

IV Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos ISSN : 1984-7521	Artigo: 06
	Páginas: 40 - 47

MÓDULO DIDÁTICO PARA ESTUDO DE CONTROLADOR PID ANALÓGICO

Alisson L. Daga¹, Marcelo K. Lenzi² e Thiago Dalgalo de Quadros³

¹Universidade Federal do Paraná, Usinas Piloto de Tecnologia Química – alisson.daga@ufpr.br

²Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – lenzi@ufpr.br

³Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – dalgalo.thiago@gmail.com

Resumo. Com o propósito de desenvolver um módulo didático para visualização e fácil compreensão de controladores, para as disciplinas que envolvam controles de processo na engenharia química, é apresentado um controlador PID analógico. Este controlador é baseado em amplificadores operacionais, e estes são utilizados nas suas várias configurações para o condicionamento de sinais em operações matemáticas. Para a visualização dos dados em tempo real, utiliza-se os conversores A/D do microcontrolador na plataforma Arduino e a função *plotter serial* do software Arduino IDE, para que as variáveis de *set-point*, manipulada e controlada possam ser analisadas. Para a validação do módulo, foi realizado seis testes, dois em cada configuração P, PI e PID. A apresentação deste módulo didático no ensino, vem para auxiliar o aluno a assimilar de maneira mais efetiva o conteúdo visto na literatura, observando o controlador realizado fisicamente atuando no processo.

Palavras-chave: Controlador Analógico, PID, Arduino, Ensino, Tecnologia na Educação.

1. INTRODUÇÃO

Com o advento da indústria, surgiu a necessidade de obter processos de produção cada vez mais estáveis. Baseado nesta demanda, o controle automático de processos adveio para auxiliar a indústria cumprir especificações de qualidade dos produtos mais restritas, cumprindo requisitos de segurança e ambientais, bem como o aumento da competitividade no mercado, auxiliando assim, a redução de custos operacionais (Seborg et al., 2003).

O objetivo fundamental de uma malha de controle é manter as variáveis controladas em seus valores especificados pelo projeto, ou *set-points*. Para controlar um processo industrial, é preciso inicialmente definir quais serão as variáveis controladas e medi-las, fazendo uso de sensores, como medidores de temperatura, pressão, composição, etc. Para o controle destas variáveis, o algoritmo mais utilizado industrialmente é o PID (Proporcional Integral Derivativo) em malha feedback, por ser de fácil implementação traz bons resultados (Ogata, 2004).

Antes da difusão dos computadores, que proporcionaram a implementação dos controladores digitais, baseados em amostragem e discretização, a implementação de controladores PID eram feitas através de circuitos analógicos em sistemas contínuos. Os parâmetros do controlador eram ajustados a partir da alteração da resistência em pontos específicos do circuito.

As entradas e saídas de um controlador PID analógico são funções de tensão e também contínuas no tempo, portanto o tratamento do modelo pode ser realizado sem necessidade de discretizar o sistema, utilizando por exemplo o domínio de Laplace para o equacionamento. Entretanto, para fácil visualização dos resultados, o *output* pode ser discretizado com auxílio de um microcontrolador.

Após anos de desenvolvimento e miniaturização de componentes eletrônicos, foi desenvolvido na Itália por Massimo Banzi, em 2005, uma plataforma para auxiliar em

14 e 15 de março de 2019
Curitiba - Paraná

problemas que acometiam o Instituto de Design de Ivrea (Arduino, 2012). Os estudos de Banzi contribuíram para o surgimento de uma família de microcontroladores, destinada a um público com pouca ou nenhuma familiaridade com eletrônica, facilitando assim a integração de componentes eletrônicos desde projetos acadêmicos a *hobbies* nesta área. Neste meio, surgiu o Arduino®, uma família de microcontroladores onde tanto o projeto elétrico quanto o ambiente de desenvolvimento integrado são livres.

É importante para o engenheiro químico dominar e compreender o funcionamento de uma estratégia de controle, bem como a influência dos termos proporcional, integral e derivativo tanto para rastreamento de *set-point* quanto para rejeição de perturbação. Com esta temática, foi desenvolvido um controlador PID analógico, com o uso de componentes eletrônicos de fácil acesso, integrando o Arduino® Uno para realizar a aquisição de dados, a fim de proporcionar um módulo didático, de baixo custo e livre acesso para análises de estratégia de controle e discretização de sistemas para os cursos de Controle de Processos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do módulo didático de um controlador PID, foi utilizado toda uma topologia analógica na construção. Apenas para a coleta dos dados que foi utilizado conversores A/D, para que o comportamento em relação às diversas perturbações ou variações possam ser didáticas e de fácil visualização.

Utilizando o amplificador operacional, o qual é um dos circuitos integrados mais clássicos da eletrônica, foi elaborado o PID analógico. O amplificador operacional foi a base dos 5 circuitos utilizados em um PID analógico, que são o amplificador subtrator, inversor, integrador, derivativo e somador (Wendling, 2010).

Na literatura da eletrônica analógica, podemos observar os 5 diferentes tipos de circuitos e seus componentes, e que foram utilizados no módulo didático, conforme Fig 1 abaixo.

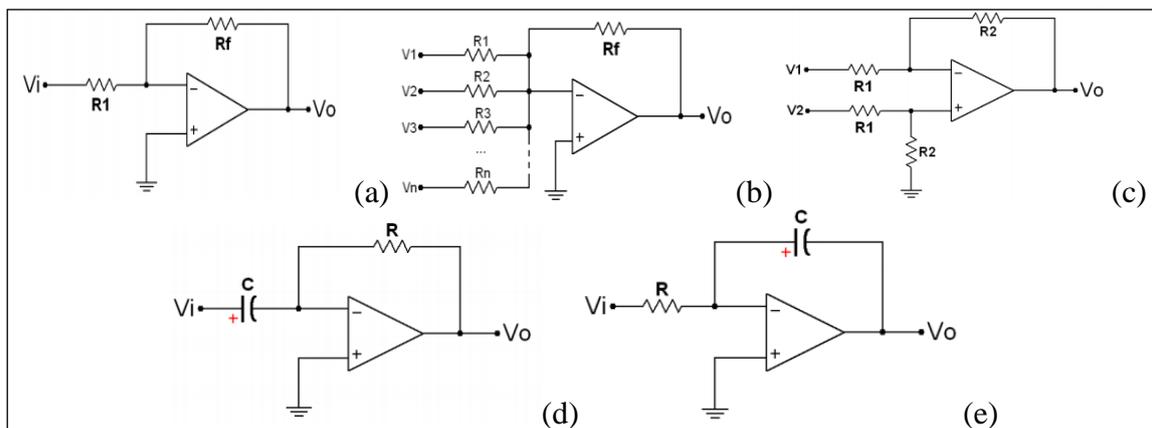


Figura 01 – Circuitos com amplificadores. (a) Amplificador Inversor; (b) Amplificadores Somador; (c) Amplificador Diferencial ou Subtrator; (d) Amplificador Diferenciador; (e) Amplificador Integrador.

Fonte: Os Autores (2019).

Na construção do módulo didático, foi utilizado como amplificador operacional, o CI LM741 o qual possui uma impedância de entrada muito alta, na ordem de $2\text{ M}\Omega$, e uma impedância de saída baixa na ordem de $75\ \Omega$. Estes valores de impedância nos dizem que o sinal é amplificado na sua saída utilizando uma corrente muito baixa na entrada.

Para aquisição de dados em tempo real, auxiliando na visualização da dinâmica do processo, foi utilizado um microcontrolador Arduino® Uno como conversor A/D. Não foram enviados nenhum dado para o circuito analógico, somente leitura das

variável controlada, variável manipulada e *set-point*. O intervalo de discretização utilizado para a coleta dos dados foi de 0,5 segundo, dado que o sistema possui uma dinâmica relativamente lenta, a partir da experiência de trabalhos similares pelos autores. Com isso, os gráficos apresentados estão apresentados em uma linha contínua, representando uma aproximação do que ocorre no circuito analógico.

Foram utilizados resistores comerciais de filme de carbono, com uma tolerância de 5% com potência de dissipação de ¼ W. Os capacitores utilizados nos circuitos diferenciador e integrador são do tipo eletrolítico, com tensão de isolamento de 25 V. A lâmpada utilizada para aquecer o sensor de temperatura LM35 é do tipo 12 V 35 W. Foi utilizado um ventilador comumente encontrado em lojas de materiais eletrônicos de 12 V 0.20 A. Um regulador de tensão positiva KA317, para fornecer potência a ventilador, controlado pela tensão de referência do PID. A fonte utilizada para alimentação do circuito é chaveada e fornece +12 V, 0 V e -12 V.

O propósito do controlador analógico, é demonstrar de forma didática e em tempo real, o comportamento de um controlador em um sistema de aquecimento por lâmpada e resfriamento pelo ar, conforme figura abaixo. A variável controlada no processo é a temperatura próximo a lâmpada, como demonstrado na Fig 2, a qual dissipa uma potência constante, e cabe ao ventilador, nossa variável manipulada manter a temperatura do ar em torno da lâmpada no *set-point* que o usuário definir.

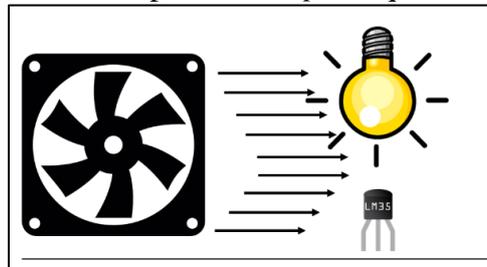


Figura 2 - Sistema lâmpada, cooler e sensor. Fonte: Os Autores (2019).

Para que o módulo de controle fosse realizado em meio físico, utilizando ferramentas de projeto de esquemas elétricos, foram definidos as ligações e os caminhos para a confecção da placa PCB. O circuito esquemático é apresentado na Fig 3 abaixo. R representa os resistores e os potenciômetros, C os capacitores e U os circuitos integrados, compreendidos pelo LM35, LM741 e o motor do ventilador (U4).

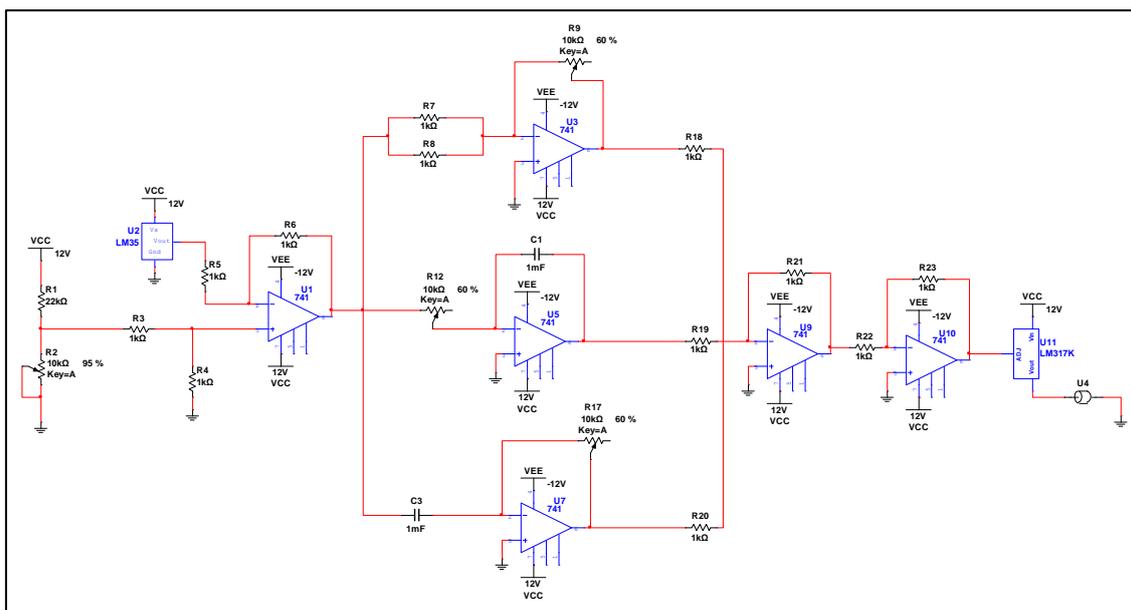


Figura 3 - Esquemático proposto para controlador PID analógico. Fonte: Os Autores (2019).

As equações que representam o sistema formado pelos amplificadores operacionais são relacionadas a cada elemento do PID.

Os sinais de *set-point* e de temperatura passam pelo amplificador diferencial ou subtrator, para termos como saída o erro no tempo:

$$V_o(t) = \frac{R_2}{R_1}(V_2(t) - V_1(t)) \quad (1)$$

Onde na Eq. 1, V_o é o erro entre o *set-point* V_2 e a variável controlada V_1 , neste caso a temperatura lida pelo LM35. Os resistores R_2 e R_1 , são de 1 k Ω para que o ganho deste AOP fosse unitário.

Com o sinal do erro que o amplificador diferencial tem como saída, passamos pelos 3 componentes do sistema de controle, que estão em paralelo. O primeiro que será considerar é o proporcional, que tem a seguinte resposta dada pelo amplificador inversor:

$$V_o(t) = -\frac{R_f}{R_1}V_i(t) \quad (2)$$

Na Eq. 2, a tensão $V_i(t)$ é o erro do processo, e que tem o ganho dado pelas resistências R_1 fixa em 1 k Ω e o R_f dada por um potenciômetro de 10 k Ω . Tendo assim um K_c com um *range* de 0 a 10.

A resposta dada pelo amplificador integrador, é constituída pela soma da área de $V_i(t)$ em um período de tempo, aplicada na entrada do circuito, que no caso é o erro do processo, e a resposta é dada pela Eq. 3.

$$V_o(t) = -\frac{1}{R * C} \int_0^t V_i(t)dt \quad (3)$$

Neste circuito integrador, foi considerado para o R um potenciômetro de 1 k Ω e um capacitor fixo de 1 mF. Formando assim o K_i do sistema com um *range* de 1 a $+\infty$.

Para o amplificador diferenciador, que é a parte do circuito que realiza a operação matemática de diferenciação, a resposta é uma saída diretamente proporcional a inclinação da função da tensão de entrada. Assim temos a Eq. 4 para o diferenciador.

$$V_o(t) = -RC \frac{dV_i(t)}{dt} \quad (4)$$

No circuito diferenciador, para o R foi utilizado um potenciômetro de 10 k Ω , e uma capacitor de 1 mF, tendo assim um *range* para o K_d de 0 a 10.

Na malha de controle *feedback*, a entrada do controlador PID será em termos de tensão, entretanto será a diferença entre o sinal de tensão vinda do potenciômetro de *set-point* e a tensão vinda do sensor LM35. Para o cálculo do esforço do controlador, a equação completa da lei de controle, utilizando como variável o erro $e(t)$, é dada pela Eq. 5:

$$u(t) = -\left\{ \frac{R_f}{R_1} e(t) + \frac{1}{R * C} \int_0^t e(t)dt + RC \frac{dV_i(t)}{dt} \right\} \quad (5)$$

Após o amplificador somador, foi utilizado um amplificador inversor com ganho unitário para que o esforço de controle seja positivo, ou seja, o valor de $u(t)$ foi multiplicado por -1 na equação acima.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig 4 apresenta o módulo experimental montado. Os potenciômetros são para ajuste dos valores de *set-point* e dos parâmetros proporcional, integral e derivativo do controlador PID.

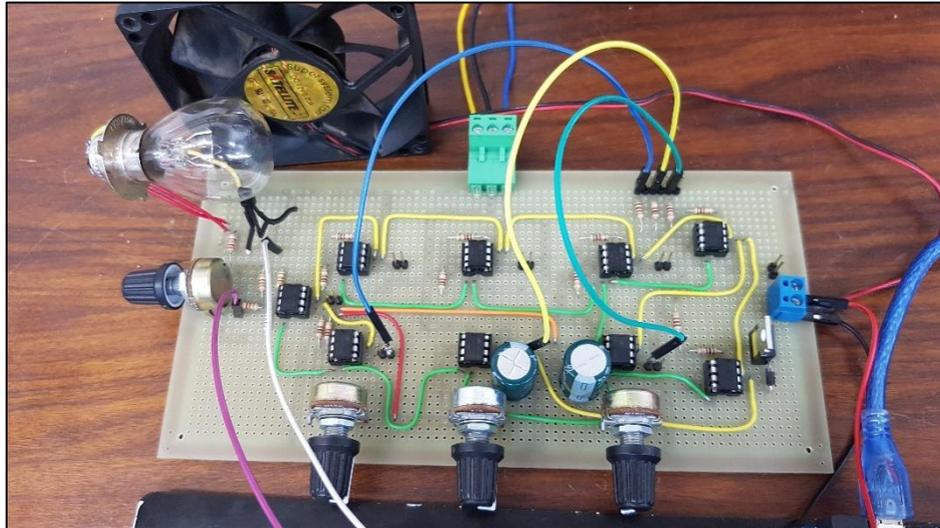


Figura 4 - Módulo de controle *feedback* com controlador PID experimental. Fonte: Os Autores (2019).

Para validação do módulo de controle, foram feitos testes avaliando a performance dos termos P, PI e PID separadamente, no resultado para rastreamento de *set-point*. Baseado nas equações apresentadas e nos valores de resistência e capacitância dos módulos do controlador PID, a Tabela 1 apresenta os limites para os parâmetros do controlador.

Tabela 1 - Limites de operação para os parâmetros do controlador PID. Fonte: Os Autores (2019).

Parâmetros	Limites
P	0 a 10
I	1 a $+\infty$
D	0 a 10

Para a determinação dos valores das constantes dos controladores P, I e D, foi feito a medição dos valores de referência dos potenciômetros, e ajustados utilizando um multímetro. A tabela 2 apresenta os valores utilizados para a avaliação do controlador.

Tabela 2 - Exemplos para validação dos termos P, I e D do controlador. Fonte: Os Autores (2019).

Exemplo	Comparativo		
	P	I	D
1	2	0	0
	10	0	0
2	2	1	0
	2	2	0
3	2	1	1
	2	1	5

A Fig 5 apresenta as respostas de temperatura e potência do ventilador para diferentes valores de K_c com o uso de um controlador P em malha *feedback*. Ao utilizar um controlador proporcional, é intrínseco à resposta a existência de *offset*, que é a

diferença entre a variável controlada e o *setpoint* no estado estacionário. Pode-se observar que, para um valor de $K_c = 10$ a temperatura medida aproximou-se mais do *setpoint* do que ao utilizar um $K_c = 2$. Apesar de que, com o K_c mais alto a variável controlada aproximou-se mais do *setpoint*, sempre haverá a existência de *offset* para controladores P. A Eq. 6 abaixo apresenta o cálculo do *offset*, sendo inversamente proporcional ao valor de K_c .

$$offset = \frac{M}{1 + K_p K_c} \quad (6)$$

Com relação ao esforço do controlador, para um valor de K_c elevado, o gasto energético do atuador é maior para trazer a variável controlada ao *setpoint*, tanto que pela Fig 5, os valores de tensão observados foram em média 30 e 62% para K_c de 2 e 10, respectivamente.

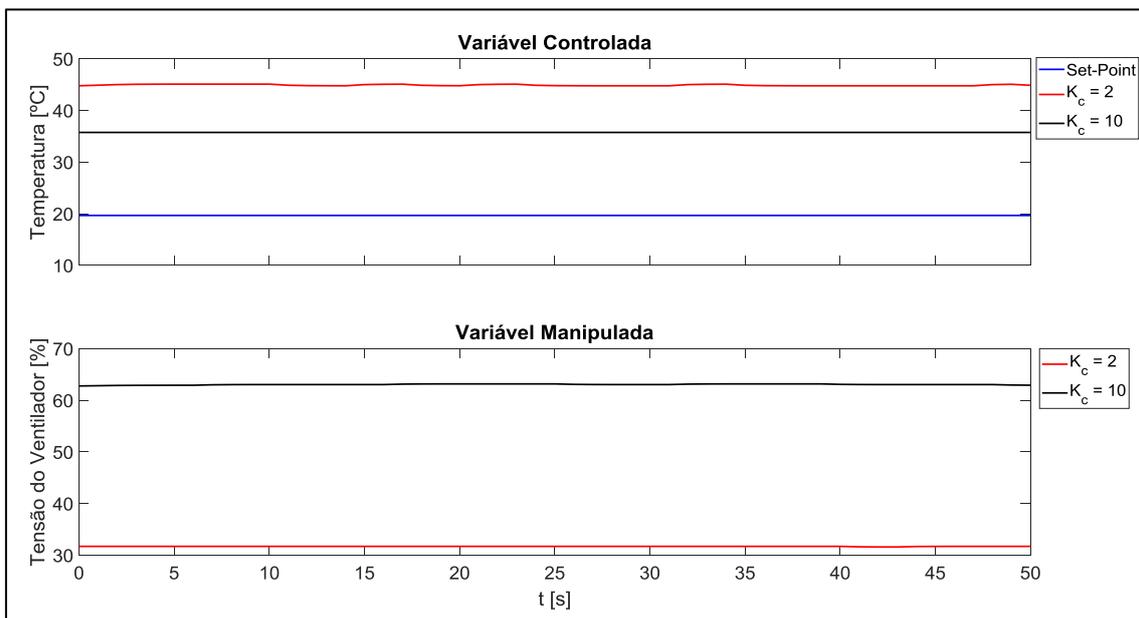


Figura 5 - Exemplo 1. Fonte: Os Autores (2019).

A Fig 6 compara as respostas do sistema para diferentes valores de K_i em um controlador PI em malha fechada. Observa-se que para valores menores do parâmetro integral, a resposta do processo é mais lenta, entretanto o *overshoot* também é reduzido, quando comparado à valores mais elevados de K_i . A oscilação presente na resposta da variável controlada pode também ser observada na variável manipulada, onde para $K_i = 1$ a subida do esforço do controlador é mais branda. Também pode ser observado a inexistência de *offset* na resposta.

Para interpretar matematicamente a relação da resposta com os valores de K_i , a Eq. 7 abaixo apresenta a resposta sub-amortecida para um sistema de 1ª ordem em malha com um controlador PI, resultando em um sistema de 2ª ordem em malha fechada. Quanto mais próximo de zero for o coeficiente de amortecimento, mais oscilatória será a resposta. Como o K_i está presente no denominador, de ξ , valores elevados do termo integral resultam em respostas mais oscilatórias, condizente com a Fig 6.

$$y(t) = M \left\{ \frac{K_c}{K_i \sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\frac{\xi t}{\tau}} \sin \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\tau} t \right\} + M \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\frac{\xi t}{\tau}} \sin \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\tau} t \right\}$$

$$\xi = \frac{K_p K_c + 1}{2 K_p \sqrt{K_i}} \sqrt{\frac{K_p}{\tau_p}}$$

$$\tau = \sqrt{\frac{\tau_p}{K_p K_i}}$$
(7)

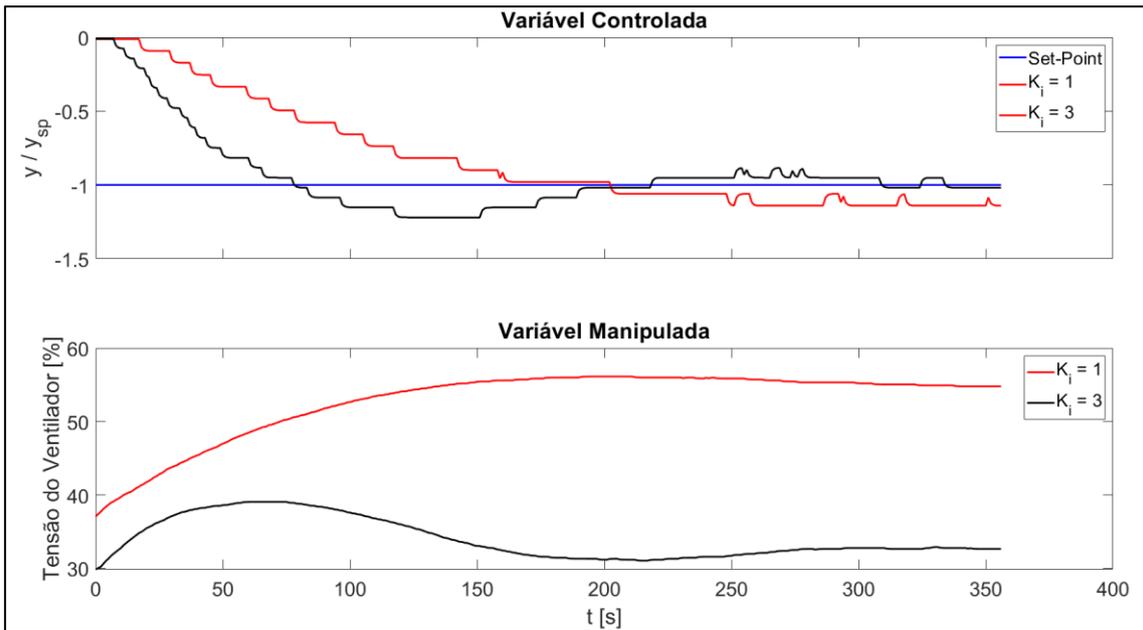


Figura 6 - Exemplo 2. Fonte: Os Autores (2019).

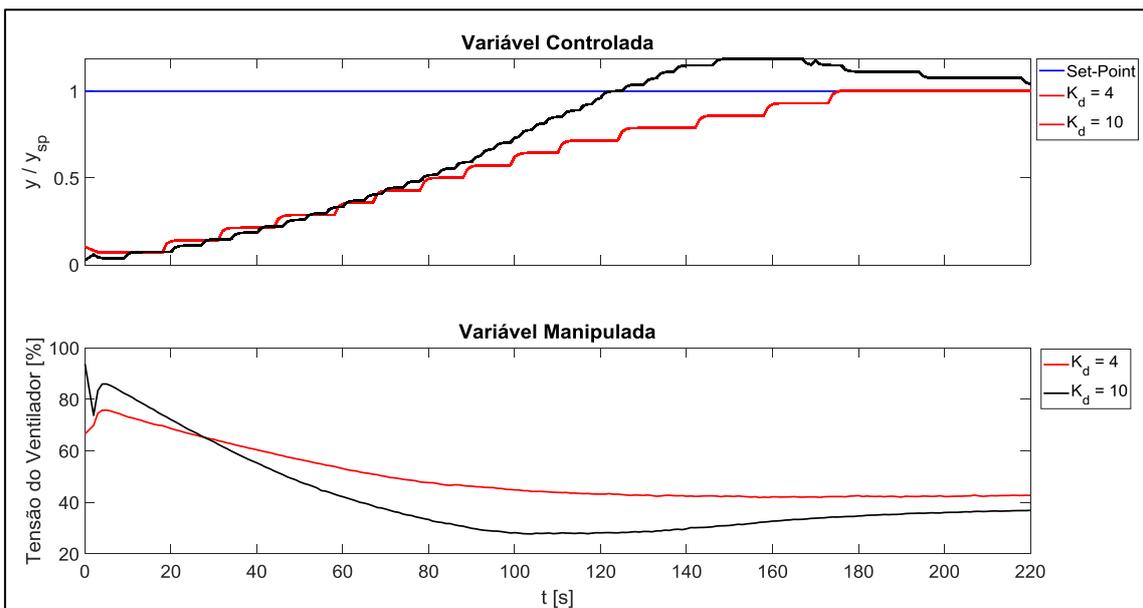


Figura 7 - Exemplo 3. Fonte: Os Autores (2019).

Na Fig 7, é apresentado o comparativo para diferentes níveis de K_d em um controlador PID com os parâmetros conforme Tabela 2. A derivada do erro representa a inclinação da função erro em um determinado instante de tempo. Com valores mais

altos de K_d , o termo derivativo possui um peso maior, ou seja, quando há a existência de erro, há uma ação de controle derivativa que antecipa a função erro através da derivada, reduzindo assim o *overshoot*. Entretanto, em meios com respostas ruidosas, valores elevados do termo derivativo podem levar a instabilidade do sistema, já que o valor da derivada em um ponto e outro imediatamente posterior terá grande variação.

Utilizando a ferramenta *Plotter Serial* do Arduino IDE, para visualização das variáveis de *set-point*, controlada e manipulada, o professor terá a disponibilidade de apresentar a turma, diferentes tipos de resposta de um circuito controlador PID.

A Fig 8 apresenta um exemplo de visualização dos dados no *plotter serial* do Arduino IDE.

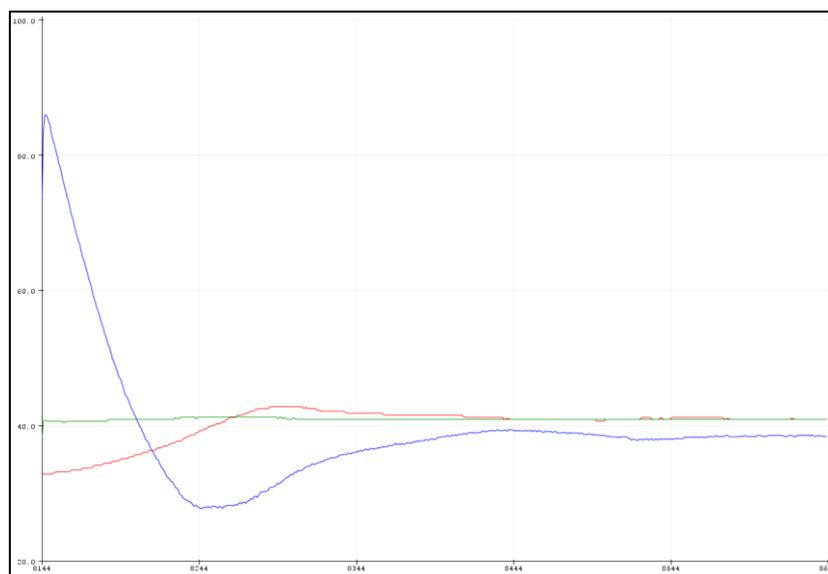


Figura 8 - *Plotter serial* do Arduino IDE, monitorando o módulo controlador. Fonte: Os Autores (2019).

4. CONCLUSÃO

Por meio desta metodologia proposta foi possível confeccionar um módulo didático para estudo de controladores PID. O aluno e professor interage com módulo por meio da variação da resistência dos potenciômetros, alterando assim os parâmetros dos diferentes controladores, podendo assim ver em tempo real as diferentes condições que uma malha de controle pode assumir. Tendo assim um contato prático com os conceitos básicos de controle de processos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFPR pelo apoio ao desenvolvimento do módulo didático.

6. REFERÊNCIAS

- ARDUINO. Arduino. 2012. Disponível em: <http://www.arduino.cc/>. Acesso em: 26/02/2019.
- WENDLING, M. Amplificadores Operacionais. UNESP, 2a.ed., 2010.
- OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno, Prentice-Hall do Brasil, 2a.ed., 1990.
- SEBORG, D.E.; EDGAR, T.F.; MELLICHAMP, D.A. Process Dynamics and Control: Wiley Series in Chemical Engineering, John Wiley & Sons, 1989.
- SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. Process dynamics and control. 2ª ed., New York, John Wiley & Sons, 2004.