



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
CECAU - COLEGIADO DE ENGENHARIA DE  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO



OLÍVIA SILVA RESENDE

DESENVOLVIMENTO DE ROTEIRO PARA PRÁTICAS DE APOIO A  
DISCIPLINA DE TEORIA DE CONTROLE I UTILIZANDO  
LABORATÓRIO REMOTO

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE  
E AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2018

OLÍVIA SILVA RESENDE

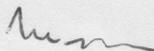
**DESENVOLVIMENTO DE ROTEIRO PARA PRÁTICAS DE APOIO A  
DISCIPLINA DE TEORIA DE CONTROLE I UTILIZANDO  
LABORATÓRIO REMOTO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia de Controle e Automação.

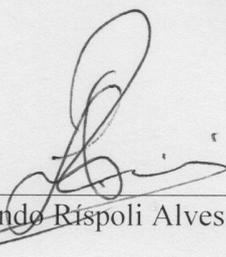
Orientador: Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro

Ouro Preto  
Escola de Minas - UFOP  
Fevereiro/2018

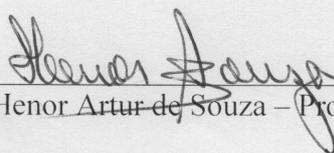
Monografia defendida e aprovada, em 01 de fevereiro de 2018, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Orientador



Prof. Dr. Luiz Fernando Rispoli Alves – Professor Convidado



Prof. Dr. Henor Artur de Souza – Professor Convidado

*Dedico este trabalho, com muito carinho, às pessoas que fazem parte permanente de minha vida e que sempre me ajudaram a vencer meus desafios: aos meus pais Fernando e Sandra, minhas irmãs Amanda e Iasmim e ao meu amado namorado Kayran.*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais essa conquista.

Aos meus pais, por serem sempre presentes apesar da distancia e por todo apoio e amor.

Aos minhas irmãs, pela cumplicidade e amizade.

Ao Kayran, que me aconselhou nos momentos mais difíceis e fez com que eles parecessem fáceis.

Ao meu orientador Professor Dr. Paulo Monteiro pelo aprendizado, paciência e dedicação.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Ouro Preto.

# RESUMO

Este trabalho consiste na elaboração de um roteiro para práticas de controle de nível no laboratório remoto de dois tanques acoplados, aplicando os conceitos de Teoria de Controle I, em uma bancada didática localizada em Ouro Preto, na Escola de Minas–UFOP. Ao utilizar este roteiro prático, espera-se que o estudante possa fazer uma análise crítica do comportamento do controle de nível de dois tanques acoplados para um Controlador Proporcional e Controlador Proporcional-Integral.

**Palavras-chave:** Controlador PID, Laboratório Remoto, Teoria de Controle, Tanques acoplados

# ABSTRACT

This work consists of drawing up a practical roadmap to level control on a remote laboratory with two coupled tanks, applying the concepts of Control Theory I, in a didactic stand located in Ouro Preto, at Escola de Minas - UFOP. When using the practical roadmap, it's expected that the student can do a critical analysis of the behavior of the two coupled tank level control using the Proportional Controller and the Proportional-Integral Controller.

**Keywords:** PID Controller, Remote Laboratory, Control Theory, Coupled Tanks

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos específicos	12
1.2	Justificativa do Trabalho	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>13</b>
2.1	Laboratórios Remotos	13
2.2	Tanques Acoplados	14
2.3	Teoria de Controle	15
2.3.1	Controlador Proporcional - P	16
2.3.2	Controlador Proporcional Integral - PI	17
2.3.3	Controlador Proporcional Derivativo - PD	17
2.3.4	Controlador Proporcional Integral Derivativo - PID	18
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>19</b>
3.1	Descrição da Bancada Didática de Tanques Acoplados.	19
3.2	Parâmetros Gerais da Bancada	21
3.3	Modelagem do Processo	21
3.4	Curva de Reação	22
3.5	Funcionamento Laboratório Remoto	24
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>28</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>29</b>
<b>A</b>	<b>ROTEIRO DIDÁTICO</b>	<b>31</b>

## LISTA DE FIGURAS

1	Descrição simplificada de um sistema de controle. Fonte: (NISE, 2002).	16
2	Diagramas de blocos de sistema em malha aberta. Fonte:(NISE, 2002).	16
3	Diagramas de blocos de sistema em malha fechada. Fonte: (NISE, 2002).	17
4	Diagrama de blocos controlador PID. Fonte: (GUIMARAES, 2017). . .	18
5	Bancada de Tanques Acoplados. Fonte: (OLIVEIRA, 2017). . . . .	19
6	Configuração adotada para sistema de dois tanques. Fonte: (COCOTA et al., 2014). . . . .	20
7	Curva de Reação de um Sistema de 1º Ordem. Fonte: (OLIVEIRA, 2017) . . . . .	23
8	Tela principal. Fonte: (OLIVEIRA, 2017) . . . . .	24
9	Bancada de Tanques Acoplados. Fonte: (OLIVEIRA, 2017). . . . .	31
10	Configuração adotada para sistema de dois tanques. Fonte: (COCOTA et al., 2014). . . . .	32
11	Curva de Reação de um Sistema de 1º Ordem. Fonte: (OLIVEIRA, 2017) . . . . .	34

## LISTA DE TABELAS

1	Parâmetros Gerais da Bancada . . . . .	21
2	Sintonia de Ziegler Nichols . . . . .	24
3	Sintonia de Cohen Coon . . . . .	24
4	Sintonia de Ziegler Nichols . . . . .	34
5	Sintonia de Cohen Coon . . . . .	34

# 1 INTRODUÇÃO

É apresentado em (FIDALGO et al., 2013) que um laboratório remoto é um tipo de laboratório onde o equipamento experimental e o utilizador estão fisicamente separados e a execução da experiência exige um meio de comunicação (como a Internet) entre o utilizador e o equipamento remoto e geralmente também uma interface especificamente desenvolvida para o efeito. Os laboratórios remotos são uma ferramenta tecnológica e pedagógica com uso crescente em todos os níveis de educação, e sua utilização generalizada é uma parte importante do seu próprio aperfeiçoamento e evolução.

(D'ABREU; CHELLA, 2003) dizem que laboratórios remotos são equipamentos reais que podem ser operados e controlados remotamente por meio de uma interface gráfica geralmente utilizando a rede internet como meio de comunicação. Um laboratório remoto simplifica a logística e infraestrutura necessária ao funcionamento de um laboratório convencional, como agendar equipamentos, espaços físicos e profissionais para acompanhar as atividades do aluno. Do ponto de vista educacional, ao ter liberdade para conduzir experimentos de qualquer computador conectado à internet no horário que lhe for mais conveniente, o aprendizado passa a acontecer em função do ritmo e da disponibilidade de tempo do aluno.

(AMARAL et al., 2011) dizem que o uso de laboratórios de aprendizagem tem se tornado mais frequente e essencial em atividades educacionais. Essa estratégia se consolida entre os educadores por proporcionar um espaço onde os estudantes podem experimentar diversas situações úteis ao seu desenvolvimento. Assim, aprender fazendo é uma expressão que se revela em atividades laboratoriais e se fortalece através da Teoria Construtivista por considerar que o conhecimento deve ser construído pelo aprendiz, através da interação com o objeto e não transmitido pelo professor.

(BRITO, 2014) diz que o controle de nível em tanques vem se destacando a cada dia e já é de grande interesse tanto no âmbito acadêmico, quanto na área industrial. Embora tenha uma conceituação relativamente simples, o controle de nível requer muitas vezes a utilização de artifícios e técnicas apuradas para que seja realizado. A título de exemplo, em ambientes industriais, muitos processos necessitam que os níveis de líquidos sejam

mantidos dentro de valores pré-estabelecidos para o bom funcionamento da produção, assim como para fins de cálculos de custos e de estoques.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um roteiro para práticas de apoio a disciplina de Teoria de Controle I utilizando o Laboratório Remoto da Escola de Minas - UFOP para realização de práticas de controle de nível de tanque.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Estudar sobre Laboratórios Remotos;
- Estudar sobre Tanques Acoplados;
- Relembrar conceitos de Teoria de Controle;
- Estudar sobre a Bancada didática e entender seu funcionamento.

## 1.2 Justificativa do Trabalho

Como apresentado em (ECKHART; SCHAF; SILVA, 2006) para o ensino de controle é necessário unir teoria e prática. Muitas vezes a prática é feita apenas com simulações computacionais, que não se aproximam muito da realidade física por não considerarem a existência de ruídos, não-linearidades e perturbações. Experimentos reais exigem manutenção, muitas vezes são caros e são sub-utilizados por ficarem ociosos boa parte do tempo. Por outro lado, o acesso à internet está cada dia mais abrangente. Daqui surge a ideia da experimentação remota, onde laboratórios reais podem ser acessados remotamente através da internet, possibilitando o compartilhamento de experimentos entre entidades de ensino.

Sendo assim desenvolver roteiro para práticas de apoio a disciplina de Teoria de Controle I utilizando o Laboratório Remoto da Escola de Minas trará grandes benefícios a aprendizagem dos alunos, pois possibilita unir teoria e prática, aumentando a qualidade de ensino e melhorando a aprendizagem dos alunos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado conceitos sobre Laboratórios Remotos (2.1), Tanques Acoplados (2.2) e Teoria de Controle (2.3).

### 2.1 Laboratórios Remotos

Como apresentado em (AKTAN et al., 1996) aprendizado a distância é um paradigma onde estudantes, professores e os equipamentos podem estar em localizações geográficas diferentes. Uma aplicação para laboratório remoto é uma forma de por em prática o aprendizado a distância usando a internet para acesso às instalações usuais de um laboratório. Um software bem sucedido para aprendizado a distância e laboratório remoto precisa ter três componentes macros: 1) Aprendizado ativo, 2) Instalações de coleta de dados, 3) Segurança. O aprendizado ativo é composto por colaboração entre os pares, presença ativa e liberdade dos usuários para tomada de decisão. Em um ambiente assim é preciso que os estudantes sejam encorajados a compartilhar suas ideias e descobertas.

Existe ao redor do mundo laboratórios remotos que auxiliam na educação a distancia. Como visto em (MASON, 2000) a *Open University*, na Grã-bretanha, fundada há mais de trinta anos, se tornou uma universidade totalmente eletrônica e, atualmente, são oferecidos cursos de graduação e de pós-graduação inteiramente on-line.

De acordo com (ROSS et al., 1997) o *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* desenvolveu uma instancia de laboratórios remotos chamado iLabs, com caracterização de dispositivos microeletrônicos que permite a realização de experimentos, de qualquer lugar, usando um navegador de internet com interpretação Java.

Como apresentado em (GARAIZAR, 2009) o WebLab é, genericamente, um laboratório remoto controlado pela internet, onde o aluno pode acessar o hardware do laboratório para o programar, entrar com valores e observar a saída. Com um WebLab é dispensada a necessidade do aluno ir às dependências físicas do laboratório na universidade e diminui a necessidade de pessoal especializado alocado para as aulas práticas.

Na *Universidade de Sannio* na Itália, como visto em (CANFORA; DAPONTE; RAPUANO, 2004), também foi desenvolvido um laboratório remoto para ensino de medições eletrônicas. O usuário pode realizar medições remotas e carregar o resultados para processamento local, usando apenas um navegador de internet.

Em 1997 na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) surgiu o RExLab, que conta atualmente com uma rede de 12 Universidades (RexNet) em cinco países diferentes. Um de seus objetivos é atender a necessidade de apropriação social da ciência e da tecnologia, popularizando conhecimentos científicos e tecnológicos, estimulando os jovens a inserirem-se nas carreiras científico-tecnológicas e buscar iniciativas que integrem a educação científica ao processo educacional promovendo a melhoria devido à atualização/modernização do ensino em todos os seus níveis, enfatizando ações e atividades que valorizem e estimulem a criatividade, a experimentação e a interdisciplinaridade, retirado de (ALVES, 2017).

## 2.2 Tanques Acoplados

Existem na literatura diversos processos envolvendo tanques acoplados. (GREGA; MACIEJCZYK, 1994) apresentam um sistema com dois tanques, um superior e outro inferior, no qual utiliza-se o primeiro para regular a vazão de entrada no segundo. O tanque inferior possui uma seção transversal variável com o nível, o que causa uma variação na dinâmica da vazão devido a não-linearidades entre o nível e o volume de fluido no tanque, dependendo do ponto de operação. O objetivo é controlar o nível do tanque inferior através da atuação sobre a bomba que alimenta o tanque superior, utilizando um acionamento a relé e a técnica PWM (*Pulse Width Modulation* que significa modulação por largura de pulso). A técnica de modelagem utilizada é a da linearização das equações do sistema em torno de um ponto de operação. São analisadas as influências das não-linearidades do sistema na sensibilidade dos algoritmos de controle dependendo do ponto de operação. Técnicas de controle PID cascata, tempo-mínimo e espaço-de-estados foram testadas, analisando-se mudanças na referência (efeitos de linearização), tempo de amostragem (efeito de discretização) e saturação do termo integrativo (prevenção do efeito wind-up). O sistema tem não só fins de pesquisa mas também educacionais, provendo um ambiente onde os estudantes podem realizar o projeto completo de um sistema de controle, desde a modelagem até o teste experimental de diferentes técnicas de controle digital.

Como apresentado em (OLIVEIRA; RESENDE; MAIA, 1997) foi construído no Laboratório de Controle de Processo Industriais na Universidade Federal de Minas Gera

(UFMG) um processo não-linear com dois tanques interativos. Os dois tanques estão em serie e o objetivo é controlar o nível do segundo tanque, não dependendo a vazão de saída da altura. O controle da vazão de entrada no primeiro tanque é feito através de uma válvula pneumática. O controle é neural *gain scheduling*, através do treinamento de controladores lineares para diversos pontos de operação da planta.

(EKER; MALMBORG, 1999) exploram o problema da necessidade de compromisso entre diferentes objetivos de controle, utilizando técnicas de controle híbrido. Apresentando uma estrutura com a união do controle PID para regulação em regime permanente e o controle de tempo mínimo para mudanças de referências. A estratégia é implementada em um processo que consiste de dois tanques em cascata, onde o objetivo é controlar o nível do tanque inferior através da vazão de entrada no tanque superior. Os resultados apresentam bom desempenho tanto para mudanças de referência como para rejeição de perturbações.

Nos artigos (JOHANSSON, 2000) e (JOHANSSON et al., 1999) descreve-se um sistema com quatro tanques utilizado para ilustrar as limitações de desempenho em controladores para sistemas de realimentação multivariáveis, especialmente o efeito de zeros em malha fechada. O sistema foi concebido de forma que sua dinâmica possa passar de fase mínima à fase não-mínima através do ajuste de uma válvula. O sistema foi desenvolvido em 1996 no Instituto Tecnológico de Lund, Suécia, e desde então foi objeto de estudo em diversos projetos envolvendo identificação de sistemas, controle descentralizado e controle ótimo.

(KO et al., 2001) apresentam um sistema com dois tanques acoplados, para fins de ensino e pesquisa, utilizados em um laboratório virtual de controle. Os tanques estão acoplados lateralmente, podendo-se obter diferentes configurações para o sistema variando-se o diâmetro do tubo que os conecta. Quatro tipos de estruturas de controle são implementadas: controle manual (em malha aberta), também usado para coletar dados para a identificação do sistema físico, controle PID, controle no espaço-de-estados e controle *fuzzy*.

## 2.3 Teoria de Controle

De acordo com (NISE, 2002) sistemas de controle fazem parte de uma sociedade moderna. Em varias aplicações, como: na orientação, navegação e controle de mísseis e veículos

espaciais, bem como em aviões e navios. Também define que um sistema de controle consiste em subsistemas e processos construídos com o objetivo de se obter uma saída desejada com um desempenho desejado, dada uma entrada especificada.



Figura 1 – Descrição simplificada de um sistema de controle. Fonte: (NISE, 2002).

Os sistemas de controle podem ser em malha aberta ou realimentado, como mostrado a seguir:

- Sistema em malha aberta: são sistemas como mostrado na figura 2. Como mostrado em (OGATA, 1998) são sistemas de controle onde a saída não tem efeito na ação de controle, ou seja, a saída não é comparada a entrada de referência, não realizando correções nas perturbações.

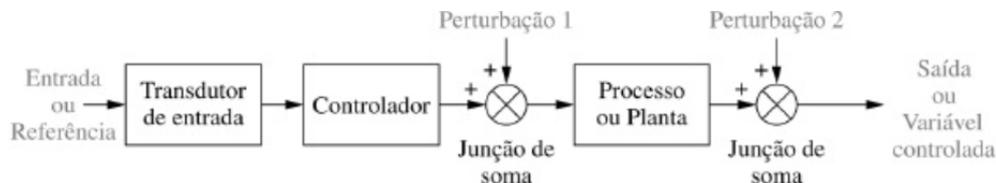


Figura 2 – Diagramas de blocos de sistema em malha aberta. Fonte:(NISE, 2002).

- Sistema em malha fechada ou realimentado: são sistemas como mostrado na figura 3. Segundo (OGATA, 1998) é aquele que o sinal de saída tem efeito direto na ação de controle. O erro que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal realimentado é alimentado no controlador de forma a reduzir o erro e manter a saída do sistema em um valor desejado.

### 2.3.1 Controlador Proporcional - P

O Controlador Proporcional apresenta a relação entre o sinal de saída do controlador  $u(t)$  e o sinal de erro atuante  $e(t)$  definida pela seguinte equação:

$$u(t) = k_p e(t) \quad (2.1)$$

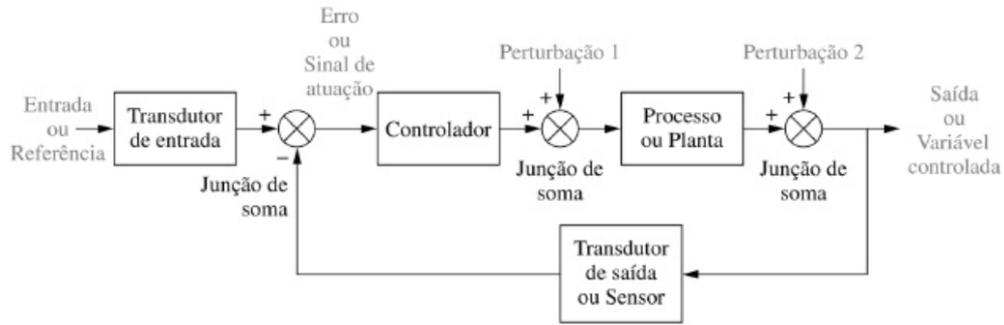


Figura 3 – Diagramas de blocos de sistema em malha fechada. Fonte: (NISE, 2002).

Onde  $k_p$  é denominado ganho proporcional.

Como visto em (IBRAHIM, 2006) para  $k_p$  elevado o sistema poderá ficar instável e para ganhos baixos o sistema pode ficar distante do ponto de operação ou demore a responder ao erro.

### 2.3.2 Controlador Proporcional Integral - PI

O Controlador Proporcional Integral apresenta uma relação entre o sinal de saída do controlador e o sinal de erro atuante igual a equação a seguir:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \quad (2.2)$$

Onde  $K_i$  é denominado ganho integral.

Com base em (LOURENÇO, 1997) conclui-se que este controlador tem como características eliminar o erro em regime permanente, porque adiciona um polo na origem da função de transferência do controlador.

### 2.3.3 Controlador Proporcional Derivativo - PD

O Controlador Proporcional Derivativo apresenta a seguinte equação para a relação entre o sinal de saída do controlador e o sinal de erro atuante:

$$u(t) = k_p e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3)$$

Onde  $K_d$  é denominado ganho derivativo.

De acordo com (LOURENÇO, 1997) a ação de controle derivativa melhora a estabilidade do sistema, reduzindo o *overshoot* e melhorando a resposta transitória. (OGATA, 1998) diz que mesmo com a vantagem de ser antecipatória ao erro, a ação de controle derivativa tem a desvantagem de amplificar os sinais de ruídos e causar um efeito de saturação no atuador.

### 2.3.4 Controlador Proporcional Integral Derivativo - PID

O Controlador Proporcional Integral Derivativo, comumente conhecido como PID é muito usado em vários setores industriais, por tratar tanto da parte transitória quanto do regime permanente, corrigindo qualquer eventual perturbação sem levar o sistema à instabilidade.

A estrutura PID é formado por 3 parte:

$$u(t) = k_p e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt} + k_i \int e(t) dt \quad (2.4)$$

Onde, realizando a transformada de Laplace e considerando as condições de contorno inicial nula, tem-se:

$$G_c = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + k_d s + \frac{k_i}{s} \quad (2.5)$$

O processo de definição de cada uma dessas constantes é chamado de sintonia do controlador PID.

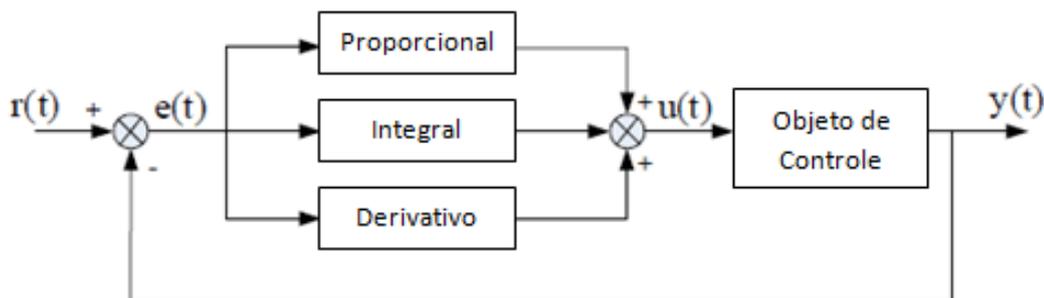


Figura 4 – Diagrama de blocos controlador PID. Fonte: (GUIMARAES, 2017).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Descrição da Bancada Didática de Tanques Acoplados

Como apresentado em (OLIVEIRA, 2017) a bancada didática foi desenvolvida por discentes no Laboratório de Maquinas de Escola de Minas e consiste em quatro tanques com 4,76 cm de diâmetro interno e 25 cm de altura, podendo ser usada com configuração de dois ou quatro tanques acoplados. É composta por um reservatório na parte inferior, duas moto-bombas, um motor de corrente contínua de 12 V, quatro sensores de pressão MPXM2010 (alimentados por uma fonte de 24 V), mangueiras redutoras e divisores de vazão para o sistema hidráulico.



Figura 5 – Bancada de Tanques Acoplados. Fonte: (OLIVEIRA, 2017).

Pode-se realizar experimentos de controle na configuração SISO (*Single Input. Single Output.*) com ou sem acoplamento e também na configuração MIMO (*Multiple Input. Multiple Output.*) com fase mínima ou não.

Para o desenvolvimento do Laboratório Remoto foi aplicado o sistema de controle SISO com acoplamento, sendo necessário utilizar dois tanques e uma bomba d'água. O esquema desta configuração é apresentado a seguir:

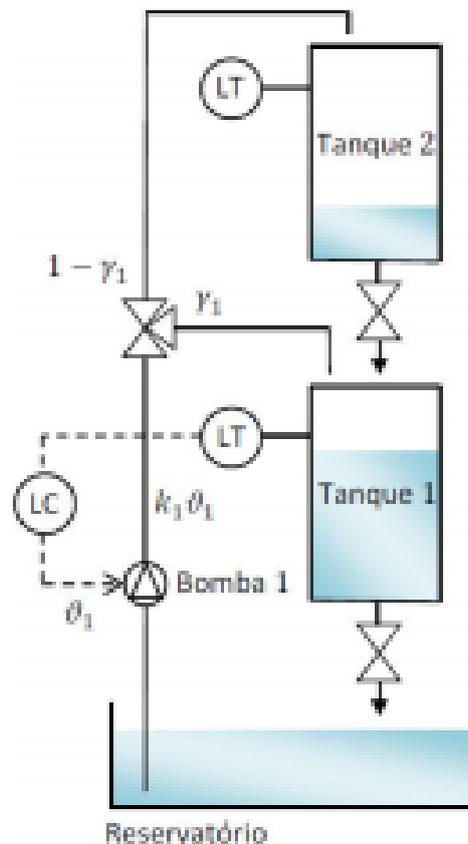


Figura 6 – Configuração adotada para sistema de dois tanques. Fonte: (COCOTA et al., 2014).

Ao ligar a bomba esta fornece uma parcela de vazão ( $\gamma_1$ ) para o tanque 1 e para o tanque 2 a outra parcela ( $1 - \gamma_1$ ). O circuito é fechado, pois cada tanque possui na base um dreno, pelo qual a água retorna para o reservatório. O nível dos tanques são medidos indiretamente por meio de sensores de pressão diferencial que estão localizados na parte superior de cada tanque. Os transdutores estão conectados à PCI (Placa de Circuito Impresso) e enviam os sinais elétricos para entradas analógicas do microcontrolador, a leitura é realizada de 0 a 5 V e a altura determinada por meio de conversão. A PCI contém um PIC 18F4550 e um módulo Ethernet ENC28j60 como principais componentes que possibilitou o controle da Bancada Didática por meio da rede Internet.

### 3.2 Parâmetros Gerais da Bancada

Os parâmetros relacionados às grandezas físicas e as ganhos do sistema que não dependem de experimentos para identificados, estão na tabela a seguir:

Símbolo	Valor [Unid.]	Descrição
$A_1, A_2$	17,795[ $cm^2$ ]	Área de seção transversal dos tanques.
$\alpha_1$	0,075[ $cm^2$ ]	Área de seção transversal do dreno do tanque 1
$\alpha_2$	0,071[ $cm^2$ ]	Área de seção transversal do tanque 2
$d_{1e}$	0,318[ $cm$ ]	Diâmetro de estrangulamento do fluxo da bomba na entrada do tanque 1
$d_{2e}$	0,238[ $cm$ ]	Diametro de estrangulamento do fluxo da bomba na entrada do tanque 2
$g$	978,79[ $\frac{cm}{s^2}$ ]	Aceleração da gravidade
$k_{c1}$	$\frac{5}{21,7}[\frac{V}{cm}]$	Ganho do sensor para a amostragem do nível no tanque
$k_{c2}$	$\frac{5}{23,5}[\frac{V}{cm}]$	Ganho do sensor para a amostragem do nível no tanque 2

Tabela 1 – Parâmetros Gerais da Bancada

### 3.3 Modelagem do Processo

Como apresentado em (LIBII, 2003), apud (BRITO, 2014) quando um líquido em um tanque é submetido a uma descarga por um orifício de saída com área da seção transversal muito menor que a área da seção transversal do tanque ( $a_i \ll A_i$ ) a hipótese de escoamento do fluido sem atrito e em regime quase permanente pode ser empregada. Essa hipótese possibilita o uso da equação de Bernoulli no centro da superfície do fluido e no centro da seção do dreno. Assim, o modelo não linear, que descreve a dinâmica do nível dos tanques em função das vazões de entrada e de saída, foi obtido a partir da lei de conservação para escoamentos incompressíveis e da lei de Bernoulli, como mostrado nas Equações 3.1 e 3.2 os modelos não lineares.

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{(1 - \gamma_1)}{A_2} k_b \theta_1 - k_{i2} \frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} \quad (3.1)$$

$$\frac{dh_1}{dt} = k_{i2} \frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} + \frac{\gamma_1}{A_1} k_b \theta_1 - k_{i1} \frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} \quad (3.2)$$

Através da expansão em séries de Taylor das equações 3.1 e 3.2 encontra-se o modelo linear na equações 3.3 e 3.4, desprezando-se os termos de segunda ordem e superiores, e assumindo-se as variáveis de desvio  $x_i = x_{i,h} - h_{i,0}$  e  $u_i = u_{i,h} - \theta_{i,0}$ .

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{(1 - \gamma_1)}{A_2} k_b u_1 - k_{i_2} \frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2h_{2,0}}} x_2 \quad (3.3)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = k_{i_2} \frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2h_{2,0}}} x_2 + \frac{\gamma_1}{A_1} k_b u_1 - k_{i_1} \frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_{1,0}}} x_1 \quad (3.4)$$

Aplicando-se a transformada de Laplace nas Equações 3.3 e 3.4, encontram-se as funções de transferência de cada tanque, que podem ser expressas pelas equações 3.5 e 3.6:

$$\frac{X_2(s)}{U_1(s)} = \frac{(1 - \gamma_1)c_2}{(\tau_2 s + 1)} \quad (3.5)$$

$$\frac{X_1(s)}{U_1(s)} = \frac{\gamma_1 c_1 \tau_2 s + c_1}{(\tau_2 s + 1)(\tau_1 s + 1)} \quad (3.6)$$

em que  $X_1(s)$  e  $X_2(s)$  são os sinais de saída referentes aos níveis dos tanques 1 e 2 e  $U_1(s)$  é o sinal de entrada no sistema referente à tensão aplicada na bomba,  $c_1 = \frac{k_b k_c \tau_1}{A_1}$  e  $c_2 = \frac{k_b k_c \tau_2}{A_2}$ , sendo as constantes de tempo  $\tau_i$  dadas por:

$$\tau_i = \frac{A_i}{k_{l_i} a_i} \sqrt{\frac{2h_{i,0}}{g}}, i = 1, 2 \quad (3.7)$$

### 3.4 Curva de Reação

No laboratório remoto desenvolvido por (OLIVEIRA, 2017) para sintonia do controlador PID utiliza-se o Método da Curva de Reação, o qual a partir de um degrau dado ao sistema em malha aberta é possível obter os parâmetros atraso (L), constante de tempo (T) e ganho direto do sistema ( $K_0$ ) para sintonia empírica do controlador. A planta é pode ser descrita como um sistema de primeira ordem, conforme apresentado na equação 3.8:

$$G(s) = \frac{k_0 e^{-sL}}{\tau s + 1} \text{ sendo } \tau > 0 \quad (3.8)$$

A saída da planta foi colocada em  $h_{1,0}$  (nível do tanque 1 no ponto de operação) de forma manual aplicando uma entrada  $\theta_{1,0}$ . Após um intervalo de tempo, aplica-se uma mudança na entrada da planta (degrau), este deve estar em uma faixa de 10 a 20% de seu fundo de escala ( $\theta_{1,1}$ ). A resposta transitória da planta a esse degrau foi amostrada, até que se alcançou um novo valor em regime permanente ( $h_{1,1}$ ), associado a nova entrada constante da planta ( $\theta_{1,1}$ ). Com este procedimento, os sistemas descritos pela Equação 3.8 irão apresentar uma curva de resposta parecido com a Figura 2 que é conhecida como a Curva de Reação do Processo, na qual m.s.t. significa a reta tangente no ponto de derivada máxima da curva.

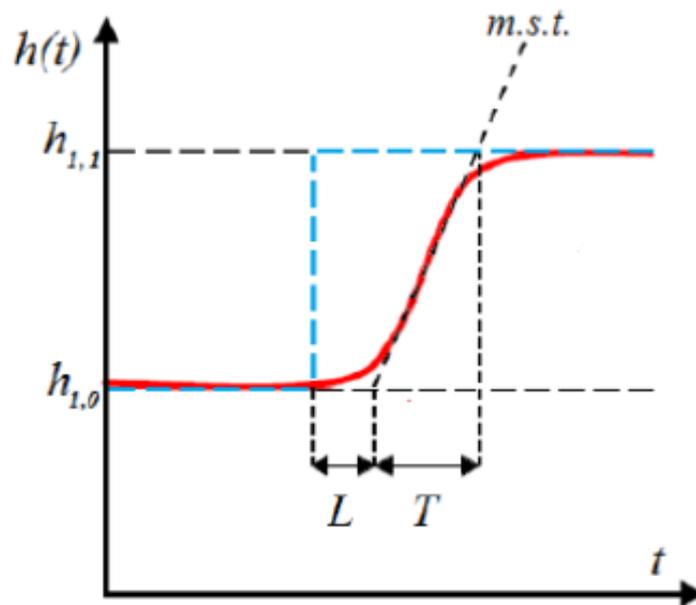


Figura 7 – Curva de Reação de um Sistema de 1º Ordem. Fonte: (OLIVEIRA, 2017)

A partir dessa curva, pode-se identificar o ganho direto ( $K_0$ ), o atraso ( $L$ ) e a constante de tempo ( $\tau$ ) do sistema. O ganho direto é representado pela Equação 3.9:

$$k_0 = \frac{h_{1,1} - h_{1,0}}{\theta_{1,1} - \theta_{1,0}} \quad (3.9)$$

O método de sintonia por Ziegler Nichols tem como objetivo obter uma reação de 4:1 do primeiro para o segundo pico na resposta do sistema dada uma referência e um degrau.

A partir das constantes  $K_0$ ,  $L$  e  $\tau$ , pode-se determinar os parâmetros do controlador para alcançar este amortecimento particular na resposta em malha fechada do sistema (Tabela 2).

Tipo do Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\tau}{k_0 L}$		
PI	$0,9 \frac{\tau}{k_0 L}$	$3L$	
PID	$1,2 \frac{\tau}{k_0 L}$	$2L$	$0,5L$

Tabela 2 – Sintonia de Ziegler Nichols

A proposta de Cohen-Coon de sintonia conforme a Equação 3.8 está apresentada na Tabela 3.

Tipo do Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\tau}{k_0 L} \left(1 + \frac{L}{3\tau}\right)$		
PI	$\frac{\tau}{k_0 L} \left(0,9 + \frac{L}{12\tau}\right)$	$\frac{L(30\tau+3L)}{9\tau+20L}$	
PID	$\frac{\tau}{k_0 L} \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4\tau}\right)$	$\frac{L(32\tau+6L)}{13\tau+8K}$	$\frac{4L\tau}{11\tau+2L}$

Tabela 3 – Sintonia de Cohen Coon

### 3.5 Funcionamento Laboratório Remoto

Para acessar o Laboratório Remoto deve-se utilizar um navegador de preferência o Google Chrome e abrir o endereço <http://200.239.166.71/>. Na página principal é possível realizar o procedimento online para projetar um controlador PI para o sistema de dois tanques acoplados. A seguir a imagem da página principal:

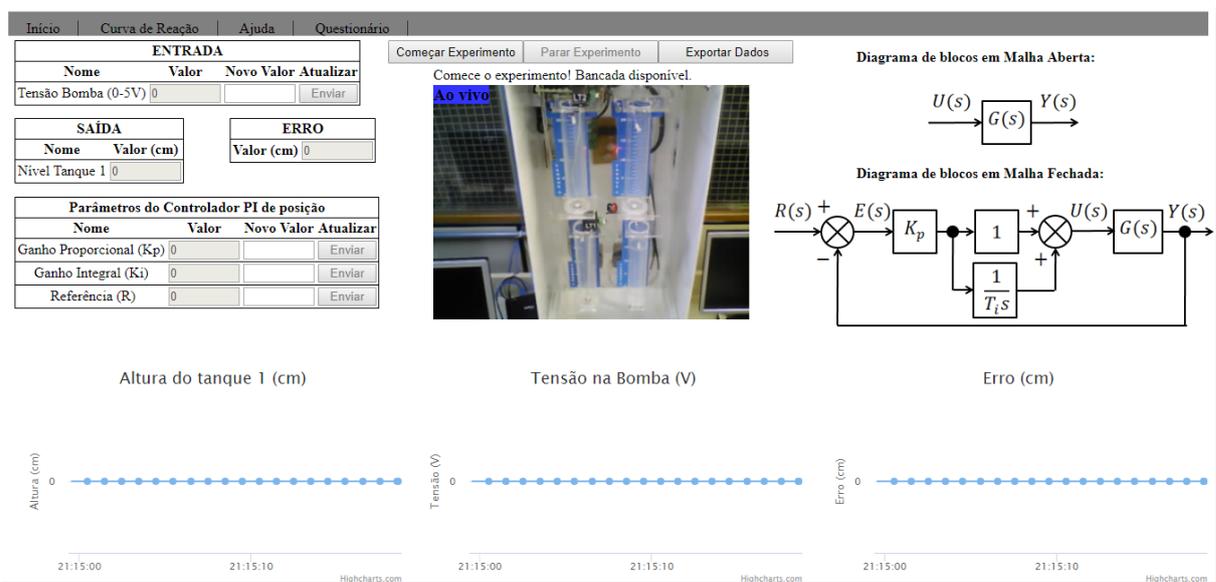


Figura 8 – Tela principal. Fonte: (OLIVEIRA, 2017)

Para realizar o experimento, primeiramente, deve-se verificar se a bancada está disponível. Para iniciar o procedimento é necessário apertar o botão “Começar Experimento” e assim terá o tempo de 610 segundos para realizá-lo. Na tela principal tem a tabela entrada que é responsável por acionar a bomba em malha aberta, sendo este valor de 0 a 5 V. A tabela saída e o gráfico Altura do tanque 1 mostram o valor do nível do tanque de baixo. A tabela parâmetros do controlador de PI de posição é responsável para acionar a bomba em malha fechada, para isso é necessário realizar todo o experimento e calcular as constantes com ajuda do software Matlab. O gráfico tensão na bomba apresenta o valor atual da alimentação na bomba. tela principal também mostra “Ao vivo” o experimento e o que está acontecendo. Após a realização do experimento, é possível exportar os dados em Excel.

Na aba Curva de Reação é apresentado resumidamente o que é um sistema de primeira ordem e como podemos calcular os parâmetros de controlador PID usando as técnicas de Ziegler-Nichols e Cohen-Coon, no final dessa aba encontra-se um tutorial de como fazer um experimento completo e projetar o controlador com ajuda do Matlab.

Na aba Ajuda encontra-se resumidamente a descrição do sistema de dois tanques acoplados, mostrando o diagrama esquemático do fluxo da água, os sensores e a placa de circuito impresso utilizada. É possível ver também os parâmetros da bancada didática, os quais não precisam de experimento para identificação, assim como a modelagem do sistema.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Para o desenvolvimento do roteiro práticos de apoio a disciplina de Teoria de Controle I, foi necessário seguir algumas etapas, como estudar alguns conceitos principais de laboratórios remotos, tanques acoplados, relembrar conceitos de teoria de controle e entender o trabalho de final de curso desenvolvido pelo aluno Luiz Otávio Mendes de Oliveira (presente em (OLIVEIRA, 2017)) do curso de Engenharia de Controle e Automação.

Com o estudo sobre laboratórios remotos pode-se observar que esta é uma forma de colocar em prática o aprendizado a distância, ou seja, sem a necessidade de ir até as dependências onde se encontra o experimento. Além de apresentam aos estudantes a possibilidade de compartilhar ideias e descobertas.

Sobre os tanques acoplados, existem diversos processos os envolvendo, usados não só para pesquisa mas com fins educacionais como é o caso do presente trabalho. Estudo similar foi desenvolvido por (KO et al., 2001) que apresenta um sistema com dois tanques acoplados para fins de ensino e pesquisa, utilizados em um laboratório virtual de controle.

Durante a revisão sobre a teoria de controle foi possível recapitular nos conceitos de sistema de controle em malha aberta e malha fechada e as características dos controladores proporcional, proporcional derivativo, proporcional integral e proporcional derivativo integral.

O trabalho apresentado por (OLIVEIRA, 2017) apresenta a metodologia para criação e desenvolvimento do laboratório remoto, mostrando seu funcionamento a partir do site (OLIVEIRA, 2017) e como realizar o experimento. As informações apresentadas foram de extrema importância para a criação do roteiro. Por meio das informações do site e do trabalho, foram realizados testes da utilização do sistema de controle do laboratório remoto, seguindo os vídeos tutoriais, verificando a usabilidade do sistema e analisando a necessidade de alterar alguma das etapas para realização da prática.

Validando todas as etapas de realização da prática, foi escrito o roteiro. Para um

melhor aproveitamento do roteiro, foram apresentados previamente uma descrição da bancada didática e os métodos de sintonia do controlador pela curva de reação, dando assim um embasamento ao aluno antes de realizar a prática. Foram descritas todas as etapas para execução da prática. Ao final ,é apresentado ao aluno um questionário para uma reflexão sobre conhecimento adquirido.

## 5 CONCLUSÕES

Durante o desenvolvimento desse trabalho foi possível perceber que os laboratórios remotos auxiliam no aprendizado e facilitam a realização de experimentos independente do horário e sem a necessidade de acompanhamento de um profissional responsável, com isso os alunos conseguem por conta própria aplicar os conhecimentos adquiridos na disciplina sem precisar se deslocar até o laboratório onde se realiza o experimento em um horário pré determinado.

No estudo da teoria de controle, a construção de uma bancada didática de tanques acoplados facilita o entendimento dos conceitos e teorias apresentados na disciplina, principalmente no estudo do funcionamento dos controladores e o controle de nível.

Com a variação dos parâmetros, o aluno pode verificar as alterações no comportamento do sistema controlado.

Para trabalho futuro, sugere-se desenvolver sistemas de controla Proporcional Derivativo e Proporcional Integral Derivativo remotos, bem como roteiros para aulas práticas.

## REFERÊNCIAS

- AKTAN, B. et al. Distance learning applied to control engineering laboratories. **IEEE Transactions on education**, IEEE, v. 39, n. 3, p. 320–326, 1996.
- ALVES, P. J. B. da M. **Laboratório de Experimentação Remota - Universidade Federal de Santa Catarina - Sobre - RExLab**. 2017. <<https://rexlab.ufsc.br/news/pt/sobre/>>, visitado em 10/12/2017.
- AMARAL, É. et al. Laboratório virtual de aprendizagem: uma proposta taxonômica. **RENOTE**, v. 9, n. 2, 2011.
- BRITO, R. P. D. **Análise de desempenho de um neurocontrolador para o controle de nível de um sistema de dois tanques acoplados**. 2014.
- CANFORA, G.; DAPONTE, P.; RAPUANO, S. Remotely accessible laboratory for electronic measurement teaching. **Computer Standards & Interfaces**, Elsevier, v. 26, n. 6, p. 489–499, 2004.
- COCOTA, J. A. N. et al. Análise de diferentes controladores para o processo de dois tanques acoplados. 2014.
- D'ABREU, J. V. V.; CHELLA, M. T. Ambiente de telerobótica em ead. In: **Anais do Workshop de Informática na Escola**. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, n. 1, p. 131–141.
- ECKHART, D.; SCHAF, F.; SILVA, J. d. Uma plataforma de experimentação remota para ensino de controle. In: **Anais: XVI–Congresso Brasileiro de Automática**. Salvador: UFBA. [S.l.: s.n.], 2006.
- EKER, J.; MALMBORG, J. Design and implementation of a hybrid control strategy. **IEEE control systems**, IEEE, v. 19, n. 4, p. 12–21, 1999.
- FIDALGO, A. V. et al. Adaptação de laboratórios remotos a cenários de ensino: Casos de estudo com visir e remotelectlab. **VAEP-RITA**, v. 1, n. 2, p. 135–141, 2013.
- GARAIZAR, P. **WebLab Deusto: Laboratórios Remotos**. 2009. UNIVERSIDAD DE DEUSTO, <<http://blog.catedratelefonica.deusto.es/weblab-deusto-laboratorios-remotos/>>, visitado em: 11/12/2017.
- GREGA, W.; MACIEJCZYK, A. Digital control of a tank system. **IEEE Transactions on Education**, IEEE, v. 37, n. 3, p. 271–276, 1994.
- GUIMARAES, K. A. Projeto de um controlador fuzzy pid para controle de velocidade de um mrv. 2017.
- IBRAHIM, D. **Microcontroller based applied digital control**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.

- JOHANSSON, K. H. The quadruple-tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero. **IEEE Transactions on control systems technology**, IEEE, v. 8, n. 3, p. 456–465, 2000.
- JOHANSSON, K. H. et al. Teaching multivariable control using the quadruple-tank process. In: IEEE. **Decision and Control, 1999. Proceedings of the 38th IEEE Conference on**. [S.l.], 1999. v. 1, p. 807–812.
- KO, C. C. et al. Development of a web-based laboratory for control experiments on a coupled tank apparatus. **IEEE Transactions on education**, IEEE, v. 44, n. 1, p. 76–86, 2001.
- LIBII, J. N. Mechanics of the slow draining of a large tank under gravity. **American Journal of Physics**, AAPT, v. 71, n. 11, p. 1204–1207, 2003.
- LOURENÇO, J. Sintonia de controladores pid. **Escola superior de tecnologia**, 1997.
- MASON, R. From distance education to online education. **The Internet and higher education**, Elsevier, v. 3, n. 1, p. 63–74, 2000.
- NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. [S.l.]: LTC, 2002. v. 3.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. [S.l.]: Prentice Hall do Brasil, 1998.
- OLIVEIRA, J. C. P. de; RESENDE, P.; MAIA, C. A. Controle neural gain scheduling de tanques interativos. 1997.
- OLIVEIRA, L. O. M. d. Desenvolvimento de um laboratório remoto para práticas de controle de nível dos tanques acoplados. 2017.
- OLIVEIRA, L. O. M. D. **Laboratório Remoto**. 2017. UFOP, <<http://200.239.166.71/>>, visitado em: 08/01/2018.
- ROSS, R. J. et al. Weblab! a universal and interactive teaching, learning, and laboratory environment for the world wide web. **ACM SIGCSE Bulletin**, ACM, v. 29, n. 1, p. 199–203, 1997.

## A Roteiro Didático



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
ROTEIRO PARA PRÁTICA DE CONTROLE DE  
NÍVEL DE DOIS TANQUES



Material desenvolvido de acordo com o trabalho de final de curso do aluno Luiz Otávio Mendes de Oliveira do curso Engenharia de Controle e Automação.

### DESCRIÇÃO DA BANCADA DIDÁTICA

Como apresentado em (OLIVEIRA, 2017) a bancada didática foi desenvolvida por discentes no Laboratório de Maquinas de Escola de Minas e consiste em quatro tanques com 4,76 cm de diâmetro interno e 25 cm de altura, podendo ser usada com configuração de dois ou quatro tanques acoplados. É composta por um reservatório na parte inferior, duas moto-bombas, um motor de corrente contínua de 12 V, quatro sensores de pressão MPXM2010 (alimentados por uma fonte de 24 V), mangueiras redutoras e divisores de vazão para o sistema hidráulico.



Figura 9 – Bancada de Tanques Acoplados. Fonte: (OLIVEIRA, 2017).

Pode-se realizar experimentos de controle na configuração SISO (*Single Input. Single Output.*) com ou sem acoplamento e também na configuração MIMO (*Multiple Inout. Multiple Output.*) com fase mínima ou não.

Para o desenvolvimento do Laboratório Remoto foi aplicado o sistema de controle SISO com acoplamento, sendo necessário utilizar dois tanques e uma bomba d'água. O esquema desta configuração é apresentado a seguir:

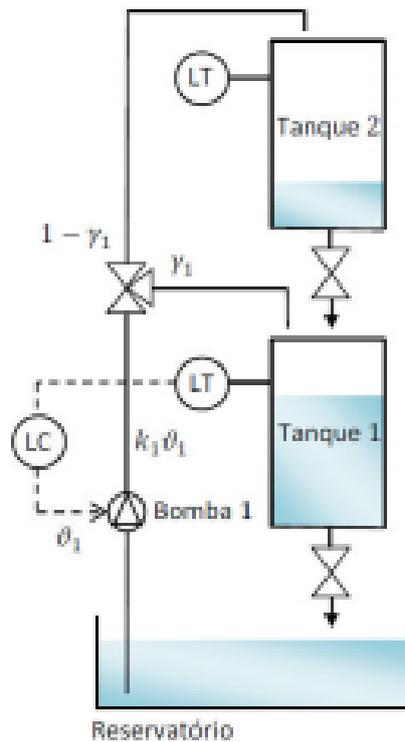


Figura 10 – Configuração adotada para sistema de dois tanques. Fonte: (COCOTA et al., 2014).

Ao ligar a bomba esta fornece uma parcela de vazão ( $\gamma_1$ ) para o tanque 1 e para o tanque 2 a outra parcela ( $1 - \gamma_1$ ). O circuito é fechado, pois cada tanque possui na base um dreno, pelo qual a água retorna para o reservatório. O nível dos tanques são medidos indiretamente por meio de sensores de pressão diferencial que estão localizados na parte superior de cada tanque. Os transdutores estão conectados à PCI (Placa de Circuito Impresso) e enviam os sinais elétricos para entradas analógicas do microcontrolador, a leitura é realizada de 0 a 5 V e a altura determinada por meio de conversão. A PCI contém um PIC 18F4550 e um módulo Ethernet ENC28j60 como principais componentes que possibilitou o controle da Bancada Didática por meio da rede Internet.

## MÉTODOS DE SINTONIA DO CONTROLADOR PELA CURVA DE REAÇÃO

No laboratório remoto desenvolvido por (OLIVEIRA, 2017) para sintonia do controlador PID utiliza-se o Método da Curva de Reação, o qual a partir de um degrau dado ao sistema em malha aberta é possível obter os parâmetros atraso ( $L$ ), constante de tempo ( $T$ ) e ganho direto do sistema ( $K_0$ ) para sintonia empírica do controlador. A planta é pode ser descrita como um sistema de primeira ordem, conforme apresentado na equação 3.8:

$$G(s) = \frac{k_0 e^{-sL}}{\tau s + 1} \text{ sendo } \tau > 0 \quad (\text{A.1})$$

A saída da planta foi colocada em  $h_{1,0}$  (nível do tanque 1 no ponto de operação) de forma manual aplicando uma entrada  $\theta_{1,0}$ . Após um intervalo de tempo, aplica-se uma mudança na entrada da planta (degrau), este deve estar em uma faixa de 10a20% de seu fundo de escala ( $\theta_{1,1}$ ). A resposta transitória da planta a esse degrau foi amostrada, até que se alcançou um novo valor em regime permanente ( $h_{1,1}$ ), associado a nova entrada constante da planta ( $\theta_{1,1}$ ). Com este procedimento, os sistemas descritos pela Equação 3.8 irão apresentar uma curva de resposta parecido com a Figura 2 que é conhecida como a Curva de Reação do Processo, na qual m.s.t significa a reta tangente no ponto de derivada máxima da curva.

A partir dessa curva, pode-se identificar o ganho direto ( $K_0$ ), o atraso ( $L$ ) e a constante de tempo ( $\tau$ ) do sistema. O ganho direto é representado pela Equação 3.9:

$$k_0 = \frac{h_{1,1} - h_{1,0}}{\theta_{1,1} - \theta_{1,0}} \quad (\text{A.2})$$

O método de sintonia por Ziegler Nichols tem como objetivo obter uma reação de 4:1 do primeiro para o segundo pico na resposta do sistema dada uma referência e um degrau. A partir das constantes  $K_0$ ,  $L$  e  $\tau$ , pode-se determinar os parâmetros do controlador para alcançar este amortecimento particular na resposta em malha fechada do sistema (Tabela 2).

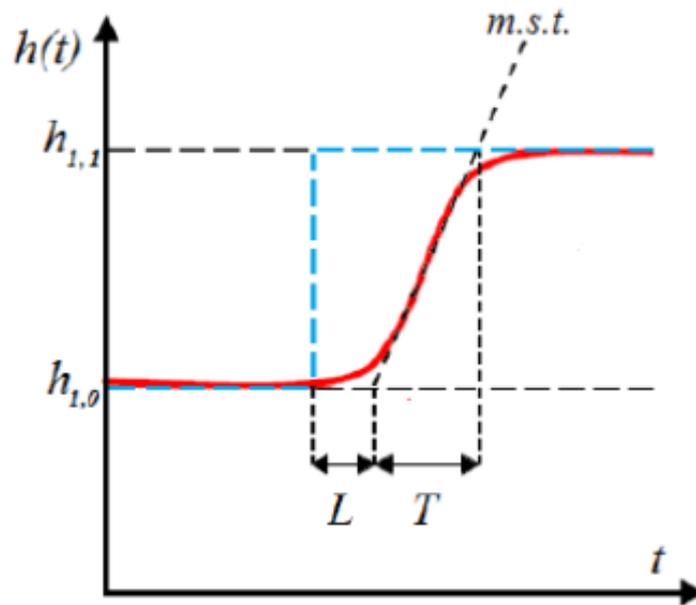


Figura 11 – Curva de Reação de um Sistema de 1º Ordem. Fonte: (OLIVEIRA, 2017)

Tipo do Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\tau}{k_0 L}$		
PI	$0,9\tau$	$3L$	
PID	$\frac{1,2\tau}{k_0 L}$	$2L$	$0,5L$

Tabela 4 – Sintonia de Ziegler Nichols

A proposta de Cohen-Coon de sintonia conforme a Equação 3.8 está apresentada na Tabela 3.

Tipo do Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\tau}{k_0 L} \left(1 + \frac{L}{3\tau}\right)$		
PI	$\frac{\tau}{k_0 L} \left(0,9 + \frac{L}{12\tau}\right)$	$\frac{L(30\tau+3L)}{9\tau+20L}$	
PID	$\frac{\tau}{k_0 L} \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4\tau}\right)$	$\frac{L(32\tau+6L)}{13\tau+8K}$	$\frac{4L\tau}{11\tau+2L}$

Tabela 5 – Sintonia de Cohen Coon

### ETAPAS:

1ª - Acessar o endereço: <<http://200.239.166.71/>>

2ª - Na tela principal do site. Verificar se a bancada esta disponível! Com a bancada disponível, o aluno deverá começar o experimento. O tempo para realizar a prática é de 610 segundos.

**3<sup>a</sup>** - Escolher um valor de tensão (0 a 5V) para a bomba (tabela ENTRADA) e clicar em enviar. Após cerca de 300 segundos, o sistema estará em regime permanente.

**4<sup>a</sup>** - Adicionar um degrau entre 10 e 20% do fundo de escala. Como o fundo de escala é 5V, o valor do degrau a ser inserido deve estar entre 0,5 e 1V.

**5<sup>a</sup>** - Após realizar o degrau no experimento, clique em Exportar Dados. Os dados serão exportados para uma planilha do Microsoft Office Excel após clicar em Sim na janela que aparecerá em seguida e o usuário poderá visualizá-los.

Antes de copiar os dados, o usuário deverá estar atento ao instante em que foi inserido o degrau.

**6<sup>a</sup>** - Na aba Curva de Reação, faça o download dos scripts do Matlab.

**7<sup>a</sup>** - Abrir o script Ensaio no Matlab, inserir os dados obtidos no experimento. Clique em Run para executar o código.

**8<sup>a</sup>** - Abrir o script Parâmetros e alterar a variável filtro para suavizar os dados da curva no gráfico. Quanto maior o valor atribuído, mais suave será a curva, uma vez que a mesma é uma média móvel. Em seguida, o código deverá ser executado clicando em Run.

**9<sup>a</sup>** - Após a realização do script o gráfico será aberto. O usuário deverá dar um zoom próximo ao tempo em que foi realizado o degrau e localizar o ponto de inflexão (ponto mais alto após o degrau). Caso o atraso seja negativo, foi escolhido o ponto de inflexão errado.

**10<sup>a</sup>** - Após localizar o ponto de inflexão, alguns parâmetros devem ser alterados no código:

X: Essa variável deve conter o valor do instante de tempo do ponto de inflexão;

$\frac{D_y}{D_x}$ : Deve conter a derivada no ponto de inflexão;

Y: É encontrada abrindo-se o gráfico 2 e buscando o ponto X, que contém informação do valor dessa variável.

tempo\_degrau: deve ser inserido o instante de tempo do degrau;

V1: valor de tensão na planta no primeiro regime permanente do ensaio da curva de reação;

V2: valor de tensão na planta no segundo regime permanente do ensaio da curva de reação.

**11<sup>a</sup>** - Após alterar os valores das variáveis, deve-se clicar em Run para novamente executar o código. Os parâmetros do controlador serão mostrados na tela do Matlab após essa execução. OBS: Note que a curva de reação, na figura 2, é de um sistema de 1<sup>a</sup> ordem.

**12<sup>a</sup>** - Encontrado os parâmetros do controlador, o usuário deve voltar para a página principal e inserir o mesmo valor de tensão inserido na primeira etapa. Após o sistema entrar em regime permanente, deve-se inserir os parâmetros do controlador encontrados e inserir um valor de referência entre  $Y_0$  e  $Y_1$ , também fornecidos pelo script do Matlab executado. OBS: O controlador irá funcionar muito bem se a referência escolhida estiver entre  $Y_0$  e  $Y_1$ , caso contrário, o mesmo não irá funcionar tão bem, uma vez que não foi projetado para o valor distante do intervalo.

**13<sup>a</sup>** - Finalizado o experimento, é possível exportar os dados novamente e copiá-los para o script GráficoControlador e analisar os dados do controlador. OBS: Vale ressaltar que a variável incrementa deve receber o último valor de logVal.

## **EXECUÇÃO DA PRÁTICA**

1<sup>o</sup> - Escolha um valor de tensão entre 0 e 5V e siga as etapas 1, 2 e 3.

2<sup>o</sup> - Adicione um degrau ao sistema, de acordo com a 4<sup>a</sup> etapa.

3º - Siga as demais etapas até concluir a prática.

### QUESTIONÁRIO

- 1) O experimento apresentou resultado satisfatório?
- 2) Analise a estabilidade do sistema após a ação de controle.
- 3) Analise o erro em regime permanente após a ação de controle.
- 4) Desenvolva a função de transferência do controlador.
- 5) Analise a resposta do sistema ao degrau.
- 6) Compare os resultados práticos com os resultados teóricos.