

EXPERIMENTO COM IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA EM LABORATÓRIO REMOTO DE CONTROLE NÃO LINEAR UTILIZANDO INTERNET

1 INTRODUÇÃO

Experimento de laboratório de Controle como instrumento para educação mediada por tecnologia é a proposta deste artigo, com uma implementação prática que utiliza um conjunto de ferramentas de programas computacionais de código aberto, e com uma planta de Controle de fácil construção. Utilizando tecnologia de banco de dados embarcado e aplicando ferramentas de código aberto capaz de operar como um servidor de dados em rede, o experimento proporciona acesso remoto através de uma interface que pode ser acessada através de uma página de internet.

O conjunto de ferramentas de programas computacionais de código aberto, IoTControl (MARTINS; FERNANDES; CAMPO, 2020) é utilizado neste experimento. Informações referentes a esta tecnologia podem ser obtidas na referência e os códigos estão disponíveis em repositório de livre acesso, como indicado na referência.

Com a finalidade de proporcionar a implementação prática neste experimento, foi aplicado o controlador proporcional, integral e derivativo (PID) na planta de controle Bola em Tubo. A planta apresentada na Figura 1 é uma versão simplificada do experimento Ball-in-tube proposto por (OUYANG; SCHNELL; KEXIN, 2007).

Figura 1 – Planta de Controle Bola em Tubo.



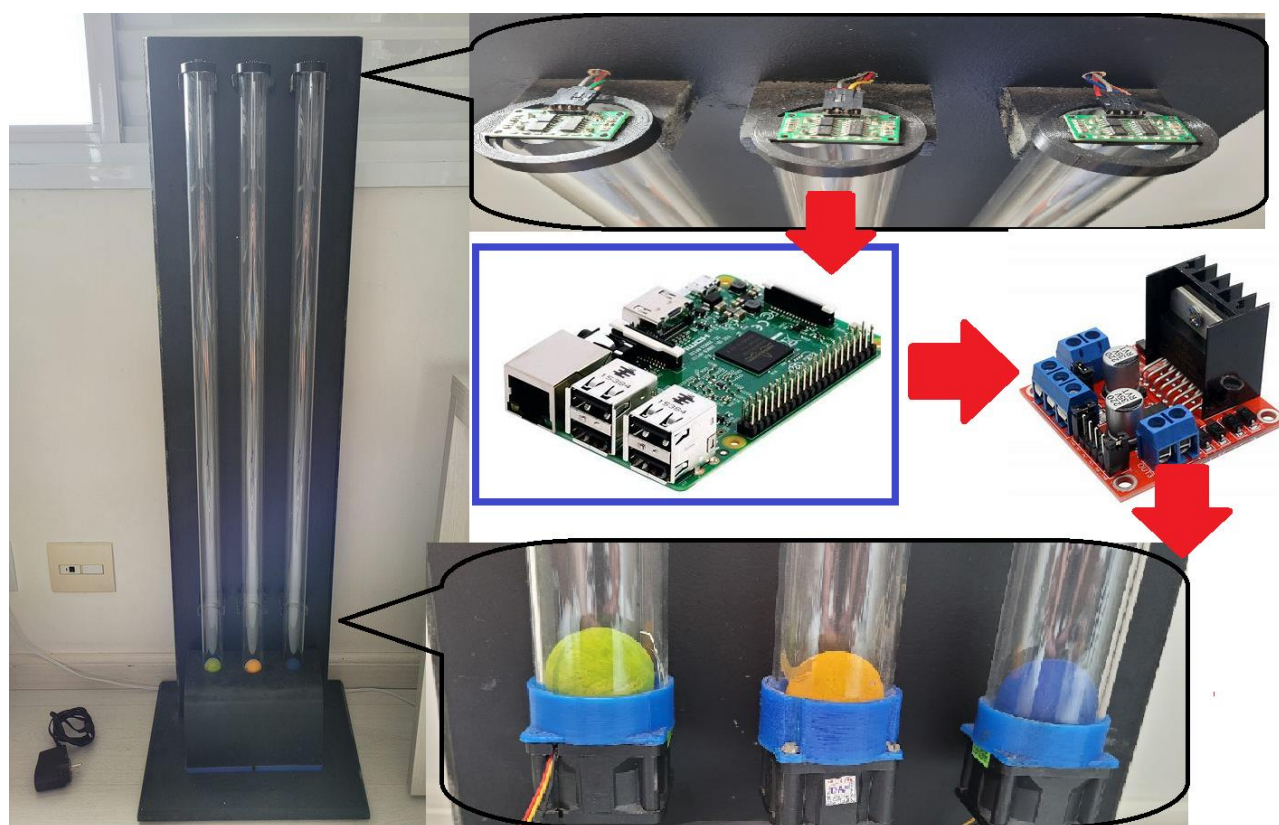
Fonte: Autores

O desenvolvimento deste experimento é apresentado na seção 2, os resultados e conclusões estão apresentados neste artigo, e os códigos fontes dos programas computacionais estão disponíveis em um repositório de livre acesso.

2 DESENVOLVIMENTO

Inspirado na planta de controle não linear proposta por (OUYANG; SCHNELL; KEXIN, 2007), os alunos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) construíram a planta Bola em Tubo. O sinal de realimentação é obtido através de sensores ultrassônicos tipo RCW-0001, o acionamento dos motores é realizado através do Driver L298N, o dispositivo computacional Raspberry Pi3B realiza o processamento de sinais bem como hospeda o servidor de dados, estes componentes principais compõe o sistema deste experimento como apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Componentes do Experimento.



Fonte: Autores

Nas subseções seguintes apresentamos as etapas de desenvolvimento de *Hardware* e *Software*.

2.1 Hardware

A planta de controle possui construção simples, consiste de motor DC acoplado em tubo acrílico com um metro de comprimento, no topo do tubo está instalado o sensor ultrassônico capaz de medir a distância entre o sensor e a bola. A lista de materiais está indicada na Tabela 1.

Tabela 1 – Lista de Materiais.

Descrição	Quantidade
Motor DC 12V FD4028B12W11	3
Sensor Ultrassônico RCW-0001	3
Dispositivo Raspberry Pi 3B	1
Driver L298N	1
Fonte Chaveada 12V 6A	1
Fiação, cabos jumpers, protoboard	20

Anilha e presilha para sensor e tubo	3
Quadros em MDF	2
Fundo e Painel	
Kit de fixação	1
Parafusos, cola.	
Tubo de acrílico 70x1000mm	3

Fonte: Autores

O diagrama de ligação entre os dispositivos de *hardware* pode ser simplificado no Quadro 1.

Quadro 1 – Pinagem

Dispositivo Raspberry	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Fonte 12V	Driver L298N
Pino 1 +3,3V	Vcc	Vcc	Vcc	-	-	-	-	-
Pino 2 +5V	-	-	-	-	-	-	-	Pino +5V
Pino 6 GND	GND	GND	GND	GND	GND	GND	GND	Pino GND
Pino 7 GPIO 4 / Saída Sensor Trigger 1	Trig	-	-	-	-	-	-	-
Pino 11 GPIO 17 / Saída Sensor Trigger 2	-	Trig	-	-	-	-	-	-
Pino 13 GPIO 27 / Saída Sensor Trigger3	-	-	Trig	-	-	-	-	-
Pino 15 GPIO 22 / Saída PWM 1	-	-	-	-	-	-	-	Pino IN1
Pino 16 GPIO 23 /	-	-	-	-	-	-	-	Pino IN2

Saída PWM 2								
Pino 18 GPIO 24 / Saída PWM 3	-	-	-	-	-	-	-	Pino IN3
Pino 22 GPIO 25 / Entrada Sensor 1	Echo	-	-	-	-	-	-	-
Pino 36 GPIO 16 / Entrada Sensor 2	-	Echo	-	-	-	-	-	-
Pino 38 GPIO 20 / Entrada Sensor 3	-	-	Echo	-	-	-	-	-
-	-	-	-	Vcc	-	-	-	OUT 1
-	-	-	-	-	Vcc	-	-	OUT 2
-	-	-	-	-	-	Vcc	-	OUT 3
-	-	-	-	-	-	-	12V	Pino +12V

Fonte: Autores

A interface de acesso ao dispositivo é realizada através de conexão sem fio (Wi-Fi), neste experimento foi utilizada a infraestrutura do próprio laboratório, considere que deverá obter um ponto de acesso em que seja possível conectar o dispositivo em rede. Uma vez que o dispositivo Raspberry estiver conectado em rede local, pode-se habilitar um ponto de acesso que estará disponível na internet seja por uma infraestrutura de rede privada virtual (VPN) ou por serviços de *proxy* reversos (NGROK). Neste experimento utilizamos a opção de serviços de *proxy* reversos, não será discutido neste artigo o tema segurança, mais informações sobre o ambiente de programas computacionais são apresentadas na subseção seguinte.

2.2 Software

Neste experimento aplicamos como base o conjunto de ferramentas de programas computacionais de código aberto, IoTControl (MARTINS; FERNANDES; CAMPO, 2020). A fim de operar a planta Bola em Tubo, telas de interface foram desenvolvidas e o código fonte que executa o processamento do algoritmo de controle foi atualizado, informações específicas de configuração podem ser obtidas acessando diretamente o código fonte. A lista de componentes de *software* está indicada na Tabela 2.

Tabela 2 – Componentes de Software.

Descrição	Nome	Versão
-----------	------	--------

Sistema Operacional	Raspbian	Jessie
Servidor de Rede	Apache	2.2.27
Banco de Dados	FairCom DB	11
Programa Aplicativo	AppControl	Abril, 2022
Programa em Rede	NetControl	Abril, 2022

Fonte: Autores

A implementação oferece, neste experimento, duas opções ao usuário: operar o sistema em malha aberta ou em malha fechada. Sendo um passo inicial do estudante, em busca de determinar o comportamento dinâmico da planta de controle, operar em malha aberta permite verificar o comportamento não linear da planta. A tela da interface de controle está indicada na Figura 3.

Figura 3 – Interface em malha aberta.

Fonte: Autores

Conforme apresentado na Figura 3, os ajustes atuam diretamente no sinal aplicado no atuador (motor), sendo possível aplicar de 0 a 100% do sinal em PWM. Representando aplicar de 0 a 12V em corrente contínua no motor. Já em malha fechada é possível experimentar algoritmos de controle, neste experimento aplicamos o controlador proporcional, integral e derivativo (PID) na planta de controle. A tela da interface de controle está indicada na Figura 4.

Figura 4 – Interface em malha fechada.

The screenshot shows a web browser window titled 'IoTControl' with the URL '192.168.15.78/loT_Ball_PID.php'. The page is titled 'Ball-in-tube PID'. It contains three sections for parameter sets:

- Set 1:** KP_1 (0.0), KI_1 (1), KD_1 (0.1). Update button.
- Set 2:** KP_2 (0.0), KI_2 (1), KD_2 (0.1). Update button.
- Set 3:** KP_3 (0.0), KI_3 (1), KD_3 (0.1). Update button.

Below the parameter sets are two buttons: 'Graph' and 'Return'.

Fonte: Autores

Em malha fechada é possível ajustar os parâmetros do controlador, conforme apresentado na Figura 4, os ajustes atuam diretamente no controlador, sendo os pontos de ajuste Set 1, Set 2, e Set 3 em centímetros com alcance de 0 a 100. O ganho proporcional do controlador está em KP_1, KP_2, e KP_3, assim como o ganho integral está em KI_1, KI_2, e KI_3, por fim o ganho derivativo está em KD_1, KD_2, e KD_3. O sinal aplicado no atuador (motor) é o resultado calculado pelo programa aplicativo que executa o algoritmo do PID. Mais informações sobre o controlador são apresentadas na subseção seguinte.

2.3 Controle

A planta Bola em Tubo é não linear sendo o seu modelamento não trivial, a fim de proporcionar uma experiência e dinâmica diferente em cada tubo foram adicionadas bolas de diferentes massas, sendo a bola de menor massa instalada no tubo mais à esquerda e a bola de maior massa instalada no tubo mais à direita. Considerando que o modelamento não será abordado neste artigo e que a escolha do controlador PID foi por simples facilidade de implementação com a finalidade de uso apenas experimental, mais informações sobre implementação de controladores PID podem ser obtidas na referência (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2018), bem como em (OGATA, 2003). De forma simplista, podemos representar o controlador PID paralelo com a Equação 1:

$$f(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Nesta implementação, temos o controlador PID digital com discretização ajustada com uma taxa de amostragem de 10Hz, tendo o algoritmo apresentado na Equação 2:

$$PID[n] = PID[n - 1] + K_p(error[n] - error[n - 1]) + u_i[n] + u_d[n] \quad (2)$$

Sendo o termo integral apresentado na Equação 3:

$$u_I[n] = KiTs \frac{error[n] + error[n - 1]}{2} \quad (3)$$

E o termo derivativo apresentado na Equação 4:

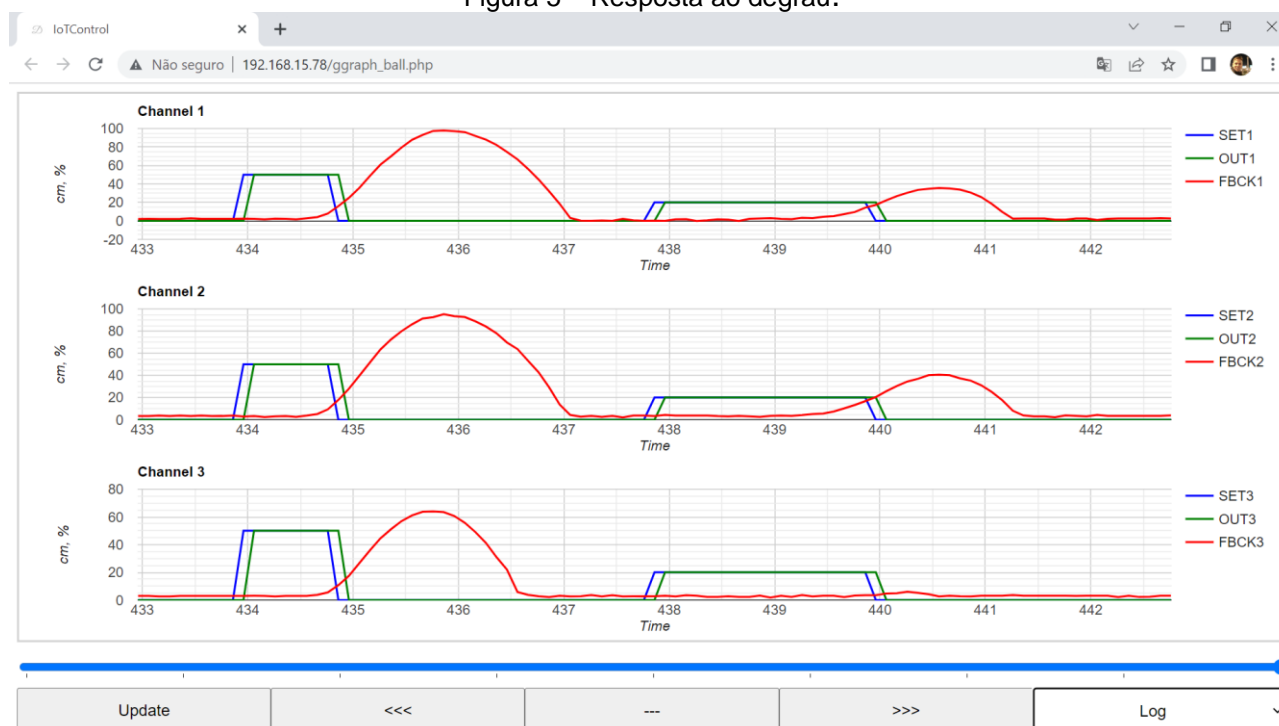
$$u_D[n] = \frac{u_D[n - 1]Kd}{Kd + KpNTs} - \frac{KdN}{Kd} (y[n] - 2y[n - 1] + y[n - 2]) \quad (4)$$

O comportamento dinâmico da planta de controle pode ser estudado através de método gráfico, na subseção seguinte os resultados são apresentados em malha aberta e malha fechada .

2.4 Resultados

Utilizando a interface, da própria ferramenta implementada, obtemos os resultados gráficos. Dessa forma, é possível verificar o comportamento dinâmico da planta Bola em Tubo em malha aberta conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Resposta ao degrau.



Fonte: Autores

Como indicado na Figura 5, é aplicado um degrau de valor 50% com duração de 1 segundo, após 3 segundos é aplicado outro degrau, porém com valor de 20%, por um intervalo de tempo igual a 2 segundos. No gráfico temos, em canal 1 a representação dos dados obtidos no conjunto motor e bola no tubo 1, em canal 2 o conjunto do tubo 2, e no canal 3 o conjunto do tubo 3. Sendo o tubo 1 que está mais à esquerda e o tubo 3 o que está mais à direita. Representado em cor azul temos o sinal SET que é o comando, em verde temos o sinal OUT que é o PWM aplicado ao driver e que representa o sinal de



esforço de controle, finalmente em vermelho temos o sinal FCBK que é a realimentação de posição da bola, este sinal é obtido através dos sensores ultrassônicos.

Em malha fechada temos o sinal de realimentação como base para calcular o erro de posição. O sinal de comando passa a ser a posição desejada em centímetros do controle da altura da bola, na Figura 6 apresentamos o comportamento do sistema com o controlador PID ajustado manualmente e com o comando inicial de 20 e final em 70 centímetros.

Figura 6 – Resposta ao degrau.



Fonte: Autores

De forma similar, aplicamos o comando inicial de 50 e final em 20 centímetros para a posição desejada de controle da altura da bola, na Figura 7 apresentamos o comportamento do sistema com o controlador.

Figura 7 – Resposta ao degrau.





Fonte: Autores

– Peças produzidas pelos estudantes para determinação do baricentro. Denomine os eixos coordenados em gráficos, incluindo as respectivas unidades, sempre que aplicável. Da mesma forma, denomine colunas/linhas em tabelas, com respectivas unidades, caso aplicável.

Citações a que um autor transcreve, literalmente, de outra fonte, o texto, respeitando todas as características formais em relação à redação, à ortografia e à pontuação originais. A citação direta pode ser breve (de até três linhas) transcrita entre aspas duplas, vindo incorporada ao parágrafo. Quando ultrapassar de três linhas a citação deve vir recuada 4,0 cm do corpo do texto e tamanho da fonte 11 pt. Quando o nome do autor estiver incluído na sentença, indicam-se a data entre parênteses e as páginas. Citação indireta são reproduções de ideias de outrem sem que haja transcrição literal das palavras utilizadas. Apesar de livres, devem ser fiéis ao sentido do texto original, não necessitando de aspas, nesse caso só o nome do(s) autor(es) e o ano da produção.

Autorizações/Reconhecimento Os autores são responsáveis por garantir o direito de publicar todo o conteúdo de seu trabalho. Se material com direitos autorais foi usado na preparação deste, pode ser necessário obter a devida autorização do detentor dos direitos para a publicação do material em questão.

3 Considerações FINAIS

Assim como apresentado em (OUYANG; SCHNELL; KEXIN, 2007) o comportamento não linear deste tipo de planta é observado. A bola aparentemente em posição controlada pode mover-se acima ou abaixo em comportamento não previsível. Os tempos de reação do sistema não são reproduzíveis, sendo que em repetidos experimentos com intervalos de comando iguais pode-se obter diferentes comportamentos dinâmicos. O experimento permitiu estudar uma planta não linear, além de proporcionar uma experiência com acesso remoto através da interface de rede em internet.

Analisando os resultados em malha aberta, é possível observar na Figura 5 que o tempo de reação do sistema é atrasado sendo o tempo que o motor gera o fluxo de ar capaz de mover a bola diferente em cada tubo porque as bolas possuem massas diferentes. No tubo 3, em que está a bola de maior massa, não foi possível atingir a altura que a bola no



tubo 1 atingiu com o primeiro sinal degrau e com o segundo sinal degrau a bola 3 praticamente não foi movimentada pela ação do motor.

Já em malha fechada, os resultados distintos de cada tudo comprovam que a massa influi no ajuste do controlador. Na Figura 6, podemos observar que as posições das bolas nos tubos 1 e 2 chegam a apresentar quatro corcovas enquanto que a bola no tubo 3 apresenta apenas uma. Quando aplicado o sinal de 50 para 20 centímetros como apresentado na Figura 7, temos que o degrau aplicado nos motores dos tubos 1 e 2 afetam a posição da bola no tubo 3, isso pode ser justificado uma vez que todos os motores competem pelo fluxo de ar disponível na base da estrutura da planta. Também é possível observar que embora na Figura 6 o tempo de estabilização do sistema foi em torno de 15 segundos já na Figura 7 o tempo foi de 25 segundos.

Em trabalho futuro, o experimento será explorado com os alunos divididos em grupos, alguns grupos iniciarão o experimento de forma remota e após uma ou duas semanas o experimento será reproduzido de forma presencial, e outros grupos iniciarão com o experimento presencialmente e após uma ou duas semanas repetirão o experimento de forma remota. Os autores esperam poder expandir esse experimento no futuro, multiplicando a quantidade de plantas de controles e obter uma infraestrutura capaz de manter os experimentos disponíveis com livre acesso na internet e dessa forma ser possível alcançar um maior número de interessados em estudos de sistemas de controle.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) e Laboratório de Automação e Controle (LAC), abrigado pelo Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle (PTC) da Universidade de São Paulo (USP). O banco de dados servidor FairCom DB foi disponibilizado como cortesia pela empresa FairCom e os outros materiais utilizados no experimento foram fornecidos pelos autores.

REFERÊNCIAS

CASTRUCCI, P. L.; BITTAR, A.; SALES, R. M. **Controle Automático**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

IoTControl: conjunto de programas computacionais abertos. Disponível em: <https://github.com/DanMartins/IoTControl>. Acesso em: 21 maio, 2022.

LEISENBERG M.; STEPPONAT, M. Internet of Things remote labs: experiences with data analysis experiments for students education. In: **IEEE GLOBAL ENGINEERING EDUCATION CONFERENCE (EDUCON)**, 2019, Dubai. Proceedings... Dubai: IEEE, p. 22-27, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2019.8725070>.

MARTINS, D. O.; FERNANDES A.; CAMPO A. B. Tool for control systems development based on IoT (IoTControl). In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (CBA 2020)**, 23., 2020, Porto Alegre (on-line). Anais... Porto Alegre: SBA, 2020. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/1366. Acesso em: 15 mar. 2022.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. São Paulo: Prentice-Hall, 2003.



OUYANG Z.; SCHNELL M.; KEXIN W. The experiment "Ball-in-tube" with Fuzzy-PID controller based on dspace. *In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, p. 877-881, 2007.

RAMPRASAD B.; FOKAEFS, M.; MUKHERJEE, J.; LITOIU, M. Emu-IoT: a virtual Internet of Things lab. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTONOMIC COMPUTING (ICAC)*, 2019, Umea. Proceedings... UMEA: IEEE, p. 73-83, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAC.2019.00019>.

WILSON S.; GLOTFELTER, P.; WANG, L.; MAYYA, S.; NOTOMISTA, G.; MOTE, M.; EGERSTEDT, M. The Robotarium: globally impactful opportunities, challenges, and lessons learned in remote-access. *IEEE Control Systems Magazine*, v. 40, n. 1, p. 26-44, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCS.2019.2949973>.

ZHANG R.; GAO L. Research on motor control and simulation based on PID and Internet of Things system. *Microprocessors and Microsystems*, v. 80, p. 103602, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103602>.

EXPERIMENT WITH PRACTICAL IMPLEMENTATION IN REMOTE LABORATORY OF NONLINEAR CONTROL USING INTERNET – COBENGE 2022

Abstract: *Control laboratory experiment as a tool for technology-mediated education is the purpose of this article, with a practical implementation that uses an open-source software framework and an easy-to-build control plant. Using an embedded database technology and applying the framework which is able to operate as a networked data server, the experiment provides remote access through an interface that can be accessed in a web page.*

To demonstrate the practical control implementation, the proportional, integral and derivative (PID) controller was applied in the Ball-in-tube control plant. The results and conclusions are presented in this paper, the source code is open-source and it can be found in the references.

Keywords: *Remote laboratory, Nonlinear control, internet of things.*