

**Evento:** XXV SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

## **PLATAFORMA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE CONTROLE<sup>1</sup> DIDACTIC PLATFORM FOR THE TEACHING OF CONTROL SYSTEMS**

**Christopher Sauer<sup>2</sup>, Manuel M. P. Reibold<sup>3</sup>, Elisiane Pelke Paixão<sup>4</sup>, João Vitor Das Chagas Silva<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Projeto de pesquisa realizado no curso de Engenharia Elétrica da UNIJUI, junto ao GAIC

<sup>2</sup> Aluno do Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da UNIJUI, Bolsista PIBIC/UNIJUI, kikisauer@gmail.com

<sup>3</sup> Professor Doutor no Curso de Mestrado e Doutorado em Modelagem Matemática e do Curso de Engenharia Elétrica do DCEEng, Orientador, manolo@unijui.edu.br

<sup>4</sup> Aluno do Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da UNIJUI, Bolsista PROBIC/FAPERGS, elisianep251@gmail.com

<sup>5</sup> Aluno do Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da UNIJUI, Bolsista PROBIC/FAPERGS, joaovitor753pw@gmail.com

### **INTRODUÇÃO**

O presente trabalho trata do ensino de Controle de Sistemas na universidade, através do uso de uma plataforma didática. A disciplina destaca-se por ser uma área de grande relevância científica, sendo essencial que os alunos de cursos de Engenharia dominem tal conhecimento. Isso pressupõe o ensino, não apenas da teoria, mas também de sua aplicação.

A plataforma consiste em uma gangorra com motores em cada extremidade. A variação da velocidade dos motores varia o ângulo da gangorra, sendo possível selecionar um ângulo desejado e observar a resposta do sistema conforme o ajuste acontece.

No sistema atual de ensino, a disciplina de Controle trabalha com um alto grau de abstração. Isso dificulta o entendimento por parte dos estudantes, ficando a teoria desconectada da prática. O uso de uma plataforma didática fará a conexão abstrato-concreto, o que irá melhorar o entendimento da disciplina.

Nesse contexto, este trabalho investiga a implementação de um controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) em uma plataforma didática, visando o estudo da resposta do sistema, através de uma interface gráfica. A contribuição está em facilitar o entendimento dos estudantes de Controle, promovendo a motivação na disciplina.

O texto deste artigo está organizado da seguinte forma: após a introdução está a metodologia, onde descreve-se a pesquisa; em seguida são apresentados os resultados e sua discussão. Por fim, a última seção traz as conclusões e perspectivas.

### **METODOLOGIA**

A pesquisa realizada neste trabalho caracteriza-se por ser analítica, quantitativa e qualitativa, e de caráter experimental. Utiliza o método dedutivo, partindo da teoria para um caso específico, a observação sistemática e a realização de testes. A metodologia utilizada no estudo se inicia pela construção da plataforma didática, seguida pelo desenvolvimento do *software*, que implementa a malha de controle de um PID digital.

As diferentes estruturas em que o controlador pode ser encontrado são: Ideal, Série e Paralela.

### Evento: XXV SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

Cada uma arranja os termos P, I e D de maneira distinta. Da mesma forma, é possível mudar o arranjo para solucionar o chamado *wind-up* do termo integral e o impulso derivativo.

A implementação do controlador PID é a digital - um sistema que opera com sinais analógicos do mundo externo e os processa como sinais discretos, através da conversão A/D (Analógico/Digital). Dessa forma, torna-se necessário utilizar aproximações numéricas da integral e da derivada. Isso fornece a lei do PID na forma de uma equação de diferenças, com um tempo de amostragem fixo. Essa equação é posteriormente implementada no microcontrolador.

A plataforma possui estrutura de canos de PVC, ligados de tal forma a dar estabilidade à plataforma, e em sua parte superior conecta-se a gangorra por meio de rolamento, o que permite um movimento livre de atrito significativo. A gangorra é composta de alumínio, o que garante que seu peso seja de pouca influência na movimentação da mesma, e conta com adaptadores nas extremidades onde são parafusados os motores. A gangorra ainda conta com um fixador para o sensor no seu centro, o que garante que o sensor esteja livre de vibrações. O *hardware* é composto de dois motores *brushless* Turnigy, de 1400 Kv, dois ESC's Turnigy Plush de 30 A e um sensor MPU6050, que contém acelerômetro de 3 eixos e giroscópio de 3 eixos. Por fim, o Arduino Uno como microcontrolador.

O algoritmo de controle é implementado na linguagem C padrão Arduino, e utiliza a biblioteca PID. A leitura do sensor é feita via protocolo i2c. O sensor MPU6050 possui integrado no *chip* um processador digital de movimento DMP (*Digital Motion Processing*), que faz a fusão dos dados de acelerômetro e giroscópio. Assim, obtém-se em sua saída os dados de movimento em 3 eixos: rolagem (*roll*), arfagem (*pitch*) e guinada (*yaw*). Isso elimina a necessidade de processamento extra por meio de filtros. A leitura dos dados do sensor é feita com auxílio da biblioteca i2cdev. O PID recebe um ângulo desejado como *setpoint* e o ângulo lido pelo sensor, e processa o sinal de erro, que é a diferença entre os dois. A saída do controlador é então mapeada para o *duty cycle* do sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) que é enviado aos ESC's (*Electronic Speed Controller*). Esse sinal PWM é gerado por programação direta do *timer1* do ATMEGA328p, que é o microcontrolador do Arduino. Isso permite escolher a frequência desejada para o PWM, que depende do ESC utilizado. Dessa forma, a malha de controle é estabelecida pelo programa.

A obtenção dos dados é feita através de um programa desenvolvido na linguagem Processing, que é compatível com a linguagem do Arduino. É possível visualizar os gráficos do *setpoint*, sinal de erro e saída do controlador em tempo real. O programa também permite a escolha do *setpoint* e dos parâmetros do controlador,  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , enviando os dados ao Arduino. A ferramenta gráfica permite observar parâmetros de desempenho de um sistema, como *overshoot*, tempo de subida, tempo de acomodação e erro em regime permanente. A possibilidade de enviar novas constantes ao PID permite observar a mudança gerada na resposta do sistema em tempo real.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a plataforma didática como primeiro resultado obtido. É possível ver a gangorra com o sensor posicionado, o Arduino Uno e os motores *brushless*.

**Evento: XXV SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

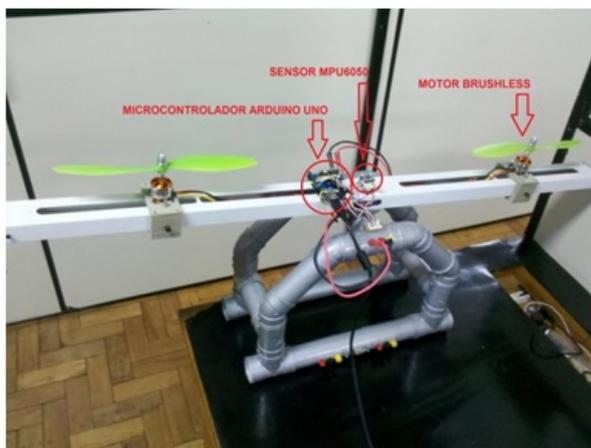


Figura 1 – Plataforma desenvolvida

Como segundo resultado tem-se o *software*, que processa os dados do sensor e calcular a saída do PID. O módulo DMP do sensor possui um *buffer* de memória FIFO (*First In, First Out*), que é preenchido com dados a uma taxa fixa de 10ms. Quando o *buffer* está completo, é gerada uma interrupção, permitindo ao microcontrolador receber os dados na mesma taxa. Isso garante que o tempo de execução do código do controlador seja fixo.

A Tabela 1 permite ver a variação real da saída do sistema. O sinal do sensor indica o quão próxima a saída está em relação ao *setpoint*. Também é possível ver o tempo de execução de cada *loop* do PID.

Tabela 1 – Resultados de execução do loop de controle PID

<i>Setpoint</i> (graus)	<i>Input</i> - sinal do sensor (graus)	Intervalo de tempo (ms)
0	0.06	10
0	0.04	9
0	0.02	10
0	-0.03	10
0	-0.02	10
0	0.01	9
0	0.02	10

A saída do controlador é mapeada para um sinal PWM adequado ao ESC, que por sua vez gera o sinal adequado para o motor. A granularidade obtida com o sinal PWM é de 1/20000, resultante da programação do registro do *timer1* do microcontrolador que define a frequência. Garante-se assim boa precisão do sinal, mesmo que o *duty cycle* fique limitado de 10% a 20%. A frequência obtida para essa programação do *timer1* foi de 100Hz. Isso está de acordo com as especificações do ESC para seu correto acionamento.

O programa desenvolvido em Processing para visualização dos dados gráficos permite alterar a velocidade com que os dados passam pela tela, e também os limites máximo e mínimo das janelas de visualização. A comunicação do programa com o Arduino se dá via serial, e ocorre nos dois sentidos, permitindo que o programa envie dados ao Arduino e altere o estado de algumas variáveis do controlador, como o *setpoint* e os parâmetros Kp, Ki e Kd.

Na Figura 2 é possível ver o *software* em operação. A janela superior apresenta o *setpoint*, em

**Evento: XXV SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

verde, e o sinal do sensor, em vermelho. A janela inferior apresenta a saída do controlador, em azul, antes de ser mapeada para o PWM.

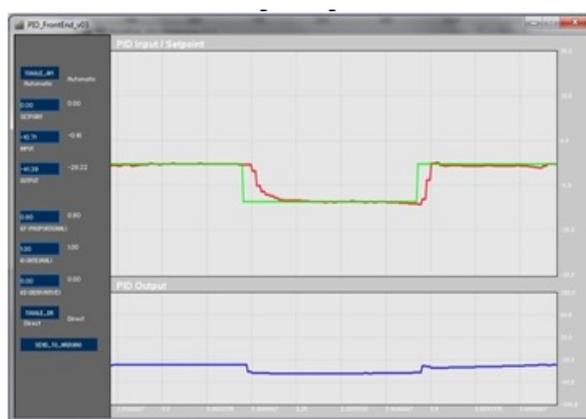


Figura 2 – Resultado de um teste de mudança de *setpoint*

Os resultados apresentados na Tabela 1 mostram a precisão do controlador, ao manter o sinal de saída muito próximo do *setpoint*, assim como a variação do tempo de execução do loop. Como pode ser verificado na Figura 2, a resposta do sistema não é ideal; isso se dá porque o controlador PID não foi sintonizado, sendo que os parâmetros utilizados ( $K_p = 0,8$ ;  $K_i = 1$ ;  $K_d = 0$ ) foram escolhidos empiricamente.

O gráfico obtido na Figura 2 demonstra a resposta do sistema a uma entrada degrau. É possível observar os parâmetros de desempenho do controlador e associar o resultado ao que foi visto no estudo da teoria de Controle. O estudante poderá analisar a parte física - a gangorra - e teórica - a resposta gráfica - simultaneamente.

Inicialmente utilizou-se o Arduino Pro Micro ao invés do Arduino Uno. Por possuir um microcontrolador ATMEGA32u4 que controla as funções de programa e comunicação USB no mesmo *chip*, ele mostrou-se incapaz de receber e enviar dados ao *software* simultaneamente. Não se pode afirmar se trata-se de limitação de *hardware* ou *software*, mas esse percalço levou ao uso do Arduino Uno. Outro problema enfrentado foi o conflito entre o uso do *timer1* do ATMEGA328p para geração de PWM e a leitura dos dados do DMP. Tal conflito ocorre apenas quando o sensor está muito afastado do microcontrolador, ou seja, para cabos longos. Quando se reduz a distância para alguns centímetros, o conflito não mais persiste. Isso limita o posicionamento do controlador, sendo que ele foi fixado na gangorra.

De acordo com Ogata (2010), o processo de selecionar parâmetros do controlador que garantam dada especificação de desempenho é conhecido como sintonia do controlador. O desempenho de um controlador PID está diretamente ligado ao ajuste de seus três termos, que é feito variando-se os ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  até que se obtenha a resposta ideal. Esta é uma possível melhoria, aliada a adição de uma interface que permita controlar essa sintonia, propiciando aos estudantes a possibilidade de aplicar diferentes métodos à plataforma e fazer observações críticas e comparações

Dentre os métodos de sintonia que não exigem o conhecimento do modelo matemático do sistema, pode-se citar o método de Ziegler e Nichols (1942), que utiliza a resposta ao degrau para

**Evento:** XXV SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

a obter os parâmetros do PID. Astrom e Hagglund (1984) desenvolveram o método do relé, também conhecido como *autotuning*.

Outra possível melhoria é o uso de um console externo que permita o controle da plataforma, com botões e *display*, o que seria uma adição à interface computacional, permitindo o uso da plataforma para os casos em que não se tem um computador disponível.

Como comparação, pode-se citar o trabalho de Martin e Kassab Junior (2006), que descrevem um trocador de calor como ferramenta didática. Foi desenvolvido um software didático para auxiliar os estudantes de controle, possibilitando o uso para os diversos cursos de Engenharia. Dentro da área de ensino, pode-se citar o estudo de Kheir e Astrom (1996). Em seu trabalho, tratam do balanço entre ensino teórico e a intuição física, focando-se na melhora do currículo de Controle. O estudo visa um futuro mais interdisciplinar para a área de ensino de Controle, com maior proximidade entre teoria e prática.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso da plataforma didática na disciplina de Controle de Sistemas visa aprimorar o ensino no âmbito dos cursos de Engenharia. O uso de um controlador PID permite a implementação de uma malha fechada de controle, e a interface gráfica auxilia na análise da resposta do sistema. Os resultados demonstram a validade da metodologia, assim como a utilidade da plataforma proposta. As implicações são de interesse, tanto para educadores, como para estudantes, pois ambos obtêm benefício pelo uso da plataforma. As perspectivas são de que a idéia possa ser reconhecida em seu valor, e que a preocupação com o ensino de qualidade possa ser retomada, particularmente na disciplina de Controle de Sistemas, no âmbito acadêmico.

**Palavras-chave:** controle, ensino, PID.

**Keywords:** Control, Platform, Arduino.

### REFERÊNCIAS

- ASTROM, K. J. e HAGGLUND, T. **Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins**. International Federation of Automatic Control, v. 20, n. 5, p. 645-651, 1984.
- KHEIR, N. A., ASTROM, K. J., AUSLANDER, D., CHEOK K. C., FRANKLIN G. F., MASTEN M. e RABINS M. **Control Systems Engineering Education**. Automatica, v. 32, n. 2, p. 147-166, 1996.
- MARTIN, Paulo Alexandre e KASSAB JUNIOR, Fuad. **Uso de Trocador de Calor como Ferramenta Didática para o Ensino de Modelagem e Sistemas de Controle**. Revista de Ensino de Engenharia, v. 25, p. 3-9, 2006.
- OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.
- ZIEGLER, J. G. e NICHOLS, N. B. **Optimum Settings for Automatic Controllers**. The American Society of Mechanical Engineers, p. 759-768, 1942.