



COBENGE 2005

XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia

"Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças"

12 a 15 de setembro - Campina Grande - Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFPE

CONTROLADOR PID ANALÓGICO: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA EM LABORATÓRIO

Marcos F. M. – mendes@ieee.org

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE
Centro de Engenharias e Ciências Exatas – CECE
Av. Tarquínio Joslim dos Santos, 1300 – Pólo Universitário
Foz do Iguaçu / PR – Caixa Postal 961 – CEP: 85.857-970

Usina Hidrelétrica de ITAIPU
Divisão de Manutenção Eletrônica – SMME.DT
Av. Tancredo Neves, 6731 – CHI
Foz do Iguaçu / PR – Caixa Postal 1563 – CEP: 85.866-900

***Resumo:** O artigo propõe a implementação prática de um controlador PID analógico como recurso didático. São apresentadas uma sugestão de metodologia e os circuitos eletrônicos. A montagem permite entender o funcionamento do controlador PID e estudar controle em malha fechada na prática, motivando o interesse dos alunos por estes assuntos. O controlador é modular e tem os recursos básicos dos controladores PID industriais. A implementação é feita utilizando amplificadores operacionais e componentes eletrônicos discretos de uso comum. O seu funcionamento é satisfatório e alguns resultados de testes são apresentados.*

Palavras-chave: Ensino de Controle, Ensino em laboratório, Controladores PID, Controle analógico, Controle.

1. INTRODUÇÃO

Em controle e automação é muito comum o uso de controladores PID - proporcional mais integral mais derivativo. Segundo SEBORG (1994), em torno de 90% das malhas industriais utilizam este controlador. Uma década se passou e ele continua sendo o tipo de controlador mais usado na indústria.

O controlador PID quando bem sintonizado, permite um bom controle do processo na maioria das aplicações. Ele pode ser utilizado em diversos tipos de plantas, proporcionando erro nulo em regime estacionário, pequeno tempo de resposta (acomodação) e níveis aceitáveis de sobre-sinal. Algumas das mais comuns aplicações deste tipo de controlador são a regulação de temperatura de fornos e a regulação de velocidade de geradores hidráulicos. Além da grande aplicabilidade industrial, este controlador é assunto obrigatório nos cursos básicos de teoria de Controle.

O artigo propõe a implementação prática de um controlador PID analógico como recurso didático, para o ensino das ações básicas de controle e do próprio controlador. Esta é uma forma motivadora e até mesmo lúdica de reforçar os conceitos físicos e desenvolvimentos matemáticos relativos a este controlador vistos em aulas teóricas.

As aulas práticas têm algumas características às vezes pouco exploradas ou inexistentes nas aulas teóricas. Podem ser citados, por exemplo, maior interação aluno/aluno e alunos/professor, o despertar da capacidade criativa e o estímulo do interesse pelo assunto. Além disso, o aprendizado em grupo prepara os alunos para a cultura industrial de trabalho em equipe (HILLBORN, 1990). Portanto, este tipo de aula tem grande importância na formação dos profissionais de qualquer área de conhecimento.

O controlador é implementado utilizando amplificadores operacionais e componentes eletrônicos discretos de uso comum. Os valores dos componentes utilizados são calculados considerando os valores disponíveis (valores comerciais). Os parâmetros são ajustados através de potenciômetros multivoltas.

Além de ser uma montagem didática, após a sua conclusão, o controlador pode ser usado em diversas aplicações nos laboratórios de ensino e pesquisa.

2. METODOLOGIA

O circuito proposto é simples devido à sua estrutura modular. O único pré-requisito necessário para os alunos é a análise de circuitos implementados com amplificadores operacionais. Este assunto normalmente é visto em disciplinas como “Eletrônica” e “Medidas Elétricas”, em geral, cronologicamente anteriores à “Controle” na grade curricular.

Como o controlador proposto é modular, a análise e implementação dos blocos funcionais são feitas separadamente. Isto permite maior facilidade de compreensão das funções individuais e do controlador completo. Desta forma, o controlador deixa de ser uma “caixa preta” e o aluno tem em mente o que está acontecendo realmente, bem como onde ele deve interferir para alterar o comportamento do controlador.

A classe (turma) deve ser dividida em grupos de três ou quatro alunos. Estes grupos devem ser formados por alunos heterogêneos, com relação à habilidade acadêmica (HILLBORN, 1990). O trabalho em grupo permite o desenvolvimento de atributos essenciais aos engenheiros, como por exemplo: boa comunicação, persuasão, liderança e cooperação. A melhora destas habilidades é mais efetiva quando se desenvolve a cultura de que os alunos não são responsáveis apenas pelo seu aprendizado, mas sim pelo aprendizado do grupo.

O ritmo de trabalho sugerido é a implementação de quatro blocos funcionais em cada encontro (duas horas-aula: 100 min). Desta forma, o controlador PID estará completo em quatro encontros.

Os alunos devem ter feito um estudo prévio dos blocos que serão implementados e fazer uma breve apresentação para toda a turma no início da aula (um bloco por grupo). Após uma discussão e esclarecimentos das possíveis dúvidas, pode se iniciar as montagens.

Após a montagem de cada bloco funcional, este precisa ser testado. Os testes devem ser feitos com sinais adequados (degraus, rampas, senóides, etc.) de acordo com a função do bloco e varrendo toda a faixa de operação (início, meio e fim, por exemplo). Estando o bloco perfeito, ele pode ser conectado ao circuito completo.

Os alunos devem fazer um relatório simplificado (rascunho), por grupo, a cada aula. Após a conclusão da montagem do controlador, deve ser feito um relatório final contendo todas as aulas. A distribuição de pontos sugerida é de 80% do valor total para as aulas práticas (aluno e grupo) e os 20% restantes para o relatório.

Após a montagem completa do controlador, este pode ser utilizado em outras aulas práticas de controle: análise de reposta (transitória e estacionária), sintonia do PID,

estabilidade, índices de desempenho, etc. Ele pode até mesmo ser usado como um componente de aulas práticas de Automação.

Uma atividade extra é o desenho e confecção de uma placa de circuito impresso e a montagem do controlador. Desta forma, os alunos têm o prazer de ver um produto final do seu trabalho. Geralmente, esta atividade é feita com entusiasmo pelos alunos.

Outro ponto importante a ser explorado é a proposição de modificações e melhorias do projeto, feitas pelos alunos. Assim, eles podem exercitar a criatividade e ter um aprendizado ativo. Além disso, as sugestões podem contribuir para melhorar o circuito proposto e, portanto, a aula da próxima turma.

3. ESTRUTURA DO CONTROLADOR

Foi escolhida a equação clássica de um controlador PID, Equação (1), onde os três parâmetros são: o ganho proporcional Kp , o tempo de integração Ti e o tempo de derivação Td . Esta é a equação mais utilizada na literatura.

$$U(s) = Kp \cdot \left(1 + \frac{1}{Ti \cdot s} + Td \cdot s \right) \cdot E(s), \quad (1)$$

onde: $U(s)$ é o sinal de controle e $E(s)$ o erro atuante.

Além da estrutura acima, o controlador aqui proposto possibilita que se aplique a ação derivativa no sinal de realimentação. Isto permite que seja verificada na prática a diferença causada por esta mudança. Abaixo é apresentada a equação com a derivação aplicada à realimentação:

$$U(s) = Kp \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{Ti \cdot s} \right) \cdot E(s) - Td \cdot s \cdot C(s) \right], \quad (2)$$

onde: $C(s)$ é o sinal de saída da planta.

As partes integral e derivativa da ação de controle podem ser inibidas. Para isso deve-se aumentar ao máximo o tempo de integração Ti e “zerar” o tempo de derivação Td , respectivamente. Isto pode ser feito quando o processo não necessita destas ações de controle e também na sintonia do controlador utilizando o método de Ziegler-Nichols (OGATA, 2000).

A ação integral é utilizada basicamente para corrigir erros em regime estacionário (OGATA, 2000). Por este motivo, não é sempre necessário utilizar esta ação no regime transitório. Em alguns casos isto pode até ser prejudicial ao controle, pois no regime transitório podem existir erros grandes que levam o integrador à saturação e a malha à instabilidade. Este efeito é conhecido como *integrator windup* (RUNDQWIST, 1990).

Para contornar este problema é implementado o circuito de *anti-windup*, que trunca o erro num limite predeterminado antes da ação integral. Assim, o integrador fica permanentemente ativo no regime estacionário e tem um peso pequeno durante o regime transitório. Este circuito pode ser desabilitado.

4. BLOCOS FUNCIONAIS

Na indústria, existe uma padronização com relação aos sinais elétricos que são gerados pelos conversores/transdutores e aos que vão controlar os atuadores. Estes sinais podem ser

de corrente (padrão de 4,0 a 20mA) ou de tensão (padrão de 1,0 a 5,0V). O controlador PID proposto pode trabalhar tanto com sinais em tensão como em corrente.

O amplificador operacional utilizado é o LM324 (Linear Databook, 1986). O circuito integrado tem quatro amplificadores operacionais, de grande ganho, com compensação interna de frequência (FAULKENBERRY, 1982). A alimentação é feita através de uma fonte simétrica, de +15V e -15V externa à placa do controlador. A potência dos resistores utilizados é de 1/4W.

Em alguns circuitos é utilizado um resistor, que liga uma das entradas do amplificador operacional ao terra, para eliminar possíveis problemas com a corrente de polarização de entrada (FAULKENBERRY, 1982).

4.1. Entrada da realimentação (*buffer de entrada*)

Este é o circuito por onde o controlador recebe o sinal medido na saída da planta (realimentação).

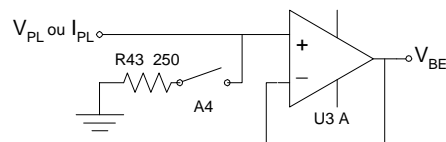


Figura 1. Circuito de entrada da realimentação (*buffer*).

Conforme pode se ver na Figura 1, o circuito é apenas um *buffer* de ganho unitário (para referência em tensão – chave *A4* aberta) e um conversor corrente para tensão (para referência em corrente). O circuito tem uma impedância de entrada alta para tensão (entrada do amplificador operacional) e baixa para corrente ($R_{43} = 250\Omega$), para não carregar o sistema remoto.

4.2. Referência (*set-point*)

A referência pode ser local, ajustada no próprio controlador através de um potenciômetro, ou pode ser remota, vir de outra placa ou sistema (computador, por exemplo). Uma vantagem de se ter referência remota é a possibilidade de implementar uma “cascata de controladores”, onde o controlador externo determina a referência do(s) controlador(es) interno(s). Tal configuração é bastante utilizada na indústria. A figura abaixo apresenta o circuito:

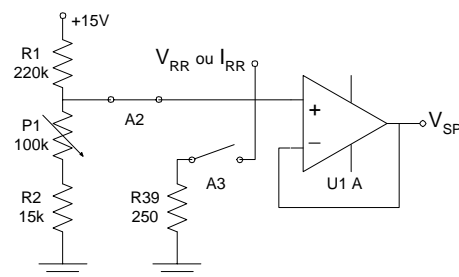


Figura 2. Circuito de referência (local e remota).

Para a referência local, são utilizados um divisor de tensão com um potenciômetro e um seguidor de tensão (*buffer*) para reduzir o efeito de carregamento. Quando o potenciômetro P_1

estiver em zero (0Ω), deseja-se que a saída seja aproximadamente 1,0V. Assim, são usados $R_1 = 220k\Omega$ e $R_2 = 15,71k\Omega \approx 15k\Omega$ (valor comercial). Quando o potenciômetro P_1 estiver no máximo, a saída deve ser 5,0V, portanto $P_1 = 95k\Omega \approx 100k\Omega$.

Para se utilizar referência remota deve se abrir a chave $A2$. O funcionamento do circuito é igual ao do circuito de *Entrada da Realimentação* (subseção 4.1). Para referência remota em tensão abre-se a chave $A3$ e para corrente esta se fecha esta chave.

4.3. Subtrator

O sinal de entrada do controlador propriamente dito é o sinal de erro, que é obtido subtraindo-se o sinal de realimentação V_{BE} do sinal de referência V_{SP} .

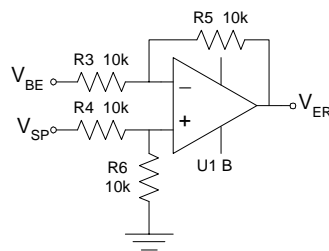


Figura 3. Circuito subtrator (referência – realimentação).

No regime estacionário, ou próximo dele, o sinal de erro tem uma amplitude pequena. Neste caso, não existem problemas de saturação dos operacionais, a não ser quando o ganho proporcional K é muito grande. Já no regime transitório, os amplificadores podem chegar à saturação, mas neste caso a saída do controlador é o valor máximo (ou mínimo) de ação do atuador, devido à padronização da saída.

Para obter ganho unitário no circuito mostrado acima (Figura 3), R_4 deve ser igual a R_6 e R_3 deve ser igual a R_5 . Todos resistores são de valor igual: $10k\Omega$.

4.4. Ação proporcional

A constante proporcional K_p está no bloco *Multiplicador*, subseção 4.10. Para implementar a parcela proporcional ao erro, é utilizado um amplificador operacional na configuração inversora com ganho unitário, mostrado na figura abaixo:

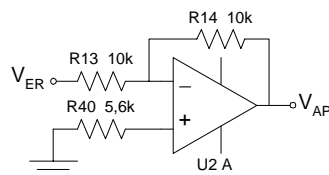


Figura 4. Circuito da ação proporcional.

4.5. Ação integral

É proposto um circuito integrador na configuração inversora. A relação entre a tensão de entrada e a de saída considerando o integrador ideal (desprezando R_{15} , R_{16} e R_{17}) é dada por:

$$V_{AI}(t) = -\frac{1}{P_3 \cdot C_1} \int V_{ER}(t) \cdot dt \quad (3)$$

Portanto, o tempo de integração T_i é igual ao produto de P_3 e C_1 . Conforme a Figura 5, ele é projetado para variar na faixa de 2,2ms a 220ms ($C_1 = 2,2 \mu\text{F}$ e $P_3 = 100\text{k}\Omega$). Para outras aplicações, estes valores podem ser alterados através da troca do potenciômetro P_3 e/ou do capacitor C_1 .

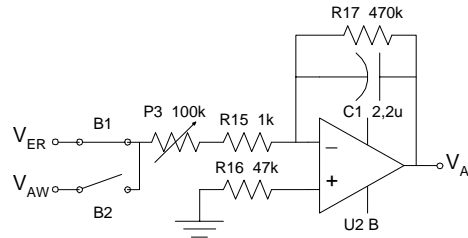


Figura 5. Circuito da ação integral.

Para solucionar o problema de funcionamento em baixas frequências, é colocado o resistor R_{17} de $470\text{k}\Omega$ em paralelo com o capacitor. Além disso, existe o R_{15} de $1,0\text{k}\Omega$ em série com o potenciômetro.

4.6. Anti-windup

Muitos sistemas de controle são sintonizados para operar numa faixa relativamente estreita. Para grandes mudanças de referência ou perturbações, o sinal de controle pode saturar devido ao integrador, levando o sistema a operar em “malha aberta” (RUNDQWIST, 1990).

O circuito de *anti-windup* faz com que o integrador atue somente próximo do regime estacionário, quando o erro é normalmente pequeno. Isto evita a saturação do integrador devido a fortes transitórios, ou grandes erros.

O circuito implementado, Figura 6, não anula a entrada do integrador quando o erro é grande, mas passa para o integrador o sinal truncado. O limite projetado deste corte é de 25% do erro máximo.

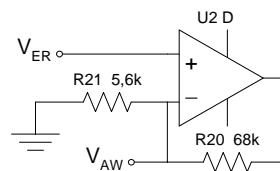


Figura 6. Circuito *anti-windup*.

O sinal de erro é na faixa de $-4,0$ a $+4,0\text{V}$, portanto, o circuito permite que passe erros na faixa de $-1,0$ a $+1,0\text{V}$. Como o ganho desejado é de 13,5, os valores são: $R_{20} = 68\text{k}\Omega$ e $R_{21} = 5,44\text{k}\Omega \approx 5,6\text{k}\Omega$.

É importante lembrar, que na prática, quando o amplificador operacional estiver saturado, a sua saída é em torno de $\pm 13,5\text{V}$, ou seja, $\pm 90\%$ da tensão de alimentação (FAULKENBERRY, 1982).

4.7. Ação derivativa

É utilizado um circuito derivador na configuração inversora. A relação entre a tensão de entrada e a de saída considerando o derivador ideal (desprezando R_{18} e R_{19}) é dada por:

$$V_{AD}(t) = -(P_4 \cdot C_2) \cdot \frac{dV_{ER}(t)}{dt} \quad (4)$$

Portanto, o tempo de derivação T_d é igual ao produto de P_4 por C_2 . Ele é projetado para variar na faixa de 0 a 4,4s. O capacitor C_2 é de $2,2\mu\text{F}$ e o potenciômetro P_4 é de $2,0\text{M}\Omega$.

De forma análoga ao problema em baixas frequências do integrador, o derivador apresenta problemas em altas frequências. Para resolver este problema, no circuito (Figura 7) é colocado o resistor $R_{18} = 100\Omega$ em série com o capacitor C_2 .

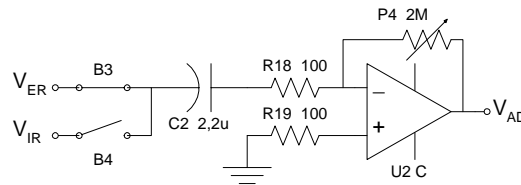


Figura 7. Circuito da ação derivativa.

4.8. Inversor da realimentação

Pode-se alterar o funcionamento do controlador PID colocando o derivador na malha de realimentação. Assim, ao invés de se derivar o sinal de erro V_{ER} , calcula-se a derivada do sinal de realimentação V_{BE} .

Quando a ação derivativa estiver atuando na realimentação, é necessária uma inversão para se obter o sinal algébrico adequado. Para isso, é implementado um amplificador inversor com ganho unitário, mostrado abaixo:

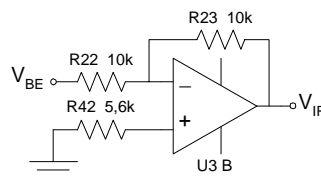


Figura 8. Circuito inversor da realimentação.

4.9. Somador

Para somar as três ações de controle (V_{AP} , V_{AI} e V_{AD}) é utilizado um circuito somador (apresentado na Figura 9) de três entradas, na configuração não inversora e ganho unitário.

Os três resistores de entrada: R_7 , R_8 e R_9 , são de $100\text{k}\Omega$. Para que o somador tenha ganho unitário, a relação entre R_{11} e R_{10} deve ser igual a dois, portanto, são usados $R_{11} = 68\text{k}\Omega$ e $R_{10} = 33\text{k}\Omega$, que é uma combinação de valores comerciais próxima.

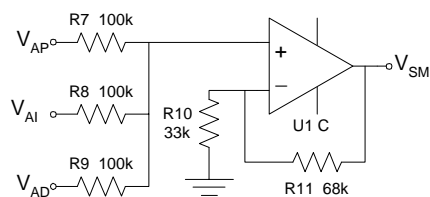


Figura 9. Circuito somador (soma as ações de controle).

4.10. Multiplicador (ganho K_p)

Este bloco, Figura 10, é um amplificador inversor com ganho variável. Ele é inversor para que o sinal de controle tenha a polaridade correta, pois as três ações de controle estão na configuração inversora.

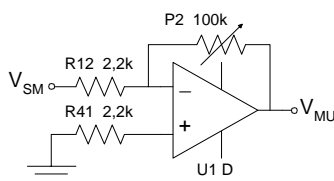


Figura 10. Circuito multiplicador (ganho K).

O ganho proporcional (parâmetro K_p do PID) pode ser variado numa ampla faixa. Ele é projetado para variar de zero a aproximadamente 50, que é suficiente para a maioria das aplicações didáticas. O potenciômetro P_2 é de $100k\Omega$ e, portanto, o resistor R_{12} deve ser de $2,0k\Omega \approx 2,2k\Omega$.

4.11. Sinal de controle

A saída do multiplicador é no máximo na faixa de operação do amplificador operacional: de -15 a $+15V$. Este sinal é convertido para $-2,0$ a $+2,0V$ através de um divisor de tensão resistivo que é então somado a $3,0V$, convertendo assim o sinal para a faixa desejada (padrão de $1,0$ a $5,0V$).

Para conseguir os $3,0V$ é implementado um divisor de tensão, alimentado com $+15V$ e com dois resistores: $R_{24} = 27k\Omega$ e $R_{25} = 6,75k\Omega \approx 6,8k\Omega$.

Além disso, é implementado outro divisor de tensão com os resistores R_{26} e R_{27} para converter a saída do amplificador operacional do bloco multiplicador para $-2,0$ a $+2,0V$ (ganho de $0,133$). Os resistores são: $R_{26} = 18k\Omega$ e $R_{27} = 2,77k\Omega \approx 2,7k\Omega$.

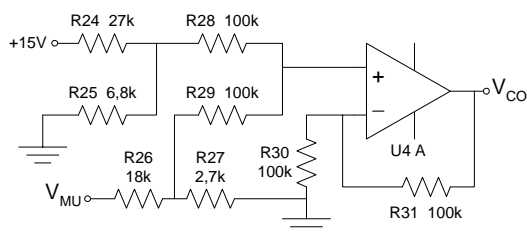


Figura 11. Circuito do sinal de controle.

Os dois sinais de saída dos divisores de tensão são aplicados num circuito somador não inversor de ganho unitário, conforme pode ser visto na Figura 11.

4.12. Saída de controle em tensão e *hold*

Em algumas situações é necessário abrir a malha de controle, desabilitando o controlador, mas sem "desligar" o sistema, para testes ou observações da planta. No projeto proposto isto é possível passando-se o controlador para "manual".

Ao passar o controlador para manual, através da chave A/M, Figura 12, o circuito de *hold* mantém a saída do controlador "congelada" por alguns minutos. O circuito implementado é simplesmente um capacitor, que fica carregado com a tensão do sinal de controle V_{CO} , ligado a um *buffer*, para que o capacitor não descarregue rapidamente.

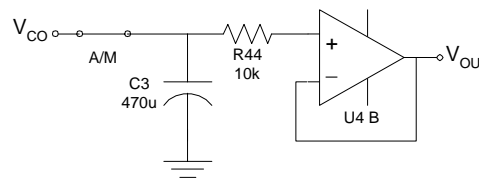


Figura 12. Circuito de *hold* (saída de controle em tensão).

O circuito é projetado para manter a saída durante um intervalo de tempo mínimo em torno de 10 minutos, variando apenas 1% da sua tensão máxima.

Sendo a corrente de polarização (FAULKENBERRY, 1982) do LM324 típica de 45nA (Linear Databook, 1986) e a variação de tensão máxima de 1% = 0,05V (valor máximo = 5,0V), o valor mínimo do capacitor é aproximadamente:

$$C_3 = \frac{i \cdot \Delta T}{\Delta V} = \frac{45 \text{ nA} \cdot 600 \text{ s}}{0,05 \text{ V}} = 420 \text{ } \mu\text{F} \quad (5)$$

Portanto, o capacitor usado é um eletrolítico de 470µF / 25V. Entre este capacitor e a entrada não inversora do amplificador operacional é colocado o resistor R_{44} no valor de 10kΩ, que é uma proteção do operacional para o caso do capacitor estar carregado quando o controlador for desligado.

4.13. Saída de controle em corrente

O circuito é um conversor tensão/corrente (FAULKENBERRY, 1982), que tem como entrada o sinal de controle em tensão V_{OU} . A corrente de saída I_{OU} é proporcional à tensão de entrada devido à realimentação e o resistor R_{38} .

Como quando a entrada for 1,0V a saída deve ser 4,0mA e quando a entrada for de 5,0V a saída deve ser 20mA, o valor do R_{38} é de 250Ω. A figura abaixo apresenta o circuito:

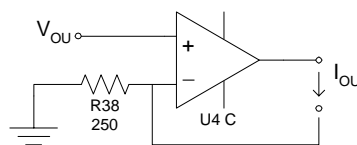


Figura 13. Circuito de saída de controle em corrente.

A corrente máxima de saída do LM324 é de 40mA, independente da tensão de alimentação (Linear Databook, 1986). Porém, neste circuito, existe um valor de resistência limite para a carga: 425Ω .

5. TESTES BÁSICOS

Foi montado um protótipo do controlador numa placa de circuito impresso. Na placa todas as entradas (fonte de alimentação, realimentação e referência remota) e saídas (sinal de controle) são feitas através de conectores e existem pontos para se medir o valor dos potenciômetros (parâmetros).

Para testar o funcionamento básico do controlador PID foi utilizado um sistema de primeira ordem (filtro passa-baixas passivo), implementado com um resistor e um capacitor. O valor do resistor utilizado é $270k\Omega$, e o capacitor é de $0,56\mu F$, portanto, a planta tem uma constante de tempo de 151,2ms.

O teste foi realizado usando um degrau (onda retangular de 1,4V pico a pico e *offset* de 3,0V) como referência (remota). A duração do degrau aplicado é de 800ms, tempo suficiente para se observar a resposta, haja vista que este tempo é superior a cinco vezes a constante de tempo da planta. Este procedimento foi repetido diversas vezes alterando se as condições de funcionamento do controlador.

As figuras abaixo apresentam os resultados de alguns dos testes realizados com o protótipo. A calibração do osciloscópio é: Escala de tensão: 0,5V por divisão; Escala de tempo: 200ms por divisão. Eixo horizontal em 3,0V.



Figura 14. Teste básico do controlador.

A Figura 14 apresenta a resposta para dois valores do ganho K_p . À esquerda $K_p = 5,0$ e à direita $K_p = 45$ (Observação: $T_i = 220ms$ e $T_d = 0$). A redução do erro em regime estacionário é clara.

A Figura 15 mostra o uso do *anti-windup*. À esquerda o baixo valor de T_i torna o sistema muito oscilatório. Após ativar o *anti-windup* (direita), as oscilações diminuem consideravelmente. Os parâmetros são: $K_p = 25$, $T_i = 2,2ms$ e $T_d = 0$.

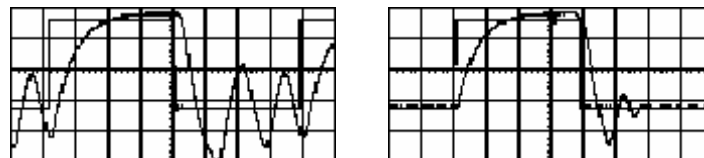


Figura 15. Teste do *anti-windup*.

A Figura 16 apresenta a alteração do local de atuação do derivador: à esquerda na malha direta e à direita na realimentação. Os parâmetros são: $K_p = 25$, $T_i = 154ms$ e $T_d = 660$. A resposta fica suave.

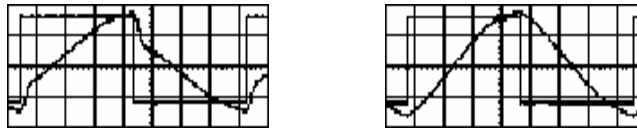


Figura 16. Teste de local do derivador.

6. CONCLUSÃO

O controlador proposto é simples, barato e eficiente. Ele permite estudar controle em malha fechada na prática, com os recursos básicos dos controladores PID industriais.

O funcionamento do controlador é satisfatório. Todos os parâmetros, as configurações (*anti-windup* e derivação na realimentação) e os demais blocos funcionam perfeitamente.

Os alunos demonstram entusiasmo e bastante interesse, fato confirmado pelas discussões e pelos questionamentos sobre alguns fenômenos observados. Fenômenos estes de caráter estritamente prático ou que às vezes não são abordados na sala de aula.

Após estas aulas práticas, o controlador PID deixa de ser uma “caixa preta”. Além disso, os alunos aumentam o interesse pelo assunto e têm maior confiança na utilização das ações básicas de controle. Eles são encorajados a usar a criatividade e motivados a fazer projetos deste tipo e implementá-los.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FAULKENBERRY, L. M. **An introduction to operational amplifiers, with linear IC applications**. New York: John Wiley & Sons, 1982.

HILLBORN, R. B. Team learning for engineering students. **IEEE Trans. On Education**. v. 37, n. 2, p. 207-211, 1990.

Linear Databook, National Semiconductor, 1986.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

RUNDQWIST, L. Anti-reset windup for PID controllers. In: Preprints of THE XI IFAC WORLD CONGRESS. Tallinn, Estonia, URSS, 1990.

SEBORG, D. E. A perspective on advanced strategies for process control. **Modeling, Identification and Control**, UK, v. 15, n. 3, p. 179-189, 1994.

ANALOG PID CONTROLLER: A DIDACTIC APPROACH IN LABORATORY

***Abstract:** The article proposes the practice implementation of an analog PID controller as didactic resource. A suggestion of methodology and the electronic circuits are presented. The assembly allows understanding the PID controller operation and to study closed loop control in the practice, motivating the students' interest by these subjects. The controller is modular and has the basic resources of an industrial PID controller. The implementation is done using operational amplifiers and discrete electronic components of common use. Its operation is satisfactory and some results of tests are presented.*

Keywords: Control education; Laboratory education; PID controllers; Analog Control; Control circuits.