igual a 70l. Ambos reservatórios são isolados termicamente com uma camada uniforme de lã de vidro de espessura $e_s = e_b = 5cm$, cuja condutibilidade térmica k_s é igual a $0,04W / mK$. A razão do diâmetro D_o pela altura do reservatório L_o é igual a 0,5. A temperatura mínima de controle de pré-aquecimento é de 40°C. A área de coletor é de 1,36m². A inclinação do coletor é de 30 graus. Para todos os casos a temperatura de entrada da água é de 20°C. Foi considerada uma distribuição horária de consumo de energia igual a distribuição medida resultante do experimento de escala referido por Salazar (2004), para usuários de chuveiro elétrico pleno, como mostrado na Fig. 3. Três configurações distintas foram analisadas como descritas a seguir.

3.1 Aquecedor solar sem reservatório de backup com pré-aquecimento no reservatório térmico

Neste caso o aquecimento auxiliar é feito através de uma resistência com potência de 4kW inserida no centro do reservatório conjugado ao coletor solar. A Fig. 5 ilustra esquematicamente o sistema respectivo.

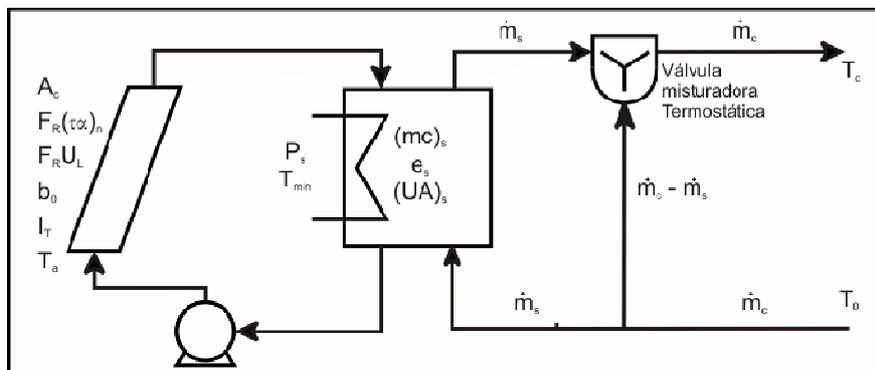


Figura 5 – Sistema de aquecimento solar com aquecimento no reservatório conjugado ao coletor solar.

A distribuição da fração solar mensal é mostrada na Fig. 6. No eixo da abscissa do lado direito é mostrada a diferença de resultados em relação aos resultados numéricos obtidos com o TRNSYS. A décima terceira coluna mostra a fração solar média anual e o desvio respectivo.

No presente caso constata-se uma razoável discordância entre o presente método e os resultados obtidos do TRNSYS. As frações solares obtidas com o presente método são sempre menores que as frações solares obtidas com o método TRNSYS. Esse resultado é esperado, uma vez que a estratificação no reservatório agrega maior eficiência ao coletor solar.

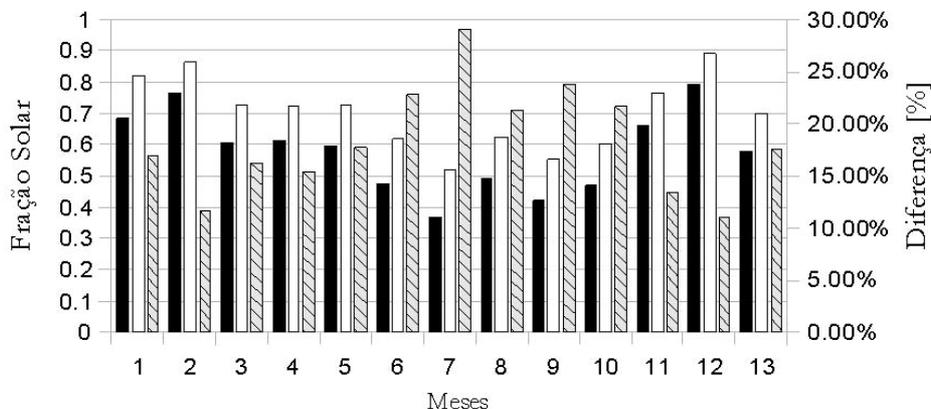


Figura 6 – Distribuição da fração solar mensal correspondente ao caso 3.1: barra preta (presente método), barra branca (TRNSYS), barra hachurada (diferença percentual).

A Fig. 7 mostra a fração solar correspondente ao caso de simulação com o TRNSYS, para o caso particular de não estratificação de temperatura no reservatório (*full mix*). Note-se que para esse caso se obtém resultados mais concordantes com os resultados do TRNSYS. A diferença média anual em termos da fração solar é da ordem de 6%. Para este caso particular, a fração solar obtida pelo presente método é levemente superior a fração solar obtida com a simulação TRNSYS.

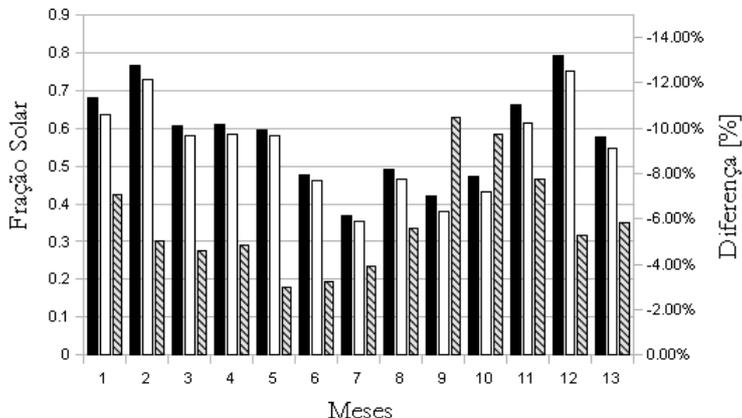


Figura 7 – Distribuição da fração solar mensal correspondente ao caso 3.1 para o caso de não estratificação no reservatório térmico conjugado ao coletor: barra preta (presente método), barra branca (TRNSYS), barra hachurada (diferença percentual).

3.2 Aquecedor solar com reservatório de backup

O sistema respectivo a este caso é mostrado na Fig. 4. O aquecedor de backup opera apenas no reservatório de backup. A distribuição anual da fração solar é mostrada na Fig. 8.

Os resultados obtidos com o presente método se diferenciam dos resultados obtidos com TRNSYS, pela mesma razão de existir estratificação de temperatura no reservatório conjugado ao coletor solar (a estratificação da temperatura no reservatório de backup não é considerada). A diferença na base anual é da ordem de 15%. Assim como no caso 3.1 as frações solares obtidas com o presente método são menores que as frações solares obtidas com o TRNSYS.

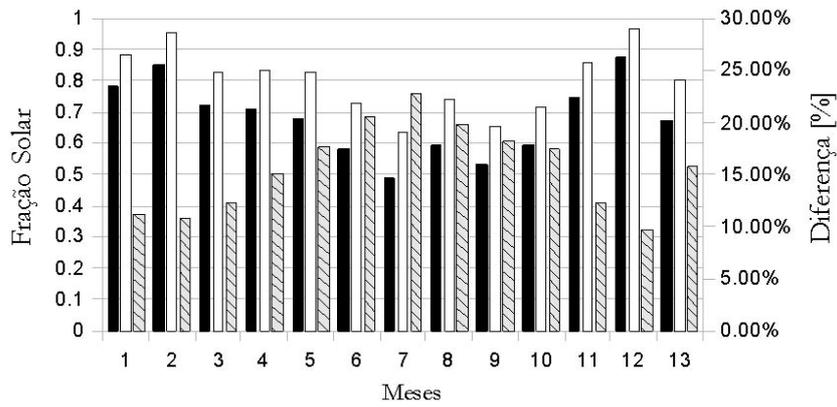


Figura 8 – Distribuição da fração solar mensal correspondente ao caso 3.2: barra preta (presente método), barra branca (TRNSYS), barra hachurada (diferença percentual).

3.3 Aquecedor solar sem reservatório de backup com pré-aquecedor de passagem

O sistema é ilustrado na Fig. 9. Esse caso contempla sistemas conjugados a chuveiros elétricos, uma vez que o chuveiro elétrico nada mais é que um aquecedor de passagem. Entretanto, diferentemente do que ocorre normalmente com os usuários de chuveiros elétricos, a temperatura de saída do chuveiro elétrico é considerada igual a 38°C. A distribuição mensal da fração solar é mostrada na Fig. 10.

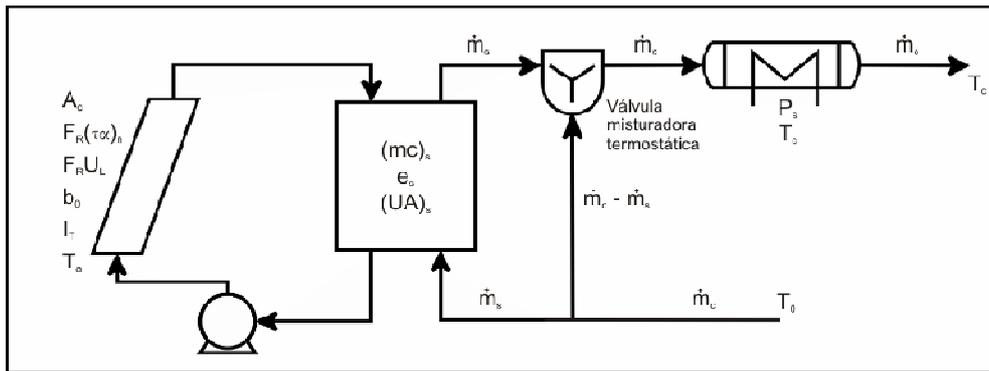


Figura 9 – Sistema de aquecimento solar sem reservatório de backup com pré-aquecedor de passagem.

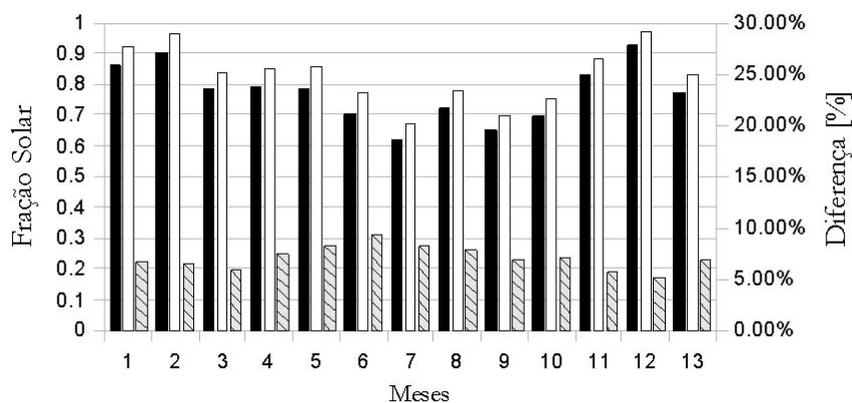


Figura 10 – Distribuição da fração solar mensal correspondente ao caso 3.3: barra preta (presente método), barra branca (TRNSYS), barra hachurada (diferença percentual).

A exemplo dos casos anteriores, as frações solares obtidas com o presente métodos são menores que as frações solares obtidas com o TRNSYS, sendo que a diferença na base anual é da ordem de 7%. A fração solar anual correspondente a esse caso é levemente superior a fração solar correspondente ao caso 3.2. Por outro lado, a fração solar correspondente ao caso 3.1 é menor que a fração solar correspondente aos casos 3.2 e 3.3. Esses resultados são esperados, uma vez que no caso 3.1, o pré-aquecimento no reservatório térmico agrega menor eficiência ao coletor solar, visto que a temperatura de entrada do mesmo é sempre superior a temperatura mínima de referência, qual seja, 40°C.

4 OTIMIZAÇÃO DO ISOLAMENTO TÉRMICO

O isolamento térmico do reservatório, que agrega custo de capital ao aquecedor solar é relacionado ao custo anual da energia auxiliar, uma vez que pouco isolamento térmico agrega perdas excessivas e, portanto, custo da energia auxiliar. Por outro lado, isolamento térmico excessivo agrega maior custo de capital, embora reduza custo da energia auxiliar. Um estudo neste sentido foi realizado por Colle *et al.* (2001), onde se adotou um modelo analítico simplificado e por esta razão, a equação diferencial da energia pôde ser resolvida analiticamente. No presente trabalho são analisados os casos simulados, como também o caso especial em que o pré-aquecimento do reservatório é realizado nas primeiras horas da manhã, de modo a suprir a energia demandada pelo aquecedor de passagem (chuveiro elétrico) no horário de pico. Nesse caso, o chuveiro pode ser virtualmente dispensado, na circunstância segundo a qual a energia auxiliar para compensar o consumo programado do chuveiro elétrico seja suprida e o consumidor, subsidiado com incentivos para aquisição do equipamento ou através de tarifas de energia elétrica reduzidas, não utilize o chuveiro elétrico no horário de pico.

Considerando-se que o presente método subestima a fração solar na base mensal para todos os casos analisados, é plausível admitir-se que os resultados da otimização obtidos com o presente modelo possam ser utilizados como referência de projeto. O software TRNSYS não foi utilizado para simular os casos de otimização, pela razão de que o caso especial correspondente ao pré-aquecimento nas primeiras horas da manhã não pôde ser programado, uma vez que o software não admite intervenções na programação temporal dos dados. Entretanto, é possível desenvolver um software no ambiente do software EES (2009) conjugado ao TRNSYS, de modo a realizar a intervenção e determinar a energia de backup necessária para compensar a demanda energética no horário de pico. Deve-se considerar, entretanto, que esse caso especial requer uma análise mais cuidadosa, uma vez que o perfil da radiação horária do dia, na realidade não é conhecido com antecedência, a menos que um algoritmo neural de previsão do dia solar seja desenvolvido, com incertezas aceitáveis.

Para efeito de comparação com resultados obtidos por Colle *et al.* (2001), foi considerado primeiramente um sistema de aquecimento solar do tipo 3.1 idêntico ao estudado na referência mencionada, para a qual o volume do reservatório térmico foi considerado igual a 80ℓ e área de coletor solar igual a 1,35m², com $F_R(\tau\alpha)_n = 0,8$, $F_R U_L = 3,0 W / m^2 K$ e $b_o = 0,16$. O período de análise econômica é de vinte anos, para taxa de desconto bancária de 8% e inflação de 10%. O custo específico do isolante térmico é de R\$ 280,00/m³ e três tarifas de energia elétrica foram consideradas, a saber, R\$ 0,187/kWh, R\$ 0,224/kWh e R\$ 0,262/kWh. O pré-aquecimento é realizado entre 0:00 hora e 6:00 horas da manhã, de modo a compensar integralmente o consumo. Na Fig. 11 são mostradas as curvas de custo total (custo operacional somado ao custo do isolamento).

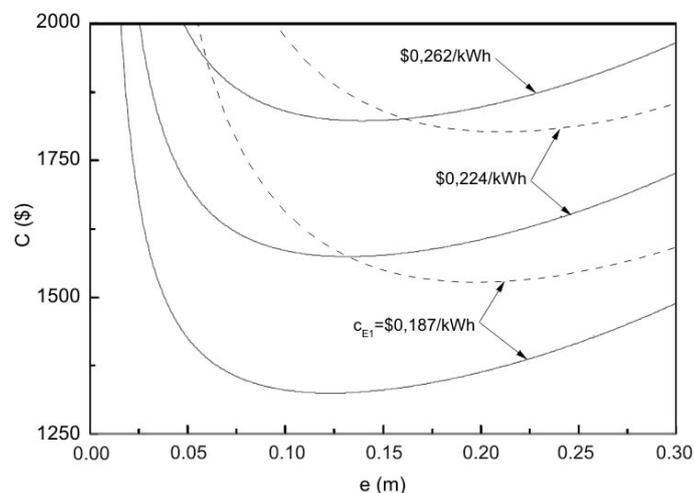


Figura 11 – Curvas de custo total obtidas da presente análise (linha tracejada) e curvas obtidas com o modelo analítico (linha contínua) referenciado em (Colle *et al.*, 2001)

Para efeito de comparação, A Fig. 11 mostra também as curvas respectivas resultantes da otimização analítica levada a efeito por Colle *et al.* (2001). Essa figura nos mostra que a espessura do isolamento ótimo resultante da presente análise é maior que aquela resultante da abordagem analítica. Entretanto, constata-se que as perdas de energia são muito pequenas, na circunstância de se adotar o isolamento resultante do método analítico. Observe-se, por outro lado, que o custo total estimado pelo presente modelo é maior para cada tarifa especificada.

A otimização econômica do isolamento térmico foi também realizada para os sistemas representados nos casos 3.1 e 3.2, neste caso, como já mencionado, para volume de reservatório igual a 90,5ℓ. Na Fig. 12 são mostradas as curvas de custo total para os sistemas 3.1 e 3.2, para as situações de pré-aquecimento de madrugada e aquecimento auxiliar

durante todo o dia, de modo a suprir a demanda do chuveiro elétrico. A tarifa elétrica praticada no horário da madrugada é considerada igual a praticada durante o dia. As espessuras de isolamento para este caso, como mostra a figura, situam-se entre 15cm e 18cm. Observe-se que se o isolamento térmico for mantido em 10cm o aumento do custo ótimo não ultrapassa em R\$ 50,00. Observe-se na Fig. 12, que o aquecimento auxiliar no período diurno, acarreta custo sensivelmente menor em relação ao custo respectivo ao caso de pré-aquecimento no horário da madrugada. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que na opção de pré-aquecimento de madrugada, a energia necessária deve ser maior para compensar as perdas durante o período diurno quando o sistema não recebe energia auxiliar.

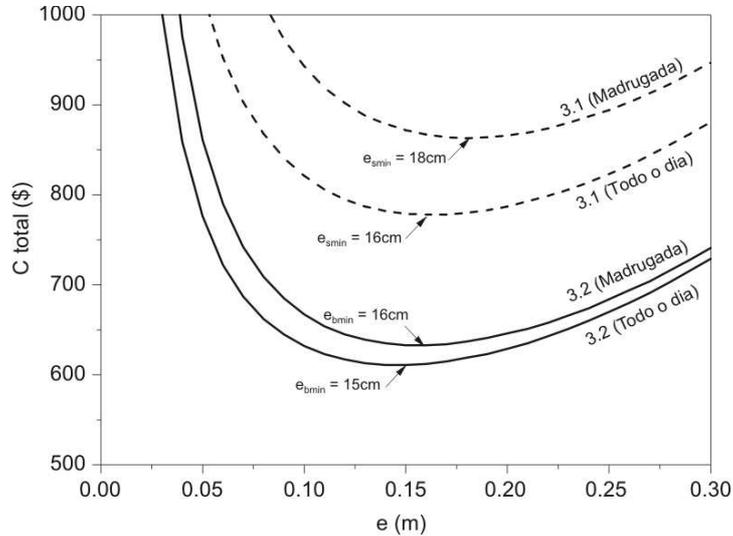


Figura 12 – Curvas de custo total para os sistemas 3.1 e 3.2 na situação de a tarifa praticada no horário da madrugada ser igual a tarifa diurna.

Na Fig. 13 são mostradas as curvas de custo total dos sistemas mencionados, na situação de a tarifa praticada no horário da madrugada ser igual a um terço da tarifa praticada no período diurno.

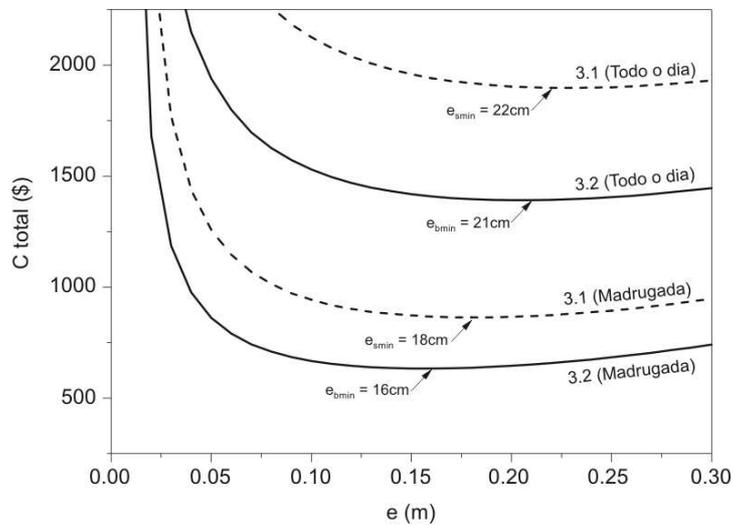


Figura 13 – Curvas de custo total para os sistemas 3.1 e 3.2 na situação em que a tarifa praticada no horário da madrugada é igual a um terço da tarifa diurna.

Embora as espessuras ótimas do isolamento térmico aumentem um pouco, a adoção de isolamento de 10cm de espessura pode resultar em aumento de custo de R\$ 100,00, o que representaria uma variação da ordem de 7% no custo total. No presente caso o aquecimento no período diurno acarreta custo muito maior em relação ao custo respectivo ao caso de pré-aquecimento no horário da madrugada. Essa considerável diferença deve-se ao fato de as tarifas serem distintas.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foram analisados sistemas de aquecimento solar considerando-se os fatores de projeto, bem como aspectos econômicos. Dentre os sistemas analisados, o sistema que considera reservatório de backup é mais interessante para assegurar a supressão da demanda de chuveiros elétricos. Considerando-se que os reservatórios de coletores de baixo custo poderão ser produzidos com termo-plásticos, o acréscimo de custo com dois reservatórios pode ser justificado, se consideramos numa análise macro-econômica os custos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica associados aos chuveiros elétricos.

No tocante a otimização econômica, os resultados da análise do presente trabalho nos permitem concluir que os sistemas inovadores que objetivem a supressão da curva de pico dos chuveiros elétricos devem considerar a necessidade de aumentar a espessura de isolamento do reservatório térmico. As curvas de custo total nos mostram que ganhos econômicos podem ser agregados com investimento no isolamento térmico.

A análise econômica e otimização dos sistemas aqui considerados, como já foi observado, não foram realizadas com simulação utilizando o software TRNSYS. Presentemente, os autores estão realizando a simulação no ambiente TRNSYS, de diferentes sistemas de aquecimento solar, para todas as cidades brasileiras para as quais a base de dados SWERA disponibiliza a série sintética TMY. Além desse trabalho, uma outra pesquisa está sendo conduzida na direção de validar a função da fração solar mensal, segundo a formulação f-Chart (Klein e Beckman, 1979), de modo a realizar mapeamentos de impacto da energia solar sobre a redução do pico de demanda dos chuveiros elétricos, tanto quanto sobre a economia dos consumidores, na ótica dos custos marginais de geração, transmissão e distribuição arcados pelos consumidores de energia elétrica. Paralelamente, a simulação dos sistemas aqui analisados está sendo realizada, no contexto de um trabalho em nível de mestrado, considerando-se o caso de sistemas pré-aquecidos no horário da madrugada, desta vez, introduzindo-se nas séries TMY disponíveis para o Brasil, variações aleatórias sobre os perfis diários de radiação solar incidente, com desvios estatisticamente representativos e consistentes.

Agradecimentos

O autor do presente trabalho agradece ao CNPq pelo apoio recebido através de bolsa de produtividade em pesquisa na categoria IA, no período de execução das pesquisas respectivas. Ele externa também seu reconhecimento a empresa CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina, pelo apoio recebido através do fundo de P&D / ANEEL da empresa.

REFERÊNCIAS

- Borges, T. P. F., Correia, P. B., Colle, S., 2003. Design of Solar Water Heating Systems Using Nonlinear Programming - An Objective Function Performed by a Numerical Simulation Procedure, ISES - International Solar Energy Society Conference, Göteborg.
- Carnahan, B., Luther, H. A., Wilkes, J. O., 1969. Applied Numerical Methods, John Wiley & Sons.
- Colle, S., Abreu, S. L., Glitz, K. L. Z., Colle, F., 2001. Optimization of the Auxiliary Heating and Water Storage Insulation of a Low Cost Domestic Hot Water Heating System with an Electric Shower, ISES - International Solar Energy Society Conference, Adelaide.
- Colle, S., Glitz, K. L. Z., Salazar, J. P. L. C., Abreu, S. L., 2003. Cost Optimization of Low-Cost Solar Domestic Hot Water Systems Assisted by Electric Energy, ISES - International Solar Energy Society Conference, Göteborg.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2006. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- EES, 2009. Engineering Equation Solver, F-Chart software, University of Wisconsin – Madison, USA.
- Müller-Steinhagen, H., 2002. Test Report: Thermal Performance of Solar Collector according to EN 12975-2, ITW - Institut Für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Germany.
- Klein, S. A., and Beckman, W. A., 1979. A general design method for closed-loop solar energy systems, Solar Energy, vol. 22, pp. 269-282.
- Kratzenberg, M. G., 2005. Método para Avaliação de Incertezas de Ensaios 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.
- Salazar, J. P. L. C., 2004. Economia de Energia e Redução do Pico da Curva de Demanda para Consumidores de Baixa Renda por Agregação de Energia Solar Térmica, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.
- TRNSYS, 2006. The Transient Energy System Simulation Tool, version 16.01.003, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin – Madison.

AN ANALYSIS OF SOLAR DOMESTIC WATER HEATING SYSTEMS IN BRAZIL

Abstract. *The present paper focuses the simulation and economical optimization a solar domestic hot water systems conjugated to electric shower heads in Brazil. The solar systems currently proposed, to reduce the peak of electric energy demand due to the intensive use of shower heads, is proved to be not effective. The reason is that the energy peak always occurs, in the circumstance of adverse climate conditions of low solar energy availability. It is suggested here an innovative concept of solar system, controlled in such a way that auxiliary energy is stored in the early hours of the morning, in order to supply the expected daily energy demand. This system can be achieved, in the circumstance the solar day could be predicted by neural algorithms, conjugated to weather forecast current physical models. The proposed system may be advantageous for low income shower head users in Brazil, in the lights of the reduction of investments in electric energy generation, transmission and distribution to support the peak demand due to electric showers. On the other hand, such a system may provide valuable information to the government energy policy planners, in order to help them in setting up consisted policies, in the interest of solar systems manufacturers, as well as the shower heads users. The paper also focuses the economical optimization of the solar systems considered, with respect to the thermal insulation of the heat reservoir.*

Key words: Solar Domestic Hot Water System, Electric Shower Heads, Solar Fraction, Economic Optimization.