

# AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE INSERÇÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR NA MORADIA POPULAR ATRAVÉS DA CRIAÇÃO DE UM FUNDO DE INVESTIMENTO EM ENERGIA SOLAR

**Helena Flávia Naspolini** – helena@eel.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica

**Ricardo Rütther** – ruther@mbox1.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

**Resumo.** *Visando contribuir para que a energia solar térmica seja incorporada ao banho na moradia popular no Brasil, este trabalho busca descrever a evolução de um fundo solar térmico de investimentos (FST), com dotação inicial equivalente a 1000 instalações solares, realimentado com o valor da amortização equivalente ao valor anual dos benefícios, para o setor elétrico, proporcionado pela agregação da energia solar térmica ao banho. Os resultados mostram que o FST proposto se apresenta como autossustentado e contribui de forma significativa para impulsionar a substituição do chuveiro elétrico por sistemas de aquecimento solar da água para o banho.*

**Palavras-chave:** *Energia Solar, Fundo Solar, Aquecimento Solar da Água para o Banho, Gerenciamento pelo Lado da Demanda.*

## 1. INTRODUÇÃO

Os recursos de irradiação solar no Brasil, um dos maiores do mundo, variam de 1.500 kWh/m<sup>2</sup>/ano, na Região Sul, a 2.100 kWh/m<sup>2</sup>/ano, na Região Nordeste (Pereira et al., 2006, Pereira et al., 2008). Embora o Brasil seja banhado por farta irradiação solar, que proporciona energia limpa, segura, gratuita e abundante em todos os meses do ano e o aquecimento de água para o uso doméstico com o aproveitamento da energia solar seja considerada uma tecnologia simples e de fácil uso, o que permite o uso pleno do sistema termossolar para aquecimento de água a baixas temperaturas (40 a 50 °C), a energia elétrica é a fonte energética responsável pelo aquecimento da água para o banho em 73,5% dos domicílios brasileiros. O gás é responsável pelo aquecimento da água para o banho em 5,9% e a energia solar térmica é utilizada para este fim em apenas 0,4% dos lares brasileiros (Procel/Eletrobrás, 2007).

O chuveiro elétrico está presente em 73,1 % dos domicílios brasileiros, com percentuais de distribuição de posse bem diferenciados nas diversas regiões do país. Enquanto nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste mais de 85% dos domicílios contam com acesso à água quente através do seu uso, nas regiões Nordeste e Norte respectivamente 30% e 4% dos domicílios o utilizam para aquecer a água para o banho. O chuveiro elétrico está maciçamente presente nas residências das regiões sul, sudeste e centro-oeste, predominando na região sul, onde aproximadamente 99% dos domicílios o possuem para fins de aquecimento da água para o banho (Procel/Eletrobrás, 2007). O aquecimento da água para o banho nos domicílios brasileiros é predominantemente realizado por aquecedores elétricos instantâneos, os “chuveiros elétricos”. Embora muito populares no país, os chuveiros elétricos não passaram por nenhuma grande evolução nas últimas décadas. A maioria dos modelos comercializados possui um seletor com possibilidade de duas, três ou quatro posições para a seleção da potência elétrica a ser utilizada para aquecer a água. Nestes modelos, o usuário regula a temperatura da água basicamente pelo aumento ou diminuição de sua vazão. Entretanto, esta solução tem se mostrado inadequada para aquecer a água para o banho, principalmente em regiões localizadas no sul do país, devido à baixa potência da resistência e das baixas temperaturas de inverno. O chuveiro elétrico com controle eletrônico de temperatura por controle de fase (por ângulo de disparo) está se tornando muito popular no Brasil. Este equipamento tem despontado como solução para combater o desperdício de água e de energia elétrica, por apresentar como diferencial o ajuste manual da potência elétrica, o que lhe confere mais possibilidades de ajuste, permitindo ao banhista um jato de água na vazão e temperatura desejada. Entretanto, tais equipamentos apresentam características indesejáveis tais como: baixo fator de potência e amplo conteúdo harmônico na forma de onda da corrente elétrica, contribuindo para aumentar a degradação da qualidade da energia e para aumentar o “carregamento” dos cabos e dos transformadores integrantes dos sistemas elétricos.

A curva de carga diária do sistema de distribuição de energia elétrica do sistema interligado Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil apresenta aumento de demanda de potência no período entre 18 e 21 horas (horário de ponta), com pico de demanda em torno das 19 horas. O segmento residencial responde por significativa parcela deste pico, e o chuveiro elétrico é um dos equipamentos que mais contribuem para que isto ocorra, já que nestas regiões está presente praticamente na totalidade das residências, com uso predominantemente no horário de ponta. Os chuveiros elétricos são alvos de políticas de conservação de energia, já que funcionam principalmente no horário de ponta com elevada potência e reduzido período de uso, resultando em baixos fatores de carga (Prado et al., 1998, Geller et al., 2002 e

Almeida et al., 2001). Com o contínuo aumento da potência dos chuveiros elétricos este problema tende a se agravar. Atualmente, pode-se afirmar que o aquecimento da água para o banho é responsável por um dos grandes problemas energéticos que o Brasil enfrenta.

A utilização intensiva dos sistemas termossolares em substituição aos chuveiros elétricos pode ser entendida como geração virtual de energia elétrica (Pereira et al., 2003). Os benefícios proporcionados pela agregação da energia solar térmica e a queda nos custos dos sistemas termossolares verificadas nos últimos anos, tornam a energia solar para o aquecimento de água uma tendência a ser adotada em praticamente todas as camadas sociais (Fantinelli et al., 2006). Entretanto, os elevados custos iniciais do sistema termossolar para o aquecimento da água continuam sendo um dos maiores obstáculos ao uso generalizado desta benigna tecnologia (Glillinghan, 2009). A crescente substituição da energia convencional, através da agregação da energia solar térmica à edificação residencial, deverá ter impacto significativo na demanda no horário de ponta e no consumo de energia elétrica para a higiene e aquecimento de água para fins pessoais.

Análises de desempenho, configuração e dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água (Kalogirou e Papamarcou, 2004, Bojie et al., 2002, Colle et al., 2003, Nahar, 2003; Salazar et al., 2004, Mills, 2004; Canbazoglu et al., 2005; Dharuman et al, 2006, Badescu & Staicivici, 2006, Quadros et al, 2007, Gunerhan & Hepbasli, 2007, Hepbasli, 2007, Zhai et al., 2007, Miguel, 2008, Cruickshank & Harrison, 2010, Xi et al., 2011) são facilmente encontradas na literatura. Análises de desempenho econômico, normalmente sob a ótica do consumidor final (Diakoulaki et al., 2001, Siridas & Koukios, 2005) e análises do potencial dos sistemas de aquecimento solares para áreas urbanas (Almeida et al., 2001, Pereira et al., 2003, Salazar et al., 2004, Abreu et al., 2004, Chandrasekar e Kampal, 2004; Thur et al., 2006; Fantinelli et al., 2006, Pillai & Banrejee, 2007) também são disponíveis na literatura.

A promoção do uso da energia solar térmica e da energia solar fotovoltaica na edificação, através da criação de “fundo solar” de investimentos foi abordada por Hottel (1989), Williams (1997) e Ferreira (2005). Entretanto, a avaliação do potencial de inserção da energia solar térmica ao banho na moradia popular através da criação de um “fundo solar térmico” de investimento realimentado com valor de amortização equivalente aos benefícios proporcionados ao setor elétrico pela agregação da energia solar térmica ao banho não foi ainda amplamente abordada na literatura. A utilização da energia solar para fins de aquecimento de água para o banho deve ser incentivada pelo governo federal, pois proporciona a postergação de vultosos investimentos em novas usinas e em ampliações de sistemas de transmissão e de distribuição, além de contribuir para a redução do efeito estufa e para a preservação da natureza. Apesar do uso da energia solar térmica reduzir o custo do banho e investimentos em novas usinas e em ampliações de sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica, além de contribuir para a redução do efeito estufa e com a preservação ambiental, a comodidade no uso da energia elétrica e o elevado investimento inicial da instalação solar, comparado com outras modalidades de aquecimento, são os grandes empecilhos para a generalização do uso da energia solar no aquecimento da água para o banho.

## 2. PROCEDIMENTOS

Este trabalho tem por objetivo descrever a evolução de um “Fundo Solar Térmico” de investimentos, com dotação inicial equivalente a  $N_i$  instalações solares, realimentado com o valor da amortização equivalente ao valor anual dos benefícios para o setor elétrico proporcionados pela agregação da energia solar térmica ao banho, a partir de técnicas de medição e de verificação da demanda elétrica com o banho, registrada em intervalos de 5 minutos durante o ano de 2004 por medidores de energia elétrica instalados em unidades consumidoras do Edifício Residencial Solar Buona Vita, localizado em Florianópolis, Santa Catarina (Abreu et al. (2004), Colle et al. (2004) e Salazar et al. (2005)). Florianópolis está localizada na região sul do Brasil. Esta região apresenta baixa irradiação solar global média diária, variando de 4,5 a 4,7 kWh/m<sup>2</sup> (Bueno et al, 2000) correspondendo ao caso mais desfavorável no país. Adicionalmente, nessa região aproximadamente 99% de domicílios utilizam o chuveiro elétrico para fins de aquecimento de água para o banho. O Edifício Residencial Solar Buona Vita é um conjunto habitacional popular de grande porte, arrendado pela Caixa Econômica Federal do Brasil a famílias classificadas na classe social média renda, com renda média familiar de aproximadamente 5 salários mínimos. O conjunto habitacional Solar Buona Vita é constituído por 25 blocos de apartamentos. Cada bloco é composto por 8 apartamentos idênticos, área de aproximadamente 45 m<sup>2</sup>, totalizando no conjunto habitacional 200 unidades residenciais.

O critério de classificação das famílias utilizado, denominado “Desvio de Comportamento Ideal” foi baseado no modelo proposto por Vine et al. (1987), conforme mostra a Eq. (1).

$$DCI = \sum \frac{|C_i - VR_i| P_i}{VR_i} \quad (1)$$

onde:

$DCI$  - Desvio do comportamento ideal;

$C_i$  - Valor do  $i$ -ésimo critério de classificação;

$VR_i$  - Valor de referência do  $i$ -ésimo critério de classificação;

$P_i$  - Peso do  $i$ -ésimo critério de classificação.

Apresenta-se na Tab. 1 os critérios de classificação utilizados, seus valores de referência e pesos.

Tabela 1 – Critérios de classificação, valores de referência e pesos (Fonte: Abreu et al., 2004)

<b>Critério</b>	<b>Identificação</b>	<b>Valor de Referência</b>	<b>Peso</b>
Número de membros da família	$C_1$	4	3
Número total anual de minutos de banho quente/morno por família	$C_2$	10.950	1
Número de banhos diários com água quente/morna por pessoa	$C_3$	1,6	2

Através do critério de seleção apresentado pelas Eq. (1) e Tab. 1, foram selecionadas as 90 unidades consumidoras que apresentaram o menor DCI para compor as amostras a serem submetidas à aplicação das técnicas de medição e verificação da demanda de energia elétrica consumida pelo grupo dos sistemas de aquecimento monitorados, instalados nas moradias populares. A amostra das 90 famílias selecionadas foi classificada na classe social: média renda (renda média familiar, em 2004, de aproximadamente cinco salários mínimos), apresenta média de três pessoas/família (dois adultos e uma criança) e desvio padrão 0,9. O domicílio integrante da classe amostral selecionada para este estudo é generalizado por um padrão de três pessoas por habitação de dois quartos, sala, cozinha e banheiro, com área útil de aproximadamente 45 m<sup>2</sup>. Visando comparar os desempenhos dos grupos classificados pela posse da energia para fins de aquecimento da água para o banho o grupo total de 90 consumidores foi dividido em dois subgrupos, um com 60 consumidores (Grupo “SE”), com sistema solar para pré-aquecimento da água e chuveiro elétrico do tipo “potência ajustável” no ponto de uso (energia solar assistida por energia elétrica) e um segundo grupo, composto de 30 consumidores (Grupo “E”), que teve o suprimento de água quente para o banho totalmente fornecido por chuveiros elétricos do tipo “potência ajustável” no ponto de uso (energia elétrica). O segundo grupo foi utilizado como referência tanto para avaliar a energia economizada como para avaliar a redução da demanda ativa no horário de ponta proporcionada pela agregação da energia solar térmica ao aquecimento da água para o banho.

Apresenta-se na Tab. 2, também para o período analisado e por grupo, a descrição das variáveis médias de consumo de energia elétrica e renda familiar. A renda média familiar foi obtida a partir de dados socioeconômicos levantados por questionários aplicados por meio de entrevista às 166 famílias residentes no Edifício Residencial Solar Buona Vita. O consumo médio mensal de energia elétrica foi obtido a partir dos consumos mensais de eletricidade de cada unidade consumidora fornecidos pela concessionária local Celesc – Centrais Elétricas de Santa Catarina. Os resultados mostram que no período analisado (2004) ambos os grupos classificados pela posse da energia para fins de aquecimento da água para o banho apresentavam renda familiar média mensal menor do que a renda média mensal da família brasileira (R\$ 1.789,66).

Tabela 2 - Variáveis médias de consumo de energia elétrica e renda familiar – Ano Base 2004

Classificação	Consumo médio mensal (kWh)	Renda média familiar (salários mínimos)
Grupo “SE”	129.64	5,69
Grupo “E”	134.18	4,93

Em cada unidade consumidora selecionada foi instalado um medidor digital de energia elétrica marca ELO 2113 (ELO Sistemas Eletrônicos S.A., 2002) junto ao quadro de distribuição da instalação elétrica, conectado em série com o circuito do chuveiro elétrico. Todos os chuveiros elétricos utilizados são do tipo “potência ajustável” com controle de temperatura por controle de fase (por ângulo de disparo), de mesmo modelo e fabricante, marca Botega, modelo Thermo System, tensão nominal de 220 V e ajuste de potência manual até 6,8 kW. Durante os 12 meses de 2004, para ambos os grupos classificados pela posse da energia para fins de aquecimento da água para o banho, foram medidos dados individuais de demandas médias de potência ativa, de potência reativa, tensão de operação e do fator de potência dos chuveiros elétricos em intervalos de 5 minutos.

O sistema de aquecimento solar monitorado, típico caso de sistemas de circulação natural, foi proposto por Salazar et al. (2003), Colle et al (2003), Abreu et al (2004), Colle et al (2004) e Salazar et al.(2005). Tais sistemas funcionam como termossifão, possuem coletor solar do tipo plano (área de placa de aproximadamente 1,4 m<sup>2</sup>, aletas de cobre) acoplado a reservatório térmico de 100 litros e foram instalados sobre o telhado. O aquecimento auxiliar da água a ser usada no banho foi proporcionado apenas pelo chuveiro elétrico com potência variável. Para garantir a segurança do usuário (prevenir queimaduras), uma válvula termostática de mistura limita a temperatura máxima de fornecimento de água quente para o chuveiro elétrico.

Em 2004, Florianópolis apresentou valor médio diário de irradiação solar de 4,20 kWh/m<sup>2</sup>, irradiação solar anual incidente sobre o plano horizontal de 1.536,53 kWh/m<sup>2</sup> e temperatura média diária de 20,9°C (Naspolini & Rüther, 2011). Ambos os grupos analisados apresentam comportamentos similares quanto à frequência e duração do banho. No período analisado, o grupo que utiliza apenas a energia elétrica para fins de aquecimento da água para o banho

apresentou duração média do banho de 5,15 minutos/pessoa e frequência média diária de 0,98 banhos/pessoa e o grupo que se apropriou da energia solar para fins de aquecimento da água para o banho, a duração média do banho foi de 4,68 minutos/pessoa e sua frequência média diária de 0,80 banhos/pessoa (Naspolini et al., 2010).

Para avaliar os impactos proporcionados pela agregação da energia solar térmica ao banho sobre o consumo de energia elétrica através das demandas ativas individuais registradas pelos medidores de energia elétrica, foram obtidas as curvas mensais de demanda ativa em intervalos de 5 minutos. Tais curvas representam, por grupo classificado pelo uso da energia, uma unidade consumidora hipotética, cujo significado pode ser interpretado de duas formas:

- a) Refletem a divisão das respectivas curvas de demanda ativa mensais pelo número de unidades consumidoras atendidas;
- b) Refletem os consumos mensais de energia elétrica de tal unidade consumidora, considerando as frações dos equipamentos de aquecimento de água possuídos e expandidos para o universo das unidades consumidoras, bem como os hábitos de uso distribuídos ao longo dos meses típicos, conforme medições obtidas por amostragem.

A definição de demanda ativa adotada neste trabalho consiste na média das potências ativas solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora durante um intervalo de tempo de 5 minutos.

Para os 12 meses do período analisado e para ambos os grupos classificados pelo uso da energia para aquecer a água para o banho, através das curvas mensais de demanda ativa, podem ser obtidas as energias consumidas com o banho em intervalos de 5 minutos conforme mostra a Eq. (2).

$$E = D * 5/60 \quad (2)$$

onde:

$E$  - Energia elétrica consumida pelo chuveiro em intervalos de 5 minutos expressa em kWh;

$D$  - Demanda ativa em intervalos de 5 minutos expressa em kW.

Para cada grupo classificado pela posse da energia e por unidade consumidora, as energias consumidas com o banho no intervalo de tempo especificado podem ser obtidas pela soma das energias consumidas com o banho a cada intervalo de 5 minutos integrante do intervalo de tempo especificado.

As Eq. (3) e (4) apresentam respectivamente, por unidade consumidora, a energia economizada e a redução da demanda medida no horário de ponta no intervalo de tempo especificado.

$$EE = E_E - E_{SE} \quad (3)$$

$$RDP = D_E^{MAX} - D_{SE}^{MAX} \quad (4)$$

onde:

$EE$  - Energia economizada por unidade consumidora, no intervalo de tempo especificado, expressa em kWh;

$E_E$  - Energia consumida por unidade consumidora, no intervalo de tempo especificado, referente ao grupo que teve suprimento de água quente para o banho totalmente fornecido por energia elétrica, em kWh;

$E_{SE}$  - Energia consumida por unidade consumidora, no intervalo de tempo especificado, referente ao grupo que teve suprimento de água quente para o banho fornecido por energia solar assistida por energia elétrica, em kWh;

$RDP$  - Redução da demanda medida no horário de ponta por unidade consumidora, no intervalo de tempo especificado, expressa em kW;

$D_E^{MAX}$  - Máxima demanda medida no horário de ponta por unidade consumidora, no intervalo de tempo especificado, causada pelo suprimento de água quente para o banho totalmente fornecido pela energia elétrica, expressa em kW;

$D_{SE}^{MAX}$  - Máxima demanda medida no horário de ponta por unidade consumidora, no intervalo de tempo especificado, causada pelo suprimento de água quente para o banho fornecido pela energia solar assistida por energia elétrica, expressa em kW.

Neste trabalho, a definição de demanda medida coincide com a definição de demanda medida adotada pelo sistema elétrico brasileiro, conforme Resolução Normativa 431 da ANEEL e consiste na maior demanda de potência ativa, verificada por medição, integralizada no intervalo de 15 minutos durante o período de faturamento, expressa em kW. O horário de ponta adotado coincide com o utilizado pelas Centrais Elétricas de Santa Catarina (Celesc), empresa concessionária da distribuição de energia elétrica no Estado de Santa Catarina e consiste, para todos os dias úteis da

semana (segunda a sexta-feira), do período compreendido no intervalo de tempo entre 18h30min e 21h30min ([www.celesc.com.br](http://www.celesc.com.br), 2012).

As curvas mensais da demanda medida podem ser obtidas pela integralização das demandas ativas a cada três intervalos de 5 minutos. Através das curvas mensais da demanda medida obtidas, podem ser identificados e comparados seus valores máximos e os respectivos horários de suas ocorrências.

Os custos anuais evitados devido à energia economizada e à demanda evitada, principais parâmetros para avaliação econômica do potencial da agregação da energia solar térmica ao aquecimento de água para o banho na habitação popular, podem ser obtidos através dos valores anuais da energia economizada (EE) e da redução anual da demanda medida no horário de ponta (RDP).

As Eq. (5) e Eq. (6) apresentam respectivamente, por unidade consumidora, o custo anual evitado devido à energia anual economizada e o custo anual evitado devido à demanda anual evitada.

$$CE = CEE * EE \quad (5)$$

$$CD = CED * RDP \quad (6)$$

onde:

*CE* - Custo anual evitado por unidade consumidora devido à energia anual economizada, expresso em R\$;

*CEE* - Custo unitário evitado devido à energia economizada, expresso em R\$/MWh;

*EE* - Energia anual economizada por unidade consumidora, expressa em MWh;

*CD* - Custo anual evitado por unidade consumidora devido à redução anual da demanda ativa medida no horário de ponta, expresso em R\$;

*CED* - Custo unitário evitado devido à redução da demanda ativa no horário de ponta, expresso em R\$/kW;

*RDP* - Redução anual da demanda medida no horário de ponta, por unidade consumidora, expressa em kW.

Sob a ótica do setor elétrico os custos evitados representam as economias decorrentes do adiamento de investimentos na expansão do sistema elétrico (custo da demanda evitada) e/ou da redução de despesas operacionais (custo da energia economizada). São considerados como custos (de demanda e de energia) para o atendimento de uma unidade consumidora, os incorridos em todo sistema elétrico a montante da unidade consumidora, inclusive aqueles onde a mesma se encontra ligada (ANEEL/MPEE, 2008). Os “custos unitários evitados” são calculados através da metodologia para “cálculo do custo unitário evitado”, adotada pela ANEEL para avaliar Programas de Eficiência Energética (ANEEL/MPEE, 2008)). Seu cálculo leva em consideração valores da tarifa horo-sazonal azul, homologados pela ANEEL, para cada subgrupo tarifário e concessionária/permissionária.

Admitiu-se neste trabalho, para o ano de 2008, os mesmos hábitos de banho observados em 2004. Os valores dos custos unitários evitados adotados coincidem com os valores utilizados pela concessionária local (Celesc) para avaliar Projetos de Eficiência Energética para Sistemas em Média e Alta Tensão e Sistemas de Baixa Tensão Subterrâneos, no ciclo 2007 – 2008. Para o custo unitário evitado de energia (CEE) foi adotado o valor de R\$ 143,80/MWh e para o custo unitário evitado da demanda no horário de ponta (CED) foi adotado o valor de R\$ 430,51/kW.ano.

A Eq. (7) apresenta, sob a ótica do setor elétrico e por unidade consumidora, o benefício anual proporcionado pela agregação da energia solar térmica ao banho.

$$B = CE + CD \quad (7)$$

onde:

*B* - Benefício anual proporcionado pela agregação da energia térmica ao banho, expresso em R\$;

*CE* - Custo anual evitado devido à energia anual economizada, expresso em R\$;

*CED* - Custo anual evitado devido à redução anual da demanda no horário de ponta, expresso em R\$.

Naspolini & Rütther (2012) demonstraram que existe potencial para se financiar a aquisição da instalação solar na moradia popular integrante do Residencial Solar Buona Vita, em Florianópolis, em condições favoráveis ao setor elétrico e ao consumidor final. Neste caso, os autores demonstraram que, sob a ótica do setor elétrico, investimentos para aquisição e instalação do sistema termossolar, com taxa de desconto anual de até 9%, apresentam atratividade financeira e que, ainda sob a ótica do setor elétrico, recursos oriundos da Redução anual Certificada de Emissões pouco afetam a atratividade financeira do investimento para a inserção da tecnologia termossolar na moradia popular.

Visando contribuir com a inserção da energia solar térmica na moradia popular, este trabalho se propõe a analisar a evolução de um “fundo solar térmico” de investimentos (FST), com dotação inicial equivalente a  $N_i$  (1000) instalações solares, realimentado com valor de amortização equivalente aos benefícios proporcionados ao setor elétrico pela agregação da energia solar térmica ao banho, conforme mostram as Eq. (8) e (9).

Para o FST proposto este trabalho adota cronograma linear de financiamento de forma que a amortização correspondente ao acréscimo anual de instalações é reinvestida no ano seguinte.

$$N_j = N_{(j-1)} * \left(1 + \frac{a}{p}\right) \quad (8)$$

$$1 \leq j \leq n$$

$$N_j = N_{(j-1)} * \left(1 + \frac{a}{p}\right) - N_{(j-n)} \quad (9)$$

$$n+1 \leq j \leq t$$

onde:

$N_j$  - Número de sistemas termossolares, no ano  $j$ ;

$N_{(j-1)}$  - Número de sistemas termossolares, no ano  $j-1$ ;

$a$  - Amortização, expressa em R\$/domicílio.ano;

$p$  - Preço do sistema termossolar (equipamento + instalação do equipamento), expresso em R\$/domicílio;

$n$  - Vida útil do sistema termossolar; expresso em anos;

$j$  - Índice genérico que representa o período  $j = 1$  a  $t$ ;

$t$  - Duração do FST, expressa em anos;

$N_{(j-1)}$  - Termo de baixa progressiva de sistemas termossolares.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se nas Tab. 3 e 4, para ambos os grupos classificados pelo uso da energia para aquecer a água para o banho e por unidade consumidora, a evolução mensal dos consumos de energia elétrica classificados por usos finais.

Tabela 3 - Evolução mensal dos consumos de energia elétrica classificados por usos finais: **Grupo “E”**

Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	média
Chuveiro elétrico (kWh)	39,02	31,78	41,11	36,64	47,71	52,14	53,5	48,45	48,64	45,77	40,92	40,58	43,95
Outros usos (kWh)	113,62	122,92	104,85	104,26	84,86	72,33	65,28	89,5	82,86	82,93	78,08	81,46	90,23
Chuveiro elétrico (%)	25,6	20,5	28,2	26,0	36,0	41,9	45,1	35,2	37,0	36,1	34,4	33,3	32,8
Outros usos (%)	74,4	79,5	71,8	74,0	64,0	58,1	54,9	64,8	63,0	63,9	65,6	66,7	67,2

Tabela 4 - Evolução mensal dos consumos de energia elétrica classificados por usos finais: **Grupo “SE”**

Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	média
Chuveiro elétrico (kWh)	27,61	17,5	17,79	18,01	32,68	34,28	41,9	39,39	33,22	30,5	19,68	16,79	27,45
Outros usos (kWh)	112,46	132,39	115,81	102,68	95,67	91,62	81,22	101,57	99,24	99,77	99,01	94,91	102,2
Chuveiro elétrico (%)	19,7	11,7	13,3	14,9	25,5	27,2	34,0	27,9	25,1	23,4	16,6	15,0	21,2
Outros usos (%)	80,3	88,3	86,7	85,1	74,5	72,8	66,0	72,1	74,9	76,6	83,4	85,0	78,8

Para o Grupo “E” e por unidade consumidora, os resultados mostram consumo médio mensal de energia elétrica com o banho de 43,95 kWh e consumo anual de 527,40 kWh. Para o Grupo “SE”, consumo médio mensal de energia elétrica com o banho de 27,45 kWh e consumo anual de 329,40 kWh. Os resultados mostram ainda que a agregação da energia solar térmica ao banho proporcionou, por unidade consumidora, uma economia anual de energia elétrica de 198 kWh.

Apresenta-se na Tab. 5, para ambos os grupos classificados pela utilização da energia, a evolução mensal dos valores máximos da demanda medida no horário de ponta e a redução da demanda medida no horário de ponta (RDP) proporcionada pela agregação da energia solar ao banho.

Os resultados mostram que a agregação da energia solar ao banho proporcionou redução significativa da demanda medida no horário de ponta em todos os meses do ano. A menor redução da demanda medida, RDP = 0,18 kW (29%), foi registrada em agosto (inverno) e a maior redução, RDP = 0,46 kW (71%), foi registrada em março (verão). No período analisado, a agregação da energia solar ao banho proporcionou, por unidade consumidora, redução anual da demanda medida no horário de ponta de 0,32 kW (42%). Para uma economia anual de energia elétrica de 198 kWh e redução anual da demanda medida no horário de ponta de 0,32 kW, a agregação da energia solar térmica ao banho

proporcionou por unidade consumidora, no ano de 2008, custo da demanda evitada (CD) de R\$ 137,76, custo da energia economizada (CE) de R\$ 28,48, totalizando um benefício (B) de R\$ 166,24.

Tabela 5 - Evolução mensal das máximas demandas medidas no horário de ponta e redução da demanda medida

Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D_{SE}^{MAX}$ (kW)	0,26	0,8	0,19	0,22	0,32	0,35	0,38	0,44	0,34	0,29	0,24	0,22
$D_E^{MAX}$ (kW)	0,53	0,40	0,65	0,46	0,55	0,76	0,61	0,62	0,55	0,73	0,61	0,51
RDP (kW)	0,27	0,22	0,46	0,24	0,24	0,41	0,23	0,18	0,21	0,44	0,37	0,29
RDP (%)	50,9	54,5	70,9	51,7	42,8	54,2	38,3	28,9	38,4	60,0	61,1	56,5

Mostra-se na Fig. 1 a partir dos dados indicados na Tab. 6 a evolução do FST durante 30 anos para amortização correspondente aos custos anuais evitados pelo setor elétrico devido à energia economizada e à redução da demanda medida no horário de ponta proporcionadas pela agregação da energia solar térmica ao banho (a = R\$ 166,24/domicílio), ao preço, em 2008, da instalação solar no varejo (p = R\$1.330,00/domicílio, dos quais R\$ 1.150,00 correspondem ao custo de equipamentos (painel + reservatório) e R\$ 180,00 correspondem ao custo de instalação do sistema solar (Solares, 2008)), vida útil da instalação solar (n = 15 anos) e dotação inicial equivalente ao preço de 1.000 instalações solares ( $N_i = 1.000$ ).

Tabela 6 - Resultados das simulações do Fundo Solar Térmico - FST (Benefícios: CE + CD)

Anos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Acréscimos	1.000	125	141	158	178	200	225	253	285	321	361	406	457	514	578
Substituições	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	1.000	1.125	1.266	1.424	1.602	1.802	2.027	2.281	2.566	2.886	3.247	3.653	4.110	4.623	5.201
Anos	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Acréscimos	650	606	667	732	804	882	968	1.060	1.161	1.271	1.389	1.518	1.657	1.807	1.969
Substituições	1.000	125	141	158	178	200	225	253	285	321	361	406	457	514	578
Total	4.851	5.333	5.858	6.433	7.059	7.741	8.483	9.290	10.166	11.116	12.145	13.257	14.457	15.751	17.141

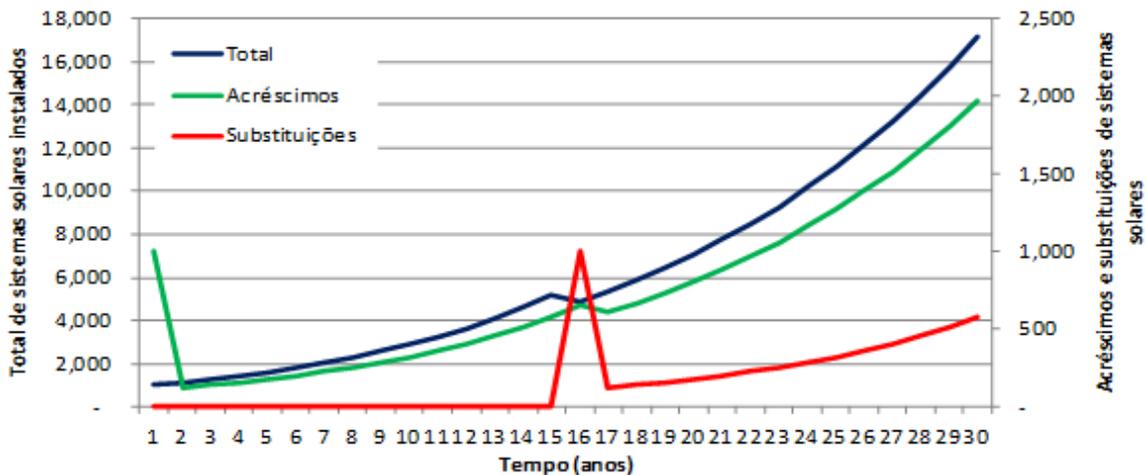


Figura 1 - Evolução do Fundo Solar Térmico - FST (Benefícios = CE + CD)

Neste caso, considerou-se que o sistema de distribuição de água quente é parte integrante do projeto original da edificação e, portanto seu custo não foi levado em consideração. Adicionalmente, foram considerados nulos os custos anuais de manutenção do sistema solar térmico. Os resultados tomaram como referência a captação por coletores solares planos instalados no Edifício Residencial Buona Vita assumindo, para o ano de 2008, os mesmos hábitos de banho observados em 2004.

Tendo em vista que no Brasil os sistemas solares de aquecimento de água são classificados como equipamentos que promovem a eficiência energética, os recursos necessários para aquisição das 1.000 ( $N_i$ ) instalações solares

poderiam ser oriundos do montante que as empresas concessionárias de energia elétrica devem, obrigatoriamente, investir em programas de eficiência energética.

Os resultados mostram que o FST se apresenta como autossustentado e que o efeito da retirada das instalações com 15 anos de uso produz apenas uma queda no 16º ano, imediatamente recuperada. Adicionalmente, pode-se observar que ao final do período analisado (30 anos), para uma dotação inicial de 1.000 sistemas de aquecimento solar, o FST apresentará um ganho de 16.141 sistemas de aquecimento solar (1.614%).

Apresenta-se na Fig. 2 a evolução do FST durante 30 anos para amortização correspondente aos custos anuais evitados pela concessionária de energia elétrica devido à redução da demanda ativa no horário de ponta ( $a = R\$ 137,76/\text{domicílio}$ ), ao preço da instalação solar no varejo ( $p = R\$1.330,00/\text{domicílio}$ ), vida útil da instalação solar ( $n = 15$  anos) e dotação inicial equivalente ao preço de 1.000 instalações solares ( $N_i = 1.000$ ).

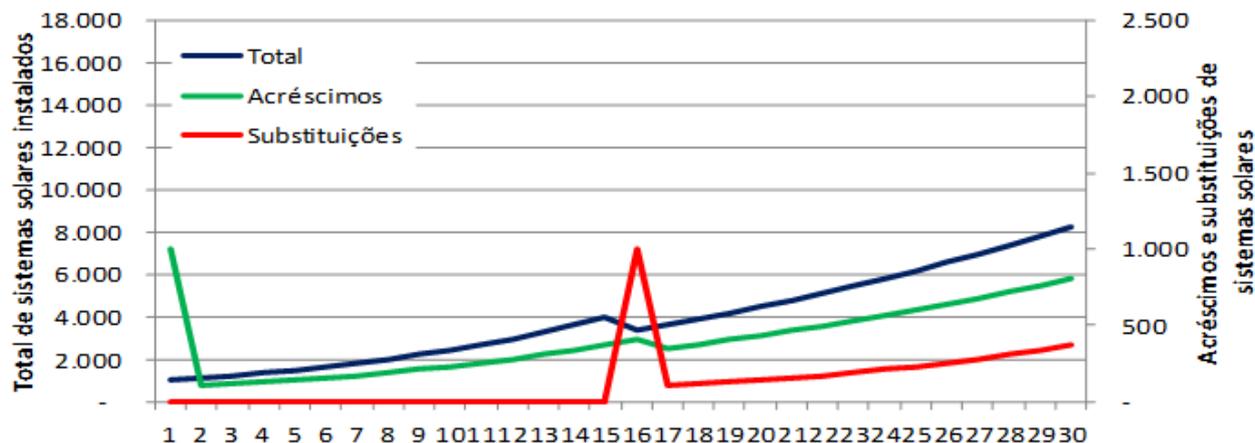


Figura 2 - Evolução do Fundo Solar Térmico - FST (Benefícios = CD)

Neste caso, os resultados mostram que o FST se apresenta como autossustentado e o efeito da retirada das instalações com 15 anos de uso produz uma queda no 16º ano, posteriormente recuperada. Adicionalmente, pode-se observar que ao final do período analisado (30 anos), para uma dotação inicial de 1.000 sistemas de aquecimento solar o FST apresentará um ganho de 7.212 sistemas de aquecimento solar (721,2%).

#### 4. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou descrever a evolução de um fundo solar térmico de investimentos (FST), com dotação inicial equivalente a  $N_i$  instalações solares, realimentado com o valor da amortização equivalente ao valor anual dos benefícios para o setor elétrico proporcionado pela agregação da energia solar térmica ao banho.

Embora o procedimento adotado apresente caráter geral, este trabalho focou em descrever a evolução de um FST de investimentos, com dotação inicial equivalente a 1000 instalações solares, realimentado com o valor da amortização equivalente ao valor anual dos benefícios, ao setor elétrico, proporcionados pela agregação da energia solar térmica ao banho, tomando como referência a captação por coletores solares planos instalados no Edifício Residencial Solar Buona Vita, em Florianópolis, cidade localizada na região do país onde são observados os menores valores de irradiação solar global no Brasil.

Sob a ótica do setor elétrico, os resultados mostram que o FST se apresenta como autossustentado e que o efeito da retirada das instalações com 15 anos de uso produz apenas uma queda no 16º ano, imediatamente recuperada. Adicionalmente, pode-se observar que ao final do período analisado (30 anos), para uma dotação inicial de 1.000 sistemas de aquecimento solar, o FST apresentará um ganho de 16.141 sistemas de aquecimento solar (1.614%).

Sob a ótica da concessionária local, os resultados mostram que o FST se apresenta como autossustentado e o efeito da retirada das instalações com 15 anos de uso produz uma queda no 16º ano, posteriormente recuperada. Adicionalmente, pode-se observar que ao final do período analisado (30 anos), para uma dotação inicial de 1.000 sistemas de aquecimento solar, o FST apresentará um ganho de 7.212 sistemas de aquecimento solar (721,2%).

Os resultados demonstram que o FST proposto contribui de forma significativa para impulsionar a desejada substituição do chuveiro elétrico por dispositivos que utilizem a energia solar para aquecer a água para o banho.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Professor Sérgio Colle, Supervisor do LABSOLAR do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, pelo acesso aos dados meteorológicos referentes à cidade de Florianópolis, e também pelo acesso aos dados registrados pelos medidores de energia elétrica instalados no Edifício Residencial Buona Vita, utilizado como exemplo neste trabalho. Agradecem ainda, ao engenheiro Ernesto de Freitas Júnior e a Renato Matta Machado Pereira da Silva pela colaboração prestada no decorrer deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Abreu, S.L., Salazar, J.P.L.C., Colle, S., 2004. Impact of compact solar domestic hot-water systems on the peak demand of a utility grid in Brazil, In: Proceedings of EUROSUN 2004, Freiburg, Germany, pp. 1832-1840.
- Almeida, M.A., Schaeffer, R., Rovere, E.L., 2001. The potential for electricity conservation and peak load reduction in the residential sector of Brazil, *Energy* 26, pp. 413-429.
- ANEEL/MPEE. Manual para elaboração de Programa de Eficiência Energética. Disponível em <http://www.aneel.gov.br>. Consulta em abril de 2008.
- ANEEL/Resolução Normativa 431 - Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. Disponível em <http://www.aneel.gov.br>. Consulta em dezembro de 2011.
- Badescu, V., Staicovici, M.D., 2006. Renewable energy for passive house heating: Model of the active solar heating system, *Energy and Buildings* 38 129-141.
- Bojie, M., Kalogirou, S., Petronijevic, K., 2002. Simulation of a solar domestic water heating system using a time marching model, *Renewable Energy* 27, pp. 441-452.
- Cambazoglu, S., Şahinaslan, A., Ekmekyapar, A., Aksoy, Ý.G., Akarsu, F., 2005. Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar water-heating system, *Energy and Buildings* 37, pp. 235-242.
- Bueno, E., Colle, S., 2000. Atlas de Radiação Solar do Brasil. INMET/LABSOLAR/CEPTEC/IMPE.
- Celesc Distribuição SA. Horário de Ponta. Disponível em <http://www.celesc.com.br>. Consulta em abril de 2012.
- Chandrasekar, B., Kandpal, T.C., 2004. Techno-economic evaluation of domestic solar water heating systems in India, *Renewable Energy*, Vol. 29, pp.319-332.
- Colle, S., Salazar, J.P.L.C., Abreu, S.L., Glitz, K., 2003. Cost optimization of low-cost solar domestic hot water systems assisted by electric energy, Proceedings of ISES - International Solar Energy Society, Solar World Congress, Gotemburgo, Suécia, pp. 1124-1133.
- Colle, S., Abreu, S.L., Salazar, J.P.L.C., Reguse, W., 2004. Impacto da energia solar sobre o pico de demanda de energia de chuveiros elétricos de famílias de baixa renda do Brasil, Proceedings of XII Congresso Ibérico y VII Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Spain, pp. 29-33.
- Cruickshank, C.A., Harrison, S.J., 2010. Heat loss characteristics for a typical solar domestic hot water storage, *Energy and Buildings* 42, pp. 1703-1710.
- Cuadros, F., López-Rodríguez, F., Segador, C., Marcos, A., 2007. A simple procedure to size active solar heating schemes for low-energy building design, *Energy and Buildings* 39, pp. 96-104.
- Diakoulaki, D., Zervos, A., Sarafidis, J., Mirasgedis, S., 2001. Cost benefit analysis for solar water heating systems, *Energy Conversion and Management* 42, pp. 1727-1739.
- Dharuman, C., Arakeri, J.H., Srinivasan, K., 2006. Performance evaluation of an integrated solar water heater as an option for building energy conservation, *Energy and Buildings* 38, pp. 214-219.
- ELO Sistemas Eletrônicos S.A. Medidor Eletrônico de Energia Elétrica – Manual do Usuário, 2002.
- Fantinelli, J.T., Pereira, J.T.V., Pereira, E.M.D., 2006. As Ações para o Incentivo ao Uso de Sistemas Termossolares na Habitação Brasileira de Interesse Social, Proceedings of V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético - CBPE, Brasília, Brasil, pp. 1-13.
- Ferreira, O.C., Dezembro de 2004 – Janeiro de 2005. Promoção do uso da energia solar para o aquecimento de água no setor residencial, *Economia & Energia*, Ano VIII, Num. 47, ISSN 1518 2932.
- Geller, H., Jannuzzi, G.M., Schaeffer, R., Tolmasquin, M.T., 2002. The efficient use of electricity in Brazil: Progress and opportunities”, *Energy Policy* 26 (11), pp. 859-872.
- Gillingham, K., 2009. Economic efficiency of solar hot water policy in New Zealand, *Energy Policy* 37, pp. 3336-3347.
- Goulart, S.G., Lamberts, R., Firmino, S., 1998. Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras, II Edição, Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, Florianópolis, Brasil, 345 p., CDU 551.58:624.
- Gunerhan, H., Hepbasli, A., 2007. Exergetic modeling and performance evaluation of solar water heating systems for building applications, *Energy and Buildings* 39, pp. 509-516.
- Hepbasli, A., 2007. Exergetic modeling and assessment of solar assisted domestic hot water tank integrated ground-source heat pump systems for residences, *Energy and Buildings* 39, pp. 1211-1217.
- Hottel, H.C., 1989. Fifty years of solar energy research supported by the Cabot Fund, *Solar Energy*, Vol. 43, Num. 2, pp. 127-128.
- Kalogirou, S.A., 2004. Environmental benefits of domestic solar energy systems, *Energy Conversion and Management* 45, pp. 3075-3092.
- Miguel, A.F., 2008. Constructural design of solar energy-based systems for buildings, *Energy and Buildings* 40, pp. 1020-1030.
- Mills, D., 2004. Assessing hot water system performance with GIS, *Solar Energy*, Vol. 76, pp. 153-157.
- Nahar, N.M., 2003. Year round performance and potential of a natural circulation type of solar water heater in India, *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 239-247.

- Naspolini, H.F., Militão, H.S.G., Rütther, R., 2010. The role and benefits of solar water heating in the energy demands of low-income dwellings in Brazil, *Energy Conversion and Management*, Vol. 51 (12), pp. 2835–2845.
- Naspolini, H.F., Rütther, R., 2011. The impacts of solar water heating in low-income households on the distribution utility's active, reactive and apparent power demands, *Solar Energy*, Vol. (85), pp. 2023-2032.
- Naspolini, H.F.; Rütther, R., 2012. Assessing the technical and economic viability of low-cost domestic solar hot water systems (DSHWS) in low-income residential dwellings in Brazil, *Renewable Energy*, Vol.48, pp. 92-99.
- Procel/Eletróbrás, 2007. Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Ano Base 2005, Classe Residencial - Relatório Brasil, Editora da Eletróbrás.
- Pereira, E.B., Martins, F.R., Abreu, S.L., Ruther, R., 2006. Atlas Brasileiro de Energia Solar, São José dos Campos: INPE ISBN 9788517000300.
- Pereira, E.B., Silva, S.A.B, Abreu, S. L., Colle, S., 2008. Solar energy scenarios in Brazil, part one: resource assessment, *Energy Policy*, Vol. 36, pp. 2853-2864.
- Pereira, E.M.D., Duarte, L.O.M., Pereira, L.T., Faria, C.F.C., 2003. Energia Solar térmica, Fontes renováveis de energia no Brasil, Interciência – Cenergia, Rio de Janeiro, pp. 239-280.
- Pereira, E.M.D., Ribeiro, M.A., Gonçalves, W.B., Mesquita, L.C.S., Neves, S.D.O., 2003. Solar water heating for social projects in Brazil, *Proceeding of the Canadian Solar Energy Conference – SESCO 2003*, Ontario, Canadá.
- Pillai, I.R., Banerjee, R., 2007. Methodology for estimation of potential for solar water heating in a target area, *Solar Energy*, Vol.81 (2), pp. 162-172.
- Salazar, J.P.L.C., Abreu, S.L., Borges, T.P.F., Colle, S., Reguse, W., 2003. Optimization of a compact solar domestic hot water system for low-income families with peak demand and total cost constraints, *Proceedings of ISES-International Solar Energy Society, Solar World Congress*, Gotemburgo, Suécia, pp. 1048-1057.
- Salazar, J.P.L.C., Abreu, S.L., Colle, S., 2005. Energy conservation and electric energy peak reduction potential during peak hours for a group of low-income residential consumers of a Brazilian utility, *Proceedings of Solar World Congress - ISES 2005*, Orlando, USA, pp. 987-992.
- Sidiras, D.K., Koukios, E.G., 2005. The effect of payback time on solar hot water systems diffusion: the case of Greece. *Energy Conversion and Management* 46, pp. 269-280.
- Solares. Produtos. Disponível em: [www.solares-online.com.br](http://www.solares-online.com.br). Consulta em 2008.
- Thur, A., Furbo, S., Shah, L.J., 2006. Energy savings for solar heating systems, *Solar Energy*, Vol. 80 (11), pp. 1463-1474.
- Vine, E., Diamond, R., Szydlowski, R., 1987. Domestic hot water consumption in four low-income apartment, *Energy* 12, pp. 459-467.
- Williams, N., 1997. Private sector initiative: The solar electric light fund, *Renewable Energy*, Vol. 10, n. 213, pp. 119-124.
- Xi, C., Lin, L., Hongxing, Y., 2011. Long term operation of a solar assisted ground coupled heat pump system for space heating and domestic hot water, *Energy and Buildings* 43, pp. 1835-1844.
- Zhai, X.Q., Wang, R.Z., Dai, Y.J., Vu, J.Y., Xu, Y.X., Ma, Q., 2007. Solar integrated energy system for a green building, *Energy and Buildings*, Vol. 39, pp. 985-993.

#### **ASSESSING THE POTENTIAL OF A SOLAR FUND IN FOSTERING THE WIDESPREAD ADOPTION OF LOW-COST DOMESTIC SOLAR HOT WATER SYSTEMS IN BRAZIL**

**Abstract.** *Aiming to contribute to solar thermal energy is incorporated into the bathroom in public housing in Brazil, this paper for the electricity seeks to describe the evolution of a solar thermal investment fund (FST), with initial allocation equivalent to 1,000 solar installations, replenished with the amount of amortization equivalent to the annual amount of benefits for the electricity sector, provided by the aggregation of solar thermal energy to the bath. The results show that the proposed FST is presented as self-sustained and contributes significantly to boost the replacement electric shower for solar heat water for bathing.*

**Key words:** Solar Energy, Solar Water Heating, Solar Thermal Fund.