

DESENVOLVIMENTO DE UM CHUVEIRO ELETRÔNICO ACOPLADO A UM MISTURADOR TERMOSTÁTICO PARA SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR COMPACTOS

FLABIO A. B. BATISTA, LIELISON RAMOS, SAMUEL L. DE ABREU
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
AVENIDA MAURO RAMOS, 950, FLORIANÓPOLIS - SANTA CATARINA, CEP 88020-300
FLABIO@IFSC.EDU.BR, LIELISON@HOTMAIL.COM, ABREU@IFSC.EDU.BR

Abstract— This paper presents the development of an electrical shower for compact solar heating systems (SASC) using a thermostatic valve. In the proposed system is performed the design and assembly of a prototype system where a digitally controlled shower is integrated for mixing hot water with mains water. The prototype allows that the shower water flow remains constant within a selectable temperature range, avoiding waste of water during the initial bath period and saving energy due the more efficient use of the SASC. The main elements of the temperature control system are described and the design methodology of the controllers for the electronic shower and the mixing valve is shown. Finally, experimental results demonstrating the operation of the complete system are presented, in which there is a satisfactory performance even when using simplified methods for the design of controllers.

Keywords— Digitally controlled shower, Mixing valve, Solar heat systems, PI controller, Microcontroller.

Resumo — Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um chuveiro eletrônico para sistemas de aquecimento solar compactos (SASC) utilizando uma válvula termostática. No sistema proposto realiza-se o projeto e montagem de um protótipo onde integra-se um chuveiro digitalmente controlado à um mecanismo de mistura de água quente com água à temperatura de fornecimento. O protótipo permite que a saída da água do chuveiro permaneça constante dentro de uma faixa de temperatura selecionável, evitando o desperdício de água na etapa inicial de banho e economizando energia devido ao uso mais eficiente da energia térmica armazenada pelo SASC. Os principais elementos do sistema de controle de temperatura são descritos e a metodologia de projeto dos controladores do chuveiro eletrônico e da válvula misturadora são apresentados. Finalmente, resultados experimentais que demonstram o funcionamento do sistema completo são apresentados, nos quais verifica-se um desempenho satisfatório mesmo utilizando-se métodos simplificados para o projeto dos controladores.

Palavras-chave— Chuveiro digitalmente controlado, Válvula misturadora, Sistemas de aquecimento solar, Controlador PI, Microcontrolador.

1 Introdução

A questão do impacto do chuveiro elétrico no sistema de Geração, Transmissão e Distribuição (GTD) de energia elétrica é um problema recorrente e amplamente conhecido. Estudos como a Pesquisa de Posse e Uso de Eletrodomésticos no Brasil (ELETROBRÁS/PROCEL, 2007) afirmam que o chuveiro é responsável em média por 24% do consumo de energia elétrica residencial no Brasil.

Sistemas de Aquecimento Solar (SAS) são alternativas ao uso do chuveiro elétrico e apresentam excelente viabilidade econômica no caso de sistemas de grande porte, os quais fornecem energia para aquecimento de água em sistemas de aquecimento central. No caso da maioria das residências do Brasil, a viabilidade econômica diminui porque a demanda de água aquecida necessária não é muito grande, e os custos de instalação de um chuveiro elétrico são muito pequenos para o consumidor final. Por outro lado, a alta potência dos chuveiros (valores acima de 5 kW) faz com que o mesmo seja o equipamento de maior potência instalada na maioria das residências.

A busca pela viabilidade econômica dos sistemas de pequeno porte é uma questão fundamental diante de cenário atual de expansão do consumo de energia elétrica. Nessa direção, algumas iniciativas governamentais podem ser destacadas, como a recomendação da instalação de SAS de pequeno porte no programa habitacional “Minha Casa Minha Vida” (CAIXA

ECONÔMICA FEDERAL, 2010) e a inclusão dos sistemas de aquecimento solar no Programa de Eficiência Energética da ANEEL (ANEEL, 2013).

Em um sistema de aquecimento solar a água quente leva um certo tempo para chegar até o chuveiro e essa água geralmente é desperdiçada.

Esse volume varia de acordo com a instalação elétrica da residência, quanto maior a distância entre o reservatório térmico e o chuveiro, maior a quantidade de água não aproveitada, pois o usuário só utiliza a ducha após atingir uma temperatura agradável para seu uso.

Chuveiros convencionais apresentam problemas quando utilizados neste tipo de sistema, pois a temperatura do reservatório térmico não é controlada, podendo estar acima ou abaixo da desejada, o que faz com que o controle da temperatura de banho seja difícil de ser realizado.

O sistema de controle de temperatura proposto é composto por um chuveiro digitalmente controlado integrado à um mecanismo de mistura de água quente com água à temperatura de fornecimento, enquanto a temperatura da água do SASC for menor que a temperatura desejada, o sistema de controle do chuveiro é acionado fornecendo apenas a quantidade de potência suficiente para compensar essa diferença de temperatura.

Caso a temperatura do reservatório seja maior ou igual que a desejada, o chuveiro é desligado e a válvula misturadora controla a mistura de água quente e fria, como mostrado no fluxograma da Figura 1.

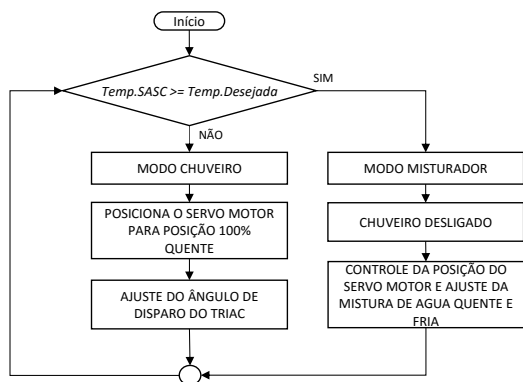


Figura 1. Modos de operação para o controle de temperatura

2 O Chuveiro Eletrônico

O chuveiro eletrônico permite que o controle de temperatura seja realizado de forma que somente seja utilizada apenas a parcela de energia elétrica necessária para elevar a temperatura da água do reservatório até um valor definido pelo usuário.

Na Figura 2 é apresentado o diagrama em blocos do chuveiro eletrônico onde observa-se a presença do micro controlador, gradador monofásico, circuito de sincronismo, sensor de temperatura entre outros.

2.1 Estágio de Potência

Para controlar a potência do chuveiro é utilizado um variador de tensão CA (gradador monofásico) que ajusta o ângulo de disparo dos TRIACs, variando a tensão e a corrente eficaz na carga (Barbi, 2006).

A Figura 3 mostra o esquema elétrico do estágio de potência do chuveiro onde a tensão de alimentação é definida pela Eq. 1.

$$v(\omega \cdot t) = \sqrt{2} \cdot V_{EF} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (1)$$

A potência entregue pelo chuveiro é determinada pela Eq. 2, onde o ângulo de disparo (α) é a variável de controle para o ajuste de temperatura. A Figura 4 mostra o comportamento da potência da carga em função do ângulo de disparo.

$$P = \frac{V_{EF}^2}{\pi \cdot R} \cdot \left(\pi - \alpha + \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{2} \right) \quad (2)$$

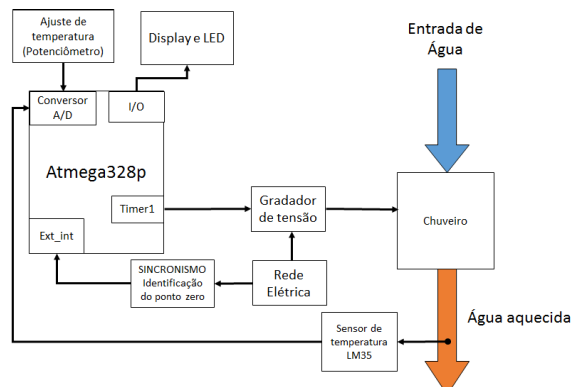


Figura 2. Diagrama em blocos do chuveiro eletrônico

Em sistemas que utilizam o aquecimento solar juntamente com um chuveiro eletrônico, pode ocorrer a situação de queima do chuveiro quando o ajuste de potência (manual) é feito de forma inadequada, pois com a água do reservatório pré-aquecida, corre-se o risco de que as temperaturas dos semicondutores de potência ultrapassem os seus limites operacionais.

No caso em que o sistema opera em malha fechada, verifica-se que esta situação não ocorre, dado que o chuveiro é ajustado automaticamente para processar apenas a parcela de energia necessária para elevar a temperatura da água, trazendo mais segurança ao funcionamento do sistema além de economizar energia elétrica.

A Figura 5 apresenta um gráfico com as variações da temperatura máxima na junção do semicondutor que foram determinadas considerando-se uma temperatura de banho de 48 °C (acima dos limites normalmente usados) e que a potência necessária para elevar a temperatura da água é 300 W/°C, nas condições normais de vazão de água do chuveiro.

Foi considerado um chuveiro de 7700 W/ 220 V com dois TRIACs BTA16 em paralelo, onde as perdas em cada semicondutor são calculadas pela Eq. 3 e a temperatura de junção determinada com auxílio do circuito elétrico equivalente da Figura 6.

$$P_{TRIAC} = r_T \cdot I_{EF}^2 + V_T \cdot I_{MED} \quad (3)$$

Neste caso, como na montagem de um chuveiro eletrônico comercial, a água da entrada do chuveiro é utilizada como elemento de dissipação de calor, definindo o valor de T_A (temperatura ambiente). Caso fosse mantida a potência máxima, a temperatura da junção do semicondutor tenderia ao valor de 141 °C, sendo este valor maior que o limite definido para este componente, que é de 125 °C. Já no sistema com ajuste do ângulo de disparo, isto não ocorre, como pode ser visto na Figura 5.

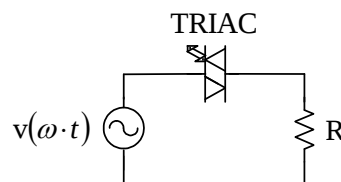


Figura 3. Gradador monofásico

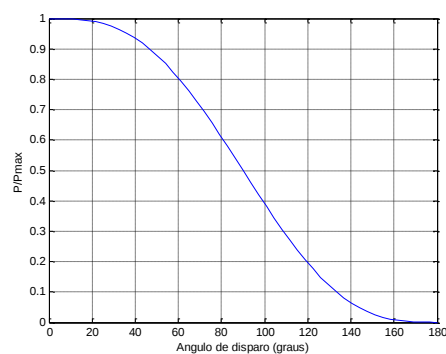


Figura 4. Potência do chuveiro em função de α

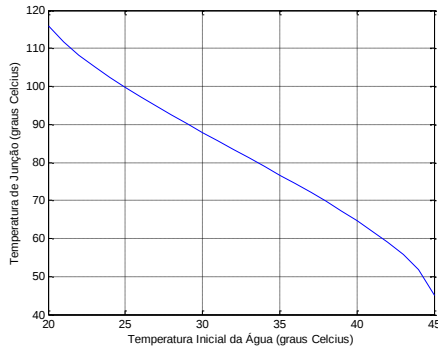


Figura 5. Temperatura de junção do semicondutor em função da temperatura inicial da água

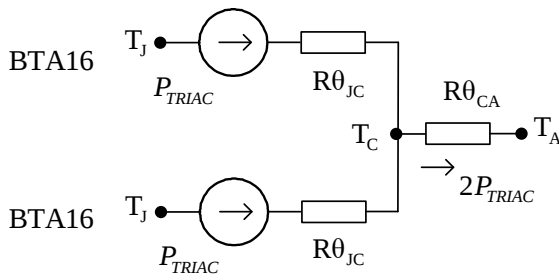


Figura 6. Circuito equivalente para o cálculo térmico

2.2 Projeto do Controlador para o Chuveiro Eletrônico

Para o controle da temperatura de saída do chuveiro eletrônico, o nível de temperatura desejado (Ref) é ajustado por meio de um potenciômetro sendo seu valor mostrado em um display de sete segmentos.

Este valor é comparado com o valor da temperatura da água na saída do chuveiro lido por um microcontrolador utilizando um sensor de temperatura LM35.

A Figura 7 mostra o resultado de um ensaio onde é verificado o comportamento dinâmico da temperatura de saída do chuveiro (Temp), frente a uma variação do ângulo de disparo (α) do controlador CA.

Observa-se que o comportamento deste sistema se aproxima ao comportamento de um sistema de primeira ordem, podendo ser usada a Eq. 4 como sendo a função de transferência para o projeto do controlador de temperatura.

$$G(s) = \frac{Temp(s)}{\alpha(s)} = \frac{K}{T \cdot s + 1} \quad (4)$$

Para garantir erro nulo frente a uma entrada do tipo degrau, utiliza-se um controlador proporcional-integral (PI) que tem sua função de transferência dada pela Eq. 5 (Ogata, 2010).

A Figura 8 mostra um diagrama em blocos simplificado da estrutura de controle utilizada.

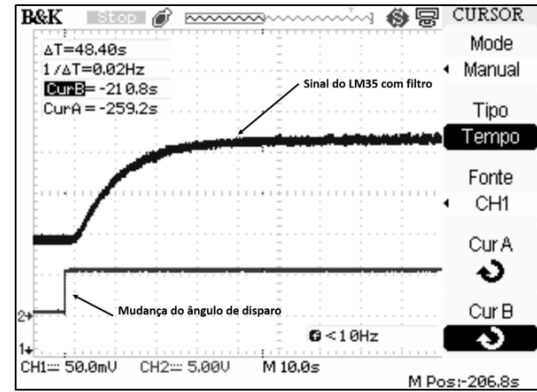


Figura 7. Comportamento dinâmico do sensor de temperatura

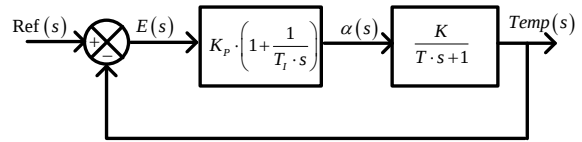


Figura 8. Diagrama em blocos da estrutura de controle

$$C(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right) = \frac{K_p}{T_i} \cdot \left(\frac{T_i \cdot s + 1}{s}\right) \quad (5)$$

Considerando que o zero do compensador anula o polo da planta: $T_i = T$, a função de transferência de laço aberto é dada pela Eq. 6 e a função de transferência de malha fechada é representada pela Eq. 7.

$$FTLA(s) = \frac{K_p \cdot K}{T_i \cdot s} \quad (6)$$

$$FTMF(s) = \frac{1}{\frac{T_i}{K_p \cdot K} \cdot s + 1} = \frac{1}{T_{EQ} \cdot s + 1} \quad (7)$$

Onde: $T_{EQ} = T_i / (K_p \cdot K)$ é a nova constante de tempo do sistema quando operando em malha fechada.

A equação recursiva para a implementação digital do controlador PI é mostrada na Eq. 8, onde T_s é o período de amostragem.

$$\alpha(k) = K_p \cdot e(k) - \frac{K_p \cdot T_s}{T_i} \cdot e(k-1) + \alpha(k-1) \quad (8)$$

Embora o projeto do controlador tenha sido definido a partir de uma função de transferência simplificada, foram realizados testes com diferentes variações de ângulo de disparo e condições de vazão, temperatura da água e temperatura ambiente.

O comportamento das diferentes funções de transferências obtidas foi observado para a situação em que se utiliza o controlador projetado, onde também foi considerado o atraso de transporte do sistema, modelado através a aproximação de Pade (MATLAB, 2010), conforme a Eq. 9.

$$G(s) = \frac{Temp(s)}{\alpha(s)} = \frac{K \cdot e^{-L \cdot s}}{T \cdot s + 1} \quad (9)$$

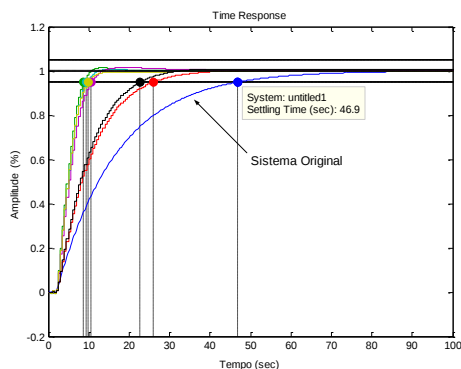


Figura 9. Resposta do controle de temperatura em malha fechada

Na Figura 9 observa-se a resposta do sistema considerando as diferentes funções de transferências, com atraso de 2 s. Em todos os casos, o tempo de acomodação de 5% resultante foi menor que 60 % do tempo da resposta original.

3 Válvula Misturadora Termostática

Válvulas misturadoras termostáticas são dispositivos destinados a prover água à uma temperatura especificada a partir de duas fontes com temperaturas diferentes, neste caso, a mistura de água quente e água fria é controlada eletronicamente em função de um ajuste realizado pelo usuário, que define a temperatura desejada na saída do misturador. Este modo de operação ocorre quando a temperatura da água no SASC é superior a definida pelo usuário, ficando o chuveiro eletrônico desligado.

Na Figura 10 é apresentado o diagrama em blocos do misturador eletrônico, tendo como principais elementos o micro controlador, o servo motor, o sensor de temperatura e o ajuste de temperatura pelo potenciômetro.

3.1 Estrutura Mecânica e Hidráulica

Para possibilitar o controle eletrônico da válvula termostática, foi realizada a conexão mecânica de um misturador hidráulico de três vias (duas entradas e uma saída) à um servo motor.

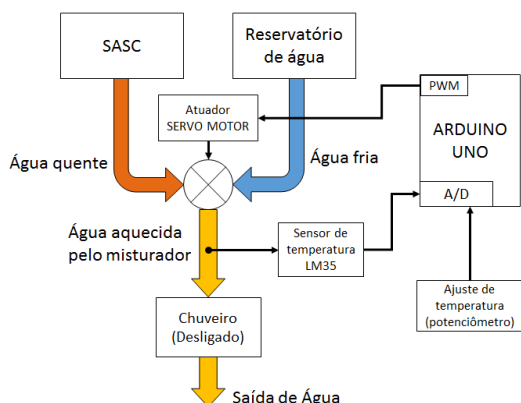


Figura 10. Diagrama em blocos da válvula misturadora



Figura 11. (A) Misturador, (B) servo motor acoplado ao misturador e (C) conjunto após montagem

Este misturador possui um miolo próprio para misturar água quente com água fria, sendo a mistura realizada de forma proporcional ao giro da manopla de controle do misturador.

A Figura 11 mostra o acoplamento do servo motor com a manopla do misturador. Para fixar o servo motor à base do misturador foi utilizado um pedaço de cano de cobre que envolveu todo o corpo do misturador e também a conexão entre ambos.

3.2 Projeto do Controlador para o Misturador Eletrônico

Para o projeto do controlador do misturador eletrônico, foi utilizada a mesma metodologia que foi aplicada ao chuveiro eletrônico.

A Figura 12 mostra o resultado de um ensaio onde é verificado o comportamento dinâmico da temperatura de saída do misturador, frente a uma variação do ângulo de giro do servo motor. Neste caso, também é possível utilizar a Eq. 4 para caracterizar o comportamento desta parte do sistema.

O posicionamento do servo motor é inversamente proporcional à temperatura, ou seja, quanto maior ângulo de giro do servo motor, menor a quantidade de água quente que passa pela válvula.

Assim, o ganho K é negativo, fator que também ocorre para o controle do chuveiro em relação ao controle de potência em função do ângulo de disparo.

O controlador de temperatura do misturador foi projetado utilizando as mesmas equações apresentadas na seção 2.2, sendo que na Figura 13 observa-se a resposta do sistema em malha fechada para o controlador utilizado nos testes experimentais. Verifica-se que o tempo de acomodação resultante foi menor que 60 % do tempo da resposta original.

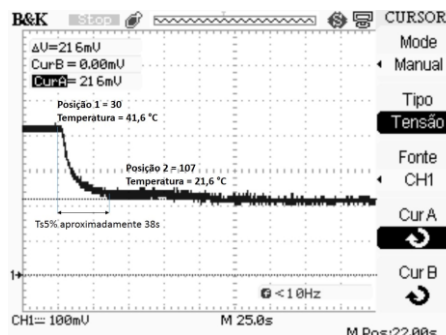


Figura 12. Comportamento dinâmico do sensor de temperatura de saída do misturador

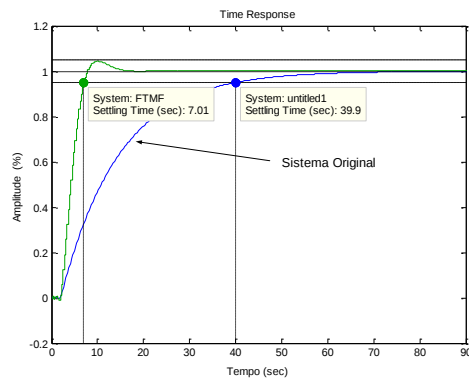


Figura 13. Resposta do controle de temperatura do misturador

4 Resultados Experimentais

A bancada de testes do sistema completo é composta por um chuveiro, uma válvula misturadora, um painel de ajuste e indicação de temperatura, uma placa principal com um microcontrolador atmega328p e um kit Arduino UNO como microcontrolador auxiliar para controle do misturador. A disposição dos equipamentos e sensores é mostrada na Figura 14.

Para realização dos testes, foi montada uma estrutura para o fornecimento de água para a bancada que possui um reservatório térmico com aquecimento elétrico e um reservatório de água fria. Dessa forma os experimentos podem ser realizados sem o uso do SASC dando maior flexibilidade para simulação de diferentes temperaturas de fornecimento de água.

4.1 Descrição do Hardware

A Figura 15 mostra um diagrama em blocos do sistema integrado e a Figura 167 mostra a conexão entre os dois microcontroladores do sistema para realização dos experimentos em bancada.

A integração entre a placa de controle principal e o Arduino UNO é controlada pela placa principal, que após identificar uma temperatura no sensor do SASC igual ou superior à desejada, muda o estado do pino 24 para alto, entrando no modo “misturador”. O pino 24 da placa principal é conectado ao pino 2 do Arduino UNO, configurado como entrada.

Quando este está em nível alto, o modo misturador é habilitado permitindo que o controle seja realizado pelo Arduino UNO e o chuveiro fique desligado.

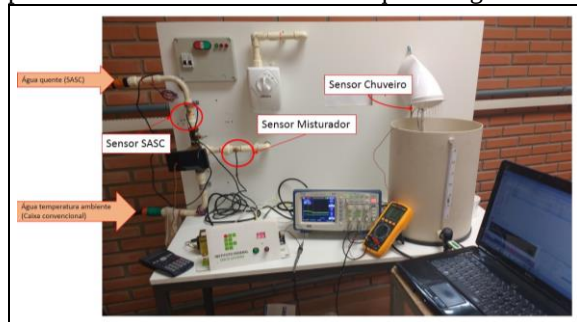


Figura 14. Bancada de testes e disposição dos sensores

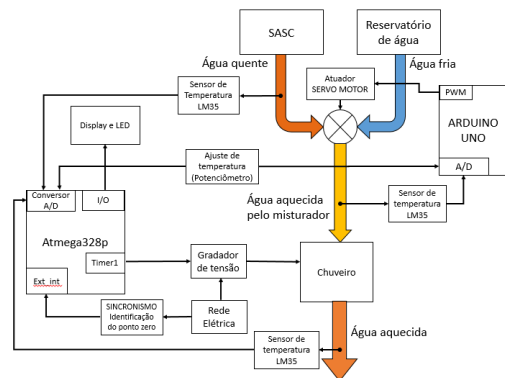


Figura 15. Diagrama em blocos do sistema integrado

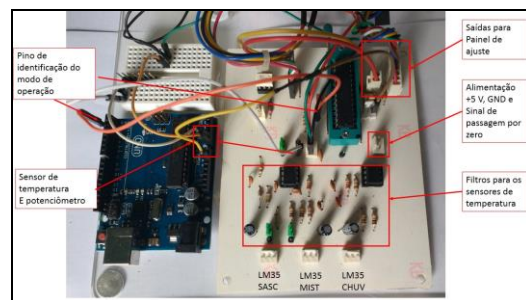


Figura 16. Disposição dos componentes de controle.

O potenciômetro é conectado à entrada A0 do Arduino UNO e também ao pino 28 do atmega328p.

Os sinais de temperatura do SASC e do chuveiro são conectados apenas ao microcontrolador principal. O sensor de temperatura do misturador é conectado ao pino A1 do Arduino UNO e não é lido pelo atmega328p da placa principal.

4.2 Testes Realizados

O comportamento do controle de temperatura do chuveiro em malha fechada sem o misturador é mostrado na Figura 17, onde observa-se um tempo de acomodação de 25 s para uma temperatura inicial de 29 °C e uma temperatura desejada de 41 °C. A Tabela 1 mostra o tempo da resposta do controle de temperatura do chuveiro em diferentes condições de ensaio como vazão, temperatura ambiente e da água. Estes parâmetros não foram mensurados e dependem das condições ambientais e de fornecimento da água, mesmo assim, o desempenho do sistema foi satisfatório para as diferentes condições de operação. Em todos os casos, o valor medido na saída, apresentou erro menor que 1 °C.

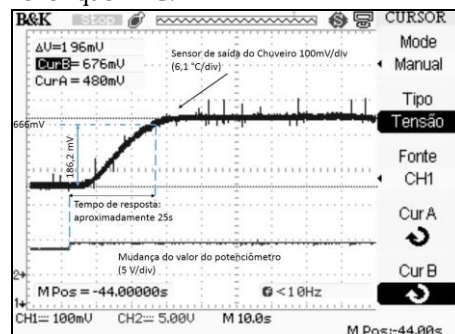


Figura 17. Resposta do controle de temperatura do chuveiro

Tabela 1. Resposta do Controle de Temperatura do Chuveiro.

	Temperatura Inicial	Temperatura Desejada	Tempo de Acomodação
Teste 1	33 °C	41 °C	30 s
Teste 2	28 °C	40 °C	31 s
Teste 3	36 °C	47 °C	33 s
Teste 4	28 °C	43 °C	35 s

Tabela 2. Resposta do Controle do Sistema Integrado.

	Temp. Desejada	Temp. SASC	Tempo de Resposta do Misturador	Tempo de Resposta Total
Teste 1	41 °C	55 °C	24 s	58 s
Teste 2	38 °C	55 °C	20 s	54 s
Teste 3	38 °C	53 °C	10 s	40 s
Teste 4	39 °C	37 °C	32 s	75 s

A Figura 18 mostra o comportamento do controle de temperatura do misturador em malha fechada, onde a temperatura apresentada no display estava em 49 °C e foi alterada para 42 °C. O tempo de resposta para este caso foi de aproximadamente 12 s.

A maioria dos testes práticos apresentou um tempo de resposta entre 10 s e 32 s. Na prática, foi possível perceber que o controlador permite ajustar a temperatura de forma rápida evitando o desperdício de água que geralmente ocorre com o ajuste manual.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos testes realizados após a integração do sistema. O tempo de resposta do misturador é o tempo que a saída do misturador leva para atingir a temperatura desejada e o tempo total é o tempo entre o ajuste do potenciômetro e o momento em que a temperatura desejada foi atingida. No último teste apresentado na Tabela 2 (teste 4), a temperatura da água proveniente do SASC estava abaixo da temperatura desejada. Quando a saída do misturador atinge o valor desejado, a temperatura da água começa a cair e o modo “chuveiro” é acionado, como verificado na Figura 19. Nestes ensaios, as variações e picos em alta frequência se devem a ruídos de medição.

É possível observar que o sistema de controle do chuveiro elétrico manteve a temperatura dentro da margem desejada e que o tempo total de resposta do sistema foi de aproximadamente 75 s.

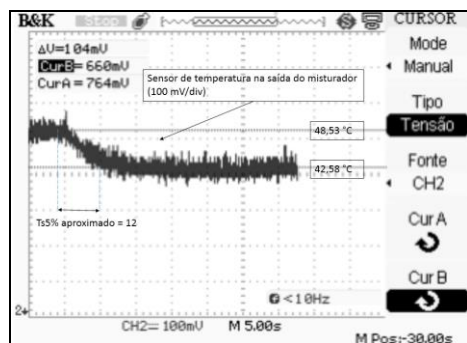


Figura 18. Resposta do controle de temperatura do misturador

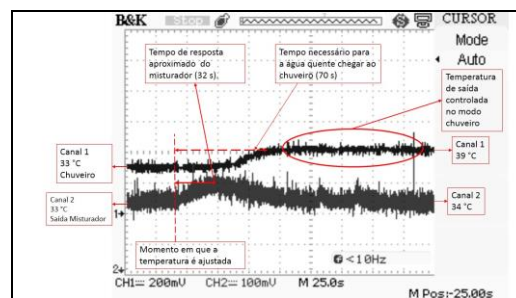


Figura 19. Resposta do controle do sistema integrado

5 Conclusão

Foi apresentada uma aplicação prática da teoria de controle clássico onde verifica-se um desempenho satisfatório mesmo utilizando-se métodos simplificados para o projeto dos controladores.

O sistema proposto mostrou que é possível integrar o controle automático de uma válvula misturadora com um chuveiro digitalmente controlado, permitindo reduzir o consumo de energia elétrica e o desperdício de água durante o banho, com um tempo de resposta máximo de 35 s para o chuveiro eletrônico e de 32 s para o misturador.

A interface com o usuário é de simples utilização, sinalizando para o mesmo quando a água se encontra em uma faixa próxima da temperatura programada. Como desdobramentos futuros do trabalho é possível considerar a realização de todo o sistema de controle em apenas um microcontrolador e a implementação de funções de usuário como temporização do banho e outras sinalizações. Também é possível reduzir o número de sensores e diminuir o tempo de resposta do sistema com a operação simultânea do misturador e do chuveiro eletrônico.

Referências Bibliográficas

- ANEEL, Procedimentos do Programa de Eficiência Energética - PROPEE. Disponível em: www.aneel.gov.br/arquivos/zip/PROPEEv1.zip, 2013.
- Barbi, I. Eletrônica de Potência. 6ª. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2006.
- Caixa Econômica Federal. Termo de Referência Sistema de Aquecimento Solar – Programa Minha Casa Minha Vida. Disponível em: http://downloads.caixa.gov.br/_arquivos/desenvolvimento_urbano/gestao_ambiental/TR_SA_S_MCMV_FINAL.pdf.
- ELETOBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.; PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso – Ano Base 2005 – Classe Residencial – Rio de Janeiro: ELETOBRÁS/PROCEL, 2007. 184 p.
- Ogata, Katsuhiko (2010). Engenharia de Controle Moderno. 5. Ed. São Paulo: Prentice Hall.
- Matlab. Help - Padé. Tópicos de ajuda do software Matlab. Natick: MathWorks, 2010.