

# CONTROLE DE TEMPERATURA DE UM FORNO PARA CURA E SECAGEM DE TINTA FOTOSSENSIVEL

Higgor Olype P. Oliveira<sup>1</sup>, Paulo Pereira B. Júnior<sup>2</sup>, Igor Borges Tavares<sup>3</sup>, Felipe Adriano da Silva Gonçalves, Josué Silva de Morais<sup>4</sup> e Carlos Augusto Bissochi Júnior<sup>5</sup>

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – Minas Gerais<sup>1,2,3,4,5</sup>  
[olipe.higgor@gmail.com](mailto:olipe.higgor@gmail.com)<sup>1</sup>, [paulo\\_pbj@hotmail.com](mailto:paulo_pbj@hotmail.com)<sup>2</sup>, [igorborgest@hotmail.com](mailto:igorborgest@hotmail.com)<sup>3</sup>, [josue@eletrica.ufu.br](mailto:josue@eletrica.ufu.br)<sup>4</sup>, [cabjunior@ufu.br](mailto:cabjunior@ufu.br)<sup>5</sup>

**Resumo** – Para garantir um processo de fabricação de circuitos impressos de qualidade é necessário um fino controle da temperatura de aquecimento e resfriamento das placas de circuito impresso, esse aquecimento é necessário para secagem e cura de tintas fotossensíveis. Um controle de temperatura estável contribui para que as placas de circuito impresso não sofram torções causadas por variações bruscas de temperatura.

**Palavras-Chave** – Controlador, forno, fotossensível, microcontrolador, PID.

## CONTROL TEMPERATURE OF AN OVEN FOR STIFENING AND DRYING OF INK SENSITIVE TO LIGHT

**Abstract** – To provide a manufacturing process of printed circuit board quality is required fine control of the temperature of heating and cooling the printed circuit boards, this heating is required for drying of photosensitive inks. A stable temperature control contributes to the printed circuit board does not undergo torsions caused by variations in temperature.

**Keywords** – Controller, microcontroller, oven, photosensitive, PID.

### I. INTRODUÇÃO

Os circuitos impressos foram criados para substituir às antigas pontes de terminais onde se fixavam os componentes eletrônicos. O circuito impresso consiste de uma placa que pode ser mais comumente de fenolite, fibra de vidro ou fibra de poliéster, que possuem a superfície coberta em uma ou nas duas faces por fina película de cobre, prata, ou ligas à base de ouro, níquel entre outras, nas quais são desenhadas pistas condutoras que representam o circuito onde serão fixados os componentes eletrônicos.

Atualmente o processo mais usado na indústria para fabricação de PCIs (Placas de Circuito Impresso), é o método fotográfico; chamado assim por usar uma tinta, ou resina, que ao ser exposta por luz ultravioleta tem suas

características físico-químicas alteras, este processo é chamado de fotopolimerização.

O processo de fabricação consiste em quatro etapas, aplicar a tinta sobre a PCI, secar a tinta usando o processo térmico, fotopolimerizar a tinta, e por fim, imergir a PCI em soluções ácidas ou básicas.

Todo o procedimento de ser executado em ambiente limpo para evitar qualquer imperfeição, deve-se tomar muito cuidado ao manusear os agentes químicos principalmente a resina fotossensível.

A primeira etapa do processo consiste em espalhar a tinta fotossensível sobre a PCI, de maneira homogênea; para isso usamos o método chamado de *silkagem*, onde uma tela muito fina serve de anteparo para aplicação do produto.

A etapa seguinte requer muita pericia, uma vez que o controle de temperatura deve ser minucioso e será abordado em outras partes deste trabalho.

Após o processo de secagem, a PCI deve ser exposta a luz ultravioleta juntamente com o fotolito, de tal forma que, a área exposta à luz tornar-se-á resistente a exposição de soluções ácidas, possibilitando assim a confecção das chamadas trilhas ou conexões da PCI.

Na ultima fase do processo de fabricação de PCIs, banharemos a placa em duas soluções; a primeira será uma solução de caráter básico, responsável por retirar a tinta que não foi exposta à luz, já o segundo banho químico será de uma solução ácida, responsável por corroer a área de cobre indesejada.

O processo deverá ser repetido caso a chamada mascara anti-solda seja adicionada ao projeto da PCB, juntamente com a legenda de componente.

Podemos perceber que a etapa mais critica, em termos de controle, é a etapa de secagem da tinta, pois o mesmo deve seguir uma cota bem especifica, caso contrário, a placa sofreria danos irreversíveis, impossibilitando a fabricação da PCI de alta qualidade proposta pelo método fotográfico.

O controle das tarefas do forno foi realizado por um sistema embarcado. Tais dispositivos são formados basicamente pelos mesmos componentes de um computador: processador, memória, dispositivo de armazenamento, interfaces e demais componentes. Porém a principal diferença é que, ao contrário de um computador, eles se limitam a executar bem uma única tarefa ou poucas tarefas. Basicamente, qualquer equipamento autônomo que não é um computador, acaba caindo nesta categoria.

### II. MICROCONTROLADOR

O sistema embarcado do forno utiliza um microcontrolador fabricado pela Microchip Technology Inc.. Um



X CEEL - ISSN 2178-8308  
24 a 28 de setembro de 2012  
Universidade Federal de Uberlândia - UFU  
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

microcontrolador é um sistema computacional completo, no qual estão incluídos internamente um CPU (Unidade Central de Processamento), memórias RAM, memória Flash e E2PROM, pinos de I/O (Input/Output), além de outros periféricos internos, tais como, osciladores, canal USB, interface serial assíncrona USART, módulos de temporização e conversores A/D, entre outros periféricos, integrados em um mesmo componente (chip).

O microcontrolador utilizado foi um PIC 18F4550, visto na Figura 1. com encapsulamento DIP, esse encapsulamento foi escolhido por ser de fácil manipulação para realização de testes. Ele foi escolhido por possuir comunicação USB, o que permite passar diretamente de um computador para o microcontrolador os Setpoint's correspondentes à curva de temperatura que o forno terá que seguir.

A comunicação USB também foi utilizada no envio dos valores médios de temperatura lidos pelos sensores em intervalos regulares de tempo. Esses valores de temperatura são utilizados para se ter um Feedback do que realmente está acontecendo dentro do forno, com eles monta-se um gráfico contendo a curva de temperatura/tempo que o forno descreveu e a compara com a curva de temperatura/tempo que ele deve descrever.

O PIC 18F4550 possui um conversor Analógico/Digital interno com 13 canais e com uma resolução de 10 bits. A um canal do conversor Analógico/Digital do microcontrolador foi conectado um sensor de temperatura com o seu devido amplificador.

O sensor envia para o microcontrolador um valor analógico de tensão que varia de 0V a 5V, dependendo da temperatura lida. O conversor A/D converte esse valor analógico recebido do sensor para um valor digital, os valores que saem do conversor variam linearmente com a tensão de entrada e assume valores de 0 a 1023, com essa informação consegue-se converter o valor lido para a unidade de temperatura do SI.

Na memória de programa do microcontrolador foi gravado o firmware do sistema embarcado que contém a função do controle PID, as funções necessárias para enviar e receber dados por USB, as funções de leitura do conversor A/D e uma função que converte o valor lido do conversor A/D para um valor em Graus Celsius.

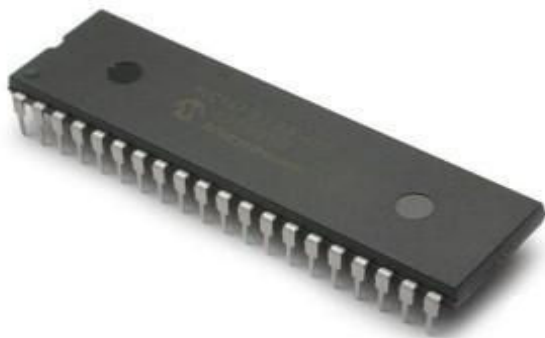


Fig. 1. PIC 18F4550 com encapsulamento DIP (Dual In-Line Package)

### III. SENSORIAMENTO

O sensor temperatura utilizado foi um termopar tipo K (Chromel-Alumel). Esse tipo de sensor é construindo unindo-se dois metais, a junção dos metais gera uma tensão elétrica em função da temperatura, esse efeito é conhecido como *Efeito de Seebeck*.

A relação entre temperatura e tensão gerada pelo termopar não é linear, é uma equação polinomial de 5ª a 9ª ordem dependendo do tipo do termopar.

O sensor tipo K é um termopar de uso genérico. Tem um baixo custo e, devido à sua popularidade estão disponíveis variadas sondas. Cobrem temperaturas entre os -200 e os 1200 °C.

Um dos pontos negativos da utilização dos termopares é que a tensão gerada por eles é reduzida, não é possível a leitura dessa tensão diretamente pelo conversor A/D do microcontrolador. Faz-se necessário a utilização de um amplificador para elevar a tensão de saída do sensor de temperatura, alguns amplificadores específicos para utilização conjunta com termopares até linearizam a relação temperatura/tensão, facilitando muito a utilização desse sensor.

O AD595-AQ foi o amplificador utilizado no forno para permitir a leitura da temperatura do termopar pelo conversor A/D do microcontrolador, ele apresenta uma relação de saída linear de 10 mV / ° C.

### IV. SISTEMA OPERACIONAL

Para gerenciar as tarefas, que o programa deve realizar, foi utilizado o sistema operacional OSA. O uso de um sistema operacional para eletrônica embarcada é uma realidade muito presente na maioria dos novos projetos.

Para a linguagem C, utilizada para construir o programa que foi gravado no microcontrolador, existem diversas opções de RTOS's (Sistema operacional de tempo real), porem estas são limitadas às particularidades de cada compilador.

O sistema operacional OSA foi desenvolvido pelo russo Victor Timofeev e é uma opção gratuita muito funcional. O RTOS OSA é baseado na idéia de multitarefa (multi *thread*), onde cada tarefa é um laço infinito.

O uso de RTOS permite que o programador se concentre na resolução de tarefas orientadas (algorítmica, matemática, etc.) e não precisa se preocupar com tarefas secundárias. Todas as tarefas secundárias são realizadas pelo kernel do OSA. Uma tarefa em OSA é uma função de C. Esta função deve conter um loop infinito que tem no seu interior pelo menos um serviço que muda de contexto tarefa.

### V. CONTROLADOR PID

Na sua atuação, o controlador PID emprega três ações de controle baseadas no sinal de erro: Proporcional (P), Integral (I) e Derivativa (D). Essas ações são usadas de forma isolada (P) ou combinadas (PI, PD, PID). No controle de temperatura do forno foi utilizado um controlador PID na forma paralela ideal.

A ação proporcional estabiliza o processo, provocando uma correção proporcional ao valor do erro, instantaneamente.

A integral é uma ação auxiliar que elimina o desvio permanente, produzindo uma correção proporcional à duração do erro, depois da ação proporcional. A derivativa é uma ação adicional que apressa a correção, gerando uma ação proporcional a velocidade da variação do erro, antes da ação proporcional.

A ação derivativa é altamente importante neste controle devido a alta inércia do sistema. A variação de temperatura não é instantânea. A ação derivativa deve tentar prever o erro futuro e fazer a devida correção o mais rápido possível.

O programa de controle foi escrito em um programa de linguagem C e para sintonização das constantes  $K_c$ ,  $\tau_i$ , e  $\tau_d$  foi utilizado um critério empírico chamado Método de Sintonização de Ziegler-Nichols de Malha Fechada.

## VI. MÉTODO DE SINTONIZAÇÃO DE ZIEGLER-NICHOLS DE MALHA FECHADA

Esse método foi utilizado devido a facilidade de sua execução, e a resposta satisfatória que ele normalmente apresenta.

É de fácil implementação e demonstra bons resultados práticos apresentando normalmente no máximo 25% de overshoot.

O princípio é inicialmente alterar um ganho proporcional no controlador de forma que a resposta de saída (PV) apresente uma oscilação sustentada.

Para utilizar este método, deve-se proceder da seguinte forma:

*Passo 1:* Implementar somente o controle proporcional, anulando as constantes integral e derivativa e ajustar o valor de setpoint (SP) de 50% da faixa de operação.

*Passo 2:* aumenta-se  $K$  até que a resposta ao degrau unitário apresente oscilações constantes. A esse valor de  $K$  chama-se  $K_u$  e ao período das oscilações  $P_u$ .

*Passo 3:* Com os valores de  $K_u$  e  $T_u$  determina-se os valores das constantes do controlador conforme a Tabela I.

**TABELA I**  
**Constantes Ziegler-Nichols**

| Tipo de controlador | $K_p$        | $T_i$                 | $T_d$         |
|---------------------|--------------|-----------------------|---------------|
| P                   | $0.5K_{CR}$  | $\infty$              | 0             |
| PI                  | $0.45K_{CR}$ | $\frac{1}{1.2}P_{CR}$ | 0             |
| PID                 | $0.6K_{CR}$  | $0.5P_{CR}$           | $0.125P_{CR}$ |

Foi feito uma simulação do sistema, como pode ser visto na Figura 2, para saber como ele reagiria. O programa usado para a simulação foi Proteus 7 Professional. A imagem abaixo mostra a simulação do forno feita no programa com o gráfico de resposta.

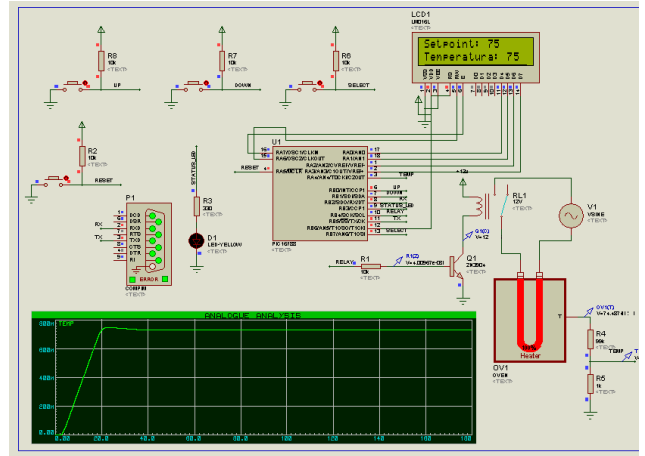


Fig. 2. Simulação do controle de temperatura do forno feito no software de simulação Proteus - Isis, produzido pela empresa Labcenter Electronics

Para visualização dos resultados foi criado um programa em linguagem C++ onde podemos acompanhar em tempo real a resposta do sistema. A Figura 3. mostra a reação do sistema sem ação integrativa e derivativa, ou seja, apenas a ação proporcional.

Seguindo os passos do critério de Ziegler-Nichols e encontrando as constantes  $T_i$  e  $T_d$  a resposta do sistema fica estável com uma faixa de erro de 1°. É uma faixa de erro aceitável, levando em conta que a resolução do programa criado é de 1°. A Figura 4. mostra a resposta do sistema com controle proporcional, derivativo e integrativo.

Percebe se então que a resposta do sistema foi similar à resposta da simulação, verificando a confiabilidade do método.

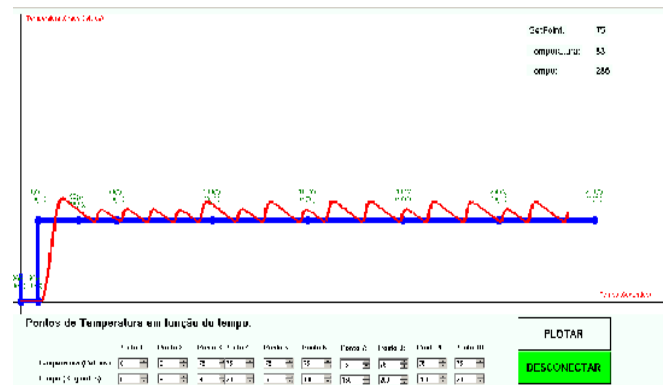


Fig. 3. Resposta do sistema com apenas a ação de controle proporcional atuando.



Fig. 4. Resposta do sistema com controle PID.

Uma foto do resultado prático do forno para confecção de placas pode ser observado na figura 5.

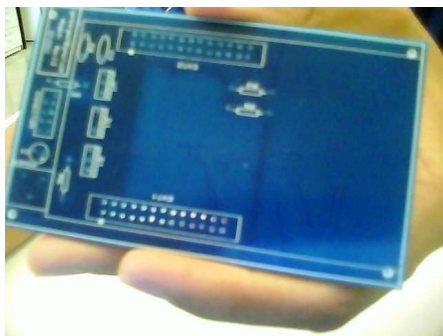


Fig. 5. Placa confeccionada.

## VII. CONCLUSÕES

Conclui-se que a utilização de um sistema embarcado microcontrolado com uma técnica de controle PID obteve êxito no controle da temperatura de um forno, que foi utilizado na secagem e cura de tinta fotossensível.

Uma proposta de trabalho futuro é a utilização do hardware e do software do forno com uma mudança no firmware, mais especificamente na função de controle de temperatura, que será ajustado para realizar a solda de componentes. É necessária uma mudança na função de

controle devido ao aumento de complexidade da reta de temperatura que o forno terá que seguir.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TIMOFEEV, Victor; IVANOV, D.; FRANK, Vadim. Osa documentation. , 2012. Disponível em: <<http://www.pic24.ru/doku.php/en/osa/ref/intro>>. Acesso em: 01 maio 2012.
- [2] ANALOG DEVICES. Thermocouple signal conditioning using the ad594/ad595. , 2012. Disponível em: <[http://www.analog.com/static/imported-files/application\\_notes/AN-369.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/AN-369.pdf)>. Acesso em: 05 abr. 2012.
- [3] BRAGA, Newton C.. Escolhendo sensores de temperatura. , 2012. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/182>>. Acesso em: 05 abr. 2012.
- [4] JUCÁ, Sandro. Apostila de microcontroladores e periféricos. , 2012. Disponível em: <<http://www.tinyurl.com/SanUSB>>. Acesso em: 01 mar. 2012.
- [5] NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS LTDA.. Controle pid básico. , 2003. Disponível em: <<http://www.novus.com.br/site/arquivos/ArtigoPIDBasicoNovus.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2012.
- [6] SILVA, Joao Manoel Gomes da. O controlador pid. , 2000. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node24.html>>. Acesso em: 25 abr. 2012.
- [7] MICROCHIP TECHNOLOGY INC.. Microcontrolador pic18f4550. , 2009. Disponível em: <[http://www.microchip.com/wwwproducts/devices.aspx?ddo\\_cname=en010300](http://www.microchip.com/wwwproducts/devices.aspx?ddo_cname=en010300)>. Acesso em: 19 mar. 2012.
- [8] UFPR. Transferência de calor. , 2010. Disponível em: <[http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/engenheiro\\_do\\_petroleo/traf\\_calor.pdf](http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/engenheiro_do_petroleo/traf_calor.pdf)>. Acesso em: 04 maio 2012.
- [9] NEUMANN, Miguel G.. Fotopolimerização: princípios e métodos. Polímeros: Ciência e Tecnologia. Sao Carlos, 01 dez. 1993.