

SIMULAÇÃO E PROTOTIPAGEM DE UM CONTROLE DE TEMPERATURA EM MALHA FECHADA PARA CHUVEIROS ELÉTRICOS

MARCOS G. BERNARDO¹, RAIMUNDO C. S. FREIRE², ANTONIO AUGUSTO L. DE SOUZA³, OTÁVIO H. DE M. NETO⁴

¹*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPgEE/UFCG*

²*Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG*

⁴*Graduando em Engenharia Elétrica, UFCG
Campina Grande,, Brasil*

³*Departamento de Engenharia Elétrica, UFPB
João Pessoa, Brasil*

E-mail: marcos.bernardo@ee.ufcg.edu.br

Abstract— In this paper, we propose a closed-loop temperature control targeting water heating in electric showers, which is constrained to feature low cost, small volume and high efficiency. We have adopted Scilab, Proteus and Arduino platform as tools to facilitate the design of the system. Prior to the construction of a prototype, several hardware/software co-simulations were performed using both Scilab and Proteus altogether. For the experimental test, a prototype with a nominal power of 3.2 kW (a typical value for a commercial shower) was built. Experimentally, we have obtained an efficiency of about 99% and an effective control of the temperature of the water at the output of the shower, with no observable flicker effect on the lighting system as far as the electrical installation is in accordance with local standards.

Keywords— Closed-loop temperature control, electric shower, low cost, effect flicker, high efficiency.

Resumo— Neste trabalho, propõe-se um controle de temperatura de malha fechada visando o aquecimento de água em chuveiros elétricos, que tem como restrição baixo custo, pequeno volume e alta eficiência. Adotou-se o Scilab, Proteus e a plataforma Arduino como ferramenta para facilitar o design do sistema. Antes da construção de um protótipo, várias simulações de hardware / software foram realizadas usando Scilab e Proteus. Para testes experimentais, um protótipo com potência nominal de 3,2 kW (valor típico para um chuveiro comercial) foi construído. Experimentalmente, obteve-se uma eficiência maior que 99% e um controle efetivo da temperatura da água na saída do chuveiro, sem efeito perceptível de cintilação no sistema de iluminação, desde que a instalação elétrica esteja de acordo com os padrões nacionais.

Palavras-chave— Controle de temperatura em malha fechada, chuveiro elétrico, baixo custo, cintilação luminosa, alta eficiência.

1 Introdução

No Brasil, o aquecimento de água para o banho é realizado principalmente por chuveiros elétricos, duchas ou aquecedores domésticos. Ele está presente em aproximadamente 73,1% dos domicílios brasileiros, e tem consumo médio de energia elétrica em nível nacional de 24%, apresentando-se como o eletrodoméstico de maior consumo em uma residência quando considerando o uso individual (ELETROBRÁS/PROCEL, 2007). No mercado brasileiro, os chuveiros elétricos podem ser classificados em dois grupos, modelos de baixo custo, que disponibilizam de três a quatro níveis de potência, e aqueles com controle eletrônico de potência. Este último tem se tornado muito popular, por se apresentar como uma solução para combate ao desperdício de água e eletricidade, e disponibilizar maior conforto ao usuário (Naspolini, 2012). Apesar de apresentar configurações analógica de potência ou escalas graduais (controle eletrônico), esses modelos não conseguem implementar um controle efetivo de temperatura, e sim de potência (sistema em malha aberta), sendo a temperatura da água na saída do chuveiro dependente de ambos o fluxo e temperatura da água na entrada do equipamento.

Neste contexto, propõe-se neste trabalho um sistema de controle de temperatura em malha fechada visando baixo custo e pequenas dimensões, destinado a ser incorporado nos chuveiros elétricos comerciais, sem a necessidade de reformulação do *design*. No entanto, este sistema de controle de temperatura pode ser facilmente utilizado em aplicações em que a temperatura bem estabilizada da água seja de relevante importância, por exemplo, no controle da temperatura da água em aquários de peixe e/ou banhos de bebês. Este último, para proporcionar maior conforto ao recém-nascido.

2 Técnicas de Controle de Potência

O aquecimento da água no chuveiro é obtido pela transferência de calor de uma resistência elétrica aquecida e imersa na água (efeito Joule), quanto maior a quantidade de potência dissipada na resistência, maior o aquecimento, conforme expressão 1.

$$P = (V_{RMS})^2 / R \quad (1)$$

Nos modelos de baixo custo, a variação de potência é obtida alterando-se o valor da resistência por meio de uma chave com 2 ou 3 derivações. Nos

modelos de custo mais elevado, a variação de potência é realizada por mudança no valor RMS (do inglês, *root mean square*) da tensão fornecida a resistência. Este controle de potência é geralmente realizado por um conversor estático direto.

Os chuveiros elétricos com controle eletrônico disponíveis no mercado brasileiro geralmente utilizam a técnica de controle por ângulo de fase. Contudo, outras técnicas podem ser implementadas, tais como controle por ciclos integrais ou modulação por largura de pulso. Uma breve descrição destas técnicas será abordada a seguir:

2.1 Controle por Ângulo de Fase

No controle por ângulo de fase, a chave de potência é acionada a cada semiciclo da tensão em corrente alternada (CA), conectando a carga a fonte durante um intervalo de tempo menor ou igual a um semiciclo da rede. Esta técnica permite controlar a potência fornecida a carga entre 0 e 100% da potência máxima sem geração de sub-harmônicas da frequência fundamental. Soluções de baixo custo e alta robustez podem ser implementadas. A variação da potência na carga é obtida pela mudança do ângulo de fase (α), entre 0° e 180° , conforme ilustrado na Figura 1.

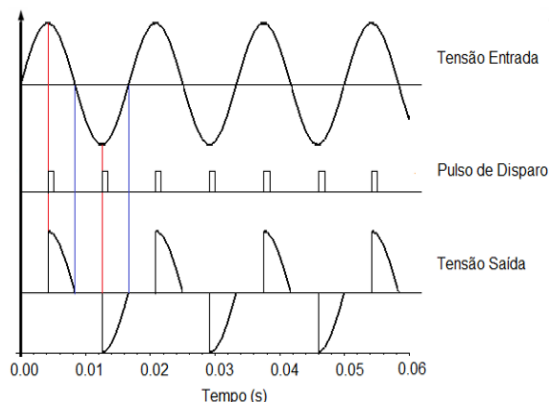


Figura 1. Típico controle por ângulo de fase – carga resistiva ($\alpha=90^\circ$).

As principais desvantagens são a geração de componentes harmônicas, interferência eletromagnética devido as elevadas taxas de variação de corrente e tensão na chave e na própria carga. Além disso, apresenta baixo fator de potência (FP) para ângulos de fase elevados (Rashid, 2001; Paramashivam et al., 2011; Khamsen et al., 2011).

2.2 Controle por Ciclos Inteiros

No controle por ciclos inteiros, a chave de potência é comutada apenas nos cruzamentos por zero da rede CA. Na Figura 2 é ilustrado um exemplo típico de controle por ciclos inteiros, em que 50% da potência máxima é entregue à carga.

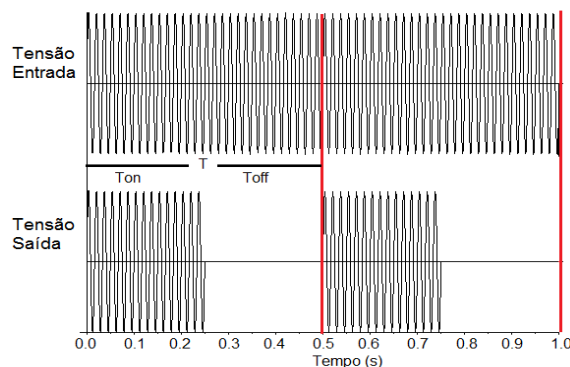


Figura 2. Controle por ciclos inteiros – carga resistiva.

A operação baseia-se no período T , que representa a base de tempo. Durante este período, o número de ciclos entregue a carga pode ser modificado, e assim, controlar a potência na carga. Este é um controle ideal para sistemas com constante de tempo grande como controle de aquecimento (Rashid, 2001; Oliveira Júnior, 2006).

As vantagens desta técnica consistem em baixa interferência eletromagnética ou de componente espectral de alta frequência, baixo ruído elétrico (comparado a outros métodos), redução da potência dissipada na chave de potência e baixo custo. A principal desvantagem é a baixa modulação da corrente, que pode causar o aparecimento de sub-harmônicas e seus problemas associados, tal como cintilação em luminárias (Paramashivan et al., 2011; Oliveira Júnior, 2006).

2.3 Chopper CA

Os choppers CA são uma família de conversores CA-CA derivada dos tradicionais conversores de corrente contínua (CC-CC), tais como *buck*, *boost*, *buck-boost*, etc.). Em uma de suas formas mais simples, um chopper CA consiste basicamente de duas chaves bidirecionais (ou quatro chaves unidirecional), um filtro de entrada e outro filtro de saída (Rosas-Caro et al., 2010; Hao et al., 2012).

O funcionamento é baseado na aplicação de um controle de modulação por largura de pulso (PWM) nas chaves de potência em modo complementar, ou seja, enquanto uma das chaves está conduzindo, a outra permanece em aberto. Este processo é repetido várias vezes em cada semiciclo da rede CA, dependendo da frequência de chaveamento adotada. Dessa forma, a tensão de entrada é chaveada em segmentos e depois filtrada, para se obter a forma de onda com diferentes amplitudes, mas com a mesma forma e frequência do sinal de entrada. Na Figura 3 é ilustrado o procedimento descrito.

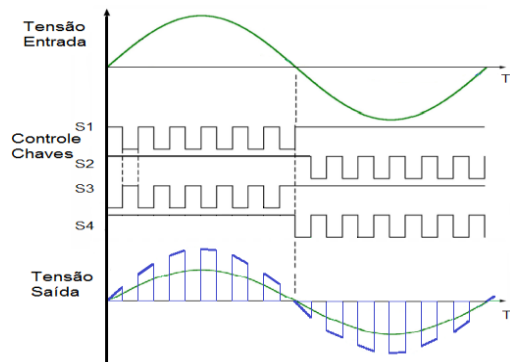


Figura 3. Controle de um típico chopper CA e forma de onda da tensão na saída.

O valor RMS da tensão de saída é controlado pelo ciclo de trabalho aplicado pelo controle PWM. Os choppers CA têm como vantagem, rápida velocidade de resposta, baixa quantidade de harmônicas de corrente, melhor fator de potência e tensão na saída senoidal, desde que os filtros de entrada e saída seja bem projetados (Soeiro, et al., 2011; Sarnago et al., 2014). Como desvantagens, pode-se citar a dependência do FP de entrada com o FP da carga (Sarnago et al., 2014), custo elevado pela grande quantidade de dispositivos eletrônicos (chaves e filtros), maior fator de forma (dissipadores, elementos dos filtros) e complexidade no controle.

2.4 Análise das Técnicas

O controle de tensão tem aplicações em aquecimento doméstico e industrial, partidas e controle de velocidades de motores, entre outros. Controle por ângulo de fase e ciclos inteiros têm sido usados extensivamente nestes tipos de aplicações (Khamsen et al., 2011). Tais técnicas oferecem algumas vantagens, como simplicidade e habilidade de controlar grande quantidade de potência de forma econômica. Entretanto, apresentam inerentes desvantagens, como a geração de componentes harmônicas ou sub-harmônicas. Os choppers CA aparecem como uma solução para contornar algumas desvantagens apresentadas pelas técnicas convencionais, no entanto, apresentam grande fator de forma e custo elevado, devido ao número de componentes necessários.

Como a solução vislumbrada neste trabalho consiste em um sistema de baixo custo e pequeno fator de forma, a técnicas controle a ser investigado é baseado no conceito de ciclos inteiros.

3 Sistema Proposto e Técnica de Controle

Este trabalho visa a concepção de um sistema para efetivamente controlar a temperatura da água na saída de um chuveiro elétrico. Para acelerar o desenvolvimento e avaliação do sistema, adotou-se o *setup* experimental ilustrado na Figura 4.

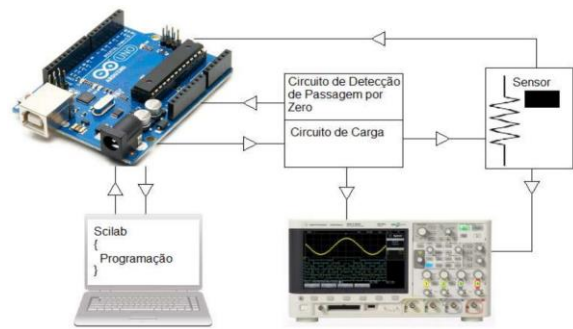


Figura 4. Esquemático da estratégia adotada para acelerar a implementação do sistema.

O controle de potência na carga é feito utilizando-se do *software* científico para computação numérica (Scilab) em conjunto com uma plataforma microcontrolada (Arduíno). A estratégia de controle empregada é baseada no acionamento da chave de potência somente nos cruzamentos por zero da rede elétrica. Como no controle por ciclos inteiros, o controle por semiciclos modulados, técnica empregada neste trabalho, tem uma janela de tempo com período T , e a potência na carga é controlada através do número de semiciclos do sinal CA fornecidos à carga (semiciclos modulados). Comparado ao controle de ângulo de fase, este método deve reduzir os componentes harmônicos na rede elétrica. Na Figura 5, ilustra-se um exemplo de sinal modulado entre os quatro que podem ser fornecidos à carga.

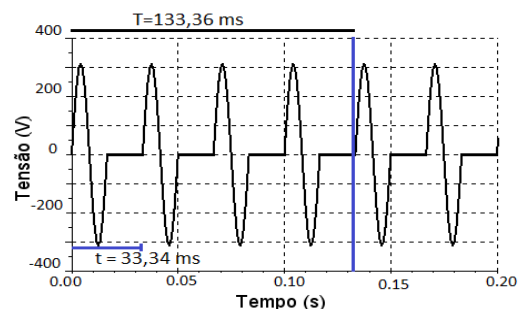


Figura 5. Sinal modulado fornecido à carga (50% da potência total).

Contudo, devido aos níveis de potência envolvidas em uma aplicação com chuveiros elétricos é importante enfatizar a possibilidade de flutuação de tensão em baixa frequência (sub-harmônicas) e, portanto, a geração de efeito *flicker* (variação de luminosidade das lâmpadas). Este problema pode ser contornado aumentando-se a frequência na qual as flutuações de tensão ocorrem e/ou reduz a potência nas componentes sub-harmônicas, tornando o efeito imperceptível pelo olho humano (Jin et al., 2009; IEEE Sdt 1453, 2005).

Portanto, a técnica de controle por semiciclos modulados adotado neste trabalho consiste em controlar o chaveamento do sinal da rede que entregue à carga (ver Figura 5), de forma que a

flutuação de tensão tenha frequência maior ou igual a 30 Hz. Dessa forma, sem incomodo ou percepção pelo olho humano.

4 Materiais e Métodos: Ambiente de Simulação e Prototipagem

Durante o desenvolvimento do protótipo, foram realizadas várias simulações dos circuitos e códigos de programação necessários à estratégia de controle adotada, em que o simulador de circuito eletrônico (Proteus) foi utilizado em conjunto com o Scilab. Na Figura 6, ilustra-se o circuito eletrônico utilizado para as simulações em conjunto com o Scilab.

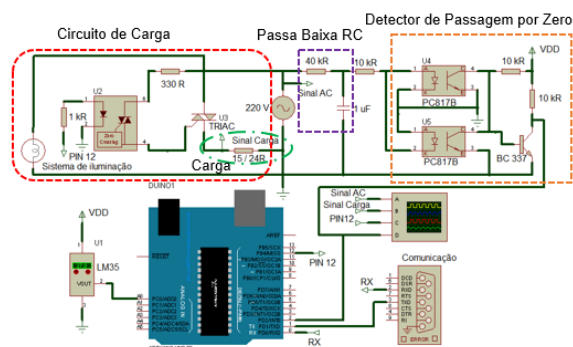


Figura 6. Esquemático utilizado nas simulações. Em que, uma porta serial emuladora RS-232 foi usada para comunicação entre os softwares Proteus e Scilab.

A estratégia de combinar o Proteus e Scilab resultou em um ambiente de simulação integrado, com a possibilidade de simulação de um sistema real, em que uma máquina executando o Scilab se comunica com uma plataforma microcontrolada por meio de uma porta USB (do inglês, *universal serial bus*). O objetivo desta interação foi o desenvolvimento da lógica do controle em malha fechada em ambiente Scilab, e assim, acelerar o processo de concepção do sistema. O *setup* de teste experimental com um chuveiro elétrico comercial de potência nominal de 3,2 kW e placa de circuito de controle pode ser visto nas Figuras 7 e 8.

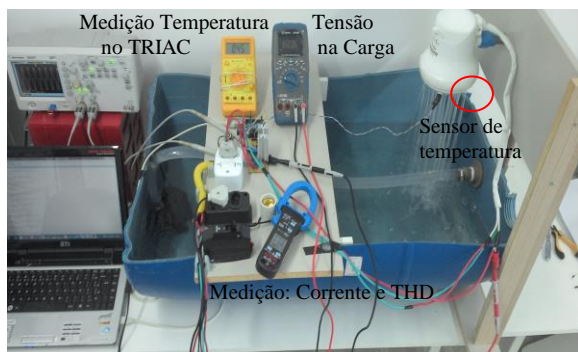


Figura 7. Protótipo construído e usado nos testes experimentais.

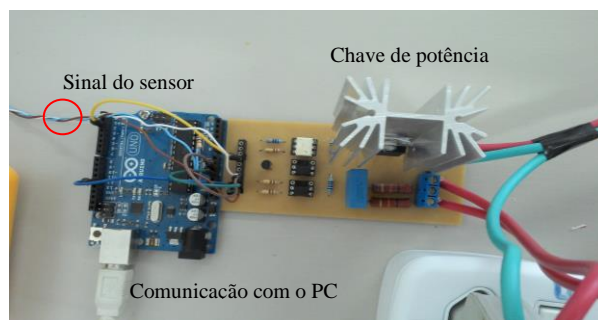


Figura 8. Circuito eletrônico de controle.

5 Resultados Experimentais do Protótipo

5.1 Sinais de Controle e Temperatura

Conforme pode ser observado no gráfico da Figura 9, o circuito de detecção de passagem por zero recebe o sinal CA da rede atrasado, devido a passagem pelo filtro passa-baixa RC (sinal em verde na Figura 9) e gera pulsos sincronizados com os cruzamentos de zero do sinal atrasado (sinal em vermelho na Figura 9). Portanto, o atraso inserido (filtro passa-baixa) possibilita que o disparo da chave de potência, TRIAC (do inglês, *triode for alternating current*), seja realizado microssegundos depois, proporcionando tempo para processamento de informações, como temperatura, cruzamento exato do zero da rede elétrica, nível de potência requerido. O sinal de disparo da chave de potência e o sinal da rede elétrica são apresentados em azul e amarelo, respectivamente.

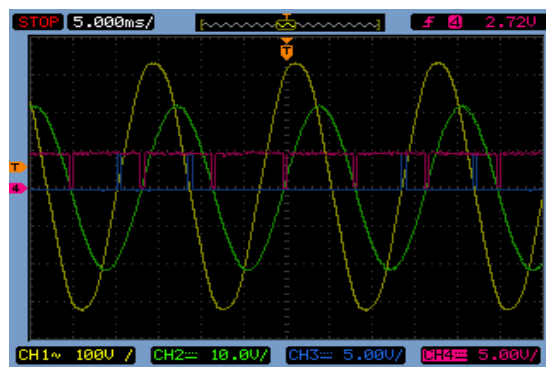


Figura 9. Sinais no circuito: Tensão CA da rede (amarela), uma versão atrasada da rede CA (verde), sinal de detecção de cruzamento por zero da versão atrasada da rede CA (vermelho) e disparo da chave de potência (azul).

Após várias simulação e testes experimentais, observou-se que para uma base de tempo (período de tempo T) com 16 semiciclos da rede, que garante flutuação de tensão igual a 30 Hz. Quatro sinais modulados podem ser usados para fornecer flutuação de tensão igual ou superior a 30 Hz em condição de malha aberta. Portanto, quatro níveis discretos de potência: 25%, 50% (sinal modulado ilustrado na Figura 5 e 9), 75% e 100% da máxima potência. O

controle de temperatura implementado, comutação entre os níveis de potência (quatro sinais modulados), apresentou tempo de resposta rápido, além de fornecer efetivo controle da temperatura da água na saída do equipamento, com erro menor que 1 °C em estado estacionário. Na Figura 10 e Figura 11 é mostrado o resultado do controle de temperatura quando escolhido as temperaturas alvo de 35 °C e 42 °C, sucessivamente.

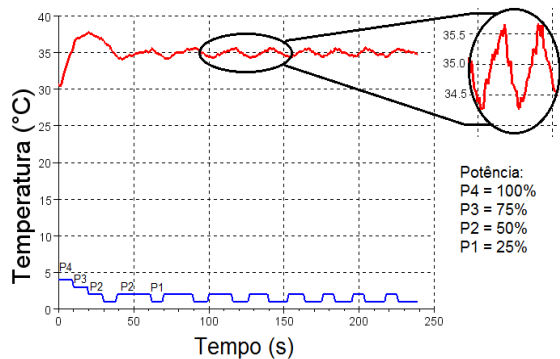


Figura 10. Quando a temperatura alvo é 35 °C.

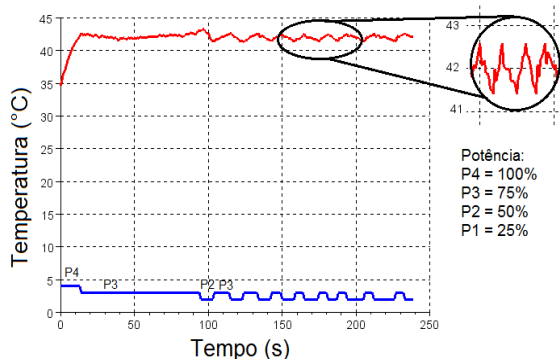


Figura 11. Atuação do controle quando a temperatura é 42 °C.

5.2 Lógica de Controle, Eficiência e THD

Inicialmente, a partir da lógica de controle, potência máxima é fornecida à carga (P4 - sinal da rede) até se alcançar o a temperatura desejada (temperatura desejada + histerese), após isto, a potência imediatamente menor é aplicada (P3). Dependendo do valor da diferença entre a temperatura desejada e informada pelo sensor de temperatura, o próximo nível de potência entregue para a carga pode ser o máximo (P4) ou menor (P2 - sinal modulado da Figura 5). Em regime permanente, apenas dois níveis de potência são entregues dentre os quatro níveis de potência disponíveis para manter a temperatura desejado pelo usuário.

A eficiência do sistema foi medida de forma indireta: a partir de estímulos CC, usando-se um *setup* (fonte CC 13 V/ 30 A e resistores de carga) para obter as relações entre temperatura na chave e potência dissipada na chave de potência; portanto, medindo-se a temperatura da chave durante operação em tempo estacionário, inferiu-se a potência

dissipada na mesma. Para a potência nominal de 3,2 kW (P4) com carga de 15 Ω, a potência dissipada na chave foi aproximadamente 13 W.

A medição indireta da eficiência evita a necessidade de caracterização experimental com grande precisão e faixa dinâmica para a tensão (e corrente) nos terminais da chave de potência. A eficiência média do conversor (não considerando a potência na plataforma Arduino, que é sensivelmente menor que a potência dissipada no TRIAC) foi maior de 99% (potência fornecida à carga menos a dissipada na chave) em todos os casos de operação, o que resultou em um dissipador de calor com apenas 63 cm³, que é compatível com o espaço livre dentro dos chuveiros comerciais.

Na Tabela 1 são listados alguns parâmetros medidos para as cargas de 24 Ω e 15 Ω (posição verão e inverno do chuveiro), incluído os valores em porcentagem da Distorção Harmônica Total - THD (do inglês, *total harmonic distortion*) da corrente. Devido à flexibilidade no disparo da chave de potência proporcionada pela estratégia utilizada, o controle por ângulo de fase pode ser facilmente implementado para questão de comparação com a técnica de semiciclos modulado empregada. Na Tabela 2, são mostrados os valores obtidos para três diferentes ângulos de condução (135°, 90° e 0°) os quais correspondem aos mesmos níveis de potência dos sinais modulados (25%, 50% e 100%).

Tabela 1. Valores adquiridos experimentalmente para a técnica proposta.

Entrada (V _{RMS})	Corrente (A _{RMS})	Carga (V _{RMS})	Chave (°C)	THD da Corrente (%)	Carga (Ω)
219,1	4,13 (P1)	95	31	52,5	24
221,1	6,66 (P2)	152,8	42	37,1	24
220,1	7,96 (P3)	182,7	51	25,6	24
216,6	9,50 (P4)	215,7	62	1,6	24
219,3	6,51 (P1)	93,4	44	52,8	15
217,5	10,3 (P2)	148,9	60	36,9	15
216,4	12,3 (P3)	177,9	68	25,9	15
214,4	14,8 (P4)	214	85	1,6	15

A partir das Tabelas 1 e 2, observa-se que a temperatura na chave é praticamente igual nas duas técnicas de controle (baixa frequência de chaveamento). Entretanto, conforme previsto, a THD da corrente no caso de chaveamento por ângulo de fase é praticamente o dobro da obtida com a técnica escolhida.

Quanto a avaliação do impacto da flutuação de tensão no sistema de iluminação, teste foram realizados com dois tipos de lâmpadas (incandescentes e eletrônicas). Ao considerar uma instalação elétrica de acordo com os padrões nacionais, em que a instalação do chuveiro elétrico possui circuito dedicado até a estrutura do quadro de distribuição, não se percebe nenhum efeito de cintilação em lâmpadas incandescentes ou

eletrônicas.

Tabela 2. Valores adquiridos experimentalmente para diferentes ângulos de condução.

Entrada (V _{RMS})	Corrente (A _{RMS})	Carga (V _{RMS})	Chave (°C)	THD Corrente (%)	Carga (Ω)
219,5	4,16	95,7	38	100	24 (135°)
216,8	6,78	154,6	49	62,4	24 (90°)
216,6	9,5	215,7	62	1,6	24 (0°)
220,2	6,51	94,8	46	100	15 (135°)
220,2	10,75	155,3	64	62,1	15 (90°)
214,4	14,85	214	85	1,6	15 (0°)

6 Conclusões

Uma pesquisa aplicada no estudo e desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura eficiente para chuveiros elétricos, duchas ou aquecedores, pode ser considerada de suma importância, uma vez que este tipo de sistema é utilizado extensivamente no país, e uma abordagem acerca do tema poderá trazer melhorias técnicas e econômicas para o produto. Neste trabalho foi proposto um sistema para controlar a temperatura da água na saída de um chuveiro elétrico, que pode ser diretamente incorporado em modelos comerciais já existentes.

O ciclo de desenvolvimento do protótipo foi consideravelmente reduzido através do uso de um ambiente experimental e de simulação integrado, incluindo Scilab, Proteus e a plataforma Arduino. Os resultados obtidos foram satisfatórios, já que o sistema apresentou rápida resposta, alta eficiência, pequeno volume e pode ser realizado como baixo custo.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à COPELE/UFMG, CAPES pelo apoio e financiamento, sem os quais este trabalho não seria possível.

Referências Bibliográficas

ELETROBRÁS/PROCEL (2007). Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso: Ano Base 2005 – Classe Residencial – Relatório Brasil. Rio de Janeiro, Brasil.

Hao, L. and Jihong, W (2012). Analysis and control of a single phase AC chopper in series connection

with an auto-transformer. Automation and Computing (ICAC), 18th International Conference on, pp.1-6.

IEEE Std 1453 (2005). IEEE Recommended Practice for Measurements and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on A Power Systems.

Jin, N. et al., (2009). Analysis and control of Buck-Boost Chopper type AC voltage regulator. IEEE 6th International on Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), pp. 1019-1023.

Khamsen, W. et al., (2011). Designing parameters in PWM buck AC chopper for unity input power factor. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 8th International Conference on, pp.731-734

Naspolini H. F (2012). Agregação da energia solar térmica ao aquecimento da água para banho na moradia popular no Brasil. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Oliveira Júnior, C. J. de (2006). Controle eletrônico de potência em aquecedores elétricos de passagem por semiciclos otimizados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Paramashivam, S. and Muralidharan, S (2011). Analysis of AC/AC converter with enhanced power quality,” Electronics Computer Technology (ICECT), 3rd International Conference on, vol. 2, pp.179-183.

Rashid, M. H (2001). Power Electronics Handbook. Academic Press, New York, USA.

Rosas-Caro, J. C. et al. (2010). A review of AC choppers. Electronics, Communications and Computer (CONIELECOMP), 20th International Conference on, pp.252-259.

Sarnago, H. et al. (2014). Direct AC-AC Resonant Boost Converter for Efficient Domestic Induction Heating Applications. Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 29, no. 3, pp. 1128-1139.

Soeiro, T. B. et al. (2012). High-Efficiency Line Conditioners With Enhanced Performance for Operation With Non-Linear Loads. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 59, no. 1, pp.412-421.