

REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM UM SISTEMA HÍBRIDO AUTOMATIZADO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

Gelson Onir Pasetti – gpasetti@gmail.com

Julio Elias Normey-Rico – julio.normey@ufsc.br

Rafael Sartori – sartori.das.ufsc@gmail.com

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Automação e Sistemas

José Luis Guzmán Sanchez – joseluis.guzman@ual.es

Universidade de Almeria, Departamento de Informática

Resumo. Este artigo apresenta uma unidade de aquecimento de água para o banho, com um grande grau de automação, especialmente projetada para reduzir o consumo elétrico em residências brasileiras, visto que praticamente 25% do consumo energético no setor doméstico é utilizado para o aquecimento de água. O sistema é composto basicamente por coletores solares, um tanque de armazenamento e um chuveiro elétrico. Válvulas automáticas e controladores de potência são utilizados para regular a temperatura e vazão de água durante o banho. Um microcontrolador é responsável por controlar todo o sistema, a fim de atender aos requisitos (temperatura e vazão do banho) definidos pelo usuário, sem que o mesmo necessite regular a abertura das válvulas ou a potência do chuveiro, aumentando o seu conforto. O segundo objetivo do sistema é reduzir o consumo de energia elétrica e o desperdício de água fria no início do banho. Um modelo matemático foi desenvolvido e um protótipo foi usado para validá-lo. O sistema proposto comprovou ser economicamente viável, economizando expressivas quantidades de energia elétrica e água se comparado aos sistemas tradicionais.

Palavras-chave: Energia Solar, Eficiência Energética, Sistema de Aquecimento, Modelagem e Automação de Sistemas.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda mundial de energia e a preocupação cada vez maior com o meio ambiente têm feito com que as energias alternativas ganhassem espaço nas discussões e importância nos centros de pesquisa. Os investimentos em pesquisa e desenvolvimento nessa área dobraram nos últimos nove anos, alcançando o valor de 9,6 bilhões de dólares em 2012. A maior parte desses investimentos (51%) está sendo aplicada em energia solar, visando aumentar a conversão de energia em placas fotovoltaicas e a eficiência dos sistemas (UNEP, 2013).

Em relação aos processos solares térmicos, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas utilizando funções de otimização para melhorar o desempenho desses sistemas e reduzir o consumo de uma fonte auxiliar de energia. Badescu (2007), por exemplo, utilizou um controle ótimo de vazão em coletores solares para melhorar a extração de energia. Núñez-Reyes et al. (2005) usaram um Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC) para controlar a temperatura em uma planta solar de ar condicionado. Salazar et al. (2003) utilizaram um método de otimização para reduzir o tamanho de um sistema de aquecimento solar doméstico voltado para famílias de baixa renda.

Em residências, o aquecimento solar é utilizado basicamente para climatização de ambientes e para aquecer a água. Como exemplo do primeiro caso, Griego et al. (2012) realizou um estudo para otimizar a eficiência energética e o conforto térmico em residências em Salamanca (México). Florio (2010), por sua vez, apresenta melhorias feitas em um sistema de aquecimento solar por termossifão. Utilizando a eletrônica microcontrolada, esse projeto apresenta como vantagens a monitoração de temperatura e economia de energia, considerando períodos de baixa insolação e o modelo de operação proposto pelo autor. No trabalho de Ormenese (2009) a lógica nebulosa é usada (controlador *Fuzzy*) para regular a entrada de água fria no tanque de armazenamento de água quente (*boiler*) e assim melhorar a eficiência de unidades solares de aquecimento de água. Já Colle et al. (2010), considerando que as tarifas de energia elétrica são diferenciadas pelo horário de consumo, aborda a otimização do isolamento térmico de reservatórios para diferentes modos de operação do sistema de aquecimento solar para banho, a fim de se obter o menor custo possível.

O aquecimento da água para o banho pode ser feito de formas:: usando um aquecedor de passagem ou um aquecedor central. O aquecedor de passagem é caracterizado por esquentar somente a água que será utilizada durante o banho, como um chuveiro elétrico ou a gás. Um sistema de aquecimento central precisa aquecer um grande volume de água que pode ser utilizado em uma ou mais duchas e em um ou vários banhos. Exemplos desse tipo de sistema são os tanques de água quente com resistência elétrica ou com aquecimento a gás e os sistemas solares de aquecimento de água.

Ambas as formas de aquecimento (de passagem e centralizado) apresentam vantagens e desvantagens. O chuveiro elétrico, que é usado em 73,5% das residências brasileiras, responde por quase 25% do consumo elétrico nas casas, e também é o principal responsável pelo pico de energia que ocorre entre as 18h e 21h no país (ELETROBRAS, 2009). Por outro lado, ele é o equipamento que menos desperdiça água. O aquecedor a gás utiliza mais água para o banho que

o chuveiro elétrico (Vizeu, 2009) e parte do calor é perdido na tubulação antes de chegar ao chuveiro. Além disso, um determinado volume de água, muito maior que no caso do chuveiro elétrico, é perdido no início do banho porque a temperatura da água está abaixo do valor desejado. A planta solar tem a vantagem de usar energia renovável como principal fonte de calor, mas apresenta os mesmos problemas que o chuveiro a gás e, em dias chuvosos ou nublados, o sistema necessita aquecer um grande volume de água no tanque de armazenamento (*boiler*), utilizando a resistência elétrica presente em seu interior. Esse processo é muito lento e consome muita energia.

Para melhorar o desempenho e reduzir o consumo de água e energia, este trabalho utiliza-se de um sistema híbrido, que combina os benefícios de uma planta solar com as vantagens de um chuveiro elétrico. Tal sistema foi estudado por Passos et al. (2012) e foi comprovado que ele é mais eficiente que um sistema solar tradicional e um chuveiro elétrico, porém o trabalho não apresenta resultados experimentais nem trata do problema de controle de vazão e temperatura.

Neste trabalho será dada ênfase a automação de um sistema híbrido doméstico e ao algoritmo sub-ótimo que é capaz de calcular a cada minuto a temperatura mínima da água no tanque de armazenamento que é exigida pelo sistema a fim de atender os requisitos de temperatura e vazão de água do banho definida previamente pelos usuários. O controlador presente neste sistema de aquecimento terá a função de regular o consumo das resistências elétricas do chuveiro e do *boiler* para garantir um banho confortável ao usuário com o menor gasto energético possível, além de controlar a abertura das válvulas de água quente e fria para que não haja desperdício de água.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a próxima seção descreve o sistema híbrido e sua operação. A terceira parte apresenta o modelo matemático utilizado nas simulações. A quarta seção introduz a estratégia de controle utilizada no sistema. A quinta parte mostra os resultados do projeto e a última seção apresenta as conclusões do trabalho.

2. SISTEMA PROPOSTO

Um sistema foi projetado para atender as necessidades de uma família com quatro pessoas, considerando que cada indivíduo toma banho uma vez por dia. Esse sistema é composto por três placas solares de 1,5m² cada uma, um tanque de armazenamento de água quente (*boiler*) com capacidade de 200L e uma resistência interna de 3000W, uma bomba com uma vazão de $1,667 \cdot 10^{-4}$ m³/s (10L/min), uma caixa d'água de 310L, um chuveiro elétrico de 6600W e volume interno de 0,3L, dois microcontroladores, duas válvulas automáticas que regulam a vazão da água, sete sensores de temperatura, dois sensores de vazão e um sensor de radiação. A Fig. 1 apresenta um esquema do sistema.

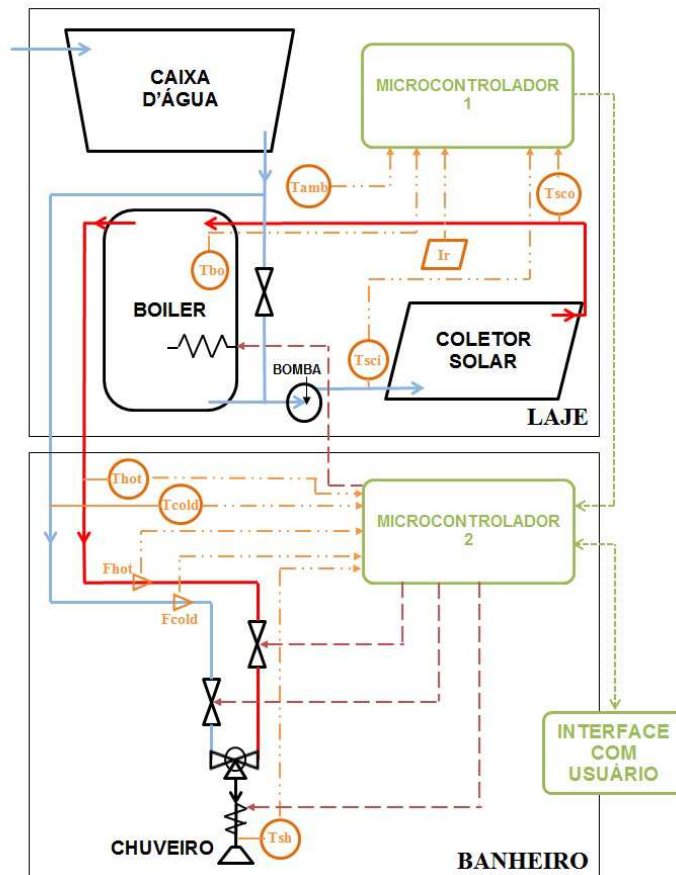


Figura 1 - Esquema do sistema solar híbrido.

A planta solar apresenta dois circuitos hidráulicos que operam de forma independente. Em um deles a água circula entre as placas solares e o tanque de armazenamento de forma que a água quente aquecida pelo sol seja armazenada no *boiler*. Nesse circuito se utiliza uma bomba, dois sensores de temperatura e um controlador que controla a circulação da água. Quando a diferença de temperatura de entrada e saída do coletor solar for de 5°C, a bomba é acionada, e quando essa diferença cair para 2°C, o controlador desliga a bomba, interrompendo a circulação de água no circuito.

No segundo circuito, o *boiler* e a caixa d'água abastecem o chuveiro elétrico com água quente e fria, respectivamente. Conforme a água quente é consumida, a caixa d'água também repõe o volume de água consumida no *boiler*. No chuveiro, a água quente e a água fria são misturadas utilizando duas eletroválvulas e, quando necessário, a resistência do chuveiro é acionada para aquecer a água do banho. Se a resistência do chuveiro não tem potência suficiente para atingir a temperatura desejada, a resistência do *boiler* é ligada previamente utilizando um modelo preditivo, a fim de garantir maior conforto ao usuário durante o banho.

Dois microcontroladores são usados para o controle e supervisão do processo. O primeiro microcontrolador realiza a aquisição de quatro temperaturas (do ambiente, do *boiler*, da entrada e da saída do coletor solar) e da radiação solar. Então ele envia todos os dados para o segundo microcontrolador, que faz a leitura de outras três temperaturas (do banho, da água quente e fria) e da vazão de água quente e fria utilizada no banho. O segundo microcontrolador também é responsável por receber, de uma interface local, os parâmetros definidos pelo usuário. Com toda essa informação, o segundo microcontrolador executa um algoritmo sub-ótimo para controlar as válvulas e as resistências de tal forma que a vazão e a temperatura desejadas sejam atingidas.

O usuário pode inserir ou alterar os parâmetros do sistema utilizando um teclado afixado junto ao chuveiro. Quando o usuário quiser tomar um banho, ele programa o microcontrolador, fornecendo a temperatura e vazão desejada, assim como, o horário e duração de seu banho. Essa operação pode ser feita a qualquer momento, entretanto é o ideal é que seja realizada com pelo menos duas horas de antecedência em relação ao banho programado.

Um protótipo do sistema proposto foi construído na Universidade Federal de Santa Catarina, em Florianópolis (27.6°S, 48.4°O), Santa Catarina.

3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Para que fosse possível avaliar o consumo de energia do sistema híbrido proposto e comparar sua eficiência com um chuveiro elétrico (aquecedor de passagem) e uma planta solar doméstica tradicional (aquecimento centralizado composto por um coletor solar e um tanque de armazenamento com uma resistência elétrica em seu interior), foram criados modelos matemáticos dos sistemas, usando leis da física. Posteriormente esses modelos foram validados em uma planta real.

Os modelos matemáticos foram desenvolvidos usando as seguintes considerações:

- A temperatura do líquido no tanque de armazenamento não é estratificada;
- As perdas térmicas da tubulação estão concentradas no *boiler* e no encanamento que leva a água quente ao chuveiro;
- A queda de pressão no coletor solar e no encanamento é negligenciada;
- As capacidades térmicas do coletor solar e da parede do tanque de armazenamento são negligenciadas;
- A transferência de calor, quando ocorre a mistura da água quente e fria, é instantânea.

A função de transferência de calor nos coletores solares é obtida utilizando-se a equação de Hottel-Whillier-Bliss (Smith e Weiss, 1977):

$$\dot{Q}_{sc}(t) = A_{sc} f_r [I_r(t)(\tau\alpha) - U_{sc}(T_{sci}(t) - T_{amb}(t))] \quad (1)$$

A dinâmica do *boiler* é descrita pela Eq. (2) (Duffie e Beckman, 1980):

$$c_p \rho V_{bo} \frac{\partial T_{bo}}{\partial t} = \dot{Q}_{bo}(t) + \dot{Q}_{sc}(t) + \dot{Q}_{cons}(t) - \dot{Q}_{loss}(t) \quad (2)$$

Onde:

$$\dot{Q}_{bo}(t) = \eta P_{bo}(t) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{cons}(t) = c_p \rho F_{bo}(t) [T_{cold}(t) - T_{bo}(t)] \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{loss}(t) = U_{bo} A_{bo} [T_{bo}(t) - T_{amb}(t)] \quad (5)$$

E a equação do chuveiro é definida por (Maceti, Levada e Lautenschleguer, 2011):

$$\dot{Q}_{sh}(t) = \eta P_{sh}(t) = c_p \rho [F_{sh}(t)T_{sh}(t) - F_{hot}(t)T_{hot}(t) - F_{cold}(t)T_{cold}(t)] \quad (6)$$

Onde:

$$T_{hot}(t) = (1 - K_{hot})T_{bo}(t) + K_{hot}T_{amb}(t) \quad (7)$$

Todas as variáveis estão definidas na Tab. 1.

Tabela 1 – Nomenclatura das variáveis

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO	UNIDADE
A_{bo}	Área de superfície do <i>boiler</i>	m ²
A_{sc}	Área da superfície do coletor solar	m ²
c_p	Calor específico da água	J/K.kg
F_{cold}	Vazão de água fria da caixa d'água para o chuveiro	m ³ /s
F_{hot}	Vazão de água quente do <i>boiler</i> para o chuveiro e vazão de água fria da caixa d'água para o <i>boiler</i> .	m ³ /s
f_r	Fator de remoção do calor do coletor solar	–
F_{ref}	Vazão de referência para o banho definida pelo usuário	m ³ /s
F_{sh}	Vazão de água na saída do chuveiro	m ³ /s
I_r	Irradiação solar absorvida pelo coletor solar	W/m ²
K_{hot}	Fator de perdas térmicas entre o <i>boiler</i> e a entrada do chuveiro	–
m	Horizonte de predição	–
m_{bo}	Massa de água no interior do <i>boiler</i>	kg
n	Passo amostral	–
P_{bo}	Potência da resistência do <i>boiler</i> aplicada no sistema	W
$P_{bo,max}$	Potência da máxima da resistência do <i>boiler</i>	W
P_{sh}	Potência da resistência do chuveiro elétrico aplicada no sistema	W
$P_{sh,max}$	Potência da máxima da resistência do chuveiro elétrico	W
$\dot{Q}_{bo}$	Calor transferido da resistência do <i>boiler</i> para a água	W
$\dot{Q}_{cons}$	Fluxo de calor entre a água quente que está saindo do <i>boiler</i> para o chuveiro e a água fria da caixa d'água que está entrando no <i>boiler</i>	W
$\dot{Q}_{loss}$	Perda térmica do <i>boiler</i> para o ambiente	W
$\dot{Q}_{sc}$	Calor absorvido pela água no coletor solar	W
$\dot{Q}_{sh}$	Calor transferido da resistência do chuveiro para a água	W
T_{amb}	Temperatura ambiente	K
T_{bo}	Temperatura da água no <i>boiler</i>	K
$T_{bo,ref}$	Temperatura de referência da água no <i>boiler</i> calculada pelo algoritmo de sub-otimização	K
T_{cold}	Temperatura da água fria na caixa d'água	K
T_{hot}	Temperatura da água quente na tubulação de entrada do chuveiro	K
$T_{hot,ref}$	Temperatura de referência da água quente calculada pelo algoritmo de sub-otimização	K
T_{ref}	Temperatura de referência do banho definida pelo usuário	K
t_s	Período de amostragem	s
T_{sh}	Temperatura da água no banho	K
T_{sci}	Temperatura da água na entrada do coletor solar	K
T_{sco}	Temperatura da água na saída do coletor solar	K
U_{bo}	Coefficiente global de perdas térmicas no <i>boiler</i>	W/m ² K
U_{sc}	Coefficiente global de perdas térmicas no coletor solar	W/m ² K
α	Coefficiente de absorção do calor na placa solar	–
η	Taxa de eficiência na conversão de energia elétrica em calor	–
ρ	Densidade da água	kg/m ³
τ	Coefficiente de transmissão de calor através do vidro	–
ΔT_{sh}	Varição da temperatura que ocorre no chuveiro devido ao aquecimento da resistência elétrica	K

Os modelos matemáticos foram validados utilizando uma planta solar localizada na Universidade Federal de Santa Catarina (Florianópolis, SC). Os valores das constantes utilizadas na modelagem se encontram na Tab.2.

Tabela 2 – Valores das constantes

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	VALOR
f_r	Fator de remoção do calor do coletor solar	0,696
K_{hot}	Fator de perdas térmicas entre o <i>boiler</i> e a entrada do chuveiro	0,14
U_{bo}	Coefficiente global de perdas térmicas no <i>boiler</i>	9,0 W/m ² K
U_{sc}	Coefficiente global de perdas térmicas no coletor solar	6,2 W/m ² K
α	Coefficiente de absorção do calor na placa solar	0,9412
η	Taxa de eficiência na conversão de energia elétrica em calor	0,95
ρ	Densidade da água a 40°C	992,2 kg/m ³
τ	Coefficiente de transmissão de calor através do vidro	0,85

O conjunto de gráficos da figura 2 mostra um dos experimentos utilizados para a validação dos modelos matemáticos. Os dados utilizados na simulação foram adquiridos no dia 31 de Setembro de 2013, entre às 12h e 20h, em Florianópolis. As condições climáticas eram favoráveis para o aquecimento solar, como pode ser observado nas Figs 2a e 2b. As válvulas de água quente e fria foram abertas 4 vezes entre às 19h e 20h, a fim de simular o comportamento de uma família com 4 pessoas, como mostra a Fig. 2c.

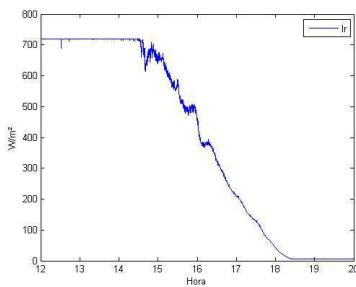


Figura 2a - Irradição solar no dia 31 de Setembro.

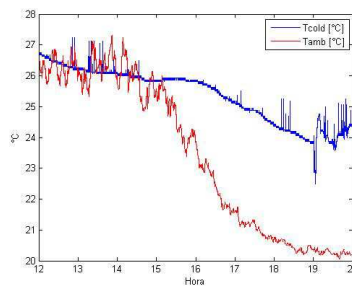


Figura 2b - Temperatura da água fria (em azul) e temperatura ambiente (em vermelho) no dia 31 de Setembro.

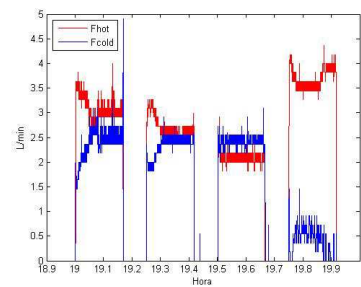


Figura 2c - Vazões de água quente (em vermelho) e fria (em azul) durante o experimento.

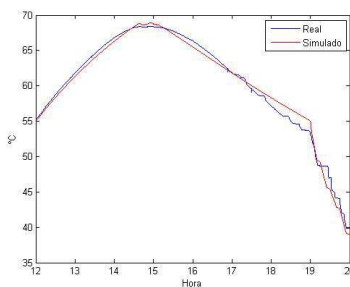
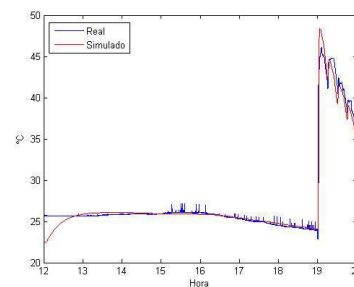
Figura 2d - Temperatura da água no *boiler* observada (em azul) e simulada (em vermelho).

Figura 2e - Temperatura da água no cano de água quente observada (em azul) e simulada (em vermelho).

Analisando-se as Figs. 2d e 2e, as quais comparam os dados reais da planta com os obtidos pela simulação é possível observar que o modelo representa muito bem o sistema. No caso da temperatura do *boiler* (T_{bo}) o coeficiente de correlação entre o sistema real e o simulado foi de 98,69%. Já a água quente (T_{hot}) apresentou um coeficiente de correlação igual a 96,97%. Resultados similares aos mostrados se obtiveram em outros experimentos, assim, o modelo pode ser usado de forma confiável para o estudo do sistema em diversas condições de operação.

4. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A estratégia de controle proposta tem por objetivo o controle da temperatura (T_{sh}) e da vazão (F_{sh}) da água do banho. Para isso atua-se na potência dissipada pelas resistências do chuveiro (P_{sh}) e do *boiler* (P_{bo}), assim como nas

válvulas localizadas próximas à entrada do chuveiro, que regulam as vazões de água quente (F_{hot}) e água fria (F_{cold}). Além disso, a temperatura da água no interior do boiler (T_{bo}) também é controlada, pois ela tem uma influência importante no desempenho do sistema e no consumo de energia.

As principais perturbações do processo são a temperatura ambiente (T_{amb}), a temperatura de água fria (T_{cold}) e a irradiação solar (I_r).

Todas as variáveis citadas são mensuráveis, por isso o sistema faz a aquisição de todas elas para realizar o controle da planta.

As referências (temperatura e vazão de água no banho) serão fornecidas pelo usuário através da interface local, entretanto o ponto de operação das variáveis controladas será dado através de um algoritmo sub-ótimo executado pelo segundo microcontrolador.

4.1 Algoritmo sub-ótimo de controle

Os microcontroladores, de forma geral, são equipamentos que possuem uma baixa capacidade de processamento, não sendo possível incluir em sua rotina funções de otimização muito complexas. Ainda assim, o controle desenvolvido deveria fazer com que o sistema operasse numa faixa próxima ao ponto ótimo, o qual traria o maior conforto e economia ao usuário. A fim de resolver esse problema, foi desenvolvido um algoritmo de controle que garantisse o seguimento à referência (tanto da temperatura, como da vazão) e, ao mesmo tempo, procurasse economizar energia elétrica.

O objetivo principal do algoritmo é calcular o valor futuro da temperatura da água no *boiler* ($T_{bo,ref}$) necessário para atingir a temperatura de referência do banho (T_{ref}), considerando o incremento máximo de temperatura que o chuveiro elétrico pode fornecer dada uma vazão constante de água. Caso o valor predito da temperatura do *boiler* for inferior à $T_{bo,ref}$, a resistência do *boiler* deverá ser acionada. Caso contrário, o microcontrolador deverá regular a potência do chuveiro elétrico para que a temperatura da água do banho siga a referência definida previamente.

Para o desenvolvimento do algoritmo foram necessários modelos discretos da planta, assim se utilizou a aproximação de Euler para obter os referidos modelos discretos, definindo “n” como o passo amostral. No modelo de T_{bo} obtido com essa aproximação (vide Eq. (8)), as variáveis T_{cold} e T_{amb} são consideradas constantes ao longo do horizonte de predição, logo $T_{cold}(n)=T_{cold}(n+k)$ e $T_{amb}=T_{amb}(n+k)$, para $1 \leq k \leq m$ e o calor absorvido pela água no coletor solar (Q_{sc}) não será considerado (dado que seu valor futuro não pode ser predito com grande confiabilidade em um horizonte de 2 horas).

$$T_{bo}(n+k) = t_s [c_p \rho F_{hot}(n+k-1)(T_{cold}(n+k-1) - T_{bo}(n+k-1)) \dots \dots - U_{bo} A_{bo} (T_{bo}(n+k-1) + T_{amb}(n+k-1)) + c_p \rho V_{bo} T_{bo}(n+k-1) / t_s] / (c_p \rho V_{bo}) \quad (8)$$

Nota-se que, ao desconsiderar Q_{sc} , faz-se com que o sistema opere considerando o pior caso possível, onde a única fonte de aquecimento da água do tanque de armazenamento seria a sua resistência interna.

No primeiro passo do algoritmo estimam-se os valores da temperatura do *boiler* (T_{bo}) e da temperatura de água quente (T_{hot}) na entrada do chuveiro nas próximas duas horas (horizonte de predição), usando as Eqs. (8) e (7), respectivamente. Para realizar esse cálculo também é necessário conhecer os consumos futuros de água quente (F_{hot}) e fria (F_{cold}), os quais podem ser obtidos por meio das Eqs. (9) e (10).

$$T_{hot}(n+k) \leq T_{ref}(n+k) \rightarrow F_{hot}(n+k) = F_{ref}(n+k) \quad \text{com } 1 \leq k \leq m \quad (9)$$

$$T_{hot}(n+k) > T_{ref}(n+k) \rightarrow F_{hot}(n+k) = \frac{F_{ref}(n+k)(T_{ref}(n+k) - T_{cold}(n+k))}{(T_{hot}(n+k) - T_{cold}(n+k))}$$

$$F_{cold}(n+k) = F_{ref}(n+k) - F_{hot}(n+k) \quad \text{com } 1 \leq k \leq m \quad (10)$$

No segundo passo do algoritmo, calcula-se a máxima variação de temperatura que o chuveiro é capaz de fornecer, dada uma vazão constante. Utilizando-se a Eq. (6) e assumindo o valor máximo da potência do chuveiro e que a vazão do banho (F_{sh}) será igual a vazão de referência definida pelo usuário (F_{ref}), obtém-se:

$$\Delta T_{sh}(n+k) = \frac{\eta P_{sh,max}}{c_p \rho F_{sh}(n+k)} \quad \text{com } 1 \leq k \leq m \quad (11)$$

No terceiro passo do procedimento, verifica-se se a temperatura de referência do banho (T_{ref}) menos a temperatura estimada da água quente (T_{hot}), cujo valor futuro é obtido utilizando-se a Eq. (7), é maior ou menor que ΔT_{sh} . Se for menor ou igual, a temperatura de referência de água quente (que representa a temperatura que essa variável deve ter ao longo do tempo) será igual à estimada anteriormente ($T_{hot}(n+k)$). Se for maior, a temperatura de referência da água quente será igual a temperatura de referência do banho ($T_{ref}(n+k)$) menos a variação de temperatura máxima que o chuveiro consegue fornecer. Essa lógica está representada na Eq. (12).

$$\begin{aligned}
T_{ref}(n+k) - T_{hot}(n+k) &\leq \Delta T_{sh}(n+k) \rightarrow T_{hot.ref}(n+k) = T_{hot}(n+k) \\
T_{ref}(n+k) - T_{hot}(n+k) &> \Delta T_{sh}(n+k) \rightarrow T_{hot.ref}(n+k) = T_{ref}(n+k) - \Delta T_{sh}(n+k)
\end{aligned}
\quad \text{com } 1 \leq k \leq m \quad (12)$$

Com a temperatura de referência da água quente na entrada do chuveiro definida ($T_{hot.ref}$), obtém-se, por meio da Eq. (7), a temperatura de referência futura do *boiler* ($T_{bo.ref}$). Em seguida, calcula-se a potência da resistência do *boiler* necessária para atingir essa temperatura, conforme apresentado na Eq. (13).

$$P_{bo}(n+k) = c_p \rho V_{bo} (T_{bo.ref}(n+k) - T_{bo}(n+k)) / \eta \quad \text{com } 1 \leq k \leq m \quad (13)$$

O último passo garante que a potência calculada da resistência do *boiler* a cada instante não ultrapasse a potência máxima do equipamento ($P_{bo.max}$). Iniciando-se com o último elemento do vetor de predição da potência da resistência do boiler, verifica-se se o seu valor é maior ou menor que a potência máxima dessa resistência. Se for menor, mantém-se o número predito. Se for maior, altera-se o valor de $P_{bo}(n+k)$ para a potência máxima e a diferença entre a potência máxima e a predita é acrescentada no elemento precedente do vetor, conforme demonstrado na Eq. (14)

$$\begin{aligned}
P_{bo}(n+k) &\leq P_{bo.max} \rightarrow P_{bo}(n+k) = P_{bo}(n+k) \\
P_{bo}(n+k) &> P_{bo.max} \rightarrow \begin{cases} P_{bo}(n+k-1) = P_{bo}(n+k-1) + P_{bo}(n+k) - P_{bo.max} \\ P_{bo}(n+k) = P_{bo.max} \end{cases} \quad \text{com } 1 \leq k \leq m
\end{aligned} \quad (14)$$

Esse procedimento é realizado em todo o vetor até que se chegue ao segundo elemento de $P_{bo}(n+k)$, cujo valor é aplicado como ação de controle na resistência do boiler.

O algoritmo é executado pelo microcontrolador a cada minuto, fazendo com que o passo amostral seja equivalente a 60 segundos. Nos cálculos das predições, são utilizados os últimos valores lidos dos sensores.

4.2 Controle local

O algoritmo de controle da seção 4.1 entrega, a cada minuto, as referências para os controles locais das temperaturas do chuveiro e do boiler e das vazões de água quente e fria.

No caso do tanque de armazenamento e do chuveiro, as temperaturas são controladas por meio de controladores PI, que regulam o consumo de energia nas resistências.

A vazão de água no banho é composta pelas vazões de água quente e água fria, conforme exposto nas Eqs. (9) e (10). A mistura delas tem um efeito direto na temperatura do banho e por isso devem ser muito bem balanceadas para melhorar o desempenho do sistema e o seguimento da referência. O controle dessas vazões é dado por um controlador proporcional, que é responsável por abrir e fechar as válvulas automaticamente.

5. RESULTADOS

Utilizando o protótipo descrito na seção 2 e as estratégias de controle apresentadas na seção 4, foi realizado um experimento simulando 4 banhos com uma duração de 10 minutos cada um e um intervalo de 5 minutos entre eles. A temperatura de referência dos banhos variou entre 32°C e 40°C e a vazão de referência deles foi de 83,33 cm³/s (5L/min) a 66,66 cm³/s (4L/min). Os resultados desse estudo são apresentados no conjunto de gráficos da Fig. 3.

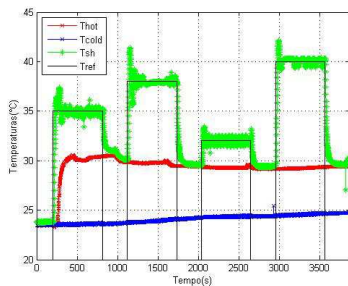


Figura 3a - Temperaturas de água quente (em vermelho), água fria (em azul), do banho (em verde) e de referência (em preto).

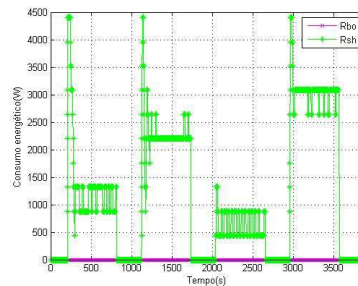


Figura 3b – Acionamento das resistências do chuveiro (em verde) e do boiler (em rosa).

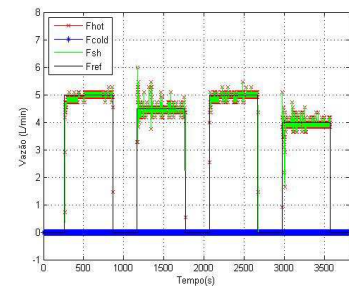


Figura 3c – Vazões de água quente (em vermelho), de água fria (em azul), do banho (em verde) e de referência (em preto).

Como a temperatura da água quente estava abaixo da temperatura de referência (Fig. 3a), o sistema utilizou em todos os banhos somente a água aquecida pelo coletor solar. Por esse motivo a vazão de água fria foi nula em todo o experimento, como pode ver visto na Fig. 3c.

Para garantir o seguimento à temperatura de referência, foi necessário utilizar a resistência elétrica do chuveiro para aquecer a água vinda do tanque de armazenamento (Fig. 3b). Os valores mais altos (próximos a 4400W) ocorreram justamente no início de cada banho, uma vez que foi necessário mais energia para compensar as perdas térmicas da água que fica parada na tubulação até que a água quente do *boiler* chegue ao chuveiro. Neste estudo não foi necessário acionar a resistência do boiler para fazer um pré-aquecimento da água.

O erro médio durante os banhos foi de 1,3674°C e 4,978cm³/s (0,2987L/min). O consumo total de energia elétrica na planta foi de 1,2415kWh e, com base na tarifa de energia elétrica vigente para as residências em Santa Catarina, o custo financeiro desse aquecimento foi de R\$0,44.

Para fazer uma comparação entre a eficiência energética do sistema híbrido, do chuveiro elétrico e da planta solar, foram coletados dados entre os dias 03 a 09 de Setembro de 2013, em Florianópolis. Esses dados (temperatura da água fria, temperatura ambiente e radiação solar), foram utilizados como entradas em simulação realizada no software Matlab. A simulação considerava um grupo de quatro pessoas tomando banho de 10 minutos, uma vez por dia, entre as 19h e 20h. A temperatura desejada da água durante o banho foi definida em 35°C e a vazão em 0,0001m³/s (o que equivale a 6L/min). A Tab. 3 apresenta o resultado do experimento.

Tabela 3 – Resultado da simulação utilizando os dados coletados entre 03 e 09 de Setembro

	Chuveiro elétrico	Sistema Solar	Sistema Proposto
Total de energia elétrica consumida em seis dias [kWh]	22,0790	25,4508	9,8477
Custo total em seis dias [reais]	R\$ 7,85	R\$ 9,05	R\$ 3,50
Custo médio diário [reais]	R\$ 1,31	R\$ 1,51	R\$ 0,58
Consumo de energia comparado ao chuveiro elétrico	100,0%	115,3%	44,6%
Erro médio da temperatura durante o banho [°C]	1,1019	1,8257	0,4556

Observa-se que o erro médio da temperatura e o consumo de energia são muito menores no sistema proposto que nos outros dois sistemas. Nessa simulação, o sistema híbrido chega a economizar mais do que 55% da energia se comparado ao chuveiro elétrico e em relação ao sistema solar essa economia chega a mais de 60%. O baixo desempenho do sistema solar nesse estudo deve-se a que, nesses dias, as condições climáticas não foram favoráveis.

Para avaliar a economia de energia ao longo do ano, foram usadas como entradas da simulação a média da temperatura ambiente e a média da radiação solar dos meses de Junho (inverno) e Dezembro (verão), em Florianópolis, (Goulart, Lamberts, & Firmino, 1998; CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito, 2013). As referências (temperatura e vazão), a duração e o número de banhos por dia foram iguais às usadas na análise anterior. O resultado dessa simulação é exposto na Tab. 4.

Tabela 4 – Resultado da simulação utilizando a temperatura e a radiação solar média nos meses de Junho (J) e Dezembro (D)

	Chuveiro elétrico	Sistema Solar	Sistema Proposto
Consumo de energia elétrica diário [kWh]	J – 4,3927 D – 3,8675	J – 7,3450 D – 1,5942	J – 2,8686 D – 0,3442
Custo médio diário [reais]	J – R\$ 1,56 D – R\$ 1,37	J – R\$ 2,61 D – R\$ 0,57	J – R\$ 1,02 D – R\$ 0,12
Consumo de energia comparado ao chuveiro elétrico	J – 100,0% D – 100,0%	J – 167,2% D – 41,2%	J – 65,3% D – 8,9%
Erro médio da temperatura durante o banho [°C]	J – 4,3876 D – 0,5514	J – 2,6337 D – 1,4970	J – 0,6295 D – 0,4740

Como pode ser observado, o sistema proposto possui uma performance superior que o chuveiro elétrico e a planta solar, uma vez que ele apresenta o menor erro de seguimento a temperatura de referência e o menor consumo de energia. O sistema híbrido com o controle apresentado também economiza aproximadamente 3,5 litros de água em cada banho (o que representa 5,83% do total e em termos anuais a economia ultrapassa 5000L) se comparado a um sistema de aquecimento central. Essa economia ocorre devido ao uso do chuveiro elétrico para o aquecimento da água fria acumulada dentro da tubulação, até que a água quente, vinda do *boiler*, chegue ao chuveiro.

O baixo desempenho do sistema solar neste estudo se deve ao modo de operação do sistema, que liga a resistência elétrica dentro do tanque de armazenamento, quando a temperatura da água fica abaixo 50°C no inverno e 40°C no verão. Uma vez acionada, a resistência só é desligada quando a temperatura do *boiler* fica acima das temperaturas

anteriormente citadas. Com isso, o sistema apresenta uma grande deficiência energética, porque aquece um grande volume de água (200L) que não será utilizado em sua totalidade e em horários nos quais não há necessidade de aquecimento, devido à falta de banhos programados pelos usuários.

6. CONCLUSÃO

O sistema proposto é economicamente viável e é mais sustentável que o chuveiro elétrico ou uma planta solar.

Em situações nas quais a incidência de radiação solar é baixa, o sistema híbrido com controle sub-ótimo terá um comportamento sempre igual ou superior a um aquecedor de passagem. Em casos de dias ensolarados, o sistema proposto pode economizar mais de 90% de energia se comparado a um chuveiro elétrico. Em termos monetários essa economia pode chegar a R\$400,00 anuais considerando esse sistema e padrão de uso em uma cidade com condições climáticas semelhantes a Florianópolis, Santa Catarina.

O sistema híbrido controlado também provou ser mais econômico que um aquecedor central em qualquer situação, devido às perdas térmicas no tanque de armazenamento e no encanamento, aliado ao grande consumo de energia necessário para aquecer a água em um sistema central. No caso de Florianópolis, a economia de energia, ao optar pelo sistema híbrido controlado, no inverno é de 60,9% e no verão chega a 78,4% se comparada a uma planta solar tradicional. Outra vantagem é que o sistema proposto não desperdiça a água fria que fica acumulada na tubulação (o que representa uma economia anual de 5000L de água se comparado a uma planta solar tradicional), utilizando o chuveiro elétrico para aquecer essa água até que a água quente chegue ao chuveiro. Dessa forma, um maior conforto é obtido para o usuário que não necessita esperar para iniciar o seu banho, tampouco necessita regular a vazão de água quente ou fria quando a temperatura de uma das duas é alterada.

Como o sistema híbrido com controle sub-ótimo possui duas fontes de aquecimento (a resistência do chuveiro e a do *boiler*), que devem ser controladas, ele possui mais graus de liberdade, permitindo que obtenha um erro no seguimento da temperatura de referência do banho menor que os demais sistemas, o que representa maior conforto ao usuário.

Nas regiões onde os aquecedores a gás são mais comuns e seu uso é economicamente mais viável que os chuveiros elétricos, o sistema híbrido pode ser modificado para utilizar um aquecedor a gás no processo. Neste caso, o microcontrolador teria que regular o consumo de gás ao invés do consumo de energia elétrica do chuveiro.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio dado pelo Departamento de Automação e Sistemas, da Universidade Federal de Santa Catarina. Esse trabalho foi financiado pela CAPES, por meio do projeto DGU 220/2010, e pelo projeto PHB2009-0008, subsidiado pelo Ministério Espanhol de Educação.

REFERÊNCIAS

- Badescu, V. (2007). Optimal control of flow in solar collectors for maximum exergy extraction. *International journal of heat and mass transfer*, 50(21-22), 4311–4322. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.01.061
- Colle, S.; Starke, A. R.; Passos, L. A. A.; Veiga, C. E. (2010). Uma análise de sistemas de aquecimento solar de água para uso doméstico no Brasil. Em *III CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Belém.
- CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. (2013). Potencial Energético Solar - Sundata. Retrieved October 07, 2013, de <http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>
- Duffie, J., & Beckman, W. (1980). *Solar engineering of thermal processes*. NASA STI/Recon Technical Report A (Second., p. 919). New York: John Wiley & Sons.
- ELETROBRAS. (2009). *Avaliação do Mercado de Eficiência Energética do Brasil* (p. 77). Rio de Janeiro.
- Florio, J. L. (2010). *Sistema de Monitoração e Controle para Aquecedor Solar*. Universidade Estadual de Campinas. Retirado de <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000774754>
- Goulart, S. V. G., Lamberts, P. R., & Firmino, O. S. (1998). *Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras* (2nd ed., p. 345). Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC.
- Griego, D., Krarti, M., & Hernández-Guerrero, A. (2012). Optimization of energy efficiency and thermal comfort measures for residential buildings in Salamanca, Mexico. *Energy and Buildings*, 54, 540–549. doi:10.1016/j.enbuild.2012.02.019
- Maceti, H., Levada, C., & Lautenschleguer, I. (2011). Ciência e cotidiano: A Física do chuveiro elétrico. *Scientia Plena*, 3, 313–318. Retirado de <http://www.scientiaplenu.org.br/ojs/index.php/sp/article/view/607>
- Núñez-Reyes, A., Normey-Rico, J. E., Bordons, C., & Camacho, E. F. (2005). A Smith predictive based MPC in a solar air conditioning plant. *Journal of Process Control*, 15(1), 1–10. doi:10.1016/j.jprocont.2004.05.001

- Ormenese, M. (2009). *Controlador fuzzy para otimização de sistemas de aquecimento de água com coletores solares*. Universidade Estadual de Campinas. Retirado de <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000469096>
- Passos, L.; Colle, S.; Cardemil, J. M. (2012). Um Estudo sobre os Impactos Técnicos da Introdução de Sistemas de Aquecimento Solar no Brasil. Em *XV Congresso Ibérico e X Iberoamericano de Energía Solar*. Vigo, Espanha.
- Salazar, J., Abreu, S., Borges, T., 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. Em *ISES Solar World Congress 2003* (p. 6). Göteborg, Suécia. Retirado de https://www.labsolar.ufsc.br/publicacoes/solar/eventos/2003/ISES2003/salazar_abreu.pdf
- Smith, C. C., & Weiss, T. A. (1977). Design application of the Hottel-Whillier-Bliss equation. *Solar Energy*, 19, 109–113. Retirado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X77900470>
- UNEP. (2013). *Global Trends in Renewable Energy Investment 2013* (p. 84). Frankfurt am Main. Retirado de <http://www.unep.org/pdf/GTR-UNEP-FS-BNEF2.pdf>
- Vizeu, R. (2009). Chuveiro elétrico consome mais energia, mas gasta menos água. *Folha de São Paulo*. São Paulo. Retirado de <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u551959.shtml>

AN ENERGY EFFICIENT HYBRID SYSTEM FOR BATH WATER HEATING

Abstract. This paper presents a domestic water heating unit, with high level of automation, specially designed to reduce energy consumption in Brazilian residences, where almost 25% of electrical energy is spent to heat water for bathing. The system is composed basically by solar plates, a boiler and an electric shower. Automatic valves and power controllers are used to regulate the temperature and flow during the bath. A microcontroller is responsible to control the system, aiming to meet the requirements (temperature and water flow) defined by the user, without being necessary that he or she opens the cold or hot water valves or regulates the shower's power, increasing the user's comfort. The second goal of the system is to reduce energy consumption and decrease waste of water in beginning of the shower. A mathematical model was developed and a prototype was used to validate it. The proposed system proved to be economically viable, saving expressive quantities of electrical energy and water if compared to traditional systems.

Key words: Solar Energy, Energy Efficiency, Heating System, Modeling and System Automation.