

Desenvolvimento de um Sistema Microcontrolado para Controle de Temperatura e Aquecimento da Água

Leandro Carvalho Pereira

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, cp.leandro@hotmail.com

Rogério Sales Gonçalves

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, rsgoncalves@mecanica.ufu.br

RESUMO

Este trabalho objetiva descrever o projeto de um sistema de controle de temperatura e aquecimento da água, cujo controle é feito através de um hardware microcontrolado. Um microcontrolador PIC (em inglês *Peripheral Interface Controller*) foi utilizado para atuar como unidade central de processamento, sendo todos os componentes presentes no sistema controlados por este a partir de um programa previamente gravado em sua memória. O programa foi desenvolvido na linguagem C e a leitura da temperatura é impressa em um LCD (em inglês *liquid crystal display*). Um controle *on/off* foi implementado para controlar a resistência e aquecer a água em uma temperatura desejada.

Palavras chaves: Temperatura, sistema microcontrolado, controle de temperatura, controle *on/off*.

ABSTRACT

This work aims to describe the project of a control system for temperature and water heating, whose control is done through a microcontroller hardware. A PIC (Peripheral Interface Controller) microcontroller was used to act as the central processing unit, with all components present in this system controlled from a previously recorded program on your memory. The program was developed in C and the temperature reading is printed on an LCD (liquid crystal display). An *on/off* control was implemented to control the resistance and heat water in a desired temperature.

Keywords: Temperature, microcontroller system, temperature control, *on/off* control.

1. INTRODUÇÃO

Este projeto tem como objetivo principal desenvolver uma interface eletrônica para controle do aquecimento e temperatura da água. Uma das características a ser enfatizada é a implementação do controle *on/off*.

Segundo Ogata (2010) um controlador automático estabelece uma relação de comparação entre a saída da planta e a entrada de referência (valor desejado), determina o desvio e produz um sinal de controle que reduzirá o desvio a zero ou a um valor pequeno. A maneira pela qual o controlador automático produz o sinal de controle é nomeada ação de controle.

O controlador detecta o sinal de erro atuante, usualmente em um baixo nível de potência, e o amplifica até um nível suficientemente alto. O sinal de saída do controlador automático alimenta um atuador, que é um dispositivo de potência que produz o sinal desejado a agir sobre o processo, de acordo com o sinal de controle, de tal modo que o sinal de retroação tenda ao valor do sinal de referência (Ogata, 2010).

O sensor, ou elemento de medição, é um dispositivo que converte a variável de saída em outra variável adequada, tal como um deslocamento, uma pressão, ou uma tensão elétrica que pode ser usada para comparar o sinal de saída com o sinal de referência. Esse elemento fica no elo de retroação do sistema de malha fechada. O valor do

ponto de ajuste do compensador (*set point*) deve ser convertido em um sinal de referência com as mesmas unidades que o sinal de retroação proveniente do sensor ou elemento de medição (Ogata, 2010). A Figura 1 apresenta um diagrama de blocos de um sistema de controle industrial.

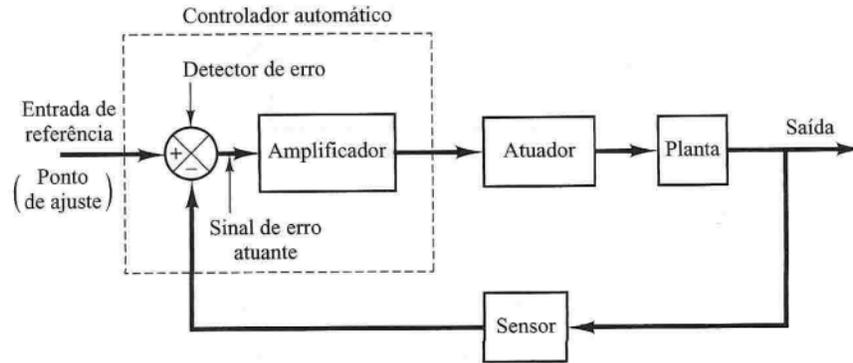


Figura 1: Diagrama de blocos de um sistema de controle industrial (Ogata, 2010)

No controle *on/off* o elemento atuante possui apenas duas posições fixas que são, em muitos casos, simplesmente “ligado” ou “desligado”. O controle de duas posições é relativamente simples e barato e, por esta razão, extremamente utilizado tanto em sistemas de controle industriais como em sistemas de controle domésticos (Ogata, 2010).

Na Equação (1) considere-se $u(t)$ o sinal de saída do controlador e $e(t)$ o sinal de erro atuante. Em um controle de duas posições, o sinal $u(t)$ permanece igual a um valor máximo ou a um valor mínimo, conforme o sinal de erro atuante seja positivo ou negativo, de modo que,

$$u(t) = \begin{cases} U_1 \rightarrow e(t) > 0 \\ U_2 \rightarrow e(t) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

U_1 e U_2 são constantes. O valor mínimo U_2 é, usualmente, zero ou $-U_1$. Os controladores de duas posições geralmente são dispositivos elétricos (Ogata, 2010).

A Figura 2a mostra o diagrama de blocos de controladores de duas posições. O intervalo através do qual o sinal de erro atuante deve mover-se antes de ocorrer a comutação de valores é denominado “intervalo diferencial”, como está apresentado na Fig. 2b. Esse intervalo faz que a saída $u(t)$ do controlador mantenha seu valor atual até que o sinal de erro atuante tenha variado ligeiramente além do valor zero. O intervalo pode ser provocado intencionalmente, de modo a impedir uma operação excessiva do mecanismo de comutação e, conseqüentemente, prevenir a redução da vida útil do componente (Ogata, 2010).

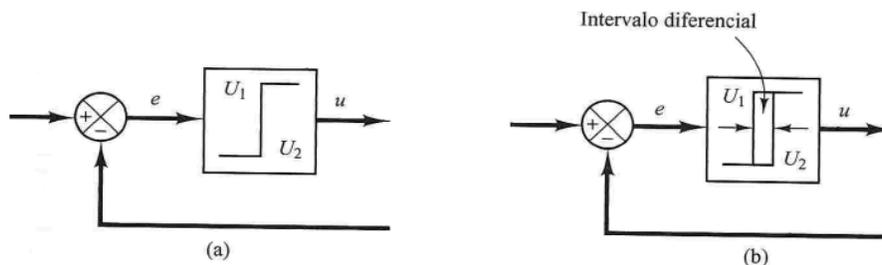


Figura 2: (a) Diagrama de blocos de um controlador liga-desliga; (b) diagrama de blocos de um controlador liga-desliga com intervalo diferencial (Ogata, 2010)

O gráfico da Fig. 3 mostra a curva de resposta em malha fechada e o respectivo sinal de controle para um sistema com controlador liga-desliga com histerese. Note que, em regime permanente, a saída do sistema apresenta uma oscilação em torno do valor de referência. Este fato denota a baixa precisão obtida com este tipo de controlador. A amplitude e a frequência da oscilação são funções do intervalo diferencial. A determinação do intervalo diferencial deve ser feito levando-se em consideração a precisão desejada, os níveis de ruído e a vida útil dos componentes.

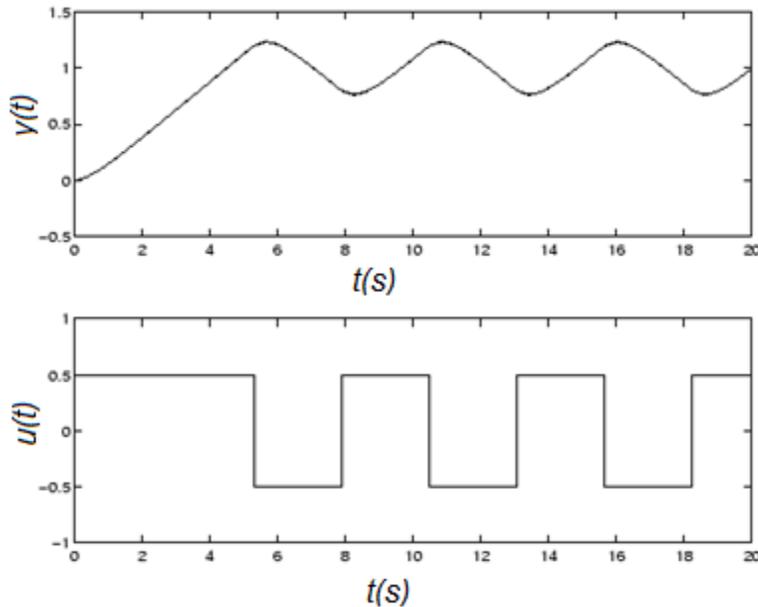


Figura 3: Diagrama de blocos de um sistema de controle industrial (Barbosa et al., 2010)

A ação de controle *on-off* geralmente é usada onde as variações acontecem muito lentamente. Portanto, no caso do aquecimento de um líquido, o efeito na temperatura do líquido com a comutação do aquecedor é uma variação apenas lenta. Isto leva a uma oscilação com um período de tempo longo (Bolton, 2010).

1.1 MICROCONTROLADOR PIC 18F4550

O microcontrolador PIC 18F4550 da fabricante Microchip Technology é o principal componente utilizado neste sistema. Segundo o datasheet (Microchip, 2004), o PIC é construído com base na arquitetura Harvard com instruções do tipo RISC (em inglês *Reduced Instruction Set Computer*). É um dispositivo de 8 *bits*, com 2048 *bytes* de memória RAM (em inglês *Random Access Memory*), e 32 *kbytes* de memória de programa. Admite alimentação entre 4 V e 5.5 V, operando em frequências de até 48 MHz, o que significa que pode executar 12 milhões de instruções por segundo. Pode ser alimentado por um cristal associado como o bloco PLL (em inglês *Phase Locked Loop*), ou diretamente por um oscilador de 48 MHz. Além disso, possui um oscilador interno de 8 MHz, 4 MHz, 2 MHz, 1 MHz, 500 KHz, 250 KHz, 125 KHz e 31 KHz.

Este modelo de microcontrolador possui 40 pinos (Fig. 4), em que são descritos os terminais e suas respectivas portas.

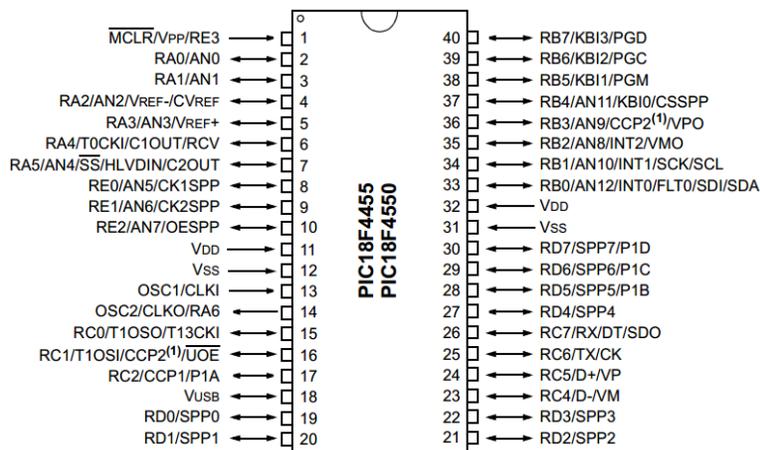


Figura 4: Pinagem do PIC 18F4550. Disponível em:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>, data de acesso: 26/02/2014

O PIC 18F4550 possui basicamente: i) 35 pinos que podem ser configurados como I/O (em inglês *input/output*) digitais que estão agrupados em 5 grupos denominados portas, sendo: RA, RB, RC, RD e RE. Por meio deles o microcontrolador se comunica com o mundo exterior. O sentido do fluxo de dados de um pino I/O pode ser definido como entrada ou saída; ii) 13 conversores A/D (analógico/digital) de 10 bits de resolução com tempo de aquisição programável; iii) 2 comparadores analógicos; iv) 1 módulo CPP (em inglês *Capture/Compare/PWM*) e ECCP (em inglês *Enhanced, Capture, Compare, or PWM*); v) 1 módulo SPI (em inglês *Serial Peripheral Interface*) e I²C; vi) 1 comunicação EUSART (em inglês *Enhanced Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*); vii) 1 módulo de detecção de alta/baixa voltagem (HLVD - em inglês *High/Low-Voltage Detect*); viii) porta paralela de 8 bits (SPP - em inglês *Streaming Parallel Port*); ix) 1 TIMER de 8 bits (TIMER2) e 3 de 16 bits (TIMER0, TIMER1 e TIMER3), que são aplicados fundamentalmente como temporizadores ou contadores; x) pinos de Alimentação (VDD e VSS); xi) pinos de entrada para o oscilador externo (OSC); xii) porta de comunicação USB (em inglês *Universal Serial Bus*) (D+ e D-); xiii) múltiplas fontes de interrupção; xiv) *watchdog Timer* (Microchip, 2004).

1.2 SENSOR DE TEMPERATURA LM35

O sensor de temperatura LM35 é um sensor de precisão fabricado pela National Semiconductor. Este dispositivo é apresentado na Fig. 5a e suas dimensões físicas na Fig. 5b.

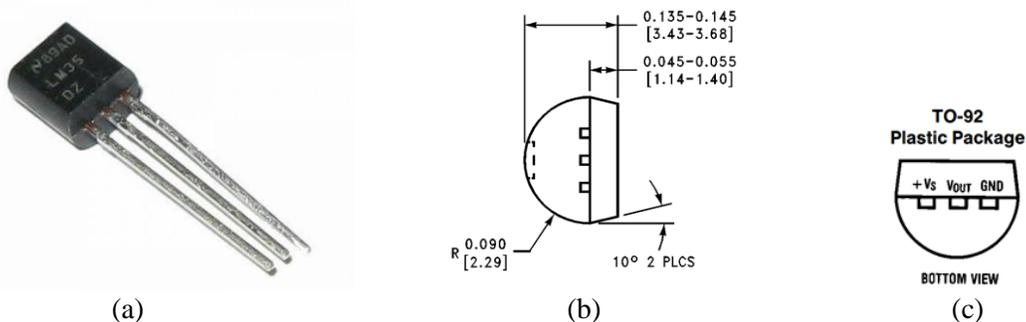


Figura 5: (a) Sensor LM35 utilizado no projeto; (b) dimensões físicas do sensor LM35; (c) encapsulamento TO-92 do sensor LM35. Disponível em:

<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/nationalsemiconductor/DS005516.PDF>, data de acesso: 26/02/2014

Segundo o datasheet (National Semiconductor, 2000), a tensão de saída do sensor LM35 é linearmente proporcional à temperatura na escala Celsius, sendo de 10 mV/°C. Este componente não necessita de qualquer calibração e possui uma boa exatidão, valores de temperatura com variações de 0,25 °C ou até mesmo 0,75 °C dentro da faixa de temperatura de 0 °C a 100 °C. Como ele possui uma saída de tensão direta, é muito fácil realizar o seu interfaceamento com dispositivos de leitura analógicos. O sensor permite uma alimentação V_s variando na faixa de 4 a 20 Vdc e drena apenas 60 μ A de sua fonte de alimentação, o que gera um baixo aquecimento por efeito joule. O sensor LM35 pode ser encontrado em vários tipos de encapsulamentos, cuja escolha depende do tipo de aplicação em que se utiliza o dispositivo. O encapsulamento mais comum é o TO-92, que se assemelha muito com um transistor, conforme a Fig. 5c.

2. METODOLOGIA

O circuito desenvolvido neste trabalho permite fazer o controle de temperatura da água numa determinada faixa regulada pelo usuário através da inserção da temperatura alvo. A função básica do controlador é avaliar os desvios da temperatura no processo de aquecimento da água e enviar um sinal elétrico aos dispositivos diretamente relacionados com as mesmas (circuito de potência), de forma a atuar no sistema corrigindo os desvios encontrados. Controlador de duas posições ou *on-off*, é assim chamado, pois a saída do processo estará sempre com 0% ou 100% de resposta, ou seja, o equipamento de aquecimento estará ligado ou desligado a cada momento, obtendo-se assim um ciclo que caracteriza o comportamento da variável no processo. A Figura 6 ilustra basicamente o funcionamento do controlador de temperatura.

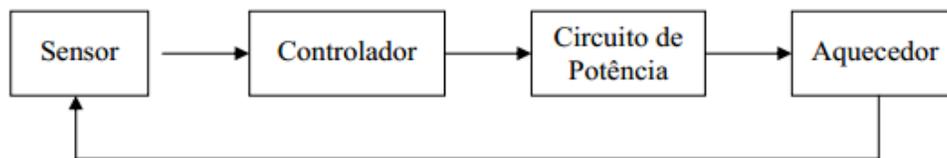


Figura 6: Diagrama de blocos do controlador de temperatura

O sensor (transdutor) de temperatura em contato com a água do reservatório fornece uma tensão dependente da temperatura em que água se encontra. Esta por sua vez entra ao controlador e este, faz o controle, fornecendo alta ou baixa tensão ao circuito de potência, que aciona o equipamento no processo de ligar e desligar.

Para testar o sistema de controle de temperatura foi escolhida uma temperatura alvo de 37 °C, e o limite inferior e o superior foram, respectivamente, 35 °C e 39 °C.

2.1 PROJETO DOS CIRCUITOS ELETRÔNICOS

O circuito do sistema de controle proposto é apresentado na Fig. 7. Este circuito possui conectores para os seguintes pinos de I/O: A0, A1, A2, A3, B0, B1, B2, B3, C0, C1 e C2. São para uso genérico no programa de controle.

As portas RE0, RE1, RE2 e RE3 (MCLR) foram escolhidas para serem as entradas das teclas OK (confirmar temperatura escolhida), “+” (aumentar temperatura), “-” (diminuir temperatura) e Iniciar, respectivamente. A tecla condicionada ao pino MCLR é responsável pelo *reset* do microcontrolador PIC. Já os botões condicionados aos pinos RE0, RE1 e RE2 são para uso genérico definido no programa de controle. O pino MCLR é ativado por nível lógico baixo. Um resistor de *pull-up* (puxar para cima) foi colocado entre o MCLR e a alimentação positiva, de modo a prevenir a ocorrência de um zero lógico acidental nesse pino. Neste projeto, esse resistor de *pull-up* tem resistência igual a 10 k Ω .

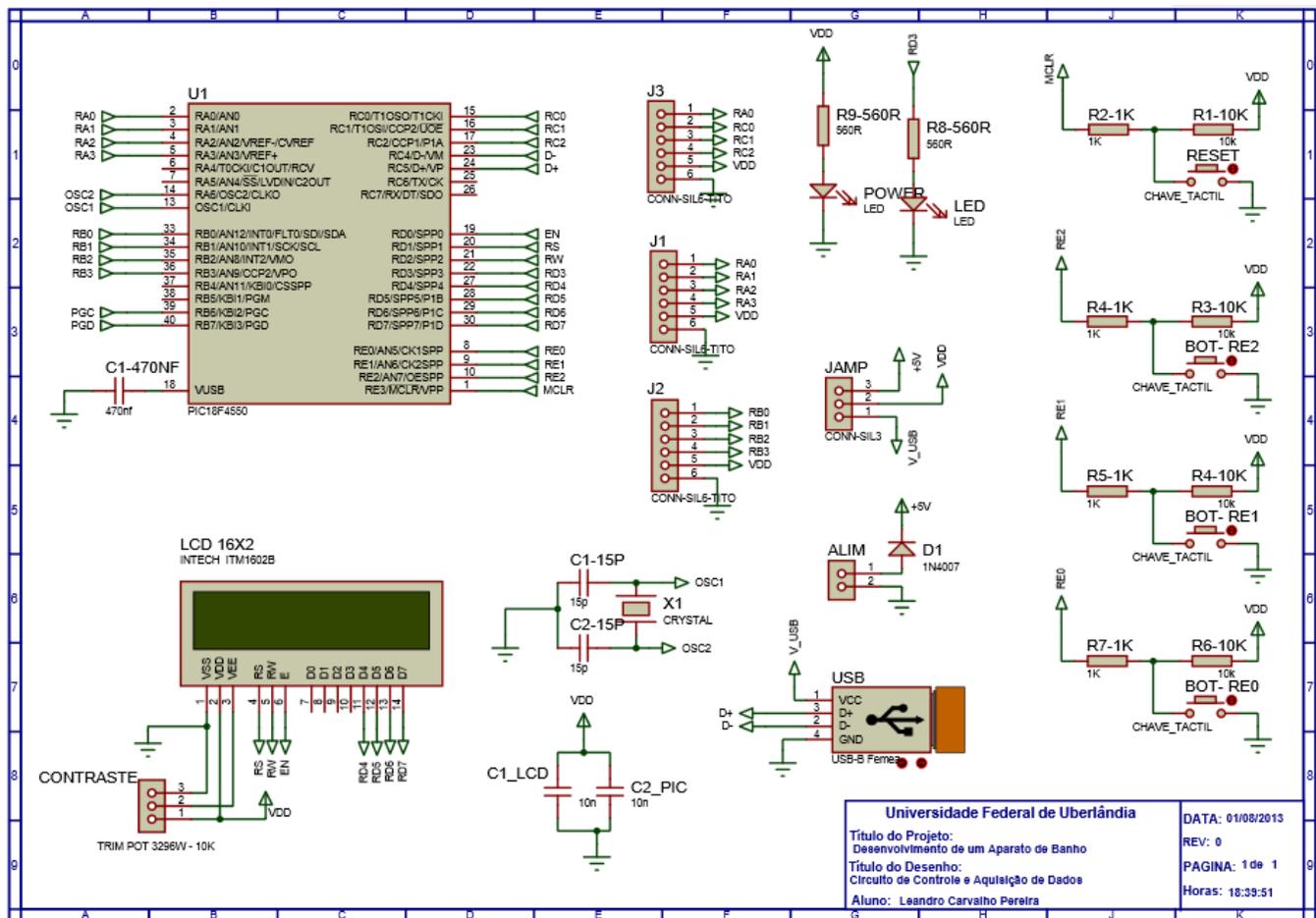


Figura 7: Circuito do sistema de controle projetado

As portas D4 a D7 fazem a comunicação de 4 bits com o mostrador LCD ITM 16x2 (2 linhas e 16 caracteres) e as portas D0, D1 e D2 são as saídas dos sinais E, *enable* que inicia leitura ou gravação de dados, RS, *registers select* que seleciona registradores para configurar o LCD, e RW, respectivamente. O LCD ainda conta com mais dois pinos para alimentação que são os VSS e o VDD.

Além disso, possui os conectores e ligações necessárias para a comunicação via USB com um computador.

Para gerar o clock foi montado um circuito com dois capacitores de 15 pF e um cristal de 20 MHz conectados aos pinos OSC1 e OSC2.

A saída do sensor de temperatura (U2) foi conectada a porta A0, que é a entrada AN0 do módulo conversor A/D. A conversão analógica é feita com resolução de 10 bits, significando que a faixa de variação da tensão foi discretizada em 1024 partes. A tensão nas entradas analógicas variam de 0 a 5V. Sendo assim, tem-se uma precisão de 0,0048828125 V. A Figura 8 apresenta a ligação do sensor LM35 com o PIC 18F4550.

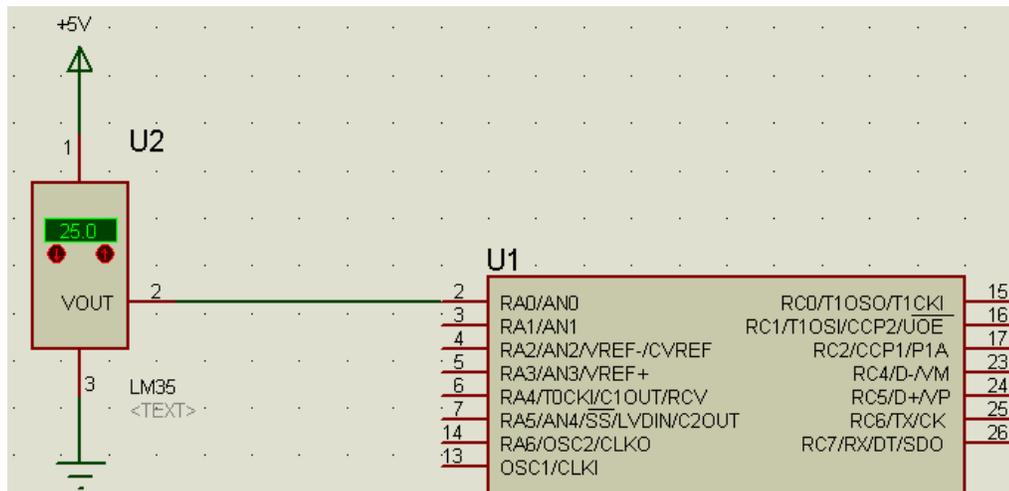


Figura 8: Ligação do sensor LM35 com o PIC 18F4550

Para o controle da resistência utilizando um microcontrolador é necessário um circuito de controle de potência, que consiste basicamente em um optoacoplador MOC 3020 (U3) e um triac TIC 226D (U5). O objetivo do optoacoplador é realizar o isolamento entre duas partes do circuito, o circuito de controle e o circuito conversor de potência (Triac). Os optoacopladores possuem um LED (em inglês *light-emitting diode*) e um fototransistor no mesmo encapsulamento. O LED passa a conduzir quando um sinal chega aos seus terminais. Desse modo o fototransistor é sensibilizado pela luz emitida pelo LED e, então, começa a conduzir.

O Triac é uma chave eletrônica de estado sólido. A ação de controle, constituída de uma corrente elétrica, é enviada ao Triac, que tem a função de chavear a corrente elétrica que alimentará a resistência promovendo ou não o aumento da temperatura da água. A Figura 9 apresenta o esquema do circuito de potência para acionamento da resistência ligado no pino C2 do PIC 18F4550.

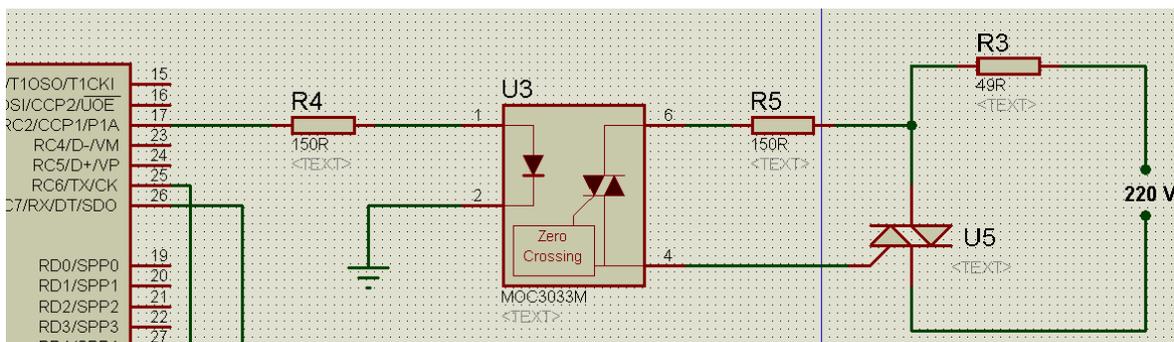


Figura 9: Esquema do circuito de potência para acionamento da resistência ligado no pino C2 do PIC 18F4550.

A resistência elétrica utilizada no projeto possui uma potência de 1000 W e tensão de 220 Volts. Uma foto da resistência utilizada é mostrada na Fig. 10.



Figura 10: Resistência utilizada no projeto

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O funcionamento do controle de temperatura e aquecimento da água ocorre da seguinte forma: o sensor captura o sinal analógico e envia para o conversor A/D (analógico/digital) do microcontrolador PIC 18F4550, que converte a temperatura analógica para níveis de tensão digital para que possa ser interpretada e decodificada no microcontrolador. A partir do erro (que compara a temperatura lida com dois sinais de referência, chamados de limite inferior e superior) um controlador *on/off* programado no microcontrolador controla a resistência a partir de um sinal PWM (em inglês *Pulse-Width Modulation*), gerado pelo microcontrolador, ou seja, quando a temperatura lida fica menor que o limite inferior, a saída PWM do microcontrolador é ativada e o atuador é acionado com sua potência máxima, e quando o sinal de entrada fica maior que o limite superior, a saída é desligada e o atuador desligado. Desta forma é controlada a temperatura da água presente no reservatório. No projeto foi definido que o limite inferior fosse a temperatura alvo escolhida pelo usuário menos dois graus Celsius ($- 2\text{ }^{\circ}\text{C}$), e o limite superior fosse a temperatura mais dois graus Celsius ($+ 2\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Em relação ao controle *on/off* de temperatura da água foram realizados alguns testes para comprovar que o método é eficiente para o mecanismo proposto. O primeiro experimento possui uma massa de água no reservatório de 9 Kg. O segundo possui uma massa de 15 Kg. Os gráficos dos experimentos realizados são apresentados, respectivamente, nas Fig. 11 e Fig. 12. Observe as oscilações que ocorrem na variável controlada (temperatura) em torno da condição desejada (temperatura alvo = $37\text{ }^{\circ}\text{C}$). A temperatura era lida de 1 em 1 segundo, totalizando 12600 segundos (3,5 horas). As faixas de operação foram definidas nos seguintes valores: i) limite inferior de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ e ii) limite superior de $39\text{ }^{\circ}\text{C}$.

O experimento foi realizado em um ambiente com pouca ventilação e a água inserida no sistema estava em temperatura ambiente ($25 \sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$). Quando a temperatura do limite superior era alcançada ($39\text{ }^{\circ}\text{C}$), a resistência era desligava e pela convecção natural do ambiente a água resfriava, até atingir a temperatura do limite inferior ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$), quando o aquecimento era novamente ligado, e assim sucessivamente. O resultado disto foi uma oscilação com período de tempo longo.

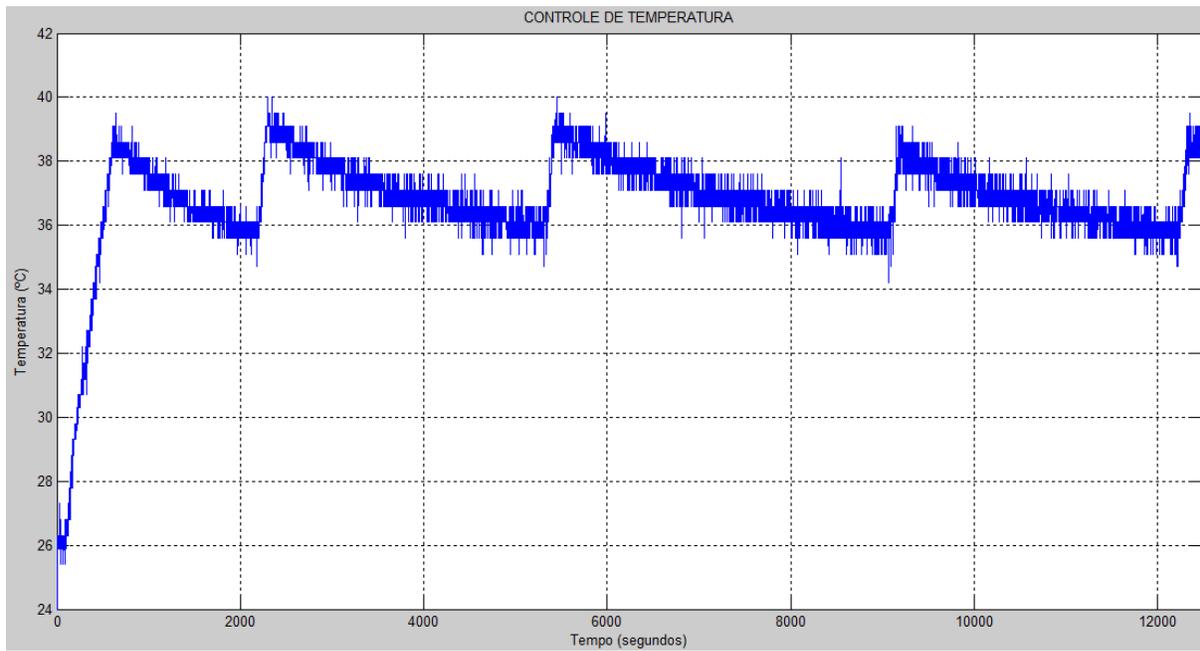


Figura 11: Gráfico do controle de temperatura da água - massa de 9 Kg.

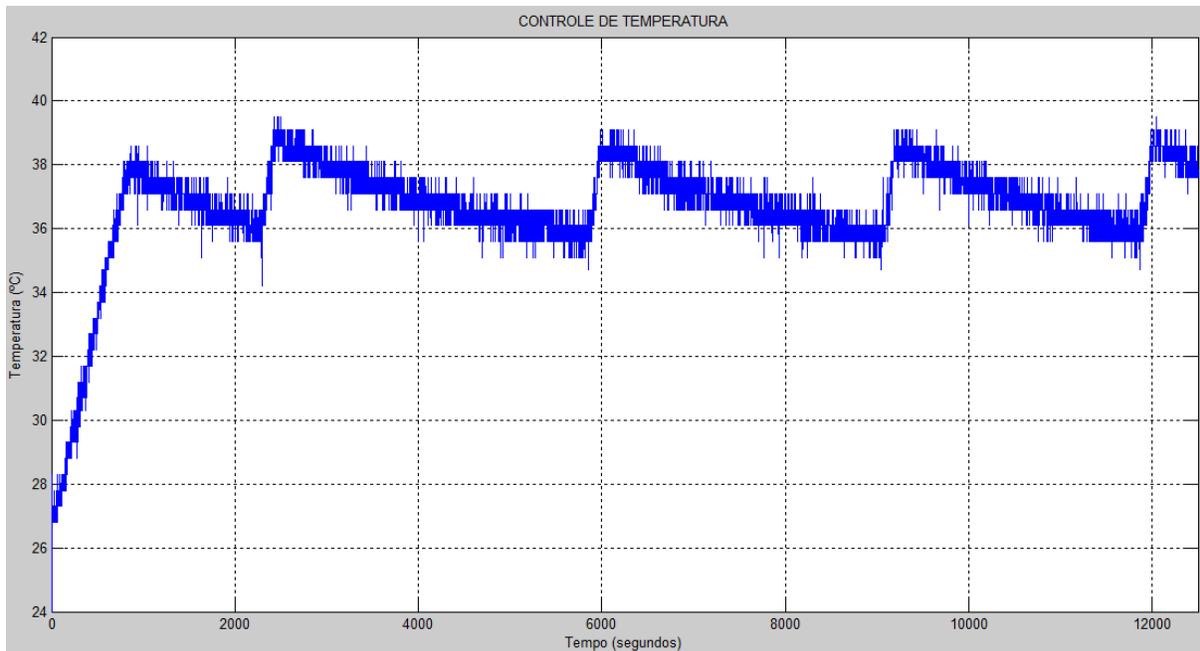


Figura 12: Gráfico do controle de temperatura da água - massa de 15 Kg.

Analisando os gráficos, percebe-se que o tempo gasto em média para a temperatura diminuir de 39° C para 35° C, excluindo a primeira vez que a resistência é desligada, foi de 1500 segundos (25 minutos). Na primeira vez que o líquido esfria, observa-se que o tempo decorrido é bem menor do que quando comparado com as outras vezes. Isto pode ser explicado pelo motivo do sensor estar localizado perto da resistência e todo o líquido não aquecer igualmente. Estando a resistência desligada, as moléculas de água mais perto da resistência tende a transferir calor para as moléculas de água mais distante da resistência, resultando em um esfriamento mais rápido.

Outra análise dos gráficos está relacionada à ultrapassagem das temperaturas limites, tanto superior como inferior. Isto ocorre por causa dos atrasos no sistema de controle e na resposta do processo. No caso, quando a temperatura da água cai abaixo do nível desejado (temperatura limite), o tempo decorrido antes do sistema de controle responder e ligar a resistência pode ser muito pequeno em comparação com o tempo decorrido antes da resistência começar a produzir um efeito na temperatura da água. Neste meio tempo, a temperatura cai ainda mais. A situação inversa ocorre quando a temperatura sobe acima da desejada. Visto o tempo decorrido antes do sistema de controle reagir desligando a resistência somado ao tempo levado para esfriar e parar de aquecer a água, a temperatura da água vai além do valor desejado.

O controle *on/off* não é preciso, mas envolve dispositivos simples, resultando em um sistema muito barato.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que o projeto foi realizado de forma satisfatória, pois apresentou resultados coerentes com a literatura.

Em relação ao controle *on/off* pode-se notar que, em regime permanente, a saída do sistema apresenta uma oscilação em torno do valor de referência. Este fato denota a baixa precisão obtida com este tipo de controlador. A amplitude e a frequência da oscilação foram determinadas a partir do intervalo diferencial. A determinação deste intervalo foi feito levando-se em consideração a precisão desejada, os níveis de ruído e a vida útil dos componentes.

Um ponto de destaque deste projeto é o desenvolvimento de controle baseado em microcontrolador PIC. É uma alternativa interessante para as tradicionais placas de controle, pois permite desenvolver soluções específicas para os problemas. Um destaque do sistema de controle desenvolvido baseado em microcontroladores é o baixo custo. Tal tecnologia pode ser aplicada também a outros projetos, tornando as soluções mais simples, com menores custos e com bons resultados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Faculdade de Engenharia Mecânica e a Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio no desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, L. P. et al. (2010). Estudo de Controladores Eletrônicos Básicos via Amplificadores Operacionais: Laboratório de Controle I, Juazeiro. Disponível em: <http://www.univasf.edu.br/~eduard.montgomery/relatorio2.pdf>, 26/02/2014. (Data de acesso).
- Bolton, W. (2010). *Mecatrônica: Uma Abordagem Multidisciplinar*. 4ª edição, Bookman, Porto Alegre.
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno*, 5ª edição, Prentice Hall, São Paulo.
- Microchip Technology Inc. (2004). PIC18F2455/2550/4455/4550 - Data Sheet, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>, 26/02/2014. (Data de acesso).
- National Semiconductor Corporation. (2000). LM35, Precision Centigrade Temperature Sensors - Data Sheet, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>, 26/02/2014. (Data de acesso).

Autorização

Os autores autorizam o LACCEI a publicar o artigo nos Anais da conferência. Tanto o LACCEI quanto os editores não são responsáveis pelo conteúdo expresso neste artigo ou suas implicações.