

## SISTEMA DIDÁTICO CONFIGURÁVEL DE TANQUES

Orlando Vinicyus Santos Martins<sup>1</sup>; Diego Oliveira Miranda<sup>2</sup>; Fernando Thomé de Azevedo Silva<sup>2</sup>; André Eurico de Moraes<sup>2</sup>; Fernanda Pelegrini Honorato<sup>2</sup>; Mariella Maia Quadros<sup>3</sup>

1 Orlando Vinicyus Santos Martin, Bolsista (IFMG), Engenharia de Controle e Automação, IFMG Campus Sabará, Sabará - MG; orlando1vinicyus@gmail.com

2 Colaboradores: Diego Oliveira Miranda; Fernando Thomé de Azevedo Silva; André Eurico de Moraes; Fernanda Pelegrini Honorato, IFMG Campus Sabará, Sabará - MG

3 Orientador: Mariella Maia Quadros, Campus Sabará; mariella.quadros@ifmg.edu.br

### RESUMO

Este projeto visa a construção de um sistema didático configurável de dois tanques como meio de implementação de sistemas de controle de nível em malha fechada, que são geralmente encontrados em indústrias químicas, petroquímicas e alimentícias. O sistema é configurável para que seja possível sua operação em diversas formas, com diferentes características e especificações de desempenho. Por exemplo, será possível realizar o ajuste para que o sistema seja de primeira ou segunda ordem e para que seja SISO (do inglês, *Single-Input/Single-Output*) ou MIMO (do inglês, *Multiple-Input/Multiple-Output*). Além disso, há a possibilidade de inserção de um sólido não-linear em um dos tanques para produzir dinâmicas não-lineares semelhantes às encontradas no ambiente industrial. O sistema didático construído é composto por dois tanques com capacidade de três litros cada e um reservatório de cinco litros. Os níveis de água são medidos nos dois tanques com utilização de sensores ultrassônicos, a atuação é realizada por uma bomba de água submersa e o sistema de controle é implementado por meio da plataforma Arduino. A partir da construção do sistema, foram realizadas a implementação e a comparação de controladores projetados para diferentes configurações. No escopo deste projeto, foram utilizados controladores do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo), por serem usualmente encontrados no ambiente industrial e para a análise de desempenho desses controladores, foram calculados índices como a integral do erro absoluto (IAE), integral do quadrado do erro (ISE) e o desvio padrão do sinal de controle (IVU). Sendo assim, foi possível o estudo teórico de diversos conceitos a respeito de sistemas de controle industriais e a sua implementação prática nas etapas de construção, modelagem matemática, projeto e programação de controladores. Também é precursor do projeto denominado Controle Híbrido Tolerante a Falhas iniciado em 2021, em que o sistema didático será usado para a implementação de controladores sujeitos a falhas, com comparação de resultados com outras abordagens encontradas na literatura.

**Palavras-chave:** Controle de Processos; Sistema de Tanques; Controladores PID.

### INTRODUÇÃO:

A crescente complexidade e automatização de dispositivos e processos industriais demandam cada vez mais o aumento de desempenho e de confiabilidade dos mesmos. Nesse contexto, o projeto e implementação de sistemas de controle são cruciais para garantir a estabilidade, robustez e desempenho do sistema como um todo. Dentre os processos industriais mais importantes, está o controle de nível e de fluxo em tanques ou reservatórios (ROY, P.; ROY, B. K., 2016), como no processamento de alimentos (CANTOR, 2007), na purificação de água e tratamento de efluentes (ALEX et al., 1999; CONCEPCIÓN; MENESES; VILANOVA, 2011; DENNIS; BURKES, 2001; POKHREL; VIRARAGHAVAN, 2004), na geração de energia nuclear (KOTHARE et al., 2000) e em caldeiras (GAIKWAD et al., 2011). Isso se deve ao fato que muitos processos exigem que os líquidos sejam bombeados, armazenados em tanques e, posteriormente, bombeados novamente para outros tanques (ABDALLA; IBRAHIM; TAO, 2018; ABBAS; ASGHAR; QAMAR, 2012; LIANG, 2011). Além disso, na maioria dos casos, é desejado que o nível de certo reservatório siga um valor de referência, geralmente constante ou constante por partes, independentemente das operações e/ou perturbações que possam ocorrer no sistema.

Mais de 80% dos controladores industriais de nível são do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) (ROY, P.; KAR; ROY, B. K., 2017). Isso se deve ao fato de possuírem uma estrutura simples, eficiente e com vários métodos de sintonia encontrados na literatura que geralmente atendem às prioridades de controle de forma satisfatória (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1995). Porém, de acordo com pesquisas em fábricas de papel e celulose, apenas 20% das malhas de controle com controladores PID operavam de forma satisfatória. Além disso, 30% apresentaram desempenho ruim devido aos ajustes dos controladores e 20% devido a problemas de projeto do sistema e/ou dos controladores. Outra pesquisa realizada com 26000 controladores em indústrias químicas, de refino e de papel e celulose indicam que apenas 32% das malhas foram classificadas como excelentes ou aceitáveis, 32% dos controladores foram classificados como razoáveis ou ruins (com respostas lentas ou oscilatórias) e 36% estavam em malha aberta (indicando que os controladores operavam em modo manual ou saturados) (YU, 2006). Dessa forma, é possível constatar que muitos processos industriais não operam da melhor forma devido ao projeto e/ou sintonia de controladores realizados de forma inadequada. Nesse contexto, o projeto de sistemas de controle ainda é um desafio em nível de engenharia, em que uma abordagem adequada pode resultar em um melhor desempenho do processo, aumentando a eficiência energética e a vida útil dos atuadores e demais dispositivos utilizados. Essa combinação é interessante, principalmente para as indústrias, pois pode proporcionar uma considerável economia de capital, além de se tornarem mais sustentáveis. Sendo assim, este projeto visa o estudo e pesquisa de diferentes técnicas de projeto de controladores do tipo PID, de modo a encontrar alternativas que possam solucionar os problemas causados pelo projeto inadequado de sistemas de controle. Além disso, será construído um sistema configurável de tanques de pequeno porte, no qual os controladores estudados e projetados poderão ser testados para análise e verificação dos resultados. O sistema desenvolvido também poderá ser utilizado como um sistema didático de controle e instrumentação para realização de futuras práticas de disciplinas do curso de Engenharia de Controle e Automação, uma vez que os laboratórios do Campus Sabará ainda não possuem bancadas ou sistemas didáticos para práticas nessas áreas.

Com a execução deste projeto de pesquisa, pretende-se projetar e construir um sistema configurável de dois tanques de pequeno porte, com sistemas de atuação e instrumentação. Após a finalização da construção do sistema de controle, será realizada sua modelagem matemática (para cada caso de configuração) e em seguida, serão projetados e implementados diversos controladores para o controle de nível do sistema, de acordo com a configuração escolhida e de modo a atender as especificações exigidas.

## **METODOLOGIA:**

O projeto pode ser dividido em duas partes, uma teórica e uma prática. A parte teórica visa o estudo da construção do sistema e das técnicas de modelagem matemática de sistemas de tanques e de diferentes abordagens desenvolvidas para o projeto de controladores. Já a parte prática contempla a construção do sistema de tanques, a verificação de seu funcionamento, a identificação dos parâmetros do sistema, a modelagem matemática para as diferentes configurações e o projeto e implementação dos controladores. Os resultados obtidos por meio dos experimentos também são avaliados a partir das simulações, em busca de avaliar consistências, adequações necessárias e a eficiência dos projetos na prática. Ademais, as abordagens são comparadas entre si de forma qualitativa e quantitativa.

Para o desenvolvimento do projeto, foram realizadas reuniões semanais com a equipe, de modo a identificar as principais potencialidades e desafios e discutir diferentes abordagens em busca de melhores soluções.

Em um primeiro momento, foi realizada a introdução conceitual sobre a modelagem e controle de sistemas, como variável controlada, sinal de controle ou variável manipulada, planta, processos, sistemas, controle com realimentação, sistemas de controle de malha aberta e de malha fechada, entre outros. Também foram feitas revisões bibliográficas sobre modelagem de sistemas elétricos e de tanques, obtenção e simulação de modelos para esses sistemas, análise de seus comportamentos típicos e obtenção de parâmetros.

Após o desenvolvimento da parte teórica do projeto, torna-se possível a realização do projeto e da construção do sistema de tanques. Dessa forma, foram selecionados os materiais necessários para a montagem, assim como realizados os orçamentos para a aquisição dos componentes. Após estudos de viabilidade, qualidade e durabilidade, foram escolhidos os seguintes dispositivos: Sensor ultrassônico HC-SR04, Arduino Nano, Bomba de água submersa 12V, Ponte H L298N e Tanques.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES:

A partir da construção e modelagem do sistema, torna-se possível o projeto de diversos controladores para as diferentes configurações propostas. De um modo geral, um sistema de malha fechada com controlador pode ser representado como mostra a Figura 1, em que  $r(t)$  é o valor de referência desejado,  $y(t)$  é a saída do sistema,  $e(t) = r(t) - y(t)$  é o sinal de erro e  $u(t)$  é o sinal de controle gerado pelo controlador.

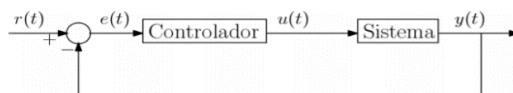


Figura 1 - Diagrama representativo de um sistema de controle de malha fechada.

Esse controlador pode ser do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo), com a relação entrada/saída geralmente definida por (ÅSTRÖM; MURRAY, 2010):

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} = k_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

O sinal de controle é então a soma de três termos: o termo P (proporcional ao erro), o termo I (proporcional à integral do erro) e o termo D (proporcional à derivada do erro). Os parâmetros do controlador são o ganho proporcional  $k_p$ , o ganho integral  $k_i$  e o ganho derivativo  $k_d$ . As constantes de tempo  $T_i$  e  $T_d$ , chamadas de tempo integral e derivativo, são também muitas vezes utilizadas no lugar dos ganhos integral e derivativo (ÅSTRÖM; MURRAY, 2010). A ação integral fornece erro nulo em regime permanente para referências e perturbações do tipo degrau, a ação derivativa ocasiona em uma melhor resposta transitória e a ação proporcional tem a função de aumentar a velocidade da resposta, sendo o controlador PID uma combinação das vantagens proporcionadas por esses três termos.

Ao projetar um controlador PID é necessário definir seus parâmetros de acordo com a dinâmica do processo e as especificações de funcionamento. Na literatura podem ser encontrados facilmente diversos métodos de sintonia de controladores PID, como por exemplo em (O'DWYER, 2006), em que são estabelecidas numerosas regras de ajuste para diferentes modelos de processo, organizadas em 116 tabelas para diferentes sintonias.

Além dos controladores PID, podem ser utilizados controladores robustos que lidam explicitamente com as incertezas do sistema em relação às diferenças entre o modelo nominal e a dinâmica real do processo, garantindo seu desempenho e estabilidade mesmo com a presença dessas incertezas (FORTUNA; FRASCA, 2012). Outros controladores interessantes de serem utilizados são os controladores híbridos PI (Proporcional-Integral, uma variação do PID), que possuem dinâmica contínua e discreta no tempo, e que permitem de forma relativamente simples a obtenção de desempenhos superiores aos obtidos por controladores PI convencionais (SCOLA; QUADROS; LEITE, 2017; QUADROS et al., 2019; ZACCARIAN; NESIC; TEEL, 2005).

Após o projeto, as partes mecânica e eletrônica foram construídas e verificadas, possibilitando o funcionamento adequado do sistema. O resultado da montagem pode ser visto nas Figuras 2 e 3.



Figura 2 – Sistema didático de tanques.



Figura 3 – Sistema didático de tanques.

Os modelos matemáticos da planta foram obtidos considerando-se duas configurações diferentes. A primeira configuração consiste no funcionamento do sistema exatamente como mostra as Figuras 2 e 3, ou seja, com a utilização dos dois tanques e do reservatório, com a vazão da bomba direcionada para o tanque superior e controle de nível (seguimento de referência) a ser realizado no tanque inferior. Já na segunda configuração, o tanque inferior é desconsiderado e o rastreamento da referência será realizado no tanque superior, que recebe toda a vazão aplicada pela bomba. Por esse motivo, o sistema denominado como *Configuração 1* é de segunda ordem e o sistema denominado de *Configuração 2* é de primeira ordem.

O método de modelagem utilizado é o de caixa preta, em que são aplicados degraus na entrada e as respostas temporais da saída são usadas para obtenção de um modelo matemático adequado. A partir das curvas resultantes, funções de transferência de primeira ordem com atraso foram aproximadas para cada um dos degraus e podem ser descritas como:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls} \quad (2)$$

em que  $K$  é o ganho estático da planta,  $T$  a constante de tempo e  $L$  o tempo de atraso. Após a determinação de cada modelo, foram realizadas simulações computacionais para verificação e comparação das respostas simuladas com as reais. Como a bomba só apresenta vazão para valores de tensões superiores a 7,11V (equivalente a um valor de 151 aplicado à saída PWM do Arduino), o primeiro degrau possui esse valor inicial. O último degrau possui valor final de 11,29V (equivalente a um valor de 240 aplicado à saída PWM do Arduino), pois a partir disso, o nível do tanque superior se aproxima ao limite máximo de altura de 20cm. O primeiro degrau tem valor inicial de 7,11V e valor final de 7,53V, os próximos degraus possuem amplitude de 0,47V, sendo um total de nove degraus. A cada degrau é obtido um modelo matemático e ao final, um modelo médio é calculado e validado para cada configuração.

O modelo médio calculado para a *Configuração 1* e utilizado para o projeto dos controladores é dado por:

$$G(s) = \frac{0,1425}{95,0064s + 1} e^{-57,94s} \quad (3)$$

O modelo médio calculado para a *Configuração 2* e utilizado para o projeto dos controladores é dado por:

$$G(s) = \frac{0,1644}{94,4578s + 1} e^{-38,77s} \quad (4)$$

Após a modelagem do sistema para as duas configurações, é realizado o projeto dos diferentes controladores PI e PID. Para isso, foram utilizadas diversas regras de sintonia apresentadas em (O'DWYER, 2006) para sistemas de primeira ordem com atraso. Cada regra possui uma especificidade e é implementada para a obtenção de diferentes critérios de desempenho de malha fechada. Os controladores foram programados no Arduino de forma digital e os experimentos foram realizados em ambas as configurações para seguimento de referência.

A Tabela 1 apresenta as diferentes sintonias de controladores PI e PID para a *Configuração 1* e a Tabela 2 para a *Configuração 2*. As regras foram retiradas de (O'DWYER, 2006).

Regra de Sintonia	$kp$	$Ti$	$Td$
(1) PI – Ziegler e Nichols (1942)	13,3381	129,1004	–
(2) PI – Chien <i>et al.</i> (1952) – Regulador (20% de overshoot)	10,3471	90,3315	–
(3) PI – Mínimo IAE – Murrill (1967), pp. 358-363	14,4023	82,7749	–
(4) PID – Chien <i>et al.</i> , (1952) – Regulador (0% de overshoot)	14,0791	92,2700	16,2829
(5) PID – Chien <i>et al.</i> , (1952) – Regulador (20% overshoot)	17,7842	77,5378	16,2829
(6) PID – Cohen e Coon (1953)	21,5279	83,3691	13,3068

Tabela 1 – Sintonias de controladores para a *Configuração 1*.

Regra de Sintonia	$k_p$	$T_i$	$T_d$
(1) PI – Ziegler e Nichols (1942)	10,3560	192,9439	–
(2) PI – Chien <i>et al.</i> , (1952) – Regulador (20% overshoot)	8,0547	135,0028	–
(3) PI – Mínimo IAE – Murrill (1967), pp. 358-363	11,2445	110,1564	–
(4) PID – Chien <i>et al.</i> , (1952) – Regulador (0% overshoot)	10,9314	137,8998	24,3353
(5) PID – Chien <i>et al.</i> , (1952) – Regulador (20% overshoot)	13,8081	115,8822	24,3353
(6) PID – Cohen e Coon (1953)	17,2884	117,4237	19,2120

Tabela 2 – Sintonias de controladores para a Configuração 2.

Os gráficos obtidos experimentalmente a partir das implementações dos controladores para a Configuração 1 (Tabela 1) são apresentados na Figura 4 e para a Configuração 2 (Tabela 2) na Figura 5.

Como é possível observar, as diferentes sintonias provocam diferentes comportamentos na dinâmica do sistema, com alterações nos tempos de subida e acomodação e no valor de sobressinal (overshoot). Apesar disso, todas as sintonias apresentaram um desempenho satisfatório para o controle do sistema, com rastreamento de referência no nível dos tanques.

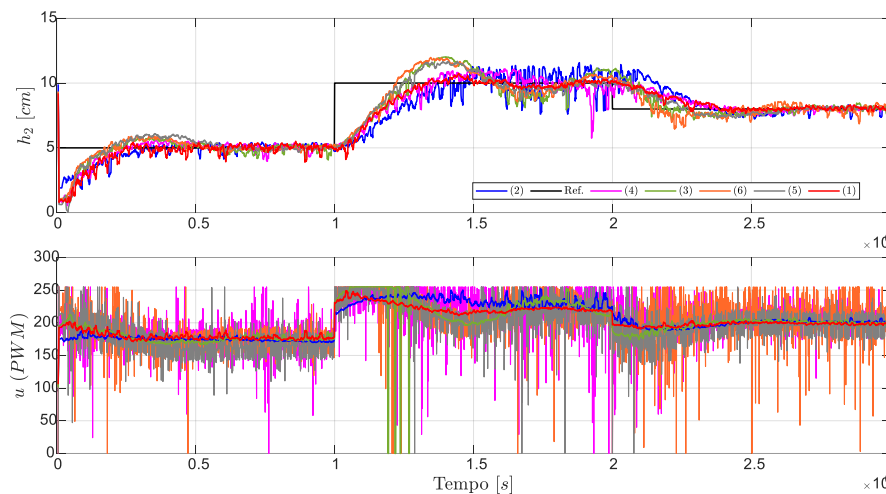


Figura 4 - Resposta de malha fechada do sistema (gráfico superior) e sinal de controle (gráfico inferior) para a Configuração 1 (Tabela 1).

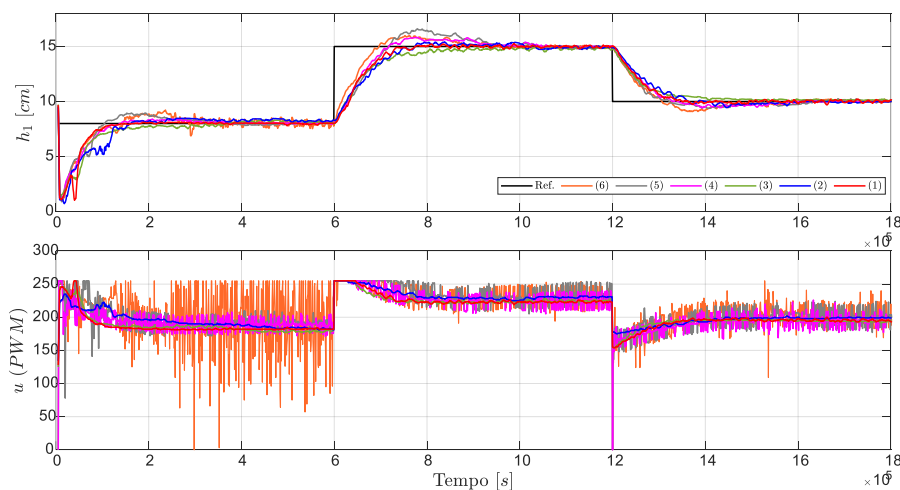


Figura 5 - Resposta de malha fechada do sistema (gráfico superior) e sinal de controle (gráfico inferior) para a Configuração 2 (Tabela 2).

Com o objetivo de comparar o desempenho dos controladores de forma quantitativa, diferentes índices de desempenho foram calculados para as duas configurações e para todos os experimentos. Os índices são: integral do erro absoluto (IAE), integral do quadrado do erro (ISE) e o desvio padrão do sinal de controle (IVU). É importante ressaltar que quanto menor o valor do índice, melhor o desempenho do sistema de controle. Os índices calculados para os experimentos da *Configuração 1* são apresentados na Tabela 3 e da *Configuração 2* na Tabela 4, em que os melhores índices são destacados em vermelho.

<b>Regra de Sintonia</b>	<b>IAE</b>	<b>ISE</b>	<b>IVU</b>
<b>(1)</b> PI – Ziegler e Nichols (1942)	<b>0,6566</b>	1,6480	<b>18,6768</b>
<b>(2)</b> PI – Chien <i>et al.</i> (1952) – Regulador (20% de overshoot)	0,9103	2,1084	24,3132
<b>(3)</b> PI – Mínimo IAE – Murrill (1967), pp. 358-363	0,7732	1,6018	26,2306
<b>(4)</b> PID – Chien <i>et al.</i> , (1952) – Regulador (0% de overshoot)	0,7017	1,5218	32,9028
<b>(5)</b> PID – Chien <i>et al.</i> , (1952) – Regulador (20% overshoot)	0,7357	1,5483	31,7936
<b>(6)</b> PID – Cohen e Coon (1953)	0,7232	<b>1,4136</b>	36,7578

Tabela 3 – Índices de desempenho para a *Configuração 1*.

<b>Regra de Sintonia</b>	<b>IAE</b>	<b>ISE</b>	<b>IVU</b>
<b>(1)</b> PI – Ziegler e Nichols (1942)	3,1734	14,2527	21,0956
<b>(2)</b> PI – Chien <i>et al.</i> , (1952) – Regulador (20% overshoot)	3,2146	14,2579	<b>20,0741</b>
<b>(3)</b> PI – Mínimo IAE – Murrill (1967), pp. 358-363	3,3458	15,3241	20,5706
<b>(4)</b> PID – Chien <i>et al.</i> , (1952) – Regulador (0% overshoot)	3,4519	15,8281	22,9962
<b>(5)</b> PID – Chien <i>et al.</i> , (1952) – Regulador (20% overshoot)	<b>3,1272</b>	<b>13,7842</b>	25,0126
<b>(6)</b> PID – Cohen e Coon (1953)	3,4388	15,2557	32,6104

Tabela 4 – Índices de desempenho para a *Configuração 2*.

## CONCLUSÕES:

Neste projeto foi proposta a construção de um sistema didático configurável de tanques para implementação de controladores para o controle de nível. O sistema permite que diferentes configurações sejam realizadas, adaptando-o facilmente para que seja de primeira ou segunda ordem e que seja SISO ou MIMO. Os resultados foram adequados e satisfatórios, já que diferentes comportamentos e dinâmicas foram obtidos a partir das diferentes configurações possíveis. Após o sistema estar em pleno funcionamento, a modelagem do sistema foi realizada pelo método caixa preta, obtendo-se modelos adequados que foram validados experimentalmente. A partir disso, foram investigadas diferentes metodologias de projeto de controladores PID, que foram simuladas e implementadas em tempo real. Com o cálculo dos índices de desempenho para cada configuração e cada controlador, foi possível analisar e comparar o comportamento do sistema, sendo possível a determinação dos melhores controladores e dos desafios e compromissos de desempenho que devem ser levados em consideração no projeto de um sistema de controle.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ABBAS, Hur; ASGHAR, Sajjad; QAMAR, Shahid. **Sliding mode control for coupled tank liquid level control system**. In: 2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology. IEEE, 2012. p. 325-330

ABDALLA, Ahmed N.; IBRAHIM, Thamir K.; TAO, Hai. **Adaptive Fuzzy/PD controller for Coupled Two Tank Liquid Levels system**. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. p. 06020.

ALEX, Jens et al. **Benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plants**. In: 1999 European Control Conference (ECC). IEEE, 1999. p. 37463751.

ÅSTRÖM, Karl Johan; MURRAY, Richard M. **Feedback systems: an introduction for scientists and engineers**. Princeton university press, 2010.

CANTOR, Jerrod M. **Progress in food engineering research and development**. Nova Publishers, 2008.

CONCEPCIÓN, Henry R.; MENESES, Montserrat; VILANOVA, Ramón. **Control strategies and wastewater treatment plants performance: Effect of controllers parameters variation**. In: ETFA2011. IEEE, 2011. p. 1-7.

DENNIS, A.; BURKES, P. E. **Dairy waste anaerobic digestion handbook: Options for recovering beneficial products from dairy manure**. Environmental Energy Company: Olympia, WA, 2001.

FORTUNA, Luigi; FRASCA, Mattia (Ed.). **Optimal and Robust Control: Advanced Topics with MATLAB®**. CRC press, 2012.

KOTHARE, Mayuresh V. et al. **Level control in the steam generator of a nuclear power plant**. IEEE transactions on control systems technology, v. 8, n. 1, p. 55-69, 2000.

GAIKWAD, Avinash J. et al. **Selection of steam drum level control method for multiple drum interacting loops pressure tube-type BWR**. IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 58, n. 2, p. 479-489, 2011.

LIANG, Li. **The application of fuzzy PID controller in coupled-tank liquid-level control system**. In: 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC). IEEE, 2011. p. 2894-2897.

O'DWYER, Aidan. **Handbook of PI and PID controller tuning rules**. World Scientific, 2006.

POKHREL, D.; VIRARAGHAVAN, T. **Treatment of pulp and paper mill wastewater—a review**. Science of the total environment, v. 333, n. 1-3, p. 37-58, 2004.

QUADROS, Mariella M. et al. **A plug-in procedure for hybridization of PI controllers**. IFAC-PapersOnLine, v. 52, n. 1, p. 892-897, 2019.

ROY, Prasanta; KAR, Biprajeet; ROY, Binoy Krishna. **Fractional order PI-PD control of liquid level in coupled two tank system and its experimental validation**. Asian Journal of Control, v. 19, n. 5, p. 1699-1709, 2017.

ROY, Prasanta; ROY, Binoy Krishna. **Fractional order PI control applied to level control in coupled two tank MIMO system with experimental validation**. Control Engineering Practice, v. 48, p. 119-135, 2016.

SCOLA, Ignacio Rubio; QUADROS, Mariella M.; LEITE, Valter J. S. **Robust Hybrid PI Controller with a Simple Adaptation in the integrator reset state**. IFAC PapersOnLine, v. 50, n. 1, p. 1457-1462, 2017.

YU, Cheng-Ching. **Autotuning of PID controllers: A relay feedback approach**. Springer Science & Business Media, 2006.

ZACCARIAN, Luca; NESIC, Dragan; TEEL, Andrew R. **First order reset elements and the Clegg integrator revisited**. In: Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005. IEEE, 2005. p. 563-568.