



DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL NO ÂMBITO DIDÁTICO COMO FORMA DE COMPLEMENTO AO ESTUDO DA TEORIA DE CONTROLE MODERNO

Victor Rocha Silva – eng.vrs@bol.com.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso - Campus Cuiabá Cel. Octayde Jorge da Silva, Departamento Área de Eletroeletrônica
Rua Profa. Zulmira Canavarros, 93
78005-200 – Cuiabá – Mato Grosso

José Marcelo Gracioli Vilas Boas – josemarcelogracioli@gmail.com

Creverson Moraes Nazário – creverson.moraes@gmail.com

Robson Rogerio Dutra Pereira – robson.pereira@cba.ifmt.edu.br

Ronan Marcelo Martins – ronan.martins@cba.ifmt.edu.br

Resumo: Este artigo apresenta o projeto e o desenvolvimento de uma planta de controle envolvendo controle de nível usando PID, haja visto que a mesma é de uso muito comum nas indústrias. A motivação do projeto teve como premissa a tentativa de criar um método facilitador de ensino e aprendizagem na área de sistema de controle de maneira didática em decorrência do fato de que o estudo da teoria moderna de controle em cursos de graduação em Engenharia, geralmente, possui um foco teórico e com pouca ênfase na parte prática de desenvolvimento de sistemas de controle em aplicações reais. Para assegurar a melhoria na relação teoria/prática, o presente artigo mostra a implementação do referido sistema de controle de maneira simples e com baixo custo, R\$197,46 é o custo total, permitindo a sua reprodução em sala de aula e/ou em qualquer outro lugar. Essa estratégia pedagógica resultou num instrumento facilitador ao aluno para a sua compreensão da interdisciplinaridade do sistema de controle, conciliando a teoria e a prática, pois a planta desenvolvida integra os conhecimentos da teoria de controle moderno com outros temas, tais como, microcontroladores, instrumentação industrial e eletrônica de potência.

Palavras-chave: Controle, Instrumentação Industrial, Microcontroladores, Ensino, Interdisciplinaridade.





1 INTRODUÇÃO

O controle automático é essencial em qualquer campo da engenharia e da ciência. O controle automático é um componente importante e intrínseco em sistemas de veículos espaciais, sistemas robóticos, modernos sistemas de manufatura e quaisquer operações industriais que envolvam o controle de temperatura, pressão, umidade, viscosidade, vazão, nível e etc (OGATA, 2011).

No estudo de sistemas de controle, o projetista deve ser capaz de modelar sistemas dinâmicos em termos matemáticos e analisar suas características dinâmicas. O modelo matemático de sistema dinâmico é definido como um conjunto de equações que representa a dinâmica do sistema com precisão ou, pelo menos, razoavelmente bem (OGATA, 2011).

O estudo da teoria moderna de controle, em cursos de graduação em engenharia, geralmente, possui um foco teórico e com pouca ênfase na parte prática de desenvolvimento de sistemas de controle em aplicações reais. Nesse trabalho, realizou-se o modelamento e a implementação prática de um sistema de controle de nível de líquido. A realização desse projeto, possibilitou integrar diversas disciplinas ministradas em engenharia, dentre elas: Controle de Sistemas Contínuos, Instrumentação Industrial, Microcontroladores e Eletrônica de Potência.

O sistema de controle projetado e implementado na planta de nível, demonstra, didaticamente, um controlador e um processo de controle amplamente utilizado industrialmente. A simplicidade na construção da planta de nível, viabiliza a reprodução do experimento em sala de aula e possibilita aos estudantes integrar os conhecimentos teóricos com a implementação prática.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelagem matemática do sistema de controle

O desenvolvimento do projeto do controle passou pelas seguintes fases:

FASE 1) Modelamento matemático do comportamento dinâmico do sistema de nível;

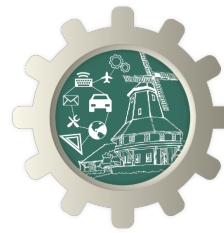
FASE 2) Escolha do tipo de controlador a ser implementado;

FASE 3) Discretização e;

FASE 4) Implementação da lei de controle.

FASE 1 - Modelamento matemático do comportamento dinâmico do sistema de nível

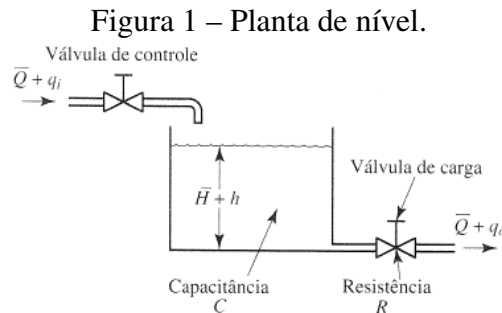
Processos industriais envolvem, frequentemente, o fluxo de líquidos ao longo de tubos de conexão e de reservatórios. O fluxo nesses processos geralmente é turbulento e não laminar. Os sistemas que evoluem fluxo turbulento são frequentemente representados por equações diferenciais não lineares. Entretanto, se a região de operação for limitada, essas equações diferenciais não lineares podem ser linearizadas. Nesta seção, vamos discutir os modelos matemáticos linearizados de sistemas de nível de líquido. Note que a introdução do conceito de capacitância para esses sistemas de nível de líquido nos possibilita descrever suas características dinâmicas de modo simples (OGATA, 2011).



Antes de destacar o modelo matemático adotado, cabe detalhar a sequência para atingir o objeto alvo dessa seção. Desta forma, inicia-se com o conceito de resistência e capacitância de sistemas de nível de líquido. Neste caso, consideramos o fluxo ao longo de uma tubulação curta que conecta dois reservatórios. A resistência R ao fluxo de líquido nessa tubulação ou restrição é definida como a variação na diferença de nível (a diferença entre o nível dos líquidos nos dois reservatórios) necessária para causar a variação unitária na vazão como demonstrado na Equação (1).

$$R = \frac{\text{variação na diferença de nível, } m}{\text{variação na vazão em volume, } m^3/s} \quad (1)$$

Em sistemas de nível de líquido, a relação entre a taxa de escoamento e a diferença de nível difere do fluxo laminar para o fluxo turbulento, entretanto, neste trabalho consideraremos o caso laminar. Dessa forma, considerando o sistema de nível de líquido mostrado na Figura 1, que o líquido flui em uma válvula de restrição, na lateral do reservatório.



Se o fluxo nessa restrição for laminar, a relação entre a vazão e a altura do nível, em regime permanente, será dada pela Equação (2):

$$Q = K_l \cdot H \quad (2)$$

Onde:

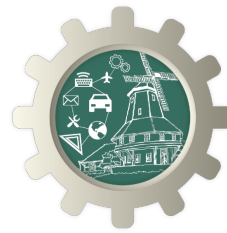
- Q = vazão em volume em regime permanente, m^3/s ;
- K_l = coeficiente de escoamento laminar, m^2/s ;
- H = altura do nível em regime permanente, m

Para o fluxo laminar, a resistência R_l é obtida conforme a Equação (3):

$$R_l = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q} \quad (3)$$

Portanto, a resistência no escoamento laminar é constante e análoga à resistência elétrica. A capacitância C , Equação (4), de um reservatório é definida como a variação na quantidade de líquido armazenada necessária para causar uma mudança unitária no potencial (altura).

$$C = \frac{\text{variação na quantidade de líquido armazenado, } m^3}{\text{variação na altura, } m} \quad (4)$$



Note que a capacidade (m^3) e a capacitância (m^2) são diferentes. A capacitância do reservatório é igual à sua seção transversal, se esta for constante, a capacitância será a mesma para qualquer altura do nível.

O desenvolvimento anterior, permite configurar a modelagem matemática do sistema foco. Dessa forma, considerando o sistema indicado na Figura 1. As variáveis são definidas como segue:

- \bar{Q} = vazão em volume em regime permanente, m^3/s ;
- q_i = pequeno desvio da vazão de entrada em relação a seu valor de regime permanente, m^3/s ;
- q_o = pequeno desvio da vazão de saída em relação a seu valor de regime permanente, m^3/s ;
- \bar{H} = altura do nível em regime permanente, m ;
- h = pequeno desvio de nível a partir de seu valor em regime permanente, m .

Com base na hipótese de que o sistema seja linear ou linearizado, a equação diferencial desse sistema pode ser obtida como segue: como o fluxo de entrada menos o fluxo de saída durante um pequeno intervalo de tempo dt é igual à quantidade adicional no reservatório, chega-se na Equação (5)

$$Cdh = (q_i - q_o)dt \quad (5)$$

A partir da definição de resistência, a relação entre q_o e h é dada pela Equação (6):

$$q_o = \frac{h}{R} \quad (6)$$

Substituindo a Equação (6) na Equação (5), obtém-se a Equação (7):

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i \quad (7)$$

Fazendo, $\tau = RC$, onde τ é a constante de tempo do sistema e $k = R$ e aplicando-se a transformada de Laplace na Equação (7), resulta na Equação (8):

$$(\tau s + 1)H(s) = kQ_i(s) \quad (8)$$

Se $Q_i(s)$ for considerada a entrada e $H(s)$, a saída, a função de transferência do sistema é a relação indicada na Equação (9):

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (9)$$

A Equação (9) é a função de transferência que descreve o comportamento dinâmico do sistema de nível.

FASE 2 - Escolha do tipo de controlador a ser implementado

Um controlador automático compara o valor real de saída da planta com a entrada de referência (valor desejado), determina o erro e produz um sinal de controle que reduzirá o erro a zero ou a um



valor pequeno. A maneira pela qual o controlador automático produz o sinal de controle é chamada ação de controle. Um sistema de controle industrial consiste em um controlador automático, um atuador, uma planta e um sensor (elemento de medição) (OGATA, 2011).

Um controlador automático do tipo PID consiste na ação integrada dos controladores proporcional, integral e derivativo. A combinação PID tem as vantagens individuais de cada uma das três ações de controle integradas. A equação diferencial que define a ação PID é dada pela Equação (10):

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

A Equação (10), em transformada de Laplace e na forma de função transferência está representada na Equação (11):

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (11)$$

Para o presente trabalho, utilizamos a identificação de constantes conforme a Tabela 1:

Tabela 1 – Atribuição das constantes do PID

K_p	K_I	K_D
K_p	K_p/T_i	$K_p T_d$

Assim, o controlador PID está estabelecido conforme a Equação (12):

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_D s + \frac{K_I}{s} \quad (12)$$

FASE 3 - Discretização

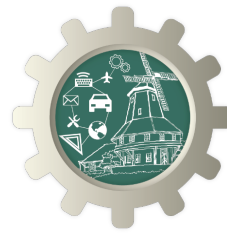
A discretização do controlador PID para implementação em microcontrolador segue os seguintes procedimentos:

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T} \quad (13)$$

Onde T é o tempo de amostragem. Substituindo a Equação (13) na Equação (12), resulta na Equação (14):

$$\frac{U(z)}{E(z)} = K_p + \frac{K_D(1 - z^{-1})}{T} + \frac{K_I}{\frac{1 - z^{-1}}{T}} \quad (14)$$

A Equação (14) representa a função de transferência no domínio da frequência que relaciona o sinal de controle com o sinal de erro. Sendo o sinal de erro, a diferença entre o *setpoint* e o valor de saída do sistema medido através do elemento sensor.



FASE 4 - Implementação da lei de controle

A implementação da lei de controle no microcontrolador necessita de uma equação discreta no domínio do tempo. Dessa forma, obtém-se a seguinte Equação (15):

$$u[n] = K_P e[n] + K_D \{y[n-1] - y[n]\} + u_I[n-1] + K_I T e[n] \quad (15)$$

A Equação (15) representa o sinal de controle emitido pela saída do controlador, cuja implementação computacional está ilustrada na Figura 2 a seguir:

Figura 2 – Fragmento do código computacional

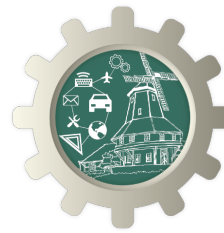
```
//Erro
error = SetPoint - level;
//Controle Proporcional
Gp = Error*kp;
//Integral
Gi += Error*ki;
//Derivativo
Gd = (lastlevel - Level)*kd;
//Saída PID
u = Gp + Gd + Gi;
//Sinal de Controle
ControllerSignal = (u);
analogWrite(sController, ControllerSignal);
```

2.2 Materiais utilizados

A Tabela 2 corresponde ao orçamento final para a implementação do presente sistema.

Tabela 2 – Equipamentos utilizados

Equipamento	Quantidade	Preço (R\$)
Arduino UNO R3	1	50,00
Display LCD 16x2	1	16,90
Potenciômetro 10K	2	3,58
IRFB3207 - MOSFET	1	16,07
Motobomba DC 12V	1	25,00
Protoboard 830 pontos	1	25,42
Sensor ultrassônico HC-SR04	1	8,42
Suporte para sensor	1	16,07
Placa acrílico 15,4cmX20,4cmX3mm	2	12
Placa acrílico 15cmX20,4cmX3mm	2	12
Placa acrílico 15cmX15cmX3mm	2	12
	Total	197,46



Na Tabela 2, destaca-se o Arduino UNO R3 como o responsável pelo controle do sistema e o sensor ultrassônico HC-SR04 como medidor de nível.

Planta de nível

A Figura 3 mostra, fisicamente, a planta de nível usada no projeto.

Figura 3 – Planta real



A planta de nível da Figura 3 foi construída utilizando-se 6 placas de acrílico de 3 mm de espessura, cujas dimensões foram especificadas na Tabela 2.

A partir dos dados da planta de nível, obtém-se os parâmetros, R , C e τ , da Equação (9). Para determinar o parâmetro R , considerou-se a vazão de saída constante e uma variação de 1 cm no nível de líquido. Por outro lado, a capacitância, C , se resume à área da base do tanque, resultando na Tabela 3:

Tabela 3 – Parâmetros da planta física

R	C	$\tau = RC$
$0,0625s/cm^2$	$C = 300cm^2$	$18,75s$

Dessa forma, a planta de nível mostrada na Figura 3 possui a função de transferência indicada na Equação (16):

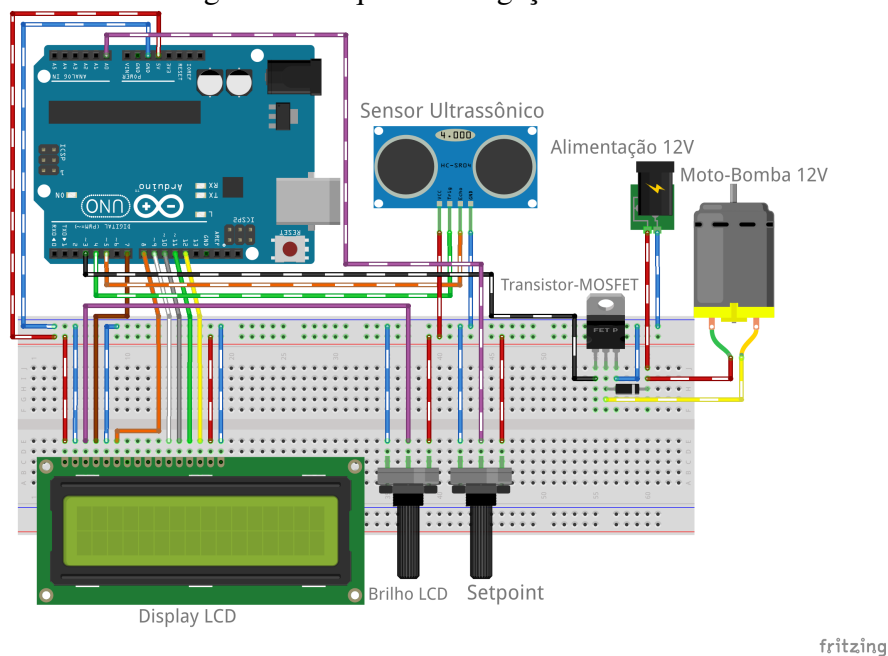
$$G(s) = \frac{0,0625}{18,75s + 1} \quad (16)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 fornece uma visão detalhada do sistema de controle desenvolvido, consistindo de um dispositivo controlador (Arduino UNO R3), um sensor, um *display* LCD, um potenciômetro (variação do *setpoint*) e uma motobomba de 12V. Os componentes do sistema interagem entre si, possibilitando a ação de controle.

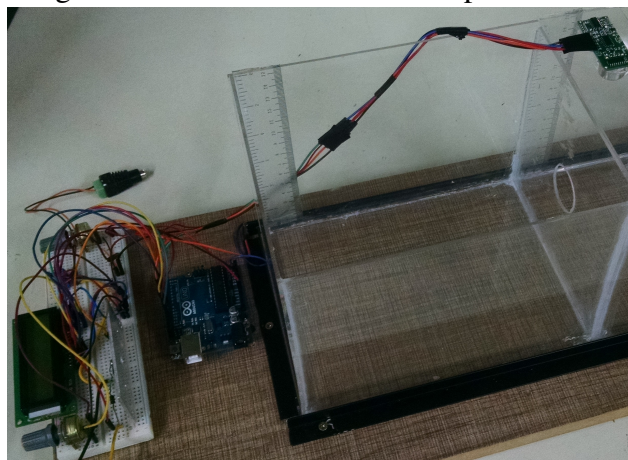


Figura 4 – Esquema de ligação do circuito



A Figura 5 ilustra, fisicamente, a Figura 4.

Figura 5 – Sistema fisicamente implementado



A determinação dos parâmetros do controlador PID tangenciou-se pelos métodos manuais de cálculo e posterior utilização de softwares de simulação. Com a intenção de observar as diversas ações do controle PID, foram realizados vários ensaios alterando-se as constantes, K_P , K_D e K_I , uma das configurações empregadas consiste nas constantes da Tabela 4:

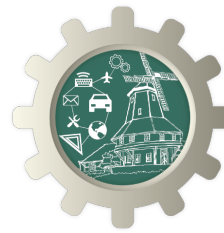
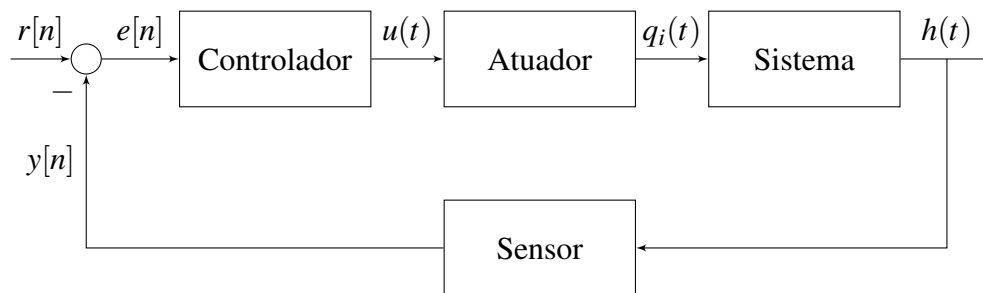


Tabela 4 – Constantes K_P , K_D e K_I atribuídas

K_P	K_D	K_I
2	0,5	0,5

A definição do valor de *setpoint*, $r[n]$, é o primeiro passo para iniciar o sistema, pois define-se o valor da referência de entrada do sistema de controle. O ciclo do sistema segue para o controlador, que realiza o processamento do erro, $e[n]$ e emite um sinal de controle $u(t)$ para o atuador que modifica o *status* da variável de controle da planta, $h(t)$. Esse processo está representado pelo seguinte diagrama de blocos:



Do diagrama de blocos ilustrado anteriormente, verifica-se que a ação de controle do sistema é iniciada após obtenção o valor da variável de saída a ser controlada $h(t)$, fornecida pelo sensor ultrassônico HC-SR04. O controlador irá comparar o valor de *setpoint* e o valor de leitura do sensor, originando o valor do erro $e[n]$. Os componentes do sistema podem ser observados na Figura 5.

O sinal de controle emitido pelo controlador, após o processamento do sinal de erro, é uma modulação por largura de pulso, ou seja, um sinal PWM. O sinal de controle controla um transistor e PWM regula a tensão de alimentação na motobomba, variando assim a vazão de entrada, que irá variar o valor do nível.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de controle abordado nesse trabalho possibilita, com muita facilidade, o seu uso como método de ensino-aprendizagem com enfoque prático da teoria de controle moderno, além de integrar diversos assuntos abordados em outras disciplinas do Curso de Engenharia, tais como, Instrumentação Industrial, Eletrônica e Microcontroladores.

O trabalho desenvolvido, embora em nível didático, possibilitou a aquisição de conhecimento e experiência em projetar e desenvolver um sistema de controle real com começo, meio e fim. Trata-se de uma articulação pedagógica que motiva e proporciona a autonomia dos alunos para a disciplina do auto aprendizado.



4.1 Agradecimentos

Agradecimentos especiais ao Programa de Educação Tutorial (PET) AutoNet/IFMT, pois devido a sua filosofia de atuação, aumentou sobremaneira a chance de sucesso desse trabalho. Agradecimentos extensivos ao professor Ronan Marcelo Martins, Tutor PET AutoNet/IFMT, pela tutoria realizada no PET e ao professor M.Sc. Robson Rogério Dutra Pereira pelos *insights* e orientações no desenvolvimento do sistema de controle.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, J. D. *Sistemas de Controle Automático*. [S.l.]: LTC. ISBN 9788521612100.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. *Sistemas de Controle para Engenharia*. [S.l.]: Bookman, 2013. ISBN 9788582600689.

OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. [S.l.]: Pearson, 2011. ISBN 9788576058106.

VASCONCELOS, F. J. de S.; MEDEIROS, C. M. de S. Modelagem, simulação e controle de uma planta de nível didática. 2012. ISSN 978-85-62830-10-5.

DEVELOPMENT OF LEVEL CONTROL SYSTEM IN DIDACTIC FRAMEWORK AS A SUPPLEMENT TO THE STUDY OF THE MODERN CONTROL THEORY

Abstract: *This paper presents the design and development of a control plant involving level control using PID, since it is very common in industries. The motivation of the project was premised on the attempt to create a facilitating method of teaching and learning in the area of control system in a didactic way due to the fact that the study of modern control theory in engineering undergraduate courses usually has a theoretical focus and with little emphasis on the practical part of developing control systems in real applications. In order to ensure improvement in the theory / practice relationship, the present article shows the simple implementation way of the control system with low cost, R\$ 197,46 was total cost, allowing its reproduction in the classroom or anywhere else. This pedagogical strategy resulted in an instrument that facilitates the student's understanding of*

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



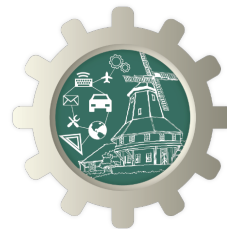
Educação e Tecnologia

Promoção



Associação Brasileira de Educação em Engenharia

Joinville/SC – 26 a 29 de Setembro de 2017
UDESC/UNISOCIESC
"Inovação no Ensino/Aprendizagem em
Engenharia"



COBENGE 2017
XLV CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA

the interdisciplinarity of the control system, reconciling theory and practice, since the developed plant integrates the knowledge of modern control theory with other topics such as microcontrollers, industrial instrumentation and power electronics.

Keywords: Control, Industrial Instrumentation, Microcontrollers, Teaching, Interdisciplinarity.

Organização



Promoção

