



**Universidade Estadual de Campinas
UNICAMP**

Instituto de Física Gleb Wataghin

F 530A - Instrumentação I (2º semestre – 2005)

**Relatório Final de Atividades
Data do término do projeto: 11/11/2005**



Aluno: Julio César Bertin

RA: 024214

Orientador:

Prof. Dr. Newton C. Frateschi

Coordenador:

Prof. Dr. José J. Lunazzi

**Campinas
2005**

Desenvolvimento de sistema automatizado de RTP para tratamento térmico de amostras de dispositivos opto-eletrônicos.

Aluno: Julio César Bertin **RA:** 024214
Orientador: Newton C. Frateschi

1. Resumo:

O estudo dos contatos ôhmicos é de fundamental importância para o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos. Esse trabalho visa a elaboração e montagem de um sistema de RTP para o tratamento térmico desses dispositivos.

Um sistema de RTP (Rapid Termal Processing) é um processo que aumenta rapidamente a temperatura da amostra e a mantém na temperatura desejada por um curto período de tempo (tipicamente até 60 segundos). O aquecimento é realizado usando várias lâmpadas de potência elevada, onde se controla a potência de cada uma individualmente ^[1].

Em suma, trata-se de um ambiente hermeticamente fechado , uma caixa de acrílico, no interior da qual haverá um fluxo de gás e uma placa de grafite, a ser aquecida por efeito Joule, onde será colocada a amostra que deverá receber o tratamento térmico.

2. Introdução:

Nesse projeto usaremos um mecanismo de aquecimento baseado na passagem de corrente elétrica através de uma placa de grafite no lugar de lâmpadas de alta potência. Essa adaptação permite menor custo de montagem e de manutenção, além disso, permite a montagem de sistemas pequenos, apropriados para os propósitos de um laboratório.

Outra vantagem desse mecanismo é o uso de peças e materiais de uso comum no laboratório e nas oficinas, facilitando a tarefa de sua confecção.

Neste relatório priorizamos a montagem da câmara de tratamento térmico, incluindo o projeto da caixa, da placa de aquecimento (feita de grafite) e o dimensionamento dos componentes eletrônicos e fios a serem utilizados.

Por fim, iniciamos os testes com o controlador de temperatura e com um circuito eletrônico a ser implementado no controle temporizado do sistema.

3. Atividades Desenvolvidas:

3.1 Automação do sistema de RTP:

Nosso sistema de RTP consiste, basicamente, de uma câmara de acrílico hermeticamente vedada, uma placa de grafite que será aquecida por meio de corrente elétrica, sensor de temperatura e conexões para entrada e saída de gases (H_2+N_2). O RTP como o próprio nome indica, trata-se de um sistema para tratamento térmico rápido. Portanto, deve-se ter a capacidade de aquecimento e resfriamento rápido, com rampas e patamares térmicos controlados precisamente sem danos às amostras com o suprimento de atmosfera redutora. Para tal é essencial termos o projeto do sistema térmico e de automação corretos para o tipo de processo a ser realizado. O objetivo do trabalho desenvolvido neste semestre é projetar o sistema de RTP e implementar sua automação. A figura 1 mostra um esquema da montagem geral do circuito com todos os componentes.

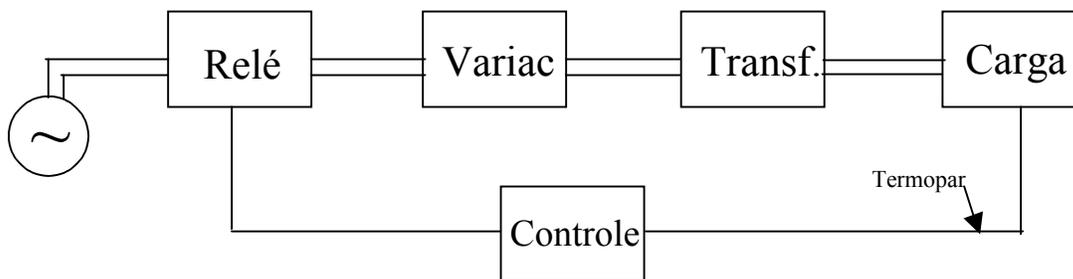


Figura 1: Esquema do circuito de ligação do RTP.

3.2 Projeto e montagem da caixa de acrílico com entradas para as conexões de gás e fios

As partes da caixa a ser utilizada para os tratamentos térmicos foram construídas com placas de acrílico de 10 mm de espessura, de acordo com o desenho da figura 2, a seguir:

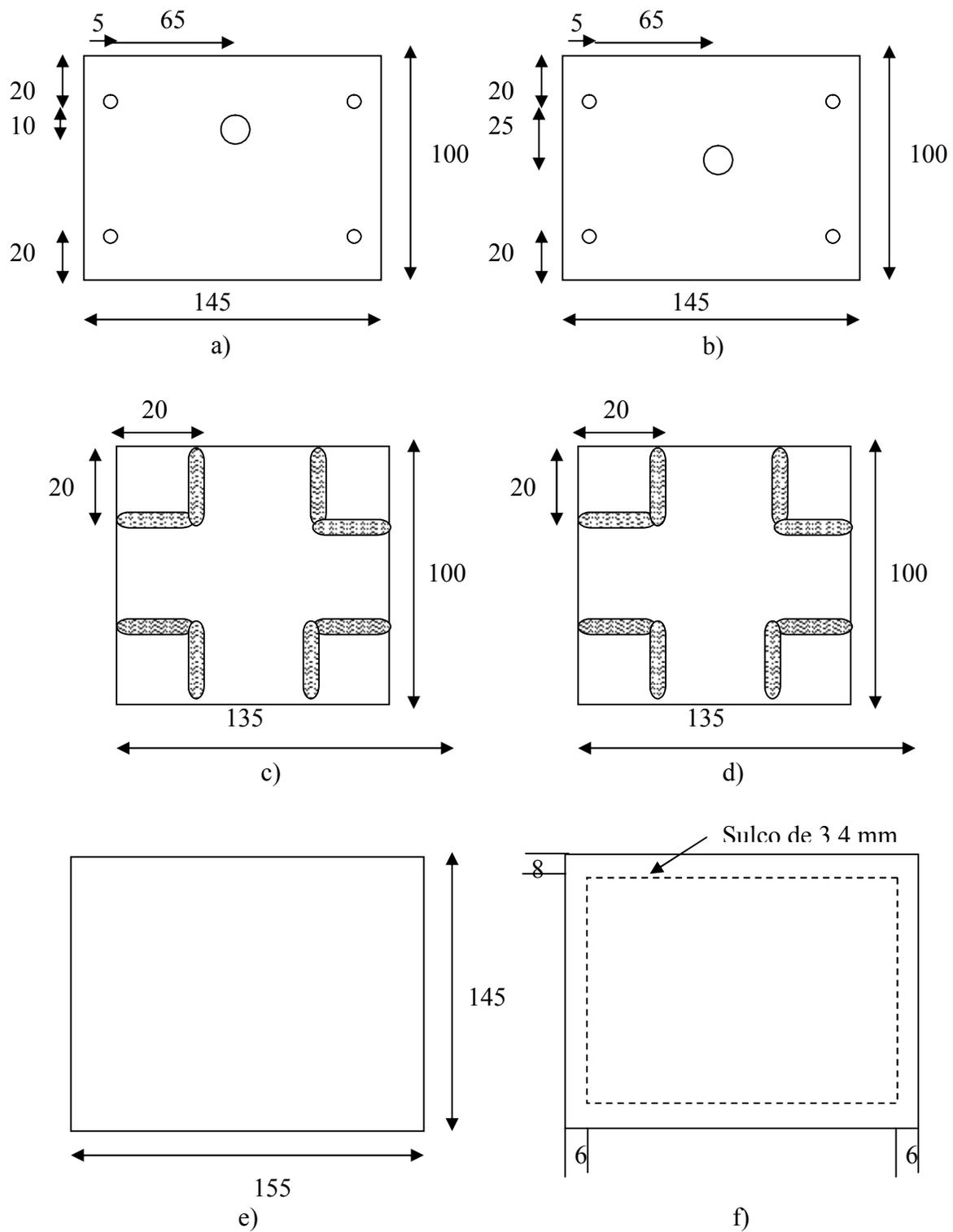


Figura 2: (a) Peça traseira da câmera, (b) peça frontal, (c) lateral direita, (d) lateral esquerda, (e) base da câmera e (f) tampa da câmera.

Nas peças das figuras 2 (a) e 2 (b), pode-se verificar o furo no interior de cada placa (traseira e frente), para a entrada do gás, mais alta na placa traseira que na da frente para que o fluxo de gás não esteja voltado diretamente para a amostra; em 2 (c) e (d), podem ser vistas as marcações para os parafusos nos quatro cantos de cada peça das laterais. A figura 2 (e) é uma peça inteira, que servirá de base para a câmara e a figura 2(f) será a tampa, na qual a marcação pontilhada representa a posição do sulco, onde será fixada a borracha de vedação.

Posteriormente, montamos as partes utilizando cola de metanol e, em seguida, silicone, obtendo a caixa pronta como mostra a figura 3 a seguir.

As conexões foram feitas através de furações nas placas, nas medidas 8 mm para os fios, um quarto de polegada para as mangueiras de gás e 3 mm para os fios do termopar.

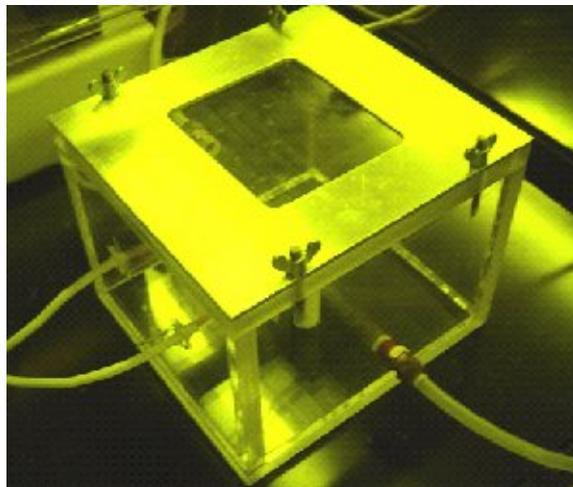


Figura 3: Câmara de tratamento térmico montada, com conexões para fios e mangueiras.

Após a montagem da caixa, instalamos os fios e mangueiras e, para obter uma boa vedação, como mostra a figura 3 acima, para isso, utilizamos uma borracha (“O - Ring”) na tampa e silicone nas conexões de fios e mangueiras para não permitir nenhum contato com o ambiente externo.

3.3 Dimensionamento da placa de grafite

No circuito de controle vamos utilizar o relé de estado sólido do modelo 48D40 fabricado pela Loti. Para o bom funcionamento desse equipamento, é necessário considerar um fator de segurança de 0,8, ou seja, não é aconselhável passar de 80% do valor nominal de corrente, assim, temos um limite de operação de 32 A.

Com o objetivo de controlar a corrente necessária para o aquecimento, projetamos uma placa de grafite dimensionada para que a corrente necessária seja inferior a 30 A.

Foram realizados cálculos baseados em conceitos básicos de termodinâmica e eletricidade nos quais usamos valores teóricos de resistividade elétrica e densidade do grafite para determinar as dimensões, a figura 4 ilustra a placa confeccionada.

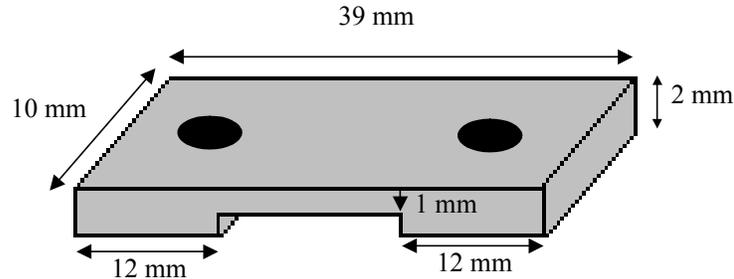


Figura 4: Desenho ilustrativo da placa de grafite do sistema de RTP.

A escolha das dimensões da placa de grafite foi baseada nas dimensões dos dispositivos a serem processados, de forma que alguns limites foram estabelecidos. A partir disso realizamos os seguintes cálculos:

O volume da placa é $V = (3,9\text{cm} * 1,0\text{cm} * 0,2\text{mm}) - (0,1\text{cm} * 1,0\text{cm} * 1,5\text{cm}) = 0,705\text{cm}^3$, assim, usando a densidade do grafite $d = 1,78\text{g} / \text{cm}^3$, vamos determinar a massa da placa: $m = d * V = 1,78 * 0,705 = 1,25\text{g}$, podemos calcular a potência necessária para uma variação de temperatura de 420°C em 30 s, substituindo $C = 0,72\text{ J/g } ^\circ\text{C}$ e a massa calculada :

$$P = \frac{\Delta U}{\Delta t} = C * m * \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad \text{logo,} \quad P = 0,72 * 1,25 * \frac{420}{30} = 12,6\text{W}.$$

A resistência pode ser determinada usando-se a seguinte relação :

$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$, onde A é a área da seção transversal da placa e L o seu comprimento, assim,

$$R = 7,84 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{3,9}{0,2} = 0,015\Omega.$$

Por fim, pode-se calcular a corrente elétrica necessária para o aquecimento, usando a expressão: $I = \sqrt{\frac{P}{R}}$, substituindo os dados, temos: $I = \sqrt{\frac{12,6}{0,015}} = 29\text{A}$.

Portanto, a corrente necessária para o aquecimento da placa está dentro do limite de operação do relé utilizado.

A figura 5 mostra montagem final da placa de grafite dentro da caixa de acrílico.

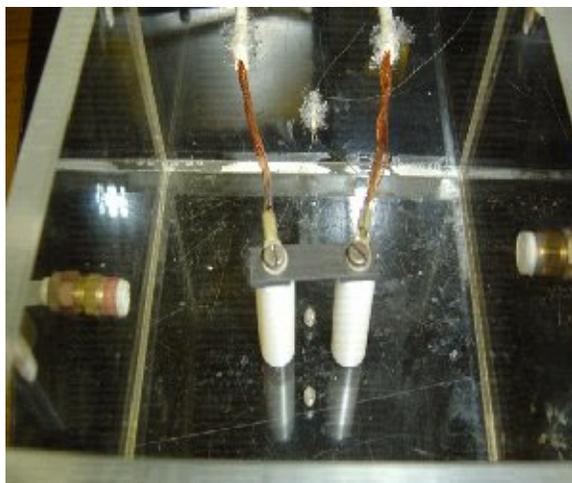


Figura 5: Montagem da placa de grafite do sistema de RTP.

3.4 Testes com o controlador de temperatura

O dispositivo utilizado foi o controlador universal modelo N 1100 fabricado pela empresa Novus Produtos Eletrônicos Ltda ^[2].

Inicialmente, foram realizados testes com o controlador em sistemas mais simples, como o aquecimento controlado de água, onde utilizamos um béquer com água e um aquecedor sendo monitorado pelo controlador. Nosso objetivo era adquirir experiência sobre as funções do equipamento, tais como ajustes de programa de rampas e patamares, tempos mínimos de cada segmento e alarmes de evento, para posterior adaptação ao uso real.

Nessa fase observamos características que influenciaram nas decisões posteriores, um exemplo disso foi o tempo mínimo de um minuto para cada estágio do programa, o que nos levou a decidir que teríamos de usar um mecanismo para interromper o programa após vinte segundos de patamar; para isso, decidimos utilizar um alarme temporizado que atua liberando um pulso de tensão para interromper o programa, conforme já mencionado.

Assim, foi possível definir um programa que serviu de base para a aplicação desejada.

3.5 Montagem do circuito eletrônico, dimensionamento dos fios e componentes

Os fios utilizados, foram escolhidos de acordo com sua capacidade de corrente, de acordo com cada aplicação no circuito. Da mesma forma com os componentes eletrônicos para o circuito temporizador.

O circuito desenvolvido tem como aplicação o desligamento automático do sistema depois de passados os 45 segundos de rampa e 20 segundos de tempo de patamar. Sua operação é baseada em um pulso de tensão proveniente de um alarme, vindo do controlador.

O circuito eletrônico desenvolvido para o desligamento do controlador pode ser visualizado na figura 6, a seguir.

Na figura 6, pode-se encontrar um dos dois flip-flops do CI 7474 ^[3], uma parte do CI 7406, o controlador e o relé eletromecânico utilizado.

Durante o processo de aquecimento da amostra, a tensão entregue ao circuito, pelo controlador, é nula, assim, na entrada 1 temos sempre 5V, uma vez que essa entrada é inversora. A saída 5 tem uma tensão de 5V. Ao entrar no Buffer inversor 7406, a tensão de 5V no pino 1 passa a ser de 0V no pino 2, pois essa saída é inversora.

Logo, a diferença de potencial na bobina do relé é de 5V, condição necessária para que o relé mantenha o controlador energizado.

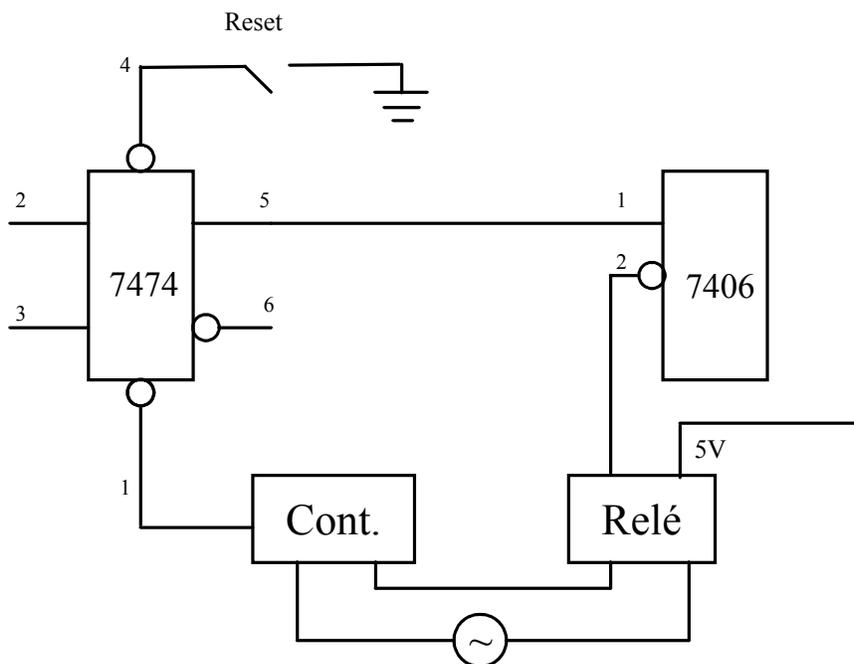


Figura 6: esquema eletrônico do circuito

Ao final do programa um alarme do controlador libera um pulso de 5V, dessa forma a entrada do pino 1 recebe 0V, da mesma forma, o pino 5 terá uma tensão de 0V. O pino 1 do Buffer 7406 receberá 0V que será transformado em 5V ao sair pelo pino 2. Ao chegar 5V no terminal do relé, a diferença de potencial será nula, uma vez que o outro terminal tem 5V constantemente. Portanto, quando a tensão na bobina do relé for nula, seus contatos ficam abertos e o controlador passa a ficar desenergizado. Isso faz com que todo o sistema fique desligado, voltando a funcionar somente quando o operador do sistema acionar a chave ligada ao pino 4 do CI 7474, denominada “Reset”.

Desta forma, temos um mecanismo de desligamento de todo o sistema, uma vez que esse circuito controla a alimentação do controlador de temperatura e o controlador é responsável pela energia entregue à placa de grafite.

A figura 7, a seguir, mostra a placa montada de acordo com o esquema descrito acima.

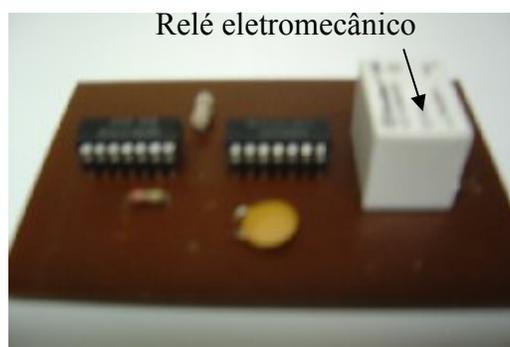


Figura 7: foto do circuito montado

3.6 Montagem da caixinha do controlador e do circuito completo

Com a placa pronta, montamos uma caixa de alumínio dobrando duas chapas de 320mm x 160mm, com 1 mm de espessura, conforme mostra a figura 8.



Figura 8: Câmera de alumínio com os componentes do circuito de desligamento do RTP.

Na figura 8, acima, podemos observar os furos feitos para a fixação do controlador, de chaves para controle e LED's para indicação de funcionamento. Internamente, há furos de fixação para a placa do circuito impresso.

- **Montagem e calibração do termopar**

Escolhemos um termopar para a medição do tipo K, por ser compatível com o controlador, sua fixação à placa de grafite foi feita utilizando uma cola à base de epoxy cerâmico de alta temperatura. Após a aplicação do material, foi realizado um tratamento térmico na placa de forma a garantir que essa cola resista ao aquecimento a que será submetida quando o sistema estiver operando.

Tivemos algumas dificuldades nesse estágio da montagem, pois, por tratar-se de um material sensível, assim como as dimensões serem reduzidas, o termopar diversas vezes se soltou da placa de grafite.

A calibração do termopar foi realizada utilizando uma liga de Al depositado em substratos de Si. Ao aquecermos até o ponto eutético, que é de $577^{\circ}\text{C}^{[4]}$ para a liga Si/Al, há a formação da liga que pode ser facilmente visualizada pela redução da refletividade da amostra. Assim, aquecemos a amostra monitorando a temperatura e observamos a temperatura medida pelo termopar no momento da fusão da liga, ou seja, o ponto eutético. Repetimos algumas vezes o procedimento para maior confiabilidade dos dados. Entretanto, percebemos que as temperaturas medidas eram ligeiramente diferentes das esperadas, assim, encontramos uma função que relaciona a temperatura a ser programada (T_p), com a temperatura real desejada (T_d):

$$T_p = T_d - \frac{30}{555}(T_d - 20) \quad (1)$$

- **Montagem do circuito completo**

O funcionamento do circuito pode ser resumido da seguinte forma:

(1) Fonte de Potência

A alimentação da rede é controlada por um relé de estado sólido, com capacidade de controlar 48 A, que tem como função controlar a passagem de corrente para o variac. O variac é um transformador variável de 0 a 120% em tensão. Em nosso sistema, tipicamente mantemos o variac em torno de 50%, aproximadamente 60 V de saída. Partindo do variac, um transformador elevador de corrente, cujo fator de transformação é aproximadamente 16,

fornece tipicamente 57 A com o variac a 50%, com tensão final de 4 V, para alimentar a fita de grafite de resistência baixa ($R \sim 70 \text{ m}\Omega$).

(2) Sensoriamento de temperatura/controle

Utilizando um termopar colado na placa de grafite com epoxy cerâmico de alta temperatura, é possível monitorar a sua temperatura. O controlador de temperatura monitora o sinal do termopar e controla o relé de entrada por modulação de largura de pulso (PWM), e por consequência, a potência elétrica fornecida ao grafite, de forma a controlar o processo de aquecimento.

Com todas as partes do sistema prontas, montamos todo o circuito, conforme mostra a figura 9, na qual pode-se encontrar: (A) o Variac, (B) o transformador, (C) o relé de estado sólido, (D) controle e (E) a câmara de acrílico com a placa de grafite, onde serão realizados os tratamentos térmicos.

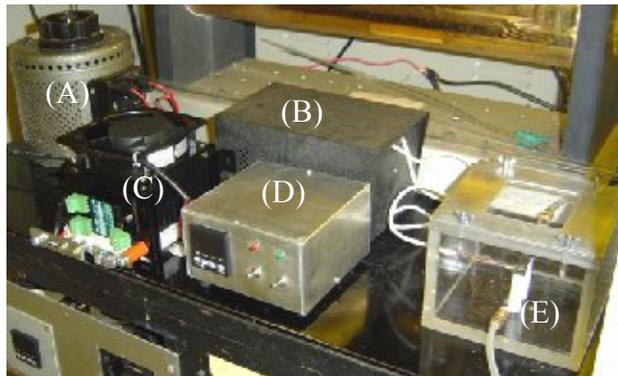


Figura 9: Foto do sistema de RTP montado, com todos os componentes.

3.7 Testes de operação do sistema

Os primeiros testes com o sistema demonstraram que há uma rápida variação de temperatura com a circulação de corrente, o que torna o ajuste mais difícil, além disso, em pequenos intervalos de tempo sem alimentação da placa de grafite, a temperatura diminui rapidamente.

Para a solução desse problema, algumas alternativas são: executar testes variando os parâmetros de banda proporcional, tempo derivativo, taxa integral [5] e a potência fornecida ao circuito.

De forma resumida, foi utilizada a função “auto-tune” do controlador, que serve para um ajuste automático dos parâmetros apropriado para a situação da aplicação. Assim como em alguns casos, esse ajuste não foi suficiente, de forma que tivemos que procurar os valores reais a serem usados testando, de forma que os valores finais satisfaçam a seguinte relação:

$$MV(t) = \frac{100}{Pb} x \left[E(t) + \left(Ir x \int E(t) dt \right) + Tdx \frac{dE(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

onde Pb é a banda proporcional, Ir é a taxa integral, Td é o tempo derivativo e E(t) é o sinal de entrada.

O significado da expressão (2) é que a variável manipulada “ MV(t) ” é composta pelos valores de Pb, Ir e Td que devemos definir para uma boa atuação do sistema de controle.

No controle Proporcional, o valor de MV é proporcional ao valor do desvio (SV-PV, para ação reversa de controle), ou seja, para desvio zero (SV=PV), MV=0; à medida que o desvio cresce, MV aumenta até o máximo de 100%. O valor de desvio que provoca MV=100% define a Banda Proporcional (Pb) [5]. As siglas SV, PV e MV significam, respectivamente, Setpoint, variável de processo e variável manipulada.

A ação integral funciona da seguinte maneira: A intervalos regulares, a ação integral corrige o valor de MV, somando a esta o valor do desvio SV-PV. Este intervalo de atuação se chama Tempo Integral, que pode também ser expresso por seu inverso, chamado Taxa Integral (Ir), ou seja, a frequência com que a ação integral é realizada.

A ação derivativa consiste em uma resposta na saída do controlador (MV) que é proporcional à velocidade de variação do desvio. A ação derivativa tem o efeito de reduzir a velocidade das variações de PV, evitando que se eleve ou reduza muito rapidamente.

Após a realização de vários testes, alterando a potência de entrada, banda proporcional, taxa integral, tempo derivativo e, finalmente, o período de PWM (Modulação da largura de pulso), conhecido como “Ct”, foi possível chegar aos valores definitivos, que são apresentados na tabela 1:

Parâmetro	Valor	Unidade
Banda proporcional	11,0	% da faixa máxima de entrada
Taxa integral	2,80	repetições por minuto
Tempo derivativo	23	segundos
Período de PWM	0,5	segundos

Tabela 1: Parâmetros finais de ajustes de PID.

Depois de definidos os valores dos parâmetros de ajuste, podemos descrever o funcionamento do sistema de RTP em termos de suas faixas de operação, conforme discutiremos a seguir.

3.8 Caracterização do sistema

Foram criados três programas com diferentes rampas e patamares, para variados tratamentos térmicos em dispositivos, a seguir serão apresentadas as principais características de cada um deles:

a) Medidas de tempo de rampa / correntes correspondentes

Durante a fase de testes foi realizada uma avaliação dos intervalos indicados de funcionamento para cada programa;

Programa 1 : Rampa de temperatura entre 30°C e 420°C em $35s \pm 1s$, com o patamar estabilizado na faixa entre $425^{\circ}C \pm 3^{\circ}C$ por $15s \pm 1s$; a potência utilizada é de 50 % da potência nominal de entrada e a corrente elétrica de 33 A, em regime de aquecimento.

Programa 2 : Rampa de temperatura entre 30°C e 370°C em $32s \pm 2s$, com o patamar estabilizado na faixa entre $372^{\circ}C \pm 8^{\circ}C$ por $15s \pm 2s$, a potência utilizada é de 50 % da potência nominal de entrada e a corrente elétrica de 33 A em regime de aquecimento.

Programa 3 : Rampa de temperatura entre 30°C e 490°C em $35s \pm 2s$, com o patamar estabilizado na faixa entre $482^{\circ}C \pm 8^{\circ}C$ por $15s \pm 2s$, a potência utilizada é de 60 % da potência nominal de entrada e a corrente elétrica de 40 A em regime de aquecimento.

b) Avaliação de temperatura final de rampa

As temperaturas no final das rampas, em cada programa, geralmente são ligeiramente inferiores aos valores nominais, isso se deve à necessidade de evitar grandes oscilações de temperatura no final da rampa, de forma que as temperaturas reais de fim de rampa nos três programas são respectivamente: 415°C, 365°C e 480°C, isso se deve, principalmente, ao efeito da banda proporcional que tende a se aproximar da temperatura desejada pelo limite inferior, pois dessa forma, haverá menos variações de temperatura durante o patamar. Isso permite a estabilização dos patamares nos valores indicados anteriormente.

c) Verificação / ajustes do alarme para controle do tempo de patamar e desligamento automático

Conforme foram realizados os testes, foi estabelecido o tempo de atuação do alarme em 50 s, de forma que compreende o período da rampa e do patamar do circuito, esse tempo foi baseado no tempo utilizado anteriormente, quando o tratamento térmico era realizado manualmente.

O sistema de desligamento automático foi verificado em cada teste realizado, não apresentando nenhuma falha em aproximadamente 50 testes realizados.

d) Taxa de transferência de temperatura da placa de grafite ao ambiente

Realizamos medições do tempo de resfriamento da placa de grafite na câmara sob condição de operação similar a um processo típico. Os resultados são apresentados no gráfico da figura 10.

A diminuição da temperatura pode ser descrita pela seguinte equação:

$$\frac{d\Delta T}{dt} = -\alpha.\Delta t \quad (3)$$

onde T é a temperatura e t é o tempo decorrido, cuja solução é dada por :

$$\Delta T = \Delta T_0.e^{-\alpha t} \quad (4)$$

onde T_0 é a temperatura inicial.

Dessa forma, podemos manipular a equação (4) para obtermos:

$$\ln\left(\frac{\Delta T}{\Delta T_0}\right) = -\alpha.t \quad (5)$$

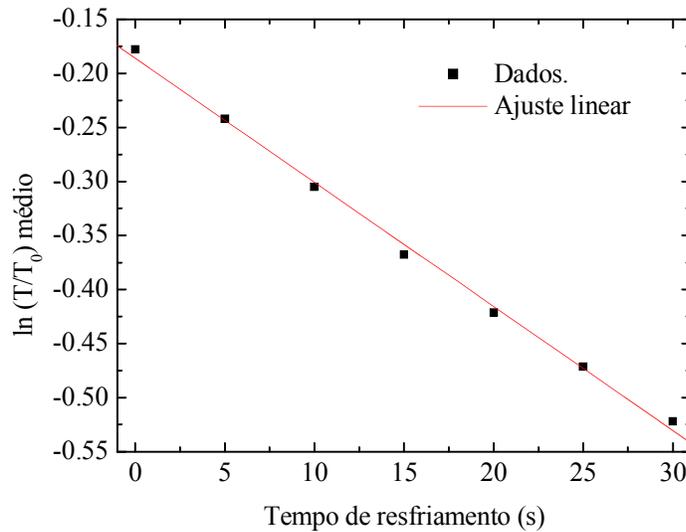


Figura 10: Gráfico de $\ln (T/T_0)$ em função de t , redução da temperatura da placa de grafite após o desligamento do circuito.

A temperatura diminui exponencialmente com o tempo, de forma que no gráfico semi-log da figura 10 acima observa-se um decréscimo linear, ajustando os pontos experimentais por uma reta, pode determinar o valor da constante de variação da temperatura representada pela variável “ α ” do ajuste linear, cuja equação é dada por:

$$\ln (T/T_0) = -0.18588 - 0.1148 * t .$$

Seu valor calculado é $\alpha = (-0.1148 \pm 0.0028) s^{-1}$.

4) Conclusão:

A etapa inicial do projeto, envolveu as tarefas mais simples e demoradas do projeto, basicamente as manuais, relacionadas à confecção e montagem da câmara de tratamento, da placa de grafite, além do projeto, testes e montagem da placa de circuito impresso utilizada no temporizador do RTP.

No entanto, o funcionamento do sistema foi obtido após numerosos testes e ajustes realizados no final do trabalho, conforme apresentados anteriormente, que visavam a obtenção dos melhores parâmetros de controle durante o processo de aquecimento.

Esse projeto envolveu diversas sub-tarefas que proporcionaram um aprendizado em diversas áreas, dentre as quais se destaca a eletrônica e um pouco de mecânica.

O sistema desenvolvido será de grande utilidade para o Laboratório de Pesquisas em Dispositivos, onde será aplicado no tratamento térmico de amostras de semicondutores, de forma que podemos considerar que obtivemos êxito nesse trabalho.

5) Comentários do Coordenador

E-mail recebido em 08/11/2005 19:33:31 com o título: “Seu trabalho”.

“Desenvolvimento de sistema automatizado de RTP para amostras ...

leva o número 1, tanto na apresentação no dia 29, servindo para ubicá-lo no corredor de painéis, como para colocar o número 01 na frente do número de cada página na hora de imprimir. 01-01, 01-01, 01-03, etc., deve ser a numeração das páginas. Logo enviarei as instruções todas para o relatório final”.

6) Referências :

[1] Site :

<http://www.semiconductorglossary.com/default.asp?searchterm=Rapid+Thermal+Processing%2C+RTP> .

[2] Site: <http://www.novus.com.br>

[3] Greenfield, J. D.; Practical Digital Design using ICs; 2nd Edition; Wiley & Sons; pp. 125-137.

[4] Site: <http://www.cfq.org.br/informativo%20out%20a%20dez%202004.pdf>, pg 9.

[5] Site: <http://www.help-temperatura.com.br/html/interesse/micro.html>.

7) Textos das Referências da Internet.

[1] Site :

<http://www.semiconductorglossary.com/default.asp?searchterm=Rapid+Thermal+Processing%2C+RTP> .

Rapid Thermal Processing, RTP	process that rapidly increases temperature of the wafer and maintains it at the target temperature for a short period of time (typically less than 60 sec.); heating is accomplished using high power lamps (typically halogen-quartz) installed in batches in which power of each lamp is controlled individually; RTP allows high temperature processing at low thermal budget.
-------------------------------	---

[2] Site: <http://www.novus.com.br>

Controladores



Controlador Universal N1100

Reúne em um único modelo as principais características necessárias aos mais diversos processos industriais. Permite a configuração das entradas de sinal e saídas de controle via teclado frontal. Possui comunicação serial RS-485 com protocolo Modbus RTU (opcional).

Ref.: N1100, N1100-HC

Detalhes do Produto

Entrada universal: J, K, T, N, R, S, Pt100, 4-20mA, 0-50mV, 0-5Vcc sem alterar hardware.
Saída de controle: relé SPST 3A/250Vca, mais saída programável linear 4-20mA ou pulso lógico para relés de estado sólido.
Saídas para aquecimento ou refrigeração (modelo HC).

Alarmes: 2 relés SPST 3A/250Vca (se saída de controle for 4-20mA ou pulso lógico para relés de estado sólido);
Até 2 alarmes temporizados de 0 a 6500s.
Resolução na medida: 12000 níveis
Alimentação: 85-250Vca
Retransmissão da PV ou SP em 4 a 20mA.
Função Automático/Manual "bumpless".
Entrada de SetPoint Remoto (4 a 20mA)
Soft start programável (0 a 9999 seg.)
Rampas e Patamares: 7 programas de 7 segmentos cada, podendo ser concatenados para formar um programa de até 49 segmentos. A todos os segmentos podem ser associados eventos.
Auto-sintonia dos parâmetros PID.
Gabinete em policarbonato e ABS, auto-extinguível, formato 48X48X110mm.
Frontal IP65 com teclas em silicone.

Opcionais:
Alimentação: 24Vcc/ca.
Terceiro relé (SPDT) ou I/O digital.
Comunicação Serial RS-485, protocolo MODBUS-RTU.
Detector de resistência aberta (não disponível na versão N1100-HC).

[5] Site: <http://www.help-temperatura.com.br/html/interesse/micro.html>.

Controladores PID Microprocessados

Este artigo pretende criar no leitor uma percepção física do funcionamento de um controle PID, sem grandes análises e rigorismos matemáticos, visando introduzir a técnica aos iniciantes e aprimorar o conhecimento dos já iniciados, com a abordagem mais prática e simplificada possível.

Noções preliminares:

Algumas definições de siglas e termos utilizados neste artigo:

PV: Process Variable ou variável de processo. Variável que é controlada no processo, como temperatura, pressão, umidade, etc.

SV ou SP: Setpoint. Valor desejado para a variável de processo.

MV: Variável Manipulada. Variável sobre a qual o controlador atua para controlar o processo, como posição de uma válvula, tensão aplicada a uma resistência de aquecimento, etc.

Erro ou Desvio: Diferença entre SV e PV. SV-PV para ação reversa e PV-SV para ação direta.

Ação de controle: Pode ser reversa ou direta. Define genericamente a atuação aplicada à MV na ocorrência de variações da PV.

Ação Reversa: Se PV aumenta, MV diminui. Tipicamente utilizada em controles de aquecimento.

Ação Direta: Se PV aumenta, MV aumenta. Tipicamente utilizada em controles de refrigeração.

A técnica de controle PID consiste em calcular um valor de atuação sobre o processo a partir das informações do valor desejado e do valor atual da variável do processo. Este valor de atuação sobre o processo é transformado em um sinal adequado ao atuador utilizado (válvula, motor, relé), e deve garantir um controle estável e preciso.

De uma maneira bem simples, o PID é a composição de 3 ações quase intuitivas, conforme resume o quadro a seguir:

P	CORREÇÃO PROPORCIONAL AO ERRO	A correção a ser aplicada ao processo deve crescer na proporção que cresce o erro entre o valor real e o desejado.
I	CORREÇÃO PROPORCIONAL AO PRODUTO ERRO x TEMPO	Erros pequenos mas que existem há muito tempo requerem correção mais intensa.
D	CORREÇÃO PROPORCIONAL À TAXA DE VARIAÇÃO DO ERRO	Se o erro está variando muito rápido, esta taxa de variação deve ser reduzida para evitar oscilações.

Um pouco de matemática

A equação mais usual do PID é apresentada a seguir:

$$MV(t) = K_p \times \left[E(t) + K_i \times \int E(t) dt + K_d \times \frac{dE(t)}{dt} \right]$$

Onde Kp, Ki e Kd são os ganhos das parcelas P, I e D, e definem a intensidade de cada ação.

Equipamentos PID de diferentes fabricantes implementam esta equação de diferentes maneiras. É usual a adoção do conceito de "Banda Proporcional" em substituição a Kp, "Tempo derivativo" em substituição a Kd e "Taxa Integral" ou "Reset" em substituição a Ki, ficando a equação da seguinte forma.

$$MV(t) = \frac{100}{P_b} \times \left[E(t) + I_r \times \int E(t) dt + T_d \times \frac{dE(t)}{dt} \right]$$

Onde Pb, Ir e Td estão relacionados a Kp, Ki e Kd e serão individualmente abordados ao longo deste texto.

Controle Proporcional

No controle Proporcional, o valor de MV é proporcional ao valor do desvio (SV-PV, para ação reversa de controle), ou seja, para desvio zero (SV=PV), MV=0; à medida que o desvio cresce, MV aumenta até o máximo de 100%. O valor de desvio que provoca MV=100% define a Banda Proporcional (Pb). Com Pb alta, a saída MV só irá assumir um valor alto para corrigir o processo se o desvio for alto. Com Pb baixa, a saída MV assume valores altos de correção para o processo mesmo para pequenos desvios. Em resumo, quanto menor o valor de Pb, mais forte é a ação proporcional de controle.

A figura a seguir ilustra o efeito da variação de Pb no controle de um processo.

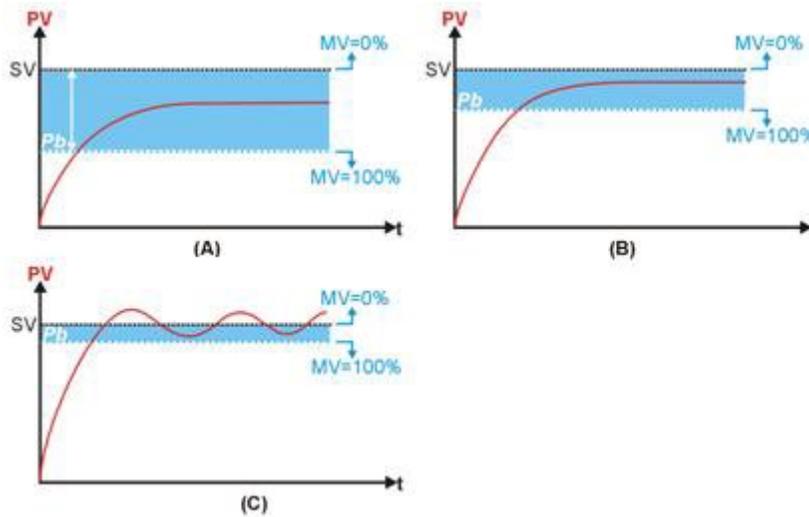


Figura 1 – Efeito da redução de PB no comportamento de PV

Em (1.A), com a banda proporcional grande, o processo estabiliza, porém muito abaixo do setpoint. Com a diminuição da banda proporcional (1.B), a estabilização ocorre mais próximo do setpoint, mas uma redução excessiva da banda proporcional (1.C) pode levar o processo à instabilidade (oscilação). O ajuste da banda proporcional faz parte do processo chamado de Sintonia do controle.

Quando a condição desejada ($PV=SV$) é atingida, o termo proporcional resulta em $MV=0$, ou seja, nenhuma energia é entregue ao processo, o que faz com que volte a surgir desvio. Por causa disto, um controle proporcional puro nunca consegue estabilizar com $PV=SV$.

Muitos controladores que operam apenas no modo Proporcional, adicionam um valor constante à saída de MV para garantir que na condição $PV=SV$ alguma energia seja entregue ao sistema, tipicamente 50%. Este valor constante é denominado BIAS (polarização), e quando ajustável permite que se obtenha uma estabilização de PV mais próxima a SV.

Incluindo o controle Integral - PI

O integral não é, isoladamente, uma técnica de controle, pois não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. A ação integral consiste em uma resposta na saída do controlador (MV) que é proporcional à amplitude e duração do desvio. A ação integral tem o efeito de eliminar o desvio característico de um controle puramente proporcional.

Para compreender melhor, imagine um processo estabilizado com controle P, conforme apresentado na figura 2.A.

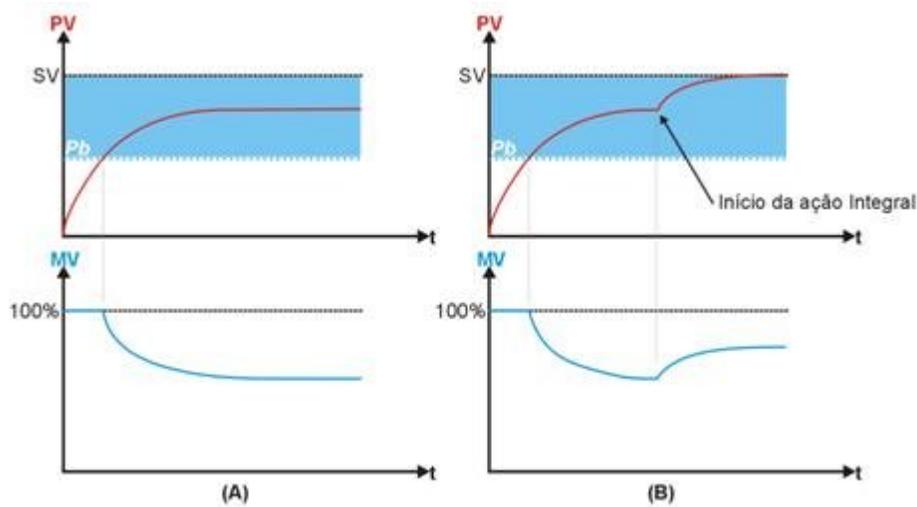


Figura 2 – Efeito da inclusão do controle Integral - PI

Em 2.A, PV e MV atingem uma condição de equilíbrio em que a quantidade de energia entregue ao sistema (MV), é a necessária para manter PV no valor em que ela está. O processo irá permanecer estável nesta condição se nenhuma perturbação ocorrer. Apesar de estável, o processo não atingiu o setpoint (SV), existindo o chamado Erro em Regime Permanente.

Agora observe a figura 2.B, onde no instante assinalado, foi incluída a ação integral. Observe a gradual elevação do valor de MV e a conseqüente eliminação do erro em regime permanente. Com a inclusão da ação integral, o valor de MV é alterado progressivamente no sentido de eliminar o erro de PV, até que PV e MV alcancem um novo equilíbrio, mas agora com $PV=SV$.

A ação integral funciona da seguinte maneira: A intervalos regulares, a ação integral corrige o valor de MV, somando a esta o valor do desvio $SV-PV$. Este intervalo de atuação se chama Tempo Integral, que pode também ser expresso por seu inverso, chamado Taxa Integral (I_r). O aumento da Taxa Integral – I_r – aumenta a atuação do Integral no controle do processo.

A ação integral tem como único objetivo eliminar o erro em regime permanente, e a adoção de um termo integral excessivamente atuante pode levar o processo à instabilidade. A adoção de um integral pouco atuante, retarda em demasia a estabilização $PV=SV$.

Incluindo o controle derivativo - PD

O derivativo não é, isoladamente, uma técnica de controle, pois não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. A ação derivativa consiste em uma resposta na saída do controlador (MV) que é proporcional à velocidade de variação do desvio. A ação derivativa tem o efeito de reduzir a velocidade das variações de PV, evitando que se eleve ou reduza muito rapidamente.

O derivativo só atua quando há variação no erro. Se o processo está estável, seu efeito é nulo. Durante perturbações ou na partida do processo, quando o erro está variando, o derivativo sempre atua no sentido de atenuar as variações, sendo portanto sua principal função melhorar o desempenho do processo durante os transitórios.

A figura 3 compara respostas hipotéticas de um processo com controle P (A) e PD (B):

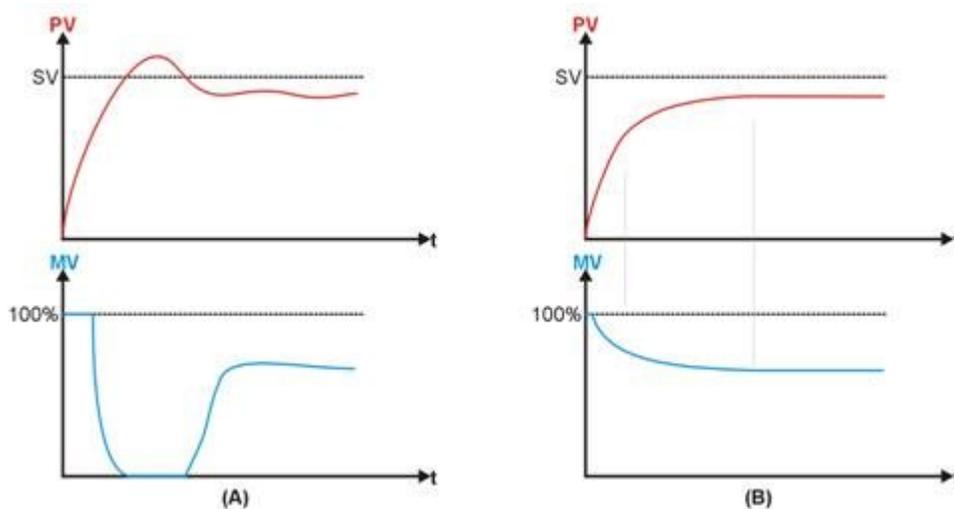


Figura 3 – Comparação de um controle P com um controle PD

No controle P (figura 3.A), se a banda proporcional é pequena, é bem provável que ocorra 'overshoot', onde PV ultrapassa SV antes de estabilizar. Isto ocorre pelo longo tempo em que MV esteve no seu valor máximo e por ter sua redução iniciada já muito próximo de SV, quando já é tarde para impedir o overshoot. Uma solução seria aumentar a banda proporcional, mas isto aumentaria o erro em regime permanente. Outra solução é incluir o controle derivativo (figura 3.B), que reduz o valor de MV se PV está crescendo muito rápido. Ao antecipar a variação de PV, a ação derivativa reduz ou elimina o overshoot e as oscilações no período transitório do processo.

Matematicamente, a contribuição do derivativo no controle é calculada da seguinte maneira: A intervalos regulares, o controlador calcula a variação do desvio do processo, somando à MV o valor desta variação. Se PV está aumentando, o desvio está reduzindo, resultando em uma variação negativa, que reduz o valor de MV e conseqüentemente retarda a elevação de PV. A intensidade da ação derivativa é ajustada variando-se o intervalo de cálculo da diferença, sendo este parâmetro chamado Tempo Derivativo – Td. O aumento do valor de Td aumenta a ação derivativa, reduzindo a velocidade de variação de PV.

Controle PID

Ao unir as 3 técnicas conseguimos unir o controle básico do P com a eliminação do erro do I e com a redução de oscilações do D, mas se cria a dificuldade de ajustar a intensidade da cada um dos termos, processo chamado de sintonia do PID.

Sintonia do controle PID?

A bibliografia de controle apresenta diversas técnicas para sintonia, tanto operando o processo em manual (malha aberta) quanto em automático (malha fechada). Foge ao objetivo deste artigo apresentar estas técnicas. A grande maioria dos controladores PID industriais incorporam recursos de "Auto Tune", em que o controlador aplica um ensaio ao processo e obtém o conjunto de parâmetros do PID (Pb, Ir e Td). Para a maior parte dos processos, este cálculo é adequado, mas em muitos casos, é necessária a correção manual para atingir um desempenho de controle mais satisfatório (menos overshoot, estabilização mais rápida, etc.).

Para efetuar manualmente esta correção, é fundamental a compreensão dos princípios de funcionamento aqui expostos. A seguir são apresentadas diretrizes para otimização manual do desempenho de um controlador PID.

Corrigindo manualmente o PID

Em muitos casos é necessário ajuste da sintonia após a conclusão do Auto Tune. Este ajuste é manual e deve ser feito por tentativa e erro, aplicando uma alteração nos parâmetros PID e verificando o desempenho do processo, até que o desempenho desejado seja obtido. Para isto é necessário conhecimento do efeito de cada parâmetro do PID sobre o desempenho do controle, além de experiência em diferentes processos.

As definições de um bom desempenho de controle são também bastante variadas, e muitas vezes o usuário espera de seu sistema uma resposta que ele não tem capacidade de atingir, independente do controlador utilizado. É comum o operador reclamar que a temperatura do forno demora muito a subir, mas o controlador está com MV sempre a 100%, ou seja, não tem mais o que fazer para acelerar. Também às vezes o operador quer velocidade mas não quer overshoot, o que muitas vezes é conflitante.

Na avaliação do desempenho do controlador, é importante analisar o comportamento da PV e MV, e verificar se o controlador está atuando sobre MV nos momentos adequados. Coloque-se no lugar do controlador e imagine o que você faria com a MV, e compare com a ação tomada pelo controlador. A medida que se adquire experiência, este tipo de julgamento passa a ser bastante eficiente.

A tabela 1 a seguir resume o efeito de cada um dos parâmetros sobre o desempenho do processo:

Parâmetro	Ao aumentar, o processo ...	Ao diminuir, o processo ...
Pb	Torna-se mais lento. Geralmente se torna mais estável ou menos oscilante. Tem menos overshoot	Torna-se mais rápido Fica mais instável ou mais oscilante Tem mais overshoot
Ir	Torna-se mais rápido, atingindo rapidamente o setpoint Fica mais instável ou mais oscilante Tem mais overshoot	Torna-se mais lento, demorando para atingir o setpoint Fica mais estável ou mais oscilante. Tem menos overshoot.
tD	Torna-se mais lento. Tem menos overshoot	Tem mais overshoot

Tabela 1 – O efeito de cada parâmetro PID sobre o processo

A tabela 2 a seguir apresenta sugestões de alteração nos parâmetros PID baseadas no comportamento do processo, visando sua melhoria:

Se o desempenho do processo ...	Tente uma a uma as opções:
Está quase bom, mas o overshoot está um pouco alto	Aumentar PB em 20% Diminuir IR em 20% Aumentar DT em 50%
Está quase bom, mas não tem overshoot e demora para atingir o setpoint	Diminuir PB em 20% Aumentar IR em 20% Diminuir DT em 50%
Está bom, mas MV está sempre variando entre 0% e 100% ou está variando demais.	Diminuir DT em 50% Aumentar PB em 20%
Está ruim. Após a partida, o transitório dura vários períodos de oscilação, que reduz muito lentamente ou não reduz.	Aumentar PB em 50%
Está ruim. Após a partida avança lentamente em direção ao setpoint, sem overshoot. Ainda está longe do setpoint e MV já é menor que 100%	Diminuir PB em 50% Aumentar IR em 50% Diminuir DT em 70%

Tabela 2 – Como melhorar o desempenho do processo