

# INFLUÊNCIA DO HORÁRIO DE CONSUMO DE ÁGUA QUENTE NO RENDIMENTO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA COM ENERGIA SOLAR E GÁS

**Jean-Marc Stephane Lafay**

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – Via do Conhecimento, km 01  
CEP 85501-970 Pato Branco – PR [jean@mecanica.ufrgs.br](mailto:jean@mecanica.ufrgs.br)

**Arno Krenzinger**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Sarmento Leite, 425 CEP 90050-170  
Porto Alegre - RS [arno@mecanica.ufrgs.br](mailto:arno@mecanica.ufrgs.br)

**César Wilhelm Massen Prieb**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Sarmento Leite, 425 CEP 90050-170  
Porto Alegre - RS [cprieb@ufrgs.br](mailto:cprieb@ufrgs.br)

*Resumo. Este trabalho tem por objetivo calcular e analisar a variação da eficiência de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás quando submetidos a diferentes horários de consumo. Foram montados dois sistemas de aquecimento em duas configurações distintas, série e paralelo, com características idênticas, diferenciando-se apenas quanto à forma de conexão de seus componentes entre si. Os sistemas funcionam por termossifão e utilizam um aquecedor a gás de passagem como fonte auxiliar de energia. Os mesmos padrões de consumo de água quente foram utilizados para cada sistema. Sensores de temperatura, irradiação solar, consumo de gás e água monitoram os sistemas de aquecimento através de uma central de aquisição de dados conectada a um micro computador. A eficiência dos coletores solares, bem como as eficiências globais de cada sistema foram determinadas. A configuração paralela mostrou-se mais eficiente.*

**Palavras-chave:** energia solar, sistema de aquecimento de água, híbrido solar gás.

## 1. INTRODUÇÃO

Sistemas de aquecimento de água diferem entre si sob diferentes aspectos. Dentre os principais pode-se citar o custo de implantação, custo de operação e atendimento ao perfil de consumo. O chuveiro elétrico, amplamente utilizado no Brasil, é o que apresenta o menor custo de implantação, seguido dos aquecedores a gás de passagem, boilers elétricos, boilers a gás e, por último, o aquecimento com energia solar.

O custo de operação é função do preço do combustível utilizado, eficiência do sistema de aquecimento e do perfil de consumo. Os sistemas de aquecimento com energia solar diferem dos demais, pois necessitam de uma fonte auxiliar de energia para suprir a demanda de água quente em dias de baixa radiação solar. Este fato faz com que o custo de operação não se mantenha constante, ficando dependente das condições climáticas, eficiência e consequentemente da fração em que a fonte auxiliar será utilizada, como demonstrado por Schröder et al (1982).

A capacidade “instantânea” de suprir a demanda é um fator limitante dos sistemas de aquecimento de passagem. Nos casos em que é necessário fornecer grandes quantidades de energia em curtos períodos de tempo são favorecidos os sistemas que utilizam acumulação. Nesta categoria encontram-se os boilers e os sistemas de aquecimento de água com energia solar.

Sistemas de aquecimento de água com energia solar tradicionalmente utilizam eletricidade como fonte auxiliar de energia. Como tais sistemas são projetados para suprir a demanda mesmo nos meses de inverno, o alto custo da energia elétrica faz com que o dimensionamento se dê de forma que a fração da fonte auxiliar de energia seja pequena, empregando uma grande área de coletores solares. Esta prática aumenta o custo de implantação e fornece um excedente de calor no verão.

No Brasil o custo equivalente do gás (GLP ou GN) é mais baixo que o da energia elétrica. Este fato faz com que no dimensionamento de sistemas de aquecimento de água com energia solar que utilizam gás como fonte auxiliar a fração da fonte auxiliar seja maior, com uma área menor de coletores. Nestes sistemas pode-se utilizar um reservatório térmico com maior capacidade volumétrica e temperatura de operação mais baixa, resultando em menores perdas térmicas, como demonstrado por Krenzinger et al (2002). Assim, além do menor custo de implantação, é obtida uma maior eficiência do sistema solar ao longo do ano todo.

A eficiência dos coletores solares é função da radiação solar, temperatura ambiente e da temperatura da água na entrada do coletor. Quanto menor for a temperatura de entrada da água no coletor maior será a eficiência deste e, consequentemente, do sistema de aquecimento solar. Algumas alternativas para baixar a temperatura de entrada da água no coletor são listadas a seguir:

- Aumentar a relação volume do reservatório e área de coletores;
- Utilização de reservatório vertical, favorecendo a estratificação;
- Tomada de água do reservatório para os coletores na parte mais baixa;
- Consumo de água quente de manhã.

As três primeiras alternativas são de caráter construtivo e foram adotadas nos sistemas em estudo. Deve-se ainda considerar que o perfil de distribuição de temperatura no interior do tanque é influenciado pela posição, potência e instante em que é acionada a fonte de energia auxiliar.

## 2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

Cada um dos sistemas de aquecimento de água solar-gás é constituído por dois coletores de placas planas conectados em paralelo, um reservatório termicamente isolado, um aquecedor a gás de passagem, uma bomba e um termostato. Os componentes do sistema estão ligados por tubos de cobre isolados com espuma de poliuretano. Um reservatório de água fria de fibra de vidro é compartilhado por ambos os sistemas. A Figura (1) apresenta uma vista geral de ambos os sistemas e a Fig. (2) representa um diagrama das principais conexões hidráulicas.



Figura 1. Vista geral dos sistemas de aquecimento de água.

Foram montados dois sistemas de aquecimento em duas configurações distintas, série e paralelo, com características idênticas, diferenciando-se apenas quanto à forma de conexão de seus componentes entre si. Os sistemas funcionam por termossifão e utilizam um aquecedor a gás de passagem como fonte auxiliar de energia. Um termostato, instalado a 68 cm do fundo do reservatório, aciona automaticamente a motobomba e o aquecedor a gás de passagem assim que a temperatura no interior do reservatório fica abaixo da temperatura de operação ajustada (43 °C).

Na configuração paralela, a entrada do coletor solar e a entrada do aquecedor a gás estão conectadas ao fundo do reservatório e suas saídas ao topo deste. Na configuração série, a entrada do coletor solar também está conectada ao fundo do reservatório, mas o retorno se dá no meio do reservatório. A entrada do aquecedor a gás conecta-se ao meio do reservatório enquanto sua saída está conectada ao topo do mesmo.

Os sensores de temperatura foram instalados para monitorar a temperatura da água e do ar ambiente. A irradiação solar é medida por um piranômetro fotovoltaico (Zanesco, 1991). Todos os sinais dos sensores são coletados por um sistema automatizado de aquisição de dados.

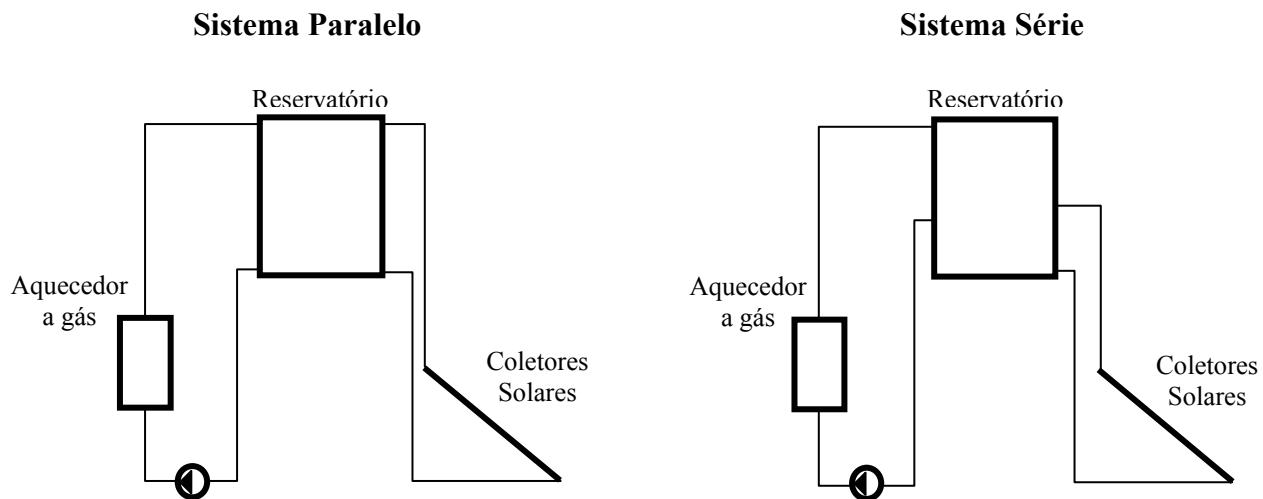


Figura 2. Representação esquemática das conexões de ambos sistemas.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DOS SISTEMAS

A metodologia de caracterização dos componentes dos sistemas já foi publicada em Lafay et al (2003), porém alguns detalhes de cada componente serão mantidos para permitir um maior entendimento dos sistemas e da metodologia empregada.

#### 3.1. Reservatórios Térmicos

Os reservatórios empregados são reservatórios verticais cilíndricos de aço inoxidável, isolados com poliuretano expandido (50 mm de espessura) e envoltos em chapas de aço. A capacidade nominal de cada reservatório é de 600 litros e a razão de aspecto foi escolhida visando uma maior estratificação da temperatura da água dentro do reservatório. Para a análise de seu comportamento térmico durante a operação do sistema, o reservatório foi subdividido em oito camadas igualmente espaçadas.

O coeficiente total de perdas térmicas de um dos reservatórios usados neste trabalho foi experimentalmente avaliado. O valor encontrado foi de 6 W/°C (o qual poderia ser considerado alto para um reservatório de 600 l). Embora a determinação experimental esteja adequada, quando os reservatórios são expostos às condições externas observaram-se coeficientes maiores de que este. Este incremento deve-se principalmente a ação do vento e das perdas pela tubulação da instalação.

Para fins de cálculos são utilizados os valores médios dos coeficientes de perdas térmicas para cada sistema. Estes valores são determinados calculando-se a variação de energia interna dos reservatórios num período em que não há radiação solar nem acionamento do aquecedor a gás. O coeficiente total de perdas do sistema paralelo assim calculado é igual a 10 e do sistema série 9,5 W/°C.

### 3.2. Coletores Solares

Os coletores solares usados nesta experiência são de placas planas, com placas e tubos de cobre. Estes coletores apresentam cobertura simples e são isolados na parte posterior e lateral com lã de vidro. As dimensões externas dos coletores são 0,59 m por 1,5 m.

A norma ABNT NBR10184 (1988) especifica os procedimentos para a determinação da eficiência instantânea do coletor e sugere que os testes sejam executados ao ar livre, perto de condições reais de operação. Estes padrões estabelecem os procedimentos experimentais, requisitos de exatidão, condições meteorológicas, etc. A curva de eficiência instantânea dos coletores utilizados, experimentalmente determinada, é apresentada na Eq. (1).

$$\eta_c = 0,71 - 8,75 \cdot (T_e - T_a) / G_T \quad (1)$$

onde  $T_e$  é a temperatura de entrada no coletor (°C),  $T_a$  é a temperatura ambiente (°C) e  $G_T$  é a radiação solar incidente no plano dos coletores (W/m<sup>2</sup>).

O cálculo da energia útil fornecida pelo coletor é expresso na Eq. (2):

$$Q_u = \eta_c \cdot \bar{G}_T \cdot t \quad (2)$$

onde  $\eta_c$  é a eficiência instantânea dos coletores,  $\bar{G}_T$  é a radiação solar média incidente no plano do coletor (W/m<sup>2</sup>),  $t$  é o tempo em que esta radiação incidiu no coletor (s).

### 3.3. Aquecedores de Passagem a Gás

Os aquecedores de passagem a gás escolhidos para serem usados como fontes auxiliares de energia são os menores encontrados comercialmente e excederam os requisitos mínimos para esta aplicação. Sua vazão máxima e eficiência, de acordo com o catálogo, são 7,5 l/min e 81 % respectivamente. Embora este modelo fosse específico para GLP, os resultados são compatíveis com aquecedores a gás natural.

A norma ABNT NBR8130 (1998) especifica os requisitos mínimos e procedimentos para a determinação do desempenho de aquecedores instantâneos a gás.

A experiência foi montada e conduzida de acordo com o padrão referido. Foi encontrada uma eficiência média de 81 % para o aquecedor empregado, o que concordou com o valor do catálogo. Testes usando temperaturas de entrada além do estabelecido pela norma também foram executados, não sendo observadas variações significativas na eficiência.

A energia fornecida à água pelo aquecedor a gás pode ser ajustada entre 8000 e 13000 W pela válvula de controle da vazão de gás. Embora os aquecedores utilizados em ambos sistemas sejam do mesmo modelo, foram observadas algumas diferenças, para uma mesma regulagem, nas vazões de água e gás. Este fato é levado em conta nos cálculos apresentados no capítulo de resultados.

### 3.4. Programa de Aquisição de Dados e Controle do Sistema de Aquecimento

Um programa de computador comanda uma central de aquisição de dados, a qual recebe os valores medidos pelos sensores instalados no sistema de aquecimento de água. A temperatura de um sensor posicionado a 68 cm do fundo do reservatório, na função de termostato, é monitorada. Ao ser alcançado um valor inferior a 43 °C o computador envia um comando, via porta paralela, para

energizar a bomba que aciona o aquecedor a gás. Quando a temperatura deste sensor atingir 44 °C o programa envia outro comando para desligar a bomba.

Um sensor instalado na altura da tomada de água para consumo, a 95 cm do fundo, monitora a temperatura de consumo. No horário ajustado para ocorrer o consumo o programa envia um sinal para que a válvula solenóide se abra, liberando água numa vazão constante. Após ter sido atingido um valor específico de energia associada ao consumo de água quente o programa manda fechar a válvula solenóide, encerrando o consumo de água.

#### 4. METODOLOGIA

Efetuou-se o consumo de água quente em ambos os sistemas nos seguintes horários de consumo: 9 horas, 15 horas e 19 horas, ao longo de três dias para cada horário.

Em ambos os sistemas o consumo inicia-se ao mesmo tempo e termina quando a quantidade de energia retirada for equivalente a 35 kJ. A Equação(3) é utilizada para calcular o tempo de consumo (tempo de abertura da válvula solenóide) necessário para consumir esta quantidade de energia.

$$Q_c = \dot{m} \cdot t \cdot c_p \cdot T_{consumo} \quad (3)$$

onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica de consumo (kg/s),  $t$  é o tempo em que a válvula permanece aberta(s),  $c_p$  é o calor específico da água e  $T_{consumo}$  é a temperatura de consumo da água (°C).

Devido ao tempo de varredura do programa de aquisição e controle ser de aproximadamente 40 segundos pode haver uma diferença entre a quantidade de energia retirada dos sistemas.

A vazão mássica é considerada constante, porém a temperatura de consumo sofre variações durante o consumo. Considerando-se esta variação, a temperatura de consumo utilizada na Eq.(3) é a média da temperatura de consumo no período em que houve consumo.

Um programa em Visual Basic trata os dados adquiridos e efetua o balanço de energia de cada sistema levando em consideração a quantidade de energia solar incidente, quantidade de energia associada ao gás consumido, quantidade de energia associada à água quente consumida, quantidade de energia associada à água de reposição e variação de energia interna do reservatório entre o início e o fim do período considerado (três dias).

#### 5. RESULTADOS

O comportamento dos sistemas pode ser analisado pela variação das temperaturas médias ao longo do período de ensaio nas diversas condições de funcionamento, considerando os efeitos da incidência de radiação solar, funcionamento do aquecedor a gás e consumo de água quente em diversos horários, etc. As Figuras (4), (5) e (6) apresentam a influência da temperatura média e da temperatura ambiente sobre as perdas térmicas dos sistemas, ao longo de três dias de ensaio, nos diferentes horários de consumo. As perdas térmicas são calculadas com a Eq.(4).

$$Q_{perdas} = U_T \cdot (T_m - T_a) \cdot t \quad (4)$$

onde  $U_T$  é o coeficiente global de perdas do sistema (W/°C),  $T_m$  é a temperatura média da água no interior do reservatório (°C),  $T_a$  é a temperatura do ar ambiente (°C) e  $t$  é o tempo em que as perdas são calculadas (s).

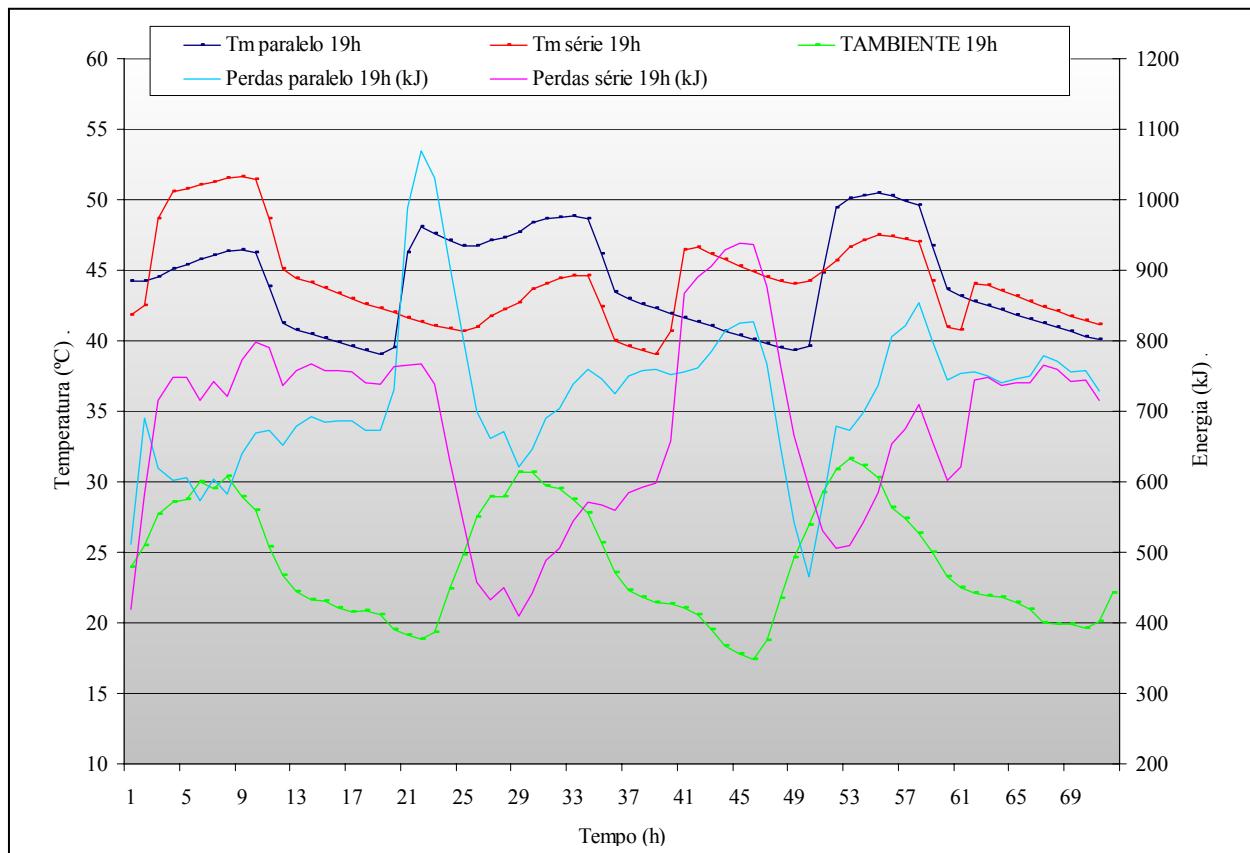


Figura 4. Influência das temperaturas média e ambiente nas perdas térmicas dos sistemas com consumo às 19 h.

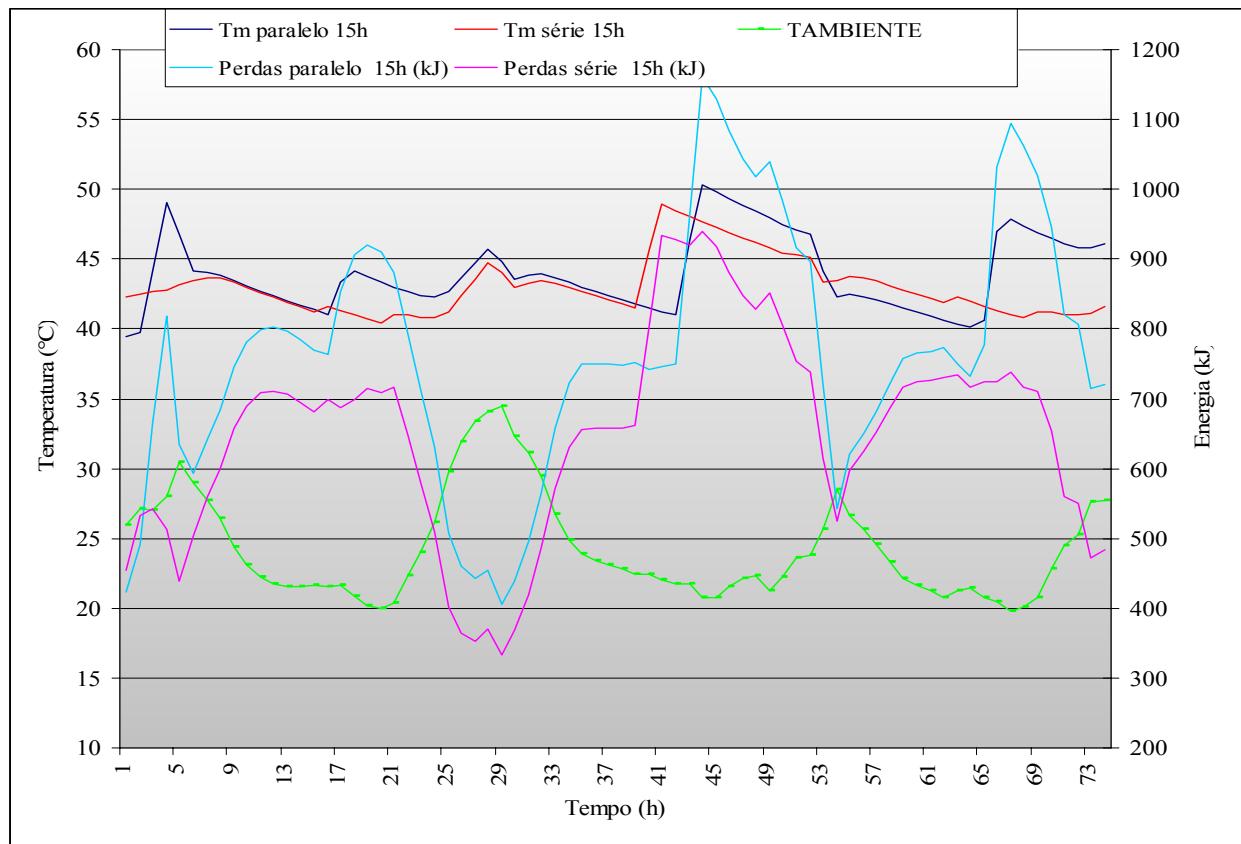


Figura 5. Influência das temperaturas média e ambiente nas perdas térmicas dos sistemas com consumo às 15 h.

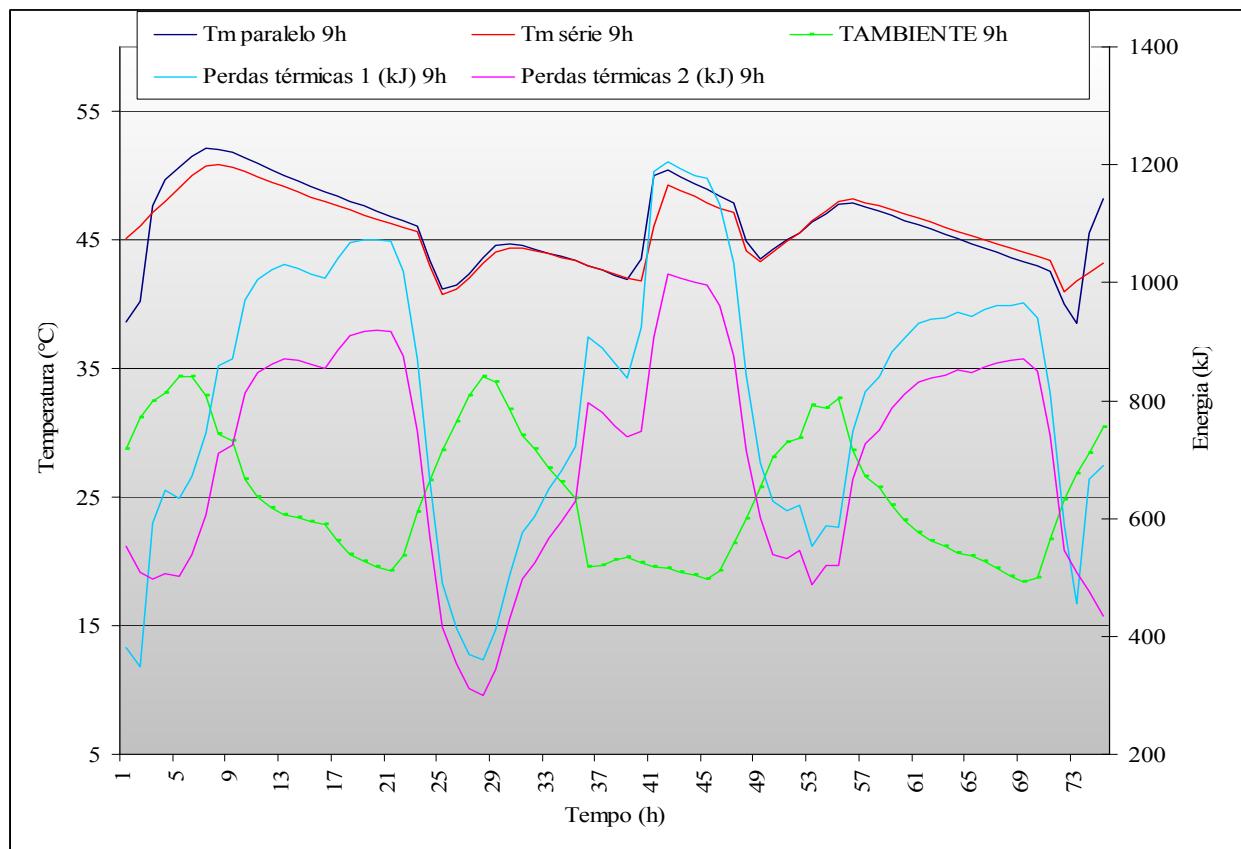


Figura 6. Influência das temperaturas média e ambiente nas perdas térmicas dos sistemas com consumo às 9 h.

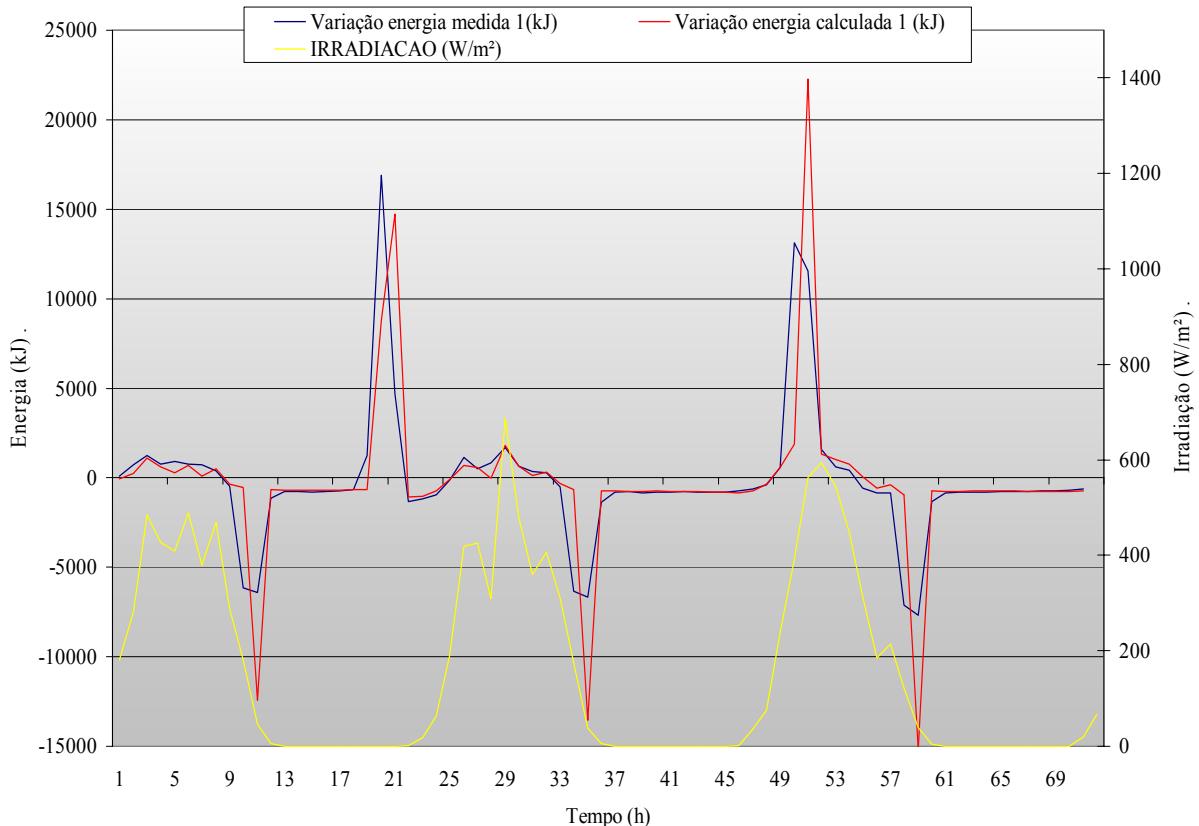


Figura 7. Comparativo da variação da energia interna do reservatório do sistema 1 (paralelo), medido e calculado.

A Figura (7) apresenta a variação de energia interna ocorrida ao longo de três dias de funcionamento do sistema paralelo (1) com consumo de água às 19 horas, assim como a comparação com a mesma variação de energia calculada utilizando-se os coeficientes da Tab. (1). Os resultados indicam que os coeficientes, assim como as equações utilizadas para calcular o comportamento do sistema, concordam com os resultados experimentais. Embora não sejam apresentados dados sobre o sistema série, estes também concordam.

Tabela 1. Coeficientes utilizados nos cálculos do balanço de energia.

	Sistema paralelo	Sistema série
Coeficiente médio de perdas térmicas (W/°C)	10,0	9,5
Vazão de gás (m <sup>3</sup> /h)	0,252	0,222
Vazão mássica de consumo de água quente (kg/min)	5,36	5,41
Temperatura de consumo média (°C)	49,5	47,5

A Tabela (2) apresenta os valores das parcelas que compõem o balanço energético dos sistemas de aquecimento para os diferentes horários de consumo (energia solar e do gás efetivamente absorvidas, variação da energia interna do reservatório, perdas térmicas e energia associada à água quente de consumo)

Tabela 2. Balanço energético dos sistemas de aquecimento para os diferentes horários de consumo.

	Energia Solar (kJ)	Energia Gás (kJ)	Variação Energia Interna (kJ)	Perdas térmicas (kJ)	Energia Consumo (kJ)	Balanço (kJ)
Sistema Paralelo consumo 19 h	<b>30931</b>	<b>46368</b>	<b>-11115</b>	<b>51915</b>	<b>38834</b>	<b>-2334</b>
Sistema Série consumo 19 h	<b>34291</b>	<b>55694</b>	<b>-53</b>	<b>48901</b>	<b>35150</b>	<b>5987</b>
Sistema Paralelo consumo 15 h	<b>37787</b>	<b>81557</b>	<b>16578</b>	<b>56661</b>	<b>43164</b>	<b>2940</b>
Sistema Série consumo 15 h	<b>39456</b>	<b>50840</b>	<b>-1762</b>	<b>48071</b>	<b>40604</b>	<b>3384</b>
Sistema Paralelo consumo 9 h	<b>52133</b>	<b>74817</b>	<b>24187</b>	<b>61035</b>	<b>44882</b>	<b>-3154</b>
Sistema Série consumo 9 h	<b>55235</b>	<b>65435</b>	<b>-4729</b>	<b>52838</b>	<b>44359</b>	<b>4127</b>

A eficiência dos sistemas é calculada pela Eq. (5).

$$\eta_s = \frac{Q_{cons} + \Delta E_i}{Q_{gás} + Q_{solar}} \quad (5)$$

onde  $Q_{cons}$  é a energia de consumo de água quente descontando a reposição de água fria no reservatório,  $\Delta E_i$  é a variação de energia interna do reservatório entre o início e o final do ensaio,

$Q_{gás}$  é a energia fornecida pelo aquecedor a gás e  $Q_{solar}$  é a energia incidente no plano dos coletores solares.

Embora na Tab. (2) tenham sido apresentados os valores da energia solar absorvida e transformada em calor útil, no cálculo da Eq. (4) são utilizados os valores da radiação incidente no plano dos coletores multiplicado pela área dos mesmos.

A elevada variação da energia interna ao longo do período dos ensaios, mostrada na Tab. (2) pode prejudicar a determinação da eficiência dos sistemas pela Eq. (5). Para minimizar esta influência seria conveniente trabalhar com mais dias de ensaios, de forma que a variação de energia tenha peso menor quando comparada às outras parcelas do cálculo da eficiência dos sistemas.

Tabela 3. Eficiências do sistema paralelo e série.

	Consumo 9 horas	Consumo 15 horas	Consumo 19 horas
Eficiência do coletor solar no sistema paralelo (%)	61	52	43
Eficiência do coletor solar no sistema série (%)	65	55	48
Eficiência do sistema paralelo (%)	37	36	32
Eficiência do sistema série (%)	28	31	30

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados na Tab. (3), mostrando influência do horário de consumo na eficiência dos sistemas de aquecimento, são ainda preliminares e estão limitados às condições ensaiadas. A tabela indica um valor máximo de eficiência na configuração paralela com horário de consumo às 9 horas.

A configuração série apresentou uma eficiência superior dos coletores solares em todos os horários de consumo ensaiados, sendo atingida a máxima eficiência quando o consumo ocorre às 9 horas. Esta configuração favorece a estratificação no interior do reservatório, fornecendo temperaturas da água na entrada do coletor mais baixas que no sistema paralelo. Os coletores solares apresentam maior eficiência na configuração série. Apesar disso, este fato não elevou a eficiência global do sistema série a ponto de superar o sistema paralelo, indicando que a parcela de energia fornecida pelos coletores foi pequena e não influenciou significativamente a eficiência dos sistemas. Fica claro que a eficiência dos sistemas em estudo não é tão dependente da eficiência dos coletores solares como o é da interação entre horário de consumo, acionamento de gás e intensidade da radiação solar, além das perdas térmicas dos sistemas.

Por outro lado, a parcela de energia proveniente do gás mostrou-se sempre maior que a parcela solar (inclusive como consequência do mau desempenho do tanque térmico) indicando o sub-dimensionamento da fração solar nos sistemas para os perfis de demanda ensaiados.

Embora a metodologia empregada vise manter a maioria das condições constantes, a variação climática entre cada seqüência de dias (para diferentes horários) altera a fração de energia solar que os sistemas recebem, assim como as perdas térmicas. Mesmo estando ambas configurações submetidas simultaneamente às mesmas condições climáticas, essas variações refletem-se diferentemente no comportamento de cada sistema.

## 7. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988. “Coletores Solares Planos para Líquidos - Determinação do Rendimento Térmico (NBR10184)”, Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998. “Aquecedor de Água a Gás Tipo Instantâneo – Requisitos e Métodos de Ensaio (NBR8130)”, Rio de Janeiro, Brasil.

Krenzinger, A., Lafay, J.M., 2002. “Análise Experimental de Um Sistema de Aquecimento de Água Com Energia Solar e Gás”, Proceedings of the 9th Congress of Thermal Engineering and Sciences, Caxambu, Brazil.

Lafay, J.M., Krenzinger, A., Prieb, C., 2003. “Experimental Results For Hybrid Solar & Gás Water Heating Systems”, 17 th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo, Brasil.

Schröder, M., Reddemann, B., 1982. “Three Different Criteria To Evaluate The Economics Of Solar Water Heating Systems”, Solar Energy, Vol. 29, No 6, pp. 549-555.

Zanesco, I., 1991. “Análise e Construção de Um Piranômetro Fotovoltaico”, PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

## 9. DIREITOS AUTORAIS

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

### INFLUENCE OF THE LOAD PROFILE ON THE EFFICIENCY OF WATER HEATING SYSTEMS COMBINING SOLAR ENERGY AND GAS

#### **Jean-Marc Stephane Lafay**

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – Via do Conhecimento, km 01  
CEP 85501-970 Pato Branco – PR [jean@mecanica.ufrgs.br](mailto:jean@mecanica.ufrgs.br)

#### **Arno Krenzinger**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Sarmento Leite, 425 CEP 90050-170  
Porto Alegre - RS [arno@mecanica.ufrgs.br](mailto:arno@mecanica.ufrgs.br)

#### **César Wilhelm Massen Prieb**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Sarmento Leite, 425 CEP 90050-170  
Porto Alegre - RS [cprieb@ufrgs.br](mailto:cprieb@ufrgs.br)

**Abstract.** This work aims to calculate and analyze the influence of the load profile on the efficiency of water heating systems combining solar energy and gas. At the experimental phase of this project two water heating systems (named series and parallel) were assembled. Both systems work by natural circulation and are identical except for the way their components are connected. Instant gas heaters are used as auxiliary source. The same load patterns were applied to each system. The values of temperatures, irradiance and consumption of water and gas were registered by a data acquisition unit interfaced to a computer. The solar collectors efficiency and the overall system efficiency were evaluated for each system. The parallel configuration was shown to be more efficient.

**Keywords.** Solar energy, water heating systems, hybrid heating.