



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS – CAMPUS CARAÚBAS  
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Kennedy Dias Dos Santos

**IDENTIFICAÇÃO E SINTONIA PID DE UM SISTEMA DE NÍVEL**

CARAÚBAS

2025

Kennedy Dias Dos Santos

## **IDENTIFICAÇÃO E SINTONIA PID DE UM SISTEMA DE NÍVEL**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Jan Erik Mont Gomery Pinto, Prof. Dr.

CARAÚBAS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S231i Santos, Kennedy Dias dos.  
Identificação e sintonia PID de um sistema de  
nível / Kennedy Dias dos Santos. - 2025.  
65 f. : il.

Orientador: Jan Erik Mont Gomery Pinto.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia  
Elétrica, 2025.

1. Controladores PID. 2. Sintonia PID. 3.  
Método do relé. 4. OPC. 5. Resposta ao degrau. I.  
Pinto, Jan Erik Mont Gomery, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade  
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas  
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra  
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

KENNEDY DIAS DOS SANTOS

IDENTIFICAÇÃO E SINTONIA PID DE UM SISTEMA DE NÍVEL

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Defendida em: 31 / 07 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 **JAN ERIK MONT GOMERY PINTO**  
Data: 31/07/2025 18:48:03-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Jan Erik Mont Gomery Pinto  
Prof. Dr. Presidente

Documento assinado digitalmente  
 **ADRIANO COSTA DE OLIVEIRA**  
Data: 31/07/2025 18:53:07-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Adriano Costa de Oliveira  
Prof. Dr. Membro Examinador Interno

Documento assinado digitalmente  
 **ANTONIO ALISSON ALENCAR FREITAS**  
Data: 04/08/2025 11:46:39-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Antônio Alisson Alencar Freitas  
Prof. Dr. Membro Examinador Interno

Dedico esse trabalho aos meus familiares, em especial a meus pais, meu irmão e meu avô Francisco Evaristo Sobrinho, in memoriam, que foram a peças fundamentais para essa conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela dádiva da vida e por iluminar meus caminhos diariamente. Sem Ele, certamente não teria tido forças para concluir este trabalho e superar os desafios da jornada.

Agradeço à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) pela oportunidade de formação acadêmica de qualidade, pelos recursos oferecidos ao longo do curso e por contribuir de forma significativa para minha trajetória profissional e pessoal.

Sou imensamente grato aos meus pais, Wanderlan Ferreira dos Santos e Maria Evaneide Dias da Cunha dos Santos, pelo apoio incondicional em todos os momentos. Vocês são o alicerce da minha vida, meu porto seguro tanto nas conquistas quanto nas dificuldades. Agradeço também ao meu irmão, Kelven Dias dos Santos, cuja presença me motiva e inspira a seguir em frente com coragem e propósito.

Estendo minha gratidão a toda a família, em especial ao meu tio, Francisco Edinaldo Dias da Cunha, pelo auxílio essencial durante a realização deste trabalho, assim como aos demais familiares que sempre estiveram presentes com apoio e palavras de incentivo.

Agradeço ao professor Jan Erik Mont Gomery Pinto, pela orientação, empenho e por compartilhar seus conhecimentos ao longo do desenvolvimento deste projeto.

Por fim, agradeço à banca examinadora, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas contribuições valiosas que certamente enriqueceram ainda mais o seu conteúdo.

Parece sempre impossível até que seja feito

Nelson Mandela

## RESUMO

Com a constante evolução da sociedade e o crescimento do setor industrial, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de tecnologias que promovam maior produtividade de forma prática e eficiente. Nesse contexto, destacam-se os controladores aplicados na indústria, responsáveis por eliminar gargalos e ampliar a escala de produção por meio da automação. Dentre os diversos tipos existentes, o controlador proporcional, integral e derivativo (PID) é o mais utilizado no ambiente industrial devido à sua simplicidade e eficácia. Quando devidamente sintonizado, esse controlador pode proporcionar um aumento significativo no desempenho de um processo. A sintonia do PID pode ser realizada por diferentes métodos já consolidados, sendo essencial o conhecimento prévio da dinâmica da planta na qual será implementado. Para essa identificação, diversos métodos podem ser empregados. Este trabalho tem como objetivo principal identificar e sintonizar uma planta de nível. Para isso, foram utilizados dois métodos para se obter um modelo de primeira ordem com atraso de transporte, que representará a dinâmica do sistema de nível proposto: O método do relé e a resposta ao degrau. As simulações e implementações foram realizadas por meio dos *softwares* Factory I/O, MATLAB e Elipse SCADA, sendo este último responsável pela comunicação via OPC (*Open Platform Communications*) entre os sistemas. Com a planta devidamente identificada por ambos os métodos, realizou-se a sintonia do controlador PID utilizando os métodos de Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Chien-Hrones-Reswick (CHR) e IAE, sendo posteriormente comparadas as respostas obtidas com cada uma das sintonias.

**Palavras-chave:** Controladores PID; Sintonia PID; Método do relé; OPC; Resposta ao degrau.



## ABSTRACT

With the constant evolution of society and the expansion of the industrial sector, the development of technologies that enable greater productivity in a practical and efficient manner has become increasingly necessary. In this scenario, industrial controllers play a crucial role by eliminating bottlenecks and enhancing production scalability through automation. Among the various types of controllers, the Proportional-Integral-Derivative (PID) controller is the most widely used in industrial environments due to its simplicity and effectiveness. When properly tuned, it can significantly improve process performance. PID tuning can be carried out using several established methods, requiring prior knowledge of the plant dynamics. To obtain this information, various identification techniques may be employed. This work aims to identify and tune a level control system. Two methods were applied to obtain a first-order plus dead time (FOPDT) model representing the system's dynamics: the relay method and the step response test. Simulations and implementations were conducted using Factory I/O, MATLAB, and Elipse SCADA—the latter providing communication between systems via OPC (Open Platform Communications). With the plant dynamics identified using both methods, PID tuning was performed using the Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Chien-Hrones-Reswick (CHR), and IAE methods. The results obtained from each tuning approach were then compared and analyzed.

**Keywords:** PID controllers; PID tuning; Relay method; OPC; Step response.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Sistema de controle de malha aberta.....                                           | 21 |
| Figura 2 - Sistema de controle de malha fechada.....                                          | 21 |
| Figura 3 - Esquematização do controlador PID.....                                             | 22 |
| Figura 4 - Modelo resposta do processo de primeira ordem em malha aberta.....                 | 27 |
| Figura 5 - Esquema de representação do método do relé em malha fechada.....                   | 28 |
| Figura 6 - Diagrama do relé Bias.....                                                         | 29 |
| Figura 7 - Comportamento da saída do processo utilizando o relé Bias.....                     | 30 |
| Figura 8 - Interface do Eclipse SCADA.....                                                    | 36 |
| Figura 9 - Interface Factory I/O.....                                                         | 37 |
| Figura 10 - Ambiente de configuração do Eclipse SCADA.....                                    | 38 |
| Figura 11 - Ambiente de configuração das <i>tags</i> no Eclipse SCADA.....                    | 39 |
| Figura 12 - Planta de nível escolhida.....                                                    | 39 |
| Figura 13 - Ambiente de conexão com servidor OPC e ajuste de <i>tags</i> .....                | 40 |
| Figura 14 - Conexão entre <i>Factory I/O</i> e Eclipse SCADA.....                             | 40 |
| Figura 15 - Resposta do sistema após perturbação de um degrau de 0 a 45%.....                 | 42 |
| Figura 16 - Aproximação visual para observar o atraso <i>L</i> .....                          | 43 |
| Figura 17 - Comparação entre planta real e planta estimada.....                               | 44 |
| Figura 18 - Resposta com a sintonia de Z-N, utilizando identificação ao degrau.....           | 44 |
| Figura 19 - Resposta com a sintonia de CHR, utilizando identificação ao degrau.....           | 45 |
| Figura 20 - Resposta com sintonia de CC, utilizando identificação ao degrau.....              | 47 |
| Figura 21 - Resposta com o método de sintonia IAE, utilizando identificação ao degrau.....    | 48 |
| Figura 22 - Comportamento do sistema com a perturbação do relé.....                           | 49 |
| Figura 23 - Resposta do sistema com sintonia Z-N, utilizando identificação com relé Bias..... | 50 |
| Figura 24 - Resposta para sintonia CHR, utilizando identificação com relé Bias.....           | 51 |
| Figura 25 - Resposta para sintonia CC, utilizando identificação com relé Bias.....            | 52 |
| Figura 26 - Resposta para sintonia utilizando método IAE e identificação com relé Bias.....   | 53 |

## **LISTA DE QUADROS**

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Comparação entre as sintonias. .... | 54 |
|------------------------------------------------|----|

## LISTA DE TABELAS

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Sintonia de acordo com Z-N. ....            | 32 |
| Tabela 2 - Tabela de parâmetros sintonia CHR.....      | 33 |
| Tabela 3 - Sintonia de acordo com o método de CC. .... | 34 |
| Tabela 4 - Sintonia de acordo com IAE. ....            | 35 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |                                                 |
|-------|-------------------------------------------------|
| CC    | Cohen-Coon                                      |
| CHR   | ChienHrones-Reswick                             |
| CLPs  | Controladores Lógicos Programáveis              |
| cm    | Centímetro                                      |
| DA    | <i>Data Access</i>                              |
| FOPDT | First Order Plus Dead Time                      |
| IAE   | Integral of Absolute Error                      |
| IHM   | Interfaces Homem-Máquina                        |
| K     | Ganho estático                                  |
| Kp    | Ganho Proporcional                              |
| L     | Atraso de transporte                            |
| OPC   | <i>Open Platform Communications</i>             |
| PID   | Controlador Proporcional, Integral e Derivativo |
| s     | Segundos                                        |
| T     | Constante de tempo                              |
| Td    | Tempo derivativo                                |
| Td    | Tempo Derivativo                                |
| Ti    | Tempo Integral                                  |
| Z-N   | Ziegler-Nichols                                 |

## SUMÁRIO

|                                                  |           |
|--------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                        | <b>16</b> |
| <b>2 OBJETIVOS .....</b>                         | <b>18</b> |
| 2.1 Objetivo Geral .....                         | 18        |
| 2.2 Objetivos Específicos .....                  | 18        |
| <b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>               | <b>20</b> |
| 3.1 Nível .....                                  | 20        |
| 3.2 Sistema de controle.....                     | 20        |
| 3.3 PID.....                                     | 21        |
| 3.3.1 Ação proporcional .....                    | 23        |
| 3.3.2 Ação integrativa.....                      | 23        |
| 3.3.3 Ação derivativa.....                       | 24        |
| 3.4 Função de transferência .....                | 25        |
| 3.5 Métodos de identificação da planta .....     | 26        |
| 3.5.1 Método da resposta ao degrau .....         | 26        |
| 3.5.2 Método do Relé .....                       | 27        |
| 3.6 Métodos de sintonia do controlador PID ..... | 31        |
| 3.6.1 Sintonia utilizando Ziegler-Nichols.....   | 32        |
| 3.6.2 Chien-Hrones-Reswick (CHR).....            | 32        |
| 3.6.3 Cohen-Coon (CC).....                       | 33        |
| 3.6.4 Integral of Absolute Error (IAE) .....     | 34        |
| 3.7 Open Platform Communications (OPC).....      | 35        |
| 3.8 Elipse Scada.....                            | 35        |
| 3.9 <i>Factory IO</i> .....                      | 36        |
| <b>4 METODOLOGIA.....</b>                        | <b>38</b> |
| 4.1 Conexão OPC .....                            | 38        |
| 4.2 Conexão com a planta.....                    | 39        |
| 4.3 Coleta de dados.....                         | 41        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>           | <b>42</b> |
| 5.1 Utilizando o método do degrau .....          | 42        |
| 5.1.1 Ziegler-Nichols.....                       | 44        |
| 5.1.2 CHR.....                                   | 45        |
| 5.1.3 Cohen-Coon.....                            | 46        |

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1.4 IAE .....                                                  | 47        |
| 5.2 Método do Relé Bias .....                                    | 48        |
| 5.2.1 Ziegler-Nichols .....                                      | 50        |
| 5.2.2 CHR .....                                                  | 51        |
| 5.2.3 Método de Cohen-Coon .....                                 | 51        |
| 5.2.4 Método IAE .....                                           | 52        |
| 5.3 Comparação de sintonias .....                                | 54        |
| <b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                               | <b>56</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                         | <b>58</b> |
| <b>APÊNDICE A – APLICAÇÃO DO MÉTODO DO DEGRAU NO MATLAB.....</b> | <b>62</b> |
| <b>APÊNDICE B – APLICAÇÃO DO MÉTODO DO RELÉ NO MATLAB.....</b>   | <b>64</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A constante evolução da humanidade está atrelada, entre outros fatores, ao crescimento industrial, no qual há uma busca contínua pela aplicação de tecnologias que permitam a melhoria dos processos, visando maior crescimento e agilidade na produção. Diante disso, os sistemas de controle surgem como uma das alternativas para garantir estabilidade e eficiência nas operações.

No contexto industrial, a elevada demanda por determinados produtos exige que as empresas aumentem continuamente sua capacidade produtiva a fim de atender de forma eficiente o mercado consumidor. Esse cenário intensifica a utilização de tecnologias de automação e controle, com o objetivo de melhorar a eficiência dos processos e garantir maior produtividade (Chai, Qin e Wang, 2014).

Segundo Ogata (2010), a aplicação prática da teoria de controle automático de processos gera benefícios como a redução de custos, o aumento da produção e a melhoria na qualidade.

De acordo com VanDore (2006), manter os processos com alta produtividade e baixo custo exige, quase como uma obrigatoriedade, o uso de controladores bem sintonizados, que adotem estratégias de auto sintonia e acompanhamento do desempenho ao longo do tempo.

Uma das principais ferramentas de controle de processos utilizadas na automação industrial atualmente são os controladores PID, especialmente em processos de origem química e térmica, que exigem estabilidade, segurança, confiabilidade e ganhos de eficiência na produção e na qualidade dos produtos (Neves, 2014). Shamsuzzoha e Skogestad (2010) relatam que uma pesquisa realizada com mais de onze mil controladores em indústrias de processo revelou que mais de 97% utilizam o algoritmo PID.

Diversos estudos indicam que o Controlador PID é amplamente utilizado na indústria devido à sua estrutura simples e boa performance em uma variedade de processos. No entanto, seu desempenho está diretamente relacionado à forma como é sintonizado, sendo a sintonia um dos aspectos mais críticos e valorizados na sua aplicação prática (Astrom e Hägglund, 2006).

Uma sintonia adequada do sistema de controle, especialmente com o uso de controladores PID, é fundamental para garantir estabilidade, evitar desperdícios e agilizar a resposta do processo. No entanto, para que a sintonia seja eficaz, é essencial obter um modelo matemático preciso da planta, o que requer uma etapa prévia de identificação do sistema (Åström e Hägglund, 2006).

O ajuste de um controlador PID consiste basicamente na definição de seus parâmetros, utilizando métodos de sintonia adequados. Dentre os métodos mais utilizados destacam-se



aqueles baseados em tabelas obtidas a partir da identificação paramétrica da planta em questão. Os métodos com maior destaque nesse cenário são os métodos de Ziegler-Nichols, Cohen-Coon e Chien-Hrones-Reswick (CHR), conforme apresentado por Åström e Hägglund (1995). Embora essas abordagens não garantam, necessariamente, uma sintonia ideal para todos os casos, elas representam um ponto de partida eficiente para ajustes posteriores mais precisos (de Andrade, 2013).

É comum, para a implementação de um controle automático de processos, o uso de *softwares* e *hardwares* específicos, com a finalidade de simular o processo por meio da modelagem matemática do sistema e da sintonização dos parâmetros do controlador utilizado. No entanto, grande parte desses softwares não é de livre acesso, o que dificulta o aprendizado e a prática do controle de processos (Barreto e Escobar, 2014).

Na indústria, o uso de sistemas de automação é cada vez mais comum, especialmente em processos que envolvem transporte e manipulação de materiais, como esteiras e tanques. Entre esses, o controle de nível em tanques destaca-se por sua ampla aplicação em etapas de armazenamento, mistura ou reações químicas de líquidos. O funcionamento adequado desse sistema impacta diretamente a qualidade do produto final e contribui para a redução de gargalos, tornando o processo produtivo mais fluido e eficiente (Campos e Teixeira, 2006).

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo obter uma sintonia PID eficaz para um sistema de controle de nível de tanque, utilizando métodos clássicos de sintonia PID, como Ziegler-Nichols, CHR, Coren-Coon e *Integral of Absolute Error* (IAE), que usam parâmetros como ganho estático, constante de tempo e atraso de transporte, obtidos a partir do método do relé e/ou resposta ao degrau. Para isso, será empregado o *software Factory IO*, que tem o sistema de nível industrial simulado, usando a comunicação OPC com o MATLAB, no qual estarão os algoritmos de identificação, sintonia e controle do controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo), permitindo simular o ambiente industrial e obter a função de transferência que melhor representa o comportamento dinâmico da planta a ser controlada.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo principal identificar e sintonizar o sistema de controle PID de uma planta de nível simulado no *Factory IO*.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos, os seguintes itens podem ser elencados:

- Aplicar técnicas de identificação de sistemas para determinar um modelo matemático representativo do processo;
- Projetar um controlador PID com base no modelo identificado;
- Realizar a sintonia do controlador;
- Validar o desempenho do sistema controlado;
- Analisar os resultados, comparando parâmetros como tempo de resposta e sobresinal.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

Nessa seção são abordados os temas que serviram como base para desenvolvimento de toda a pesquisa.

#### **3.1 Nível**

Soares (2018) define nível como sendo a determinação da posição de uma interface entre dois meios, podendo ser considerado como a diferença de altura entre um meio líquido ou sólido em um determinado recipiente. De acordo com Gonçalves (2003), essa é uma das variáveis mais utilizadas na indústria, principalmente em processos contínuos. Conhecer o nível permite, além de estimar o volume de material armazenado, garantir também a operação segura do sistema, evitando situações como o transbordamento de tanques ou a alimentação inadequada de etapas subsequentes do processo.

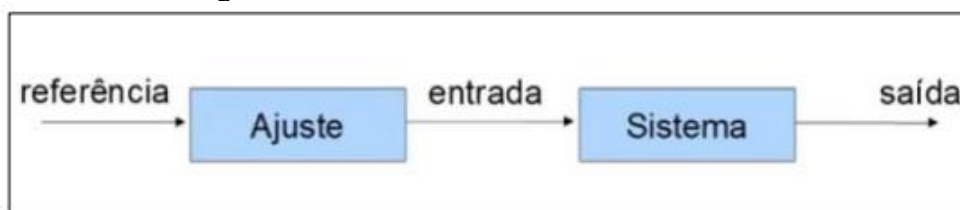
#### **3.2 Sistema de controle**

O controle de processos tem como objetivo regular variações de fatores fundamentais utilizados nas operações realizadas. Essas variações podem envolver oscilações de temperatura, pressão, nível, vazão e demais variáveis relevantes no processo. Como essas variações são recorrentes em sistemas industriais, adotam-se medidas para que se atinjam os requisitos desejáveis na produção (Smith e Corripio, 2008).

Ogata (2010) define dois sistemas de controle distintos: o sistema de controle de malha aberta e o sistema de controle de malha fechada.

Os sistemas de controle de malha aberta (Figura 1) são sistemas em que a saída não exerce ação de controle sobre a entrada. Em outras palavras, o sinal de saída não é medido nem comparado com o sinal de entrada. Dessa forma, cada sinal de entrada de referência corresponde a uma condição fixa de operação.

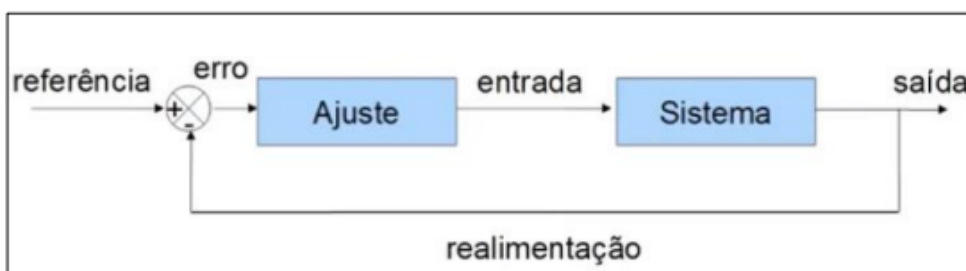
Figura 1 - Sistema de controle de malha aberta.



Fonte: Ogata, 1998.

Nos sistemas de controle de malha fechada (Figura 2) existe o erro, que é resultante da diferença entre a referência (ou entrada) e o sinal de realimentação. Esse sinal de realimentação pode ser o próprio sinal de saída ou uma função dele, incluindo suas derivadas e/ou integrais. O erro realimenta o controlador com o objetivo de ser minimizado, tornando a saída cada vez mais próxima da referência desejada.

Figura 2 - Sistema de controle de malha fechada.



Fonte: Ogata, 1998.

### 3.3 PID

O controlador PID é um tipo de algoritmo amplamente utilizado em sistemas de controle com realimentação, especialmente no ambiente industrial. Ele é capaz de atender a diversos critérios de desempenho, como estabilidade em malha fechada, boa resposta tanto transitória quanto em regime permanente, além de apresentar resistência a ruídos e perturbações (Fermino, 2014).

Existem diversas aplicações para o controlador PID, capazes de atender a uma infinidade de requisitos. Dentre os mais comuns estão os processos industriais que operam de forma contínua, por se tratarem de sistemas de controle analógico. Diante disso, o PID está associado a variáveis de instrumentação industrial, como temperatura, pressão, vazão e nível (Pena, 2018). Esse controlador é o mais utilizado para controlar sistemas em malha fechada, devido à sua eficiência e praticidade (Inocêncio, 2012).

Esses controladores são vistos por Visioli (2006) como componentes fundamentais nas estratégias de controle mais sofisticadas, tendo sua implementação quando os conceitos básicos de controle não são suficientes para obter um desempenho aceitável.

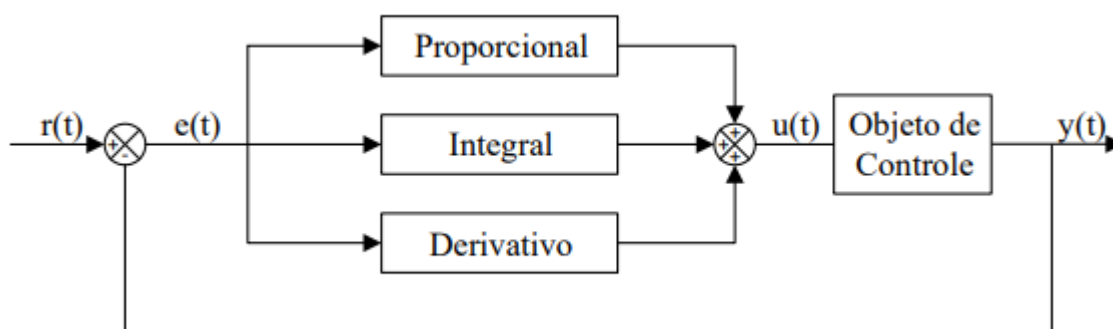
Para processos de controle, inicialmente emprega-se um método de identificação para obter uma modelagem matemática do sistema. Dentre os vários métodos citados na literatura, ganha destaque o método de Ziegler-Nichols (Z-N), Sundaresan/Krishnaswamy e Smith (Coelho e Coelho, 2004).

Após o processo de identificação da planta é realizada a sintonia do controlador, em outras palavras, parametrizar os respectivos ganhos. Para esse propósito, normalmente são utilizados métodos como o de Z-N, ChienHrones-Reswick (CHR) e Cohen-Coon (Åström e Hägglund, 1995).

Existem diversas configurações para sistemas de controle por realimentação, que podem variar desde as mais simples até as mais sofisticadas. Um exemplo básico é o controlador *on-off*, no qual o sinal de controle  $u(t)$  assume apenas dois valores, resultando em uma ação de liga/desliga do atuador. Embora seja de fácil ajuste, esse tipo de controle não considera o erro de forma contínua, o que pode gerar oscilações e dificultar a estabilidade do processo (de Brito, 2004). Por outro lado, há configurações mais avançadas, como o controlador PID, capaz de ajustar o processo de maneira mais precisa e eficiente.

Na Figura 3, observa-se a esquematização desse controlador.

Figura 3 - Esquematização do controlador PID.



Fonte: Silva, 2021.

O valor desejado na saída (*setpoint*) é representado como  $r(t)$ , já  $y(t)$  representa a saída do processo. A realimentação da malha faz com que esse valor de saída  $y(t)$  seja comparado com o *setpoint*, gerando assim um erro  $e(t)$ . Esse erro é trabalhado através das ações de controle

de modo a ser reduzido, ou seja, as ações trabalham para que o sinal de controle  $u(t)$  mantenha o sinal de saída ajustado ao valor de referência desejado (Coelho, 2004).

### 3.3.1 Ação proporcional

A ação proporcional do controlador se baseia no princípio de que o sinal de controle gerado é diretamente influenciado pelo valor do erro, ou seja, pela diferença entre a variável de processo e o valor desejado. Para isso, é utilizado um parâmetro chamado ganho proporcional ( $K_p$ ), que define o quanto o controlador reage a esse erro. Em outras palavras, quanto maior o valor de  $K_p$ , mais agressiva será a resposta do controlador com relação a variações no erro. Essa característica faz com que o ganho proporcional influencie diretamente na redução do erro em regime permanente. A relação matemática entre o erro e o sinal de controle é descrita por uma equação simples, cuja representação também pode ser feita no domínio de Laplace. Essas equações são respectivamente apresentadas a seguir (Ogata, 2010; Fermino, 2014).

$$u(t) = K_p e(t) \quad (3.1)$$

$$U(s) = K_p E(s) \quad (3.2)$$

$K_p$  é o ganho proporcional da sintonia. Vale salientar que essa constante não trabalha de modo a alterar o sinal de entrada do controlador, ela trabalha de modo a ampliar ou reduzir o sinal que é inserido na entrada da planta (Pinto, 2014).

### 3.3.2 Ação integrativa

A ação integrativa no controle tem como objetivo principal eliminar o desvio entre a variável que está sendo controlada e o valor de referência. Para realizar esse feito, o controlador acumula, ao longo do tempo, os valores do erro e os utiliza para corrigir a variável manipulada. Essa correção ocorre de forma contínua, somando-se o erro de forma progressiva em intervalos regulares. O parâmetro que define a frequência e intensidade dessa ação é conhecido como tempo integrativo ( $T_i$ ), sendo essa uma das constantes que devem ser ajustadas durante a sintonia do controlador (Bayer e Araújo, 2016). A equação matemática que representa o sinal do controlador é definida por Ogata (2010) como:

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) \quad (3.3)$$

$$U(s) = \frac{E(s)}{sT_i} \quad (3.4)$$

O termo  $T_i$  é denominado como tempo integral. Para alguns controladores o ajuste do termo integral pode ser realizado através da divisão do tempo em segundos ou minutos pelo número de repetições, para outros ele pode ser dado através do ganho integrativo  $K_i$ , que é representado matematicamente como:  $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ . A utilização desse método pode eliminar o erro em regime permanente (Pinto, 2014).

### 3.3.3 Ação derivativa

A ação derivativa no controlador age de forma a diminuir a instabilidade do processo. Devido o sistema ser dinâmico e as mudanças na variável de controle não serem rapidamente notadas o controlador derivativo aplica uma correção com base na velocidade na qual o erro está variando, ajudando assim a antecipar as oscilações e tornando o sistema mais estável.

A ação derivativa é empregada no controle com o objetivo de minimizar oscilações e instabilidades no comportamento do processo. Isso se faz necessário pois, em sistemas dinâmicos, as alterações feitas na variável manipulada nem sempre são imediatamente percebidas na saída do sistema (Åström e Hägglund, 1995). Essa estratégia de controle não atua diretamente sobre o valor do erro, mas sim sobre sua velocidade de variação ao longo do tempo, funcionando de forma preditiva. Ao detectar a tendência de crescimento ou redução do erro, o controlador reage antecipadamente, contribuindo para uma resposta mais estável e suave (Ogata, 2010). Essa resposta é regulada por um parâmetro conhecido como tempo derivativo ( $T_d$ ), que ajusta o quanto a variação do erro influencia o sinal de controle, sendo um dos elementos que precisam ser corretamente sintonizados para garantir o bom desempenho do sistema (Fermino, 2014). As equações matemáticas para a ação desse controlador são descritas por Ogata (2010) como:

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5)$$

$$U(s) = T_d S \quad (3.6)$$

De acordo com Ogata (2010), os controladores PID já representam mais que a metade dos controladores da indústria. Nesse sentido, Bayer e Araújo (2016) reforçam que a sua utilização parte do princípio de que ele é um controlador simples e de baixo custo, além de ser um controlador muito versátil na estabilização de sistemas em regime transitórios e permanente.

### 3.4 Função de transferência

Para Coughanowr e Koppel (1986) uma função de transferência é a relação entre duas variáveis de um processo físico, a causa, ou variável de entrada e o efeito, ou variável de saída. Ela pode então ser definida como a relação entre transformada de Laplace da saída pela transformada de Laplace da entrada, admitindo condições iniciais nulas. Como mostrado na Equação 3.7.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (3.7)$$

Sendo:

$G(s)$  = função de transferência;

$X(s)$  = transformada da função de entrada, em forma de desvio;

$Y(s)$  = transformada da saída, em forma de desvio.

A função de transferência é quem descreve de forma mais abrangente as características dinâmicas do sistema. No caso em que se adota uma variação específica na entrada  $X(t)$ , cuja a sua transformada é  $X(s)$ , a resposta  $Y(s)$  pode ser expressa como na Equação 3.8 (Paixão, 2019)

$$Y(s) = G(s) \cdot X(s) \quad (3.8)$$



### 3.5 Métodos de identificação da planta

Para o projeto e a implementação de controladores eficazes, é essencial conhecer o modelo dinâmico do sistema a ser controlado. A esse processo dá-se o nome de identificação da planta, que consiste em determinar uma representação matemática que descreva o comportamento dinâmico do sistema. Diversas técnicas podem ser empregadas para essa finalidade, variando em complexidade, precisão e aplicabilidade.

Nesta seção, serão abordados dois métodos amplamente utilizados para identificação de sistemas: o método da resposta ao degrau, e o método do relé, que permite estimar os parâmetros do sistema a partir de perturbações induzidas de forma controlada. Ambos os métodos são especialmente úteis em ambientes industriais por sua simplicidade de aplicação e por não exigirem modelos previamente conhecidos do sistema.

#### 3.5.1 Método da resposta ao degrau

Para a obtenção dos parâmetros a serem aplicados na sintonia do controlador PID, é necessário causar uma perturbação no sistema. A partir dessa perturbação, pode-se coletar informações referentes às suas características e, por meio delas, ajustar o controlador. Com isso, o método de perturbação em degrau surge como a técnica mais utilizada em sistemas de malha aberta (Neves, 2014).

A resposta ao degrau pode ser definida como o comportamento dinâmico observado na saída do sistema quando é gerada uma perturbação em forma de degrau na sua entrada. Em um sistema estável, essa resposta tende a um valor constante, já em um sistema instável, a resposta é desequilibrada. Essa técnica permite a obtenção de diversas propriedades do sistema (Åström e Hägglund, 2006).

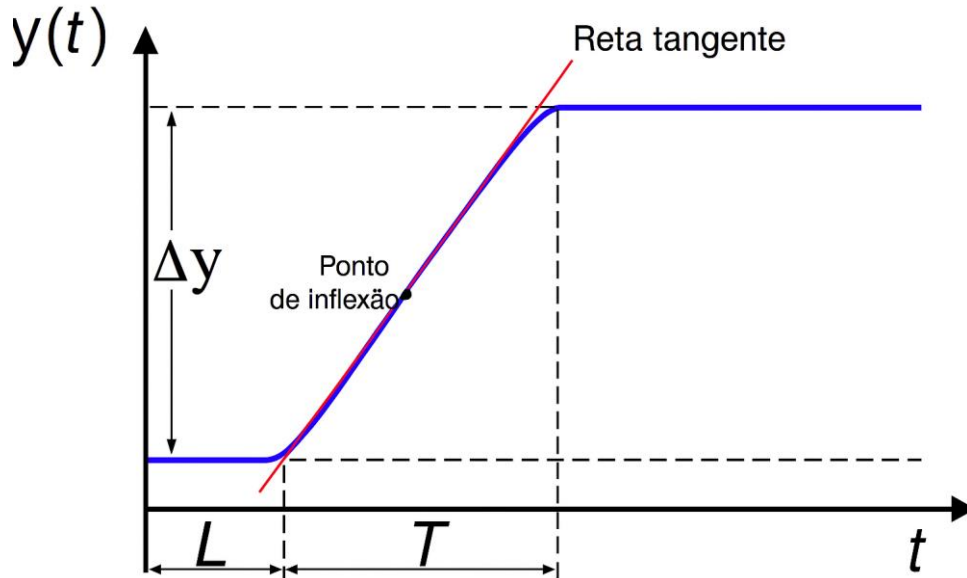
O método do degrau de Z-N se baseia na informação do processo na forma de resposta ao degrau do sistema em malha aberta. Para obter essa resposta o sistema é colocado em modo manual e após isso gerada uma variação em degrau na saída desse controlador ( $\Delta U$ ). Este método parte do pressuposto de que, após um intervalo inicial, a resposta do sistema em malha aberta a um degrau unitário torna-se monotônica, esse comportamento pode ser observado na Figura 4, podendo então aproximar esse sistema de um sistema de primeira ordem com atraso de transporte, na qual sua função de transferência é descrita na equação 3.9 (Pinto, 2014).

$$G_p(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls} \quad (3.9)$$

Sendo  $K$  o ganho estático do processo e pode ser determinado por  $K = \frac{\Delta Y}{\Delta U}$ .

De acordo com Pinto (2014) a resposta do sistema ao degrau pode ser descrita por dois parâmetros principais: o atraso de transporte ( $L$ ) e a constante de tempo ( $T$ ). Para estimar esses valores, traça-se uma linha tangente à curva no ponto de maior inclinação (ponto de inflexão). A interseção dessa linha com o eixo do tempo indica o valor do atraso, enquanto o ponto em que ela alcança 63,2% do valor final da saída,  $y$ , é utilizado para definir a constante de tempo, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Modelo resposta do processo de primeira ordem em malha aberta.



Fonte: Pinto, 2014.

Diversas abordagens podem ser utilizadas para estimar os parâmetros  $K$ ,  $T$  e  $L$  a partir da resposta ao degrau de um sistema. Esses métodos buscam ajustar os dados experimentais a um modelo do tipo primeira ordem com tempo morto, também conhecido como FOPDT (*First-Order Plus Dead Time*), conforme apresentado na equação (3.9).

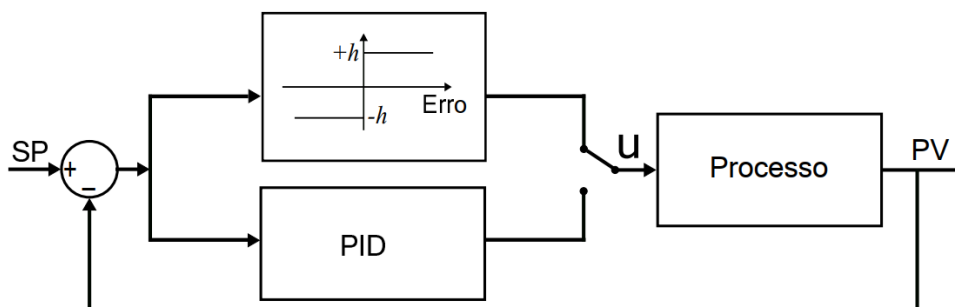
### 3.5.2 Método do Relé

O fato do método de Ziegler e Nichols apresentar algumas limitações levou os pesquisadores Åström e Hägglund a propor a utilização de um relé na realimentação do sistema a ser sintonizado, dando origem ao método do relé como ferramenta de ajuste para

controladores PID. Esse método facilita a sintonia dos controladores por dispensar a utilização de modelos matemáticos detalhados no processo (Pinto, 2014).

Nessa abordagem, a estratégia consiste basicamente em substituir o controlador PID por um relé, que irá causar perturbações na forma de sinal quadrado na entrada da planta, provocando uma oscilação autossustentada, como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Esquema de representação do método do relé em malha fechada.



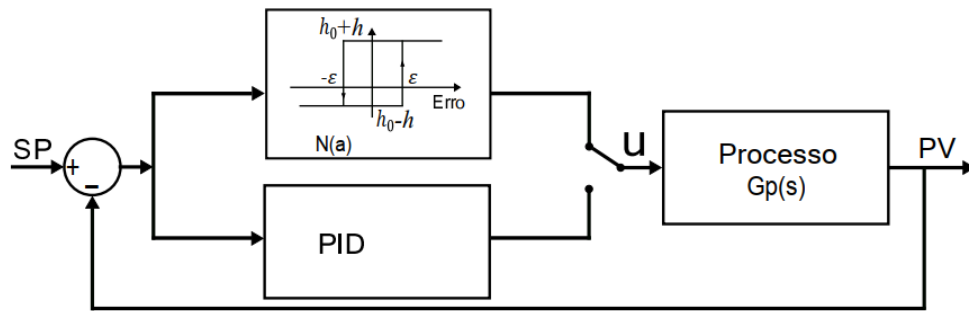
Fonte: Pinto, 2014.

Observando a amplitude e o período da oscilação resultante, é possível estimar parâmetros críticos do processo, como o ganho e o próprio período de oscilação. Esses parâmetros podem ser utilizados no cálculo dos ganhos do controlador PID (Pinto *et al.*, 2015).

De acordo com Acioli Júnior (2007), a aplicação do método em sistemas reais e simulados pode fornecer desempenhos satisfatórios e permitir ajustes eficientes dos parâmetros do controlador, mesmo em plantas com atraso de transporte e comportamento de difícil modelagem.

Partindo do mesmo princípio de que a maioria dos processos industriais podem ser adequadamente representados por uma função de transferência de primeira ordem com atraso de transporte (FOPDT), apresentado na equação (3.7), Wang *et al.* (1997) propuseram uma variação do teste do relé, denominada relé Bias, podendo ser com ou sem histerese. Essa abordagem introduz uma nova forma de excitar o sistema e permite a estimativa simultânea do ganho estático ( $K$ ) e do ganho crítico ( $K_u$ ), além de fornecer dois pontos de frequência do processo a partir de um único ensaio. Na Figura 6 pode ser observado o diagrama do relé Bias.

Figura 6 - Diagrama do relé Bias.



Fonte: Pinto, 2015.

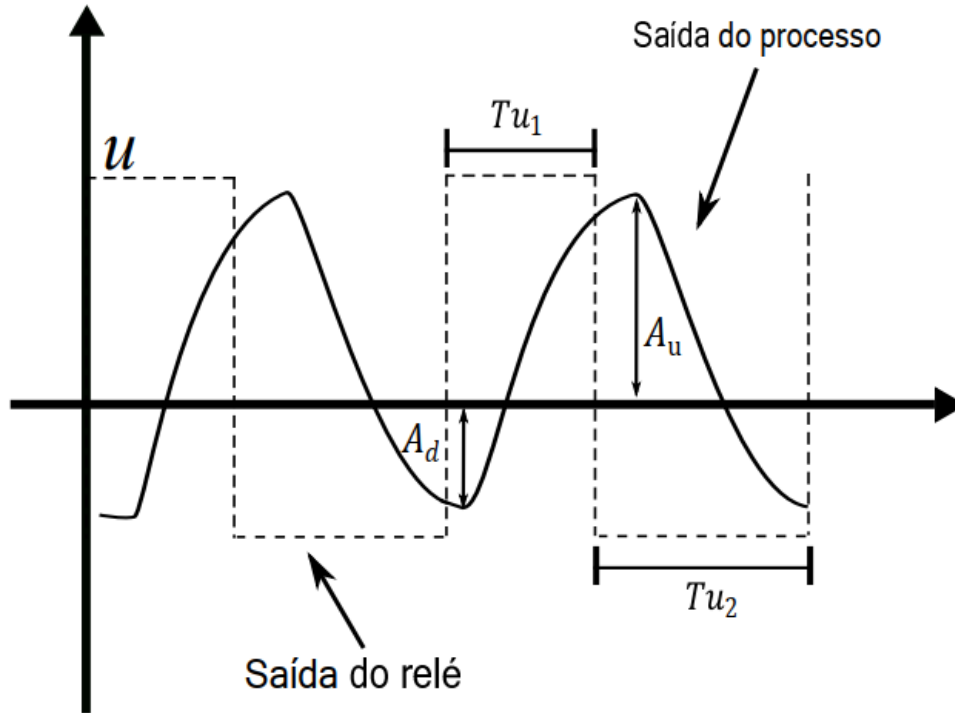
No teste do relé com Bias, a entrada e a saída do processo têm o comportamento semelhante ao apresentado na Figura 7. O sinal de saída do relé apresenta uma forma assimétrica devido à introdução do Bias, o que possibilita a obtenção de informações adicionais sobre a dinâmica do sistema. De acordo com Pinto (2014), o comportamento segue os seguintes parâmetros:

Sendo  $h$  a amplitude do sinal do relé,  $h_0$  a bia, e  $\varepsilon$  é a largura da histerese.

- Se  $[\text{erro}(t) \geq \varepsilon]$ , então  $u(t) = h_0 + h$
- Se  $[\text{erro}(t) < -\varepsilon]$ , então  $u(t) = h_0 - h$
- Se  $[-\varepsilon < \text{erro}(t) < \varepsilon]$ , então  $u(t) = u(t-1)$

Na Figura 7 é apresentado o comportamento da saída do processo quando submetido ao relé Bias.

Figura 7 - Comportamento da saída do processo utilizando o relé Bias.



Fonte: Pinto, 2014.

De acordo com Coelho e dos Santos Coelho (2004), o ganho estático do sistema pode ser calculado pela Equação 3.10.

$$K = \frac{\int_0^{T_{u1}+T_{u2}} y(t) dt}{\int_0^{T_{u1}+T_{u2}} u(t) dt} \quad (3.10)$$

Sendo  $A_d$  e  $A_u$  calculados através das equações 3.11 e 3.12, respectivamente.

$$A_d = (h_0 + h)K \left( 1 - e^{-\frac{\theta}{\tau}} \right) - \varepsilon e^{-\frac{\theta}{\tau}} \quad (3.11)$$

$$A_u = (h_0 - h)K \left( 1 - e^{-\frac{\theta}{\tau}} \right) + \varepsilon e^{-\frac{\theta}{\tau}} \quad (3.12)$$

De acordo com Pinto (2014) o período crítico do processo no ciclo limite é dado como  $T_u = T_{u1} + T_{u2}$ , sendo  $T_{u1}$  e  $T_{u2}$  obtidos conforme as Equações 3.13 e 3.14, respectivamente.

$$T_{u1} = T \ln \left( \frac{2hKe^{\frac{L}{\tau}} + (h_0 - h)K + \varepsilon}{(h_0 + h)K - \varepsilon} \right) \quad (3.13)$$

$$T_{u2} = T \ln \left( \frac{2hK e^{\frac{L}{T}} - (h_0 + h)K + \varepsilon}{(h_0 - h)K - \varepsilon} \right) \quad (3.14)$$

Com o conhecimento do valor de ganho estático, o atraso de transporte normalizado ( $L_n$ ) será obtido da equação (3.15).

$$L_n = \ln \left( \frac{(h_0 + h)K - \varepsilon}{(h_0 + h)K - A_u} \right) \quad (3.15)$$

A constante de tempo T pode então ser calculada através da Equação 3.16.

$$T = T_{u1} \left[ \ln \left( \frac{2hK e^L + (h_0 - h)K + \varepsilon}{(h_0 + h)K - \varepsilon} \right) \right]^{-1} \quad (3.16)$$

Dessa forma o atraso de transporte L, pode ser calculado através da Equação (3.17)

$$L = T \cdot L_n \quad (3.17)$$

### 3.6 Métodos de sintonia do controlador PID

Após a identificação da planta, a etapa seguinte consiste na sintonia do controlador, ou seja, na definição adequada dos parâmetros proporcional (P), integral (I) e derivativo (D) que compõem a estrutura do controlador PID. A escolha dos parâmetros corretos é essencial para garantir o desempenho desejado do sistema, como estabilidade, rapidez de resposta e minimização de erros.

Diversas metodologias têm sido propostas ao longo dos anos para facilitar esse processo, cada uma com suas vantagens e limitações, dependendo das características do sistema. Nesta seção, serão explorados quatro métodos clássicos de sintonia: Ziegler-Nichols, CHR (Chien, Hrones e Reswick), Cohen-Coon e IAE (Integral of Absolute Error). Esses métodos permitem calcular os ganhos do controlador com base em dados obtidos experimentalmente ou a partir do modelo da planta, oferecendo alternativas viáveis para diferentes requisitos de desempenho e critérios de otimização.

### 3.6.1 Sintonia utilizando Ziegler-Nichols

O método de Ziegler-Nichols, proposto em 1942 pelo engenheiro químico John G. Ziegler e pelo matemático Nathaniel B. Nichols, é uma das abordagens mais conhecidas e utilizadas para a sintonia de controladores PID. Os autores desenvolveram dois procedimentos distintos, voltados à aplicação em sistemas de controle operando tanto em malha aberta quanto em malha fechada (Fermino, 2014).

A proposta se baseia na obtenção de características dinâmicas do processo por meio de testes simples, como a resposta ao degrau ou a observação de oscilações sustentadas. A partir dessas informações experimentais, é possível determinar os parâmetros do controlador — ganho proporcional ( $K_p$ ), tempo integral ( $T_i$ ) e tempo derivativo ( $T_d$ ) — por meio de fórmulas empíricas (Fermino, 2014).

Uma das principais vantagens desse método é a dispensa do conhecimento detalhado do modelo matemático da planta. Com apenas alguns testes práticos e a aplicação das regras desenvolvidas por Ziegler e Nichols, o engenheiro pode ajustar o controlador de maneira eficiente, mesmo em ambientes industriais com dinâmicas complexas ou pouco conhecidas (Magri, 2015).

Observa-se na Tabela 1 as equações para calcular os parâmetros da sintonia utilizando o método de Z-N em malha aberta.

Tabela 1 - Sintonia de acordo com Z-N.

| Controlador | $K_p$                    | $T_i$          | $T_d$         |
|-------------|--------------------------|----------------|---------------|
| P           | $\frac{T}{KL}$           | -              | -             |
| PI          | $0,9 \cdot \frac{T}{KL}$ | $3,33 \cdot L$ | -             |
| PID         | $1,2 \cdot \frac{T}{KL}$ | $2 \cdot L$    | $\frac{L}{2}$ |

Fonte: Autor, 2025.

### 3.6.2 Chien-Hrones-Reswick (CHR)

Existem duas abordagens distintas para o método CHR, e a escolha dessa abordagem influencia diretamente o desempenho. A primeira abordagem sugere uma resposta mais rápida

sem sobrevalor e a segunda com 20% de sobrevalor. Para a sintonia desse controlador se faz o uso dos parâmetros de ganho do processo  $K$  e a razão  $R$  entre a constante de tempo do processo e o tempo morto ( $T/L$ ) (Silva *et al.*, 2014). Na prática, grande parte dos processos industriais não requer uma resposta extremamente rápida ou com oscilações acentuadas. Nesses casos, o método de sintonia proposto por Chien, Hrones e Reswick (1952) se mostra vantajoso, pois adota valores de ganho mais conservadores. Isso torna o sistema mais robusto, ou seja, menos sensível a incertezas e variações na dinâmica do processo, mantendo-o afastado da instabilidade (de Campos, 2010). Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros para sintonia utilizando esse método.

| Tabela 2 - Tabela de parâmetros sintonia CHR. |       |                           |                               |
|-----------------------------------------------|-------|---------------------------|-------------------------------|
| Controlador                                   |       | Resposta sem overshoot    | Resposta com 20% de overshoot |
| P                                             | $K_p$ | $0,3 \cdot \frac{T}{KL}$  | $0,7 \cdot \frac{T}{KL}$      |
|                                               |       |                           |                               |
| PI                                            | $K_p$ | $0,6 \cdot \frac{T}{KL}$  | $0,7 \cdot \frac{T}{KL}$      |
|                                               | $T_i$ | $4 \cdot L$               | $2,3 \cdot L$                 |
| PID                                           | $K_p$ | $0,95 \cdot \frac{T}{KL}$ | $1,20 \cdot \frac{T}{KL}$     |
|                                               | $T_i$ | $2,4 \cdot L$             | $2 \cdot L$                   |
|                                               | $T_d$ | $0,42 \cdot L$            | $0,42 \cdot L$                |

Fonte: Autor, 2025.

### 3.6.3 Cohen-Coon (CC)

O método de sintonia proposto por Cohen e Coon (1953) é muito utilizado no controle de processos, apresentando uma maior eficiência quando se trata de sistemas que podem ser aproximados por um modelo FOPDT. Segundo Silva et al. (2014), essa abordagem, assim como no método de Ziegler-Nichols, representa a dinâmica do processo por meio de uma função de transferência simplificada, o que facilita sua aplicação até mesmo em sistemas mais complexos de controlar.

De acordo com Batista et al. (2014), o método se resume em identificar a função de transferência em malha aberta a partir da resposta ao degrau, aproximando-a de um modelo FOPDT. A análise da curva de reação é o ponto principal dessa técnica, permitindo a estimativa direta dos parâmetros do processo: ganho estático  $K$ , constante de tempo  $T$  e atraso de transporte



L. Conforme Carmo (2006), esse procedimento é particularmente indicado para processos lentos, onde a obtenção da estabilidade crítica pode ser demorada, tornando o método vantajoso pela simplicidade do cálculo após a obtenção da curva.

Além disso, Pinto (2014) relata em sua obra que o método é considerado viável para processos com tempo morto relativamente elevado, isto é, quando o fator de incontabilidade  $F_c=L/T$  é superior a 0,3, condição em que métodos como o de Ziegler-Nichols tendem a apresentar desempenho inferior. A Tabela 3 apresenta a sintonia de acordo com o método de CC.

Tabela 3 - Sintonia de acordo com o método de CC.

| Controlador | $K_p$                                                        | $T_i$                                            | $T_d$                  |
|-------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|
| P           | $\left(1 + \frac{L}{3T}\right) \cdot \frac{1}{KL}$           | -                                                | -                      |
| PI          | $\left(0,9 + \frac{L}{12T}\right) \cdot \frac{T}{KL}$        | $L \cdot \left(\frac{30T + 3L}{9T + 20L}\right)$ | -                      |
| PID         | $\left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4T}\right) \cdot \frac{T}{KL}$ | $L \cdot \left(\frac{32T + 6L}{13T + 8L}\right)$ | $\frac{4LT}{11T + 2L}$ |

Fonte: Adaptado de Souza, 2024.

#### 3.6.4 Integral of Absolute Error (IAE)

O projeto de controladores PID com base em critérios de desempenho integrais, como o IAE, surgiu como uma alternativa aos métodos clássicos de sintonia, proporcionando respostas mais estáveis e com menor oscilação. Esse tipo de abordagem ganhou maior notoriedade após um grupo de pesquisadores da *Louisiana State University*, durante a década de 1960, propor regras de ajuste ótimas dos parâmetros PID por meio da minimização de critérios como IAE e ITAE. Esse trabalho considerou diferentes configurações de modelos do tipo FOPDT, estabelecendo uma base para diversas estratégias modernas de controle (Lopez *et al.*, 1967; Rovira *et al.*, 1969; Pinto, 2014).

Rivera, Morari e Skogestad (1986), reforçam que o critério IAE promove ajustes de controladores que reduzem o valor absoluto do erro ao longo do tempo, promovendo uma resposta mais suave e robusta sob ação de perturbações e ruídos de medição. Ao contrário do método de Ziegler-Nichols, que prioriza a agressividade da resposta em troca de maior risco de instabilidade, a sintonia via IAE busca um melhor comprometimento entre desempenho e

estabilidade. Essa característica é muito útil em processos industriais com dinâmica lenta, grande constante de tempo ou atraso considerável, como ocorre em sistemas térmicos ou tanques de nível.

Tabela 4 - Sintonia de acordo com IAE.

| Controlador | $K_p$                                                     | $T_i$                                                          | $T_d$                                           |
|-------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| PI          | $\frac{0,758}{K} \cdot \left(\frac{L}{T}\right)^{-0.861}$ | $\left(\frac{T}{1,02 - 0,323 \left(\frac{L}{T}\right)}\right)$ | -                                               |
| PID         | $\frac{1,086}{K} \cdot \left(\frac{L}{T}\right)^{-0.869}$ | $\left(\frac{T}{0,74 - 0,13 \left(\frac{L}{T}\right)}\right)$  | $0,348T \cdot \left(\frac{L}{T}\right)^{0,914}$ |

Fonte: Adaptado de Smith e Corripio, 1997.

### 3.7 Open Platform Communications (OPC)

O OPC é, atualmente, o meio mais comum de estabelecer a conexão entre fontes de dados e aplicações cliente de interfaces homem-máquina (IHM). Ele otimiza a interface entre aplicações cliente-servidor ao fornecer um mecanismo padronizado para a comunicação de dados entre fontes de dados (servidores) e aplicações cliente, facilitando, assim, a interoperabilidade entre diferentes fabricantes e tecnologias.

Por ser uma interface universalmente aceita para o envio de dados, o protocolo OPC dispensa a utilização de drivers e conversores proprietários, reduzindo a dependência do usuário em relação a fornecedores de sistemas fechados (Smar, 2005).

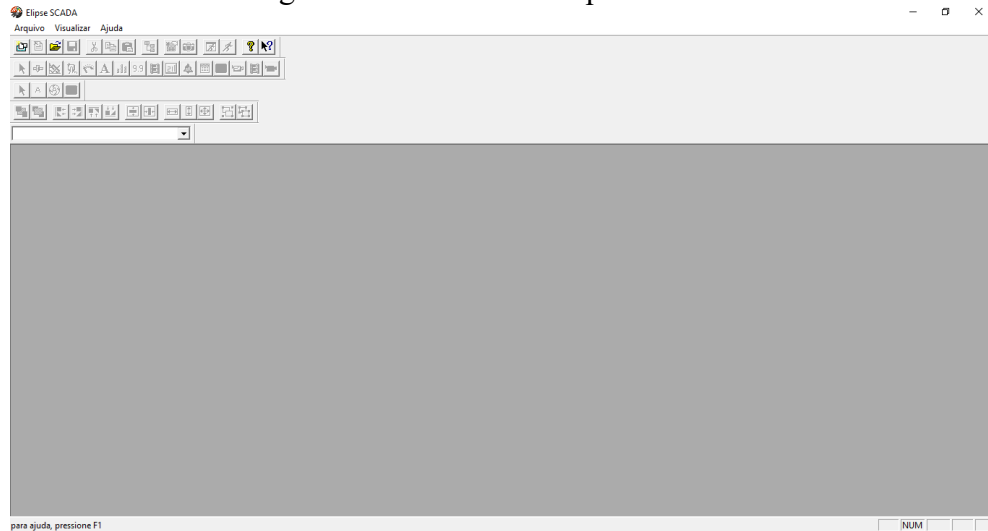
### 3.8 Elipse Scada

O Elipse SCADA, cuja interface pode ser observada na Figura 9, é uma plataforma de supervisão e controle industrial amplamente utilizada no monitoramento e na gestão de processos em tempo real. Ela permite a criação de interfaces gráficas, a coleta de dados históricos e a integração com diversos dispositivos de campo, como CLPs, sensores e atuadores.

Buch Junior e Grunewalder (2013) evidenciaram sua aplicação em ambientes industriais mais complexos ao desenvolver um concentrador de dados para ensaios de desempenho em

usinas termelétricas. Essa plataforma permite visualizar e coletar dados operacionais que visam facilitar a análise de desempenho e a tomada de decisões em um processo.

Figura 8 - Interface do Elipse SCADA.



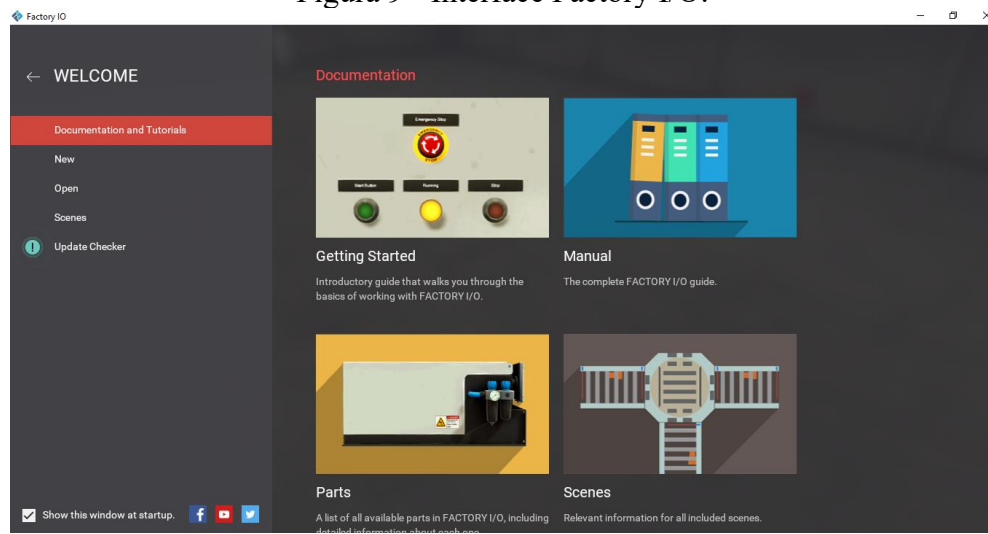
Fonte: Autor, 2025.

### 3.9 Factory IO

O *Factory I/O*, cujo a interface é apresentada na Figura 8, é um simulador tridimensional que possibilita a criação de ambientes industriais virtuais com componentes realistas, como sensores, atuadores e sistemas de transporte. Esse *software* vem sendo amplamente utilizado no meio acadêmico, pois permite simular processos industriais de forma segura, realista e de baixo custo, proporcionando o aprendizado prático de técnicas de automação industrial (Oliveira Junior, 2023).

Além disso, o *software* permite a interligação com controladores lógicos programáveis (CLPs) e também pode se conectar a ambientes de programação, como o CODESYS, e a ferramentas como o MATLAB/*Simulink*, por meio de protocolos de comunicação industrial, como o OPC (Silva, 2023).

Figura 9 - Interface Factory I/O.



Fonte: Autor, 2025.

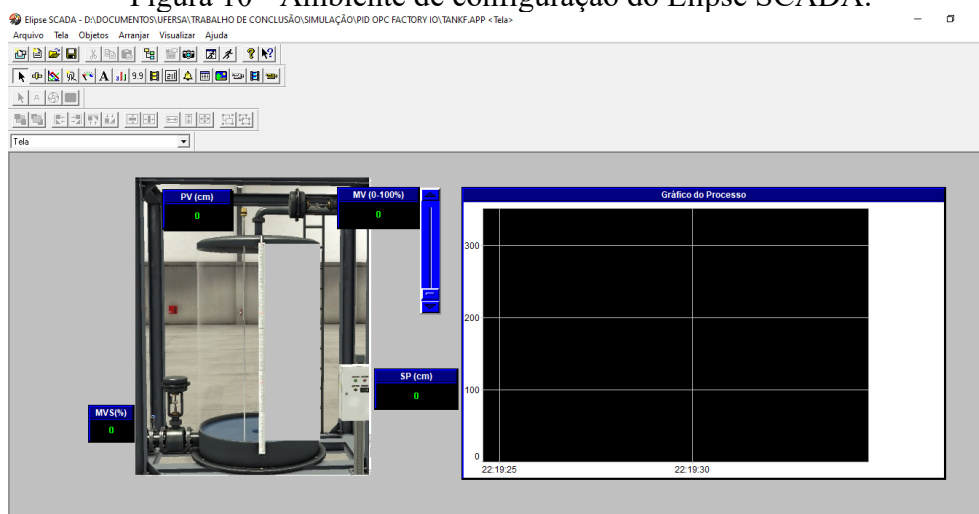
## 4 METODOLOGIA

Essa sessão aborda todo o procedimento realizado para realização desse trabalho, desde a coleta de dados aos resultados finais. O desenvolvimento desse trabalho pode ser dividido em 3 tópicos principais, sendo eles a conexão OPC, a simulação e conexão com a planta e a coleta de dados via MATLAB.

### 4.1 Conexão OPC

Com a ajuda do *software* Elipse SCADA, que possui um servidor OPC DA integrado, é realizada a conexão entre Elipse e *Factory I/O*. No ambiente de trabalho do Elipse são configurados alguns itens que servirão como agente de visualização ou interação de dados. Na Figura 10 é apresentado o ambiente de configuração do Elipse SCADA com os itens de interação.

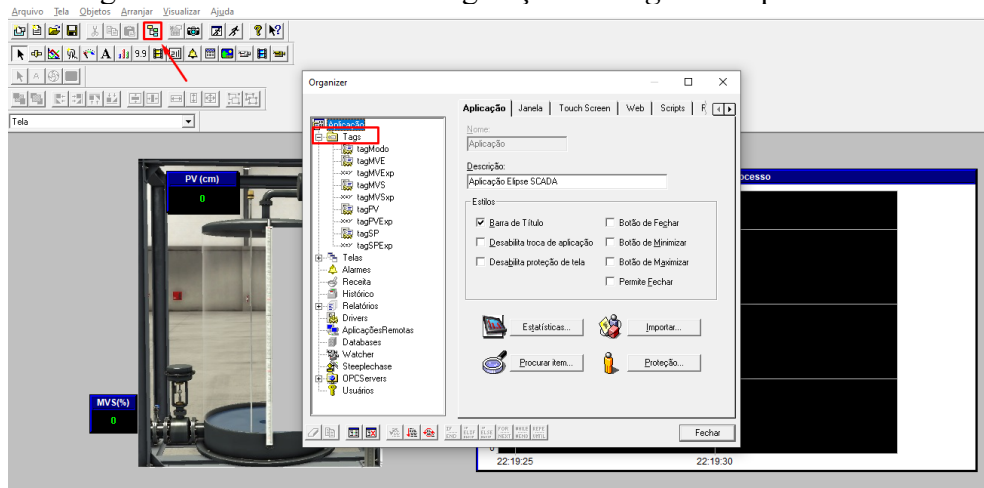
Figura 10 - Ambiente de configuração do Elipse SCADA.



Fonte: Autor, 2025.

No ambiente de configuração de organizadores são configuradas todas as *Tags*, de modo a serem cada sensor e atuador desejado no processo. Nessa aplicação serão utilizadas as *Tags* para o modo de operação da planta (seja manual ou automática), para o atuador MV, que é responsável pela abertura da válvula de entrada, para o sensor PV, que informa o nível de água no reservatório, para o valor desejado de nível, nesse caso representado por SP, que é o *setpoint* e MVS, que é a referência de abertura da válvula de saída. Na Figura 11 é apresentado a aba de configuração das *Tags*.

Figura 11 - Ambiente de configuração das *tags* no Elipse SCADA.

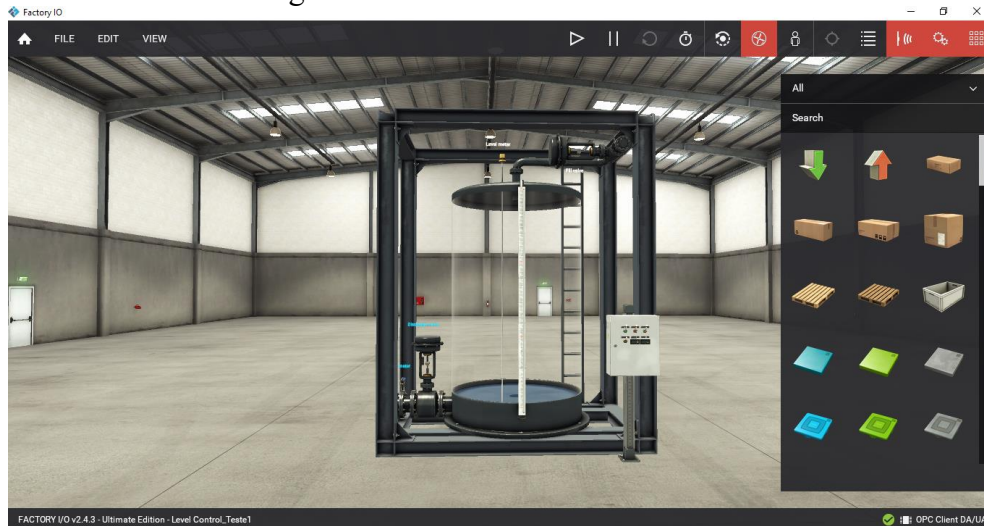


Fonte: Autor, 2025.

## 4.2 Conexão com a planta

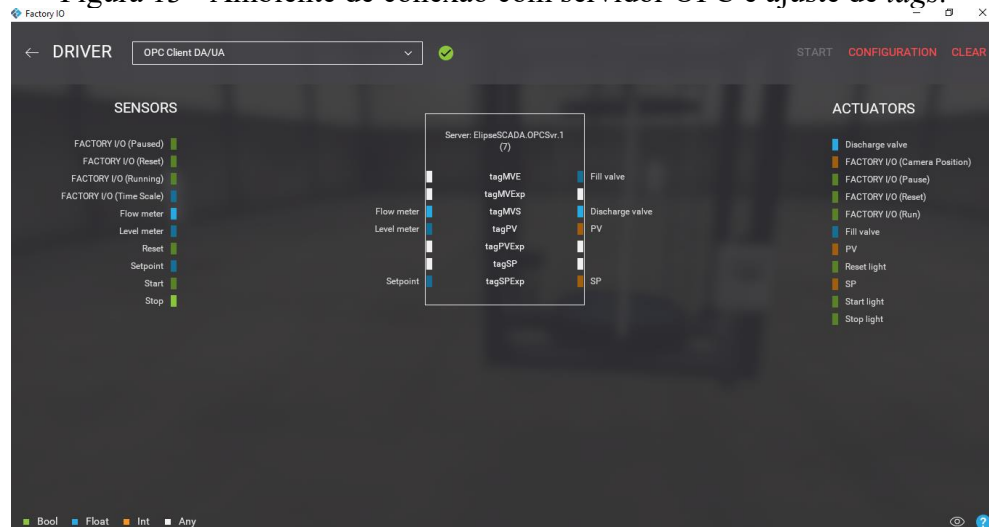
Após a configuração realizada no Elipse, se inicia a configuração do ambiente de simulação no *software Factory I/O*. Ao iniciar o *software* e realizar a escolha da planta desejada, que para essa pesquisa foi o tanque de nível, como mostrado na Figura 12, é realizada a conexão com o servidor OPC do Elipse, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 12 - Planta de nível escolhida.



Fonte: Autor, 2025.

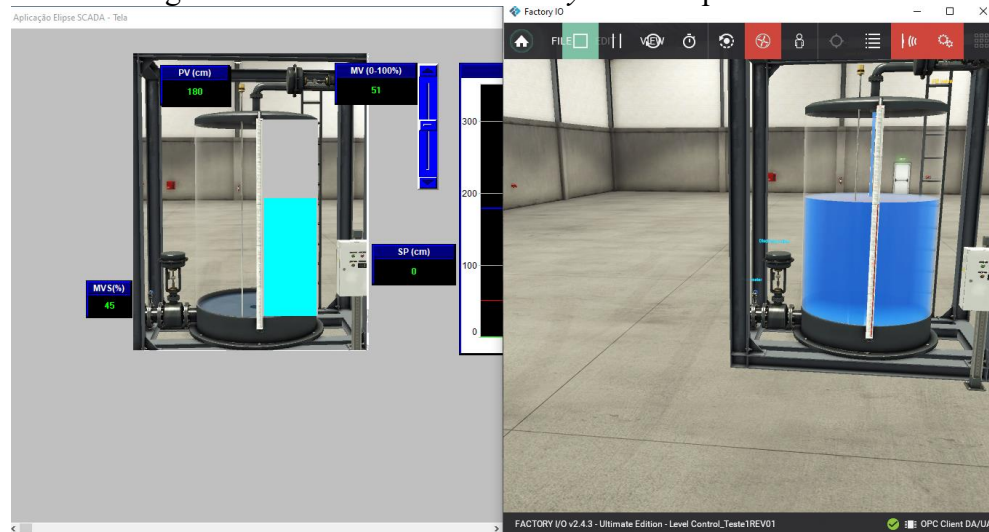
Figura 13 - Ambiente de conexão com servidor OPC e ajuste de *tags*.



Fonte: Autor, 2025.

Com as *tags* já ajustadas, é iniciada a simulação no *Factory* após essa simulação iniciada, são realizados testes de interação entre Elipse e *Factory*, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Conexão entre *Factory* I/O e Elipse SCADA.



Fonte: Autor, 2025.

Para essa configuração, a válvula de saída (MVS) foi mantida em 45%, valor inicial estabelecido na planta, de forma que o controlador opere continuamente sob a presença desse distúrbio no nível do tanque.

### 4.3 Coleta de dados

Para a coleta de dados, foi utilizado o MATLAB na versão 32 bits, por ser a única que oferece suporte à conexão com servidores OPC DA. A conexão com o servidor OPC do Elipse SCADA é estabelecida por meio dos comandos descritos nas primeiras linhas do apêndice A.

O MATLAB é utilizado tanto para a aquisição dos dados da planta quanto para a aplicação do controlador, possibilitando a avaliação do desempenho do sistema em tempo real. Inicialmente, o *software* aplica um sinal de degrau à planta, mediante solicitação, e monitora seu comportamento durante um intervalo de tempo predeterminado. O *script* utilizado para esse procedimento pode ser observado no Apêndice A. Ao final desse período, é gerado um gráfico que representa a resposta da planta ao estímulo aplicado.

Com base na resposta obtida, é possível estimar os parâmetros característicos da planta: o ganho estático (K), o atraso de transporte (L) e a constante de tempo (T). Esses parâmetros permitem a modelagem da planta e, a partir disso, a realização da sintonia do controlador com os métodos selecionados. De maneira análoga, também é aplicado o teste do relé, o qual possibilita a obtenção dos mesmos parâmetros e a consequente sintonia do controlador. No Apêndice B, é descrito o *script* utilizado para esse procedimento.

Após a determinação das sintonias, a planta é submetida à validação de cada uma das configurações obtidas. Com os dados coletados, realiza-se uma comparação entre os métodos, considerando métricas como o sobressinal (*overshoot*) e o tempo de acomodação. Esses resultados e análises comparativas são apresentados com mais detalhes na seção 5.



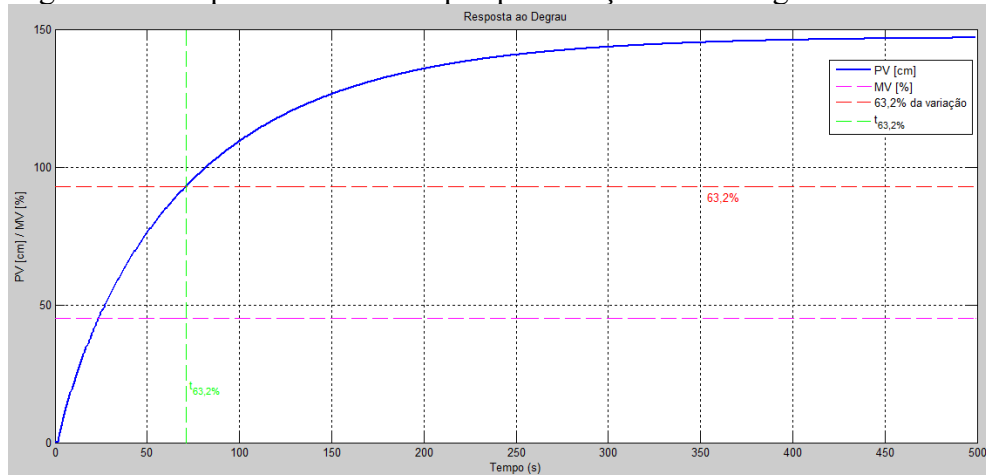
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos a partir da implementação prática e dos testes realizados ao longo deste trabalho, bem como uma análise crítica dos dados experimentais coletados. O foco está na avaliação do desempenho dos diferentes métodos de sintonia de controladores PID aplicados, considerando critérios como estabilidade, tempo de resposta e minimização do erro em regime permanente. Além disso, é realizada uma comparação entre os dois procedimentos de identificação de modelos dinâmicos utilizados: o método do degrau e o método do relé. Essa comparação busca explicar algumas diferenças em termos de precisão da estimativa dos parâmetros do modelo (ganho, atraso e constante de tempo).

### 5.1 Utilizando o método do degrau

Com a conexão OPC estabelecida entre o *Factory I/O* e o *Elipse*, utiliza-se o script apresentado no Apêndice A no MATLAB, o qual é responsável por aplicar um degrau, em malha aberta, de 0 a 45% na variável de controle (MV). Simultaneamente, a válvula de escape do tanque é ajustada manualmente para uma abertura de 45%, de forma a manter a vazão de entrada próxima à vazão de saída do líquido no reservatório. Após a saída do sistema atingir o regime permanente, estabilizando-se em um ponto de operação, foi obtido o gráfico apresentado na Figura 15, a partir do qual realizou-se a estimação da planta, aproximando-a de um modelo FOPDT.

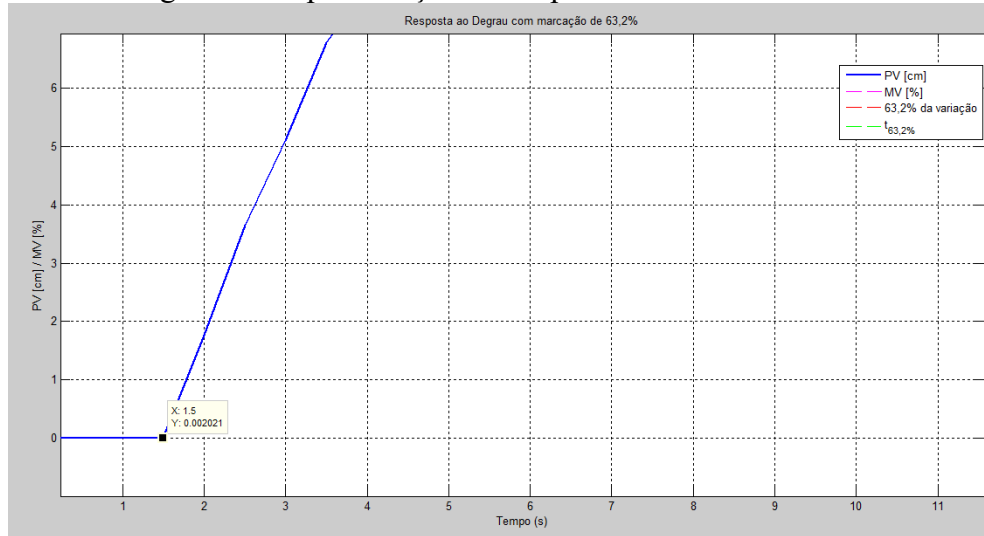
Figura 15 - Resposta do sistema após perturbação de um degrau de 0 a 45%.



Fonte: Autor, 2025.

Através da Figura 15 pode ser obtida a constante de tempo, representado por T, que é tempo necessário para o sistema atingir 63,2% da saída do sistema em estado permanente. Dessa forma a curva indica que o tempo para atingir 63,2% é 67,5 segundos e o atraso L é cerca de 1,5 s, ele pode ser obtido após uma aproximação visual, como apresentado na Figura 16, desse modo a constante de tempo (T) é 66 s.

Figura 16 - Aproximação visual para observar o atraso L.



Fonte: Autor, 2025.

Através da análise gráfica também é possível determinar o ganho estático (K), como na Equação 5.1:

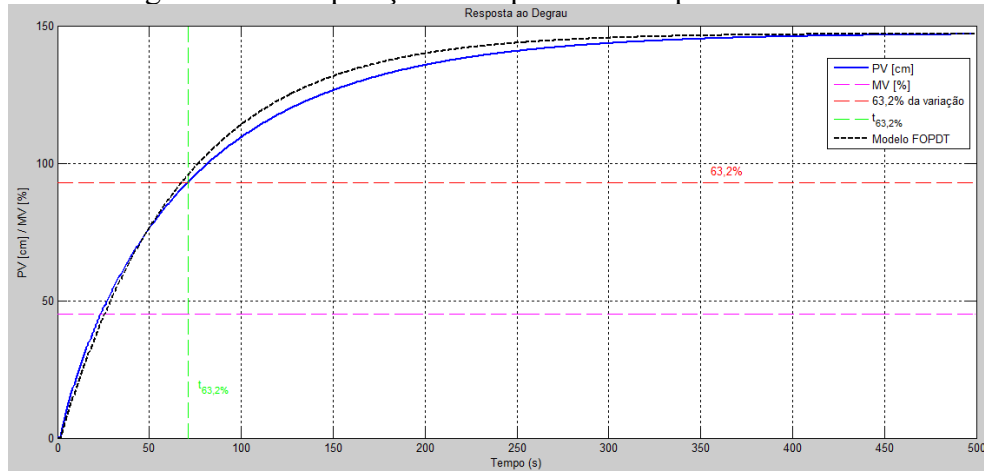
$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta MV} = \frac{147 - 0}{45 - 0} = \frac{147cm}{45\%} = 3,27 \quad (5.1)$$

Com todos os parâmetros calculados a função de transferência de primeira ordem com atraso de transporte pode ser representada como na Equação 5.2.

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} = \frac{3,27 e^{-1,5s}}{66s + 1} \quad (5.2)$$

De modo a validar a função de transferência aproximada é realizada a comparação dos gráficos sobrepostos, como é possível perceber na Figura 17 o modelo aproximado é bem semelhante ao real.

Figura 17 - Comparação entre planta real e planta estimada.



Fonte: Autor, 2025.

### 5.1.1 Ziegler-Nichols

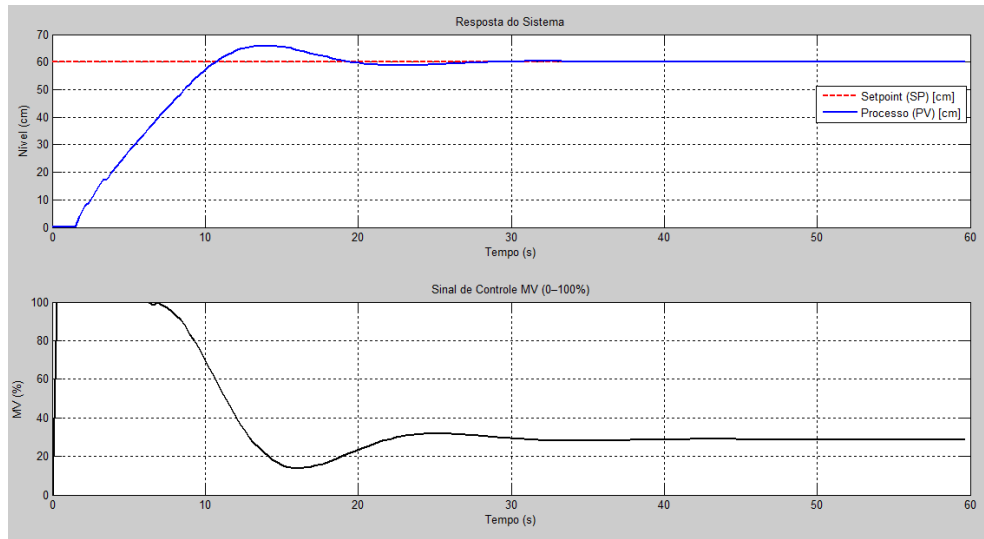
Com o modelo da planta obtido, são calculados os parâmetros  $K_p$  e  $T_i$  para aplicar na sintonia do controlador. O primeiro método de sintonia é o de Ziegler-Nichols, na qual o valor dos parâmetros  $K_p$  e  $T_i$  são representados nas Equações 5.3 e 5.4, respectivamente.

$$K_p = 0,9 \cdot \frac{T}{KL} = 0,9 \cdot \frac{66}{3,27 \cdot 1,5} = 12,11 \quad (5.3)$$

$$T_i = 3,33 \cdot L = 4,995 \quad (5.4)$$

O gráfico do comportamento da planta após a sintonia do controlador pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 - Resposta com a sintonia de Z-N, utilizando identificação ao degrau.



Fonte: Autor, 2025.

Como é característico do método de sintonia de Ziegler–Nichols, o sinal apresenta estabilização rápida, porém com um sobressinal perceptível. Nessa configuração, o nível do tanque atinge um valor máximo de 66 cm e estabiliza-se em aproximadamente 23,4 segundos.

### 5.1.2 CHR

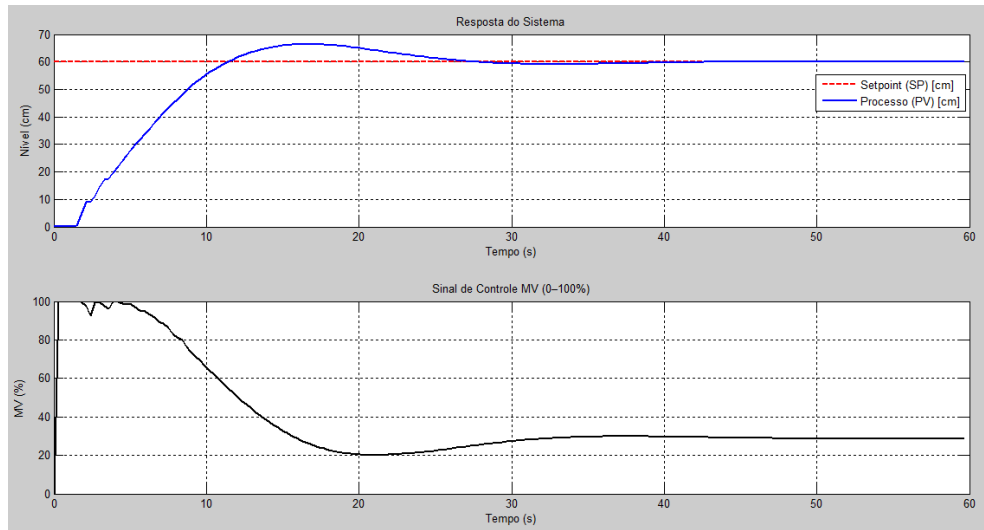
De modo análogo ao de Ziegler-Nichols são calculados os parâmetros também para CHR, o valor dos parâmetros  $K_p$  e  $T_i$  são representados nas equações 5.5 e 5.6, respectivamente.

$$K_p = 0,6 \cdot \frac{T}{KL} = 0,6 \cdot \frac{66}{3,27 \cdot 1,5} = 8,075 \quad (5.5)$$

$$T_i = 4 \cdot L = 4 \cdot 1,5 = 6 \quad (5.6)$$

Assim como em Z-N, plotou-se o gráfico do comportamento da planta para essa sintonia no seu controlador e o resultado é apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Resposta com a sintonia de CHR, utilizando identificação ao degrau.



Fonte: Autor, 2025.

Na sintonia pelo método de CHR, o nível do tanque também ultrapassa o valor de referência, atingindo 66,49 cm, assim como observado no método de Ziegler–Nichols. Entretanto, o sistema apresenta resposta ligeiramente mais lenta, com tempo de acomodação de aproximadamente 25,2 segundos.

### 5.1.3 Cohen-Coon

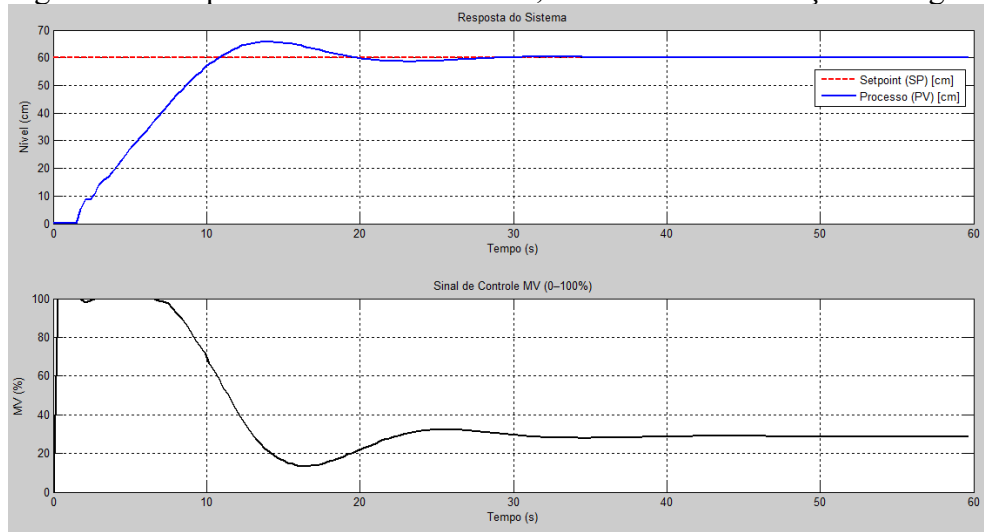
Outro método abordado foi o de Cohen-Coon, cujo os parâmetros são calculados nas Equações 5.7 e 5.8.

$$K_P = \left(0,9 + \frac{L}{12T}\right) \cdot \frac{T}{KL} = \left(0,9 + \frac{1,5}{12 \cdot 66}\right) \cdot \frac{66}{3,27 \cdot 1,5} = 12,127 \quad (5.7)$$

$$T_i = L \cdot \left(\frac{30T + 3L}{9T + 20L}\right) = 1,5 \left(\frac{30 \cdot 66 + 3 \cdot 1,5}{9 \cdot 66 + 20 \cdot 1,5}\right) = 4,77 \quad (5.8)$$

O resultado da aplicação dessa sintonia para o controlador é observado na Figura 20.

Figura 20 - Resposta com sintonia de CC, utilizando identificação ao degrau.



Fonte: Autor, 2025.

No método de Cohen–Coon, os parâmetros obtidos foram bastante próximos aos do método de Ziegler–Nichols, atingindo nível máximo de 65,72 cm e tempo de acomodação em torno de 24,7 segundos. Dessa forma, seu comportamento se mostra bastante semelhante ao observado no método de Ziegler–Nichols.

#### 5.1.4 IAE

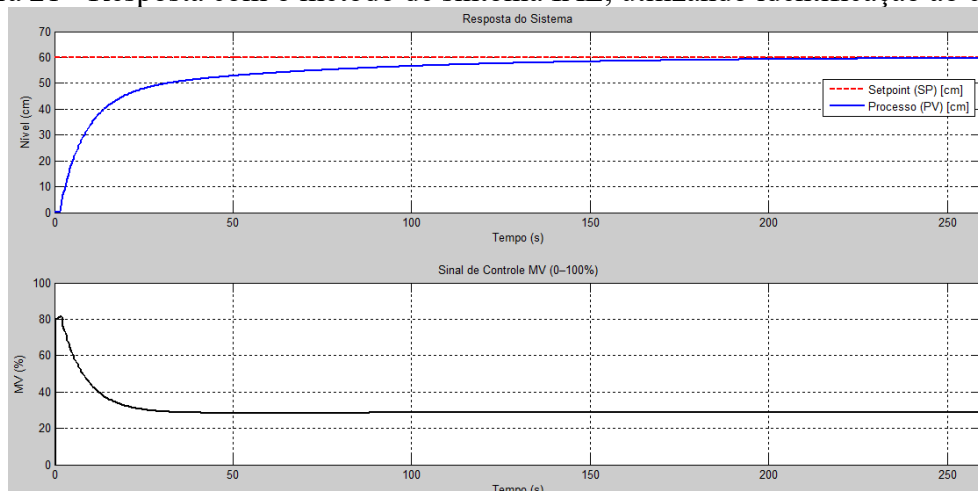
Por fim, aplicou-se o método IAE para a obtenção dos parâmetros. A determinação desses parâmetros pode ser observada nas Equações 5.9 e 5.10.

$$K_P = \frac{0,758}{K} \cdot \left(\frac{L}{T}\right)^{-0,861} = \frac{0,758}{3,27} \cdot \left(\frac{1,5}{66}\right)^{-0,861} = 4,837 \quad (5.9)$$

$$T_i = \frac{T}{1,02 - 0,323 \cdot \frac{L}{T}} = \frac{66}{1,02 - 0,323 \cdot \frac{1,5}{66}} = 65,19 \quad (5.10)$$

Os valores desses parâmetros também foram aplicados no controlador e o resultado do seu comportamento pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Resposta com o método de sintonia IAE, utilizando identificação ao degrau.



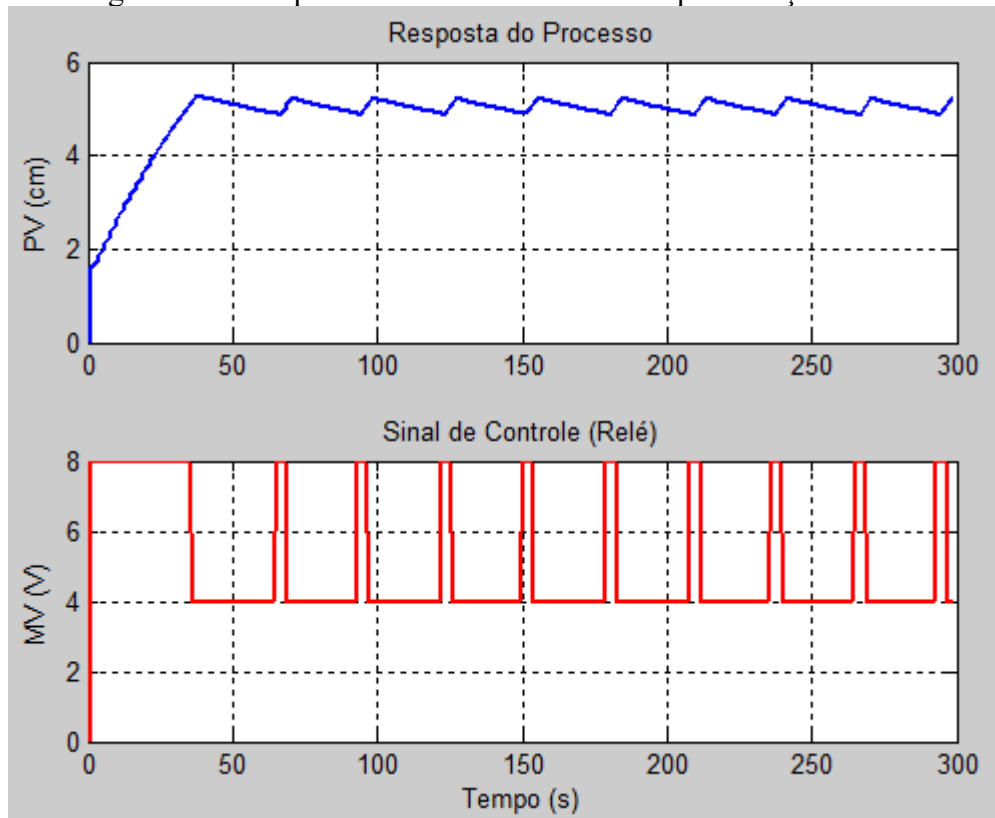
Fonte: Autor, 2025.

O método IAE apresenta um comportamento significativamente distinto dos anteriores. Inicialmente, a resposta é mais agressiva, porém torna-se lenta ao longo do tempo, estabilizando-se de forma mais demorada em comparação às demais sintonias, com tempo de acomodação de aproximadamente 168,8 segundos. Destaca-se, entretanto, a ausência de sobressinal, mantendo-se sempre abaixo do valor de referência de 60 cm.

## 5.2 Método do Relé Bias

O segundo método adotado para a determinação do modelo da planta foi o método do relé com bias. Nesse procedimento, o relé é conectado à planta em malha fechada, provocando uma perturbação controlada a fim de analisar o seu comportamento dinâmico. Após a realização de alguns testes preliminares e a observação da resposta do sistema, definiram-se os parâmetros para a coleta de dados: 300 amostras com tempo de amostragem de 1 s, referência da variável de processo (PV) igual a 5 cm. Para o sinal de controle, estabeleceu-se um ponto de operação de 5 V (equivalente a 50% da abertura da válvula), amplitude (h) de 2 V (20%), adição de bias de 1 V e histerese de 0,1 V. Nessa configuração, o relé oscila entre 40% e 80% de abertura sempre que detecta variação de 1% na PV, garantindo um comportamento adequado para a excitação da planta. Na Figura 22 é apresentado o comportamento do relé e da planta, quando submetida a essa perturbação.

Figura 22 - Comportamento do sistema com a perturbação do relé.



Fonte: Autor, 2025.

De modo a simplificar os cálculos, foram adicionadas as Equações 3.10 a 3.17 no MATLAB para que o *software* realizasse o cálculo dos parâmetros ganho estático (K), constante de tempo (T) e atraso (L), bem como o período de oscilação ( $T_u$ ). Esse *script* pode ser observado no Apêndice B e os resultados obtidos através dele são descritos a seguir:

Período de oscilação  $T_u = 28,00$  s

Ganho estático  $K = 1,1024$

Constante de tempo  $T = 37,43$  s

Atraso  $L = 1,35$  s

Com os parâmetros é possível estimar o modelo de planta de primeira ordem do sistema, o qual é representado na Equação 5.11.

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} = \frac{1,1024 e^{-1,35s}}{37,43s + 1} \quad (5.11)$$



Assim como no método do degrau, são realizadas as sintonias do controlador para os quatro métodos propostos.

### 5.2.1 Ziegler-Nichols

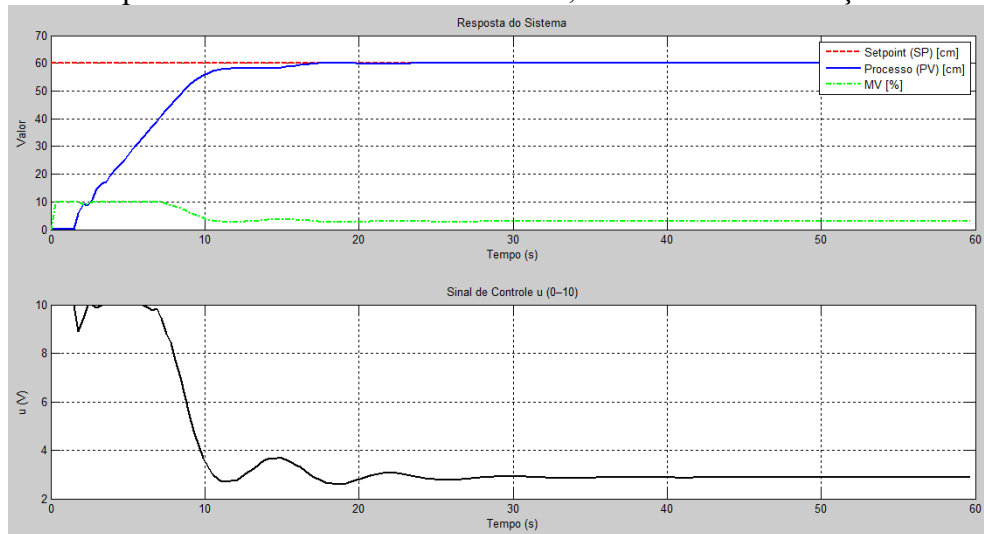
O cálculo dos parâmetros para o método de Z-N pode ser observado nas Equações 5.12 e 5.13.

$$K_p = 0,9 \cdot \frac{T}{KL} = 25,15 \quad (5.12)$$

$$T_i = 3,33 \cdot L = 4,046 \quad (5.13)$$

Aplicando esses valores de ganho ao controlador, sua resposta foi plotada e pode ser observada no gráfico da Figura 23.

Figura 23 - Resposta do sistema com sintonia Z-N, utilizando identificação com relé Bias.



Fonte: Autor, 2025.

No método de identificação do relé Bias, a sintonia realizada pelo método de Ziegler-Nichols não apresentou *overshoot*, ou seja, o nível da variável controlada não ultrapassou a referência. Além disso, o tempo de acomodação foi de 15,6 segundos, mostrando-se mais rápido em comparação com a sintonia obtida a partir da identificação da planta pelo método do degrau.

### 5.2.2 CHR

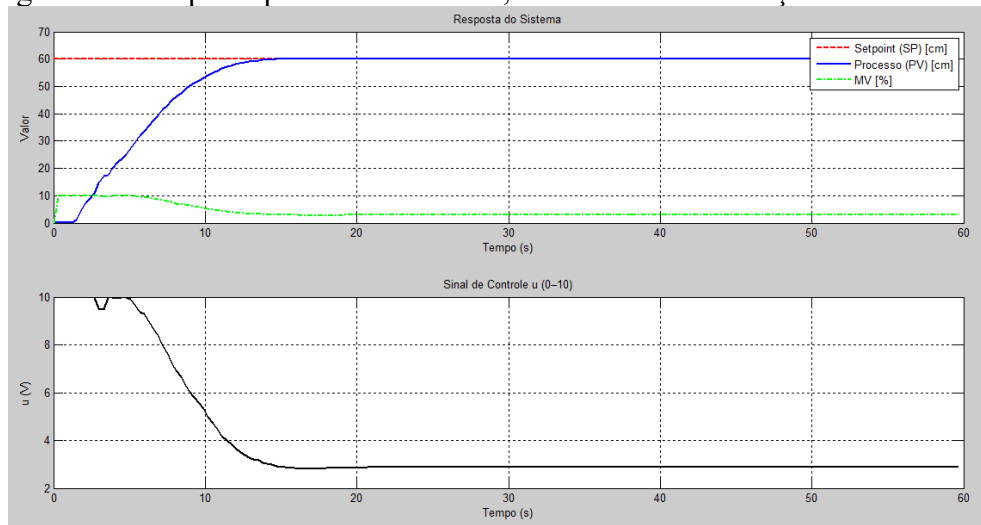
De forma análoga ao método do degrau, calcula-se os ganhos para sintonia do controlador utilizando as equações determinadas por CHR. Como apresentado nas Equações a seguir.

$$K_P = 0,6 \cdot \frac{T}{KL} = 0,6 \cdot \frac{37,43}{1,1024 \cdot 1,35} = 15,09 \quad (5.14)$$

$$T_i = 4 \cdot L = 4 \cdot 1,35 = 5,4 \quad (5.15)$$

Após aplicar os parâmetros, a resposta do sistema com a sintonia aplicada pode ser observada na Figura 24.

Figura 24 - Resposta para sintonia CHR, utilizando identificação com relé Bias.



Fonte: Autor, 2025.

Para essa sintonia não é gerado sobressinal e o sistema atinge o valor desejado de forma bem rápida, 12,6 segundos, não apresentando instabilidade no sinal.

### 5.2.3 Método de Cohen-Coon

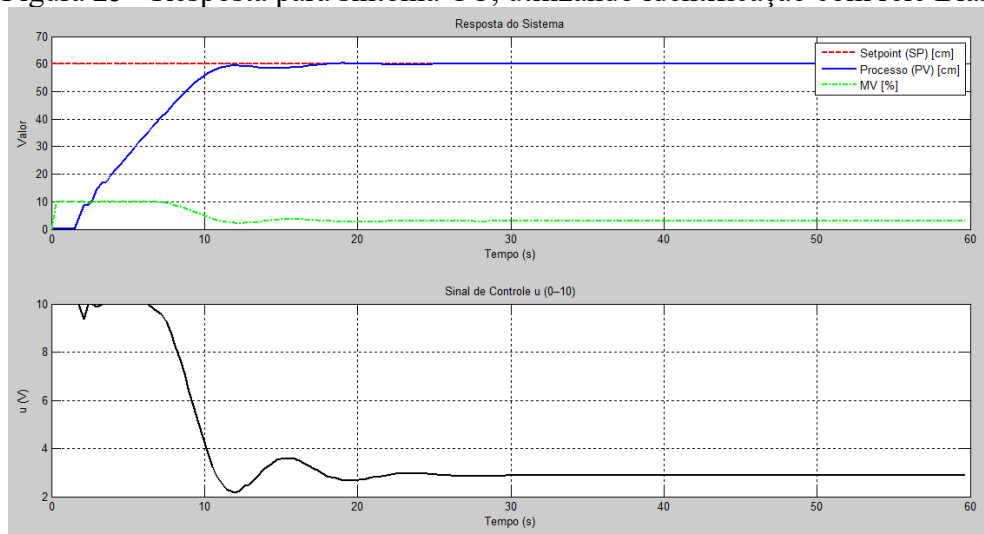
Dando continuidade as sintonias, são calculados os parâmetros para o método de sintonia de CC, na qual as equações desses cálculos podem ser observadas a seguir:

$$K_P = \left(0,9 + \frac{L}{12T}\right) \cdot \frac{T}{KL} = \left(0,9 + \frac{1,35}{12 \cdot 37,43}\right) \cdot \frac{37,43}{1,1024 \cdot 1,35} = 22,71 \quad (5.16)$$

$$T_i = L \cdot \left(\frac{30T + 3L}{9T + 20L}\right) = 1,35 \left(\frac{30 \cdot 37,43 + 3 \cdot 1,35}{9 \cdot 37,43 + 20 \cdot 1,35}\right) = 4,17 \quad (5.17)$$

De posse desses valores de ganho, eles são aplicados no controlados PI e o comportamento do sistema pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 - Resposta para sintonia CC, utilizando identificação com relé Bias.



Fonte: Autor, 2025.

Observa-se que o sistema alcança rapidamente o valor desejado; porém, ao contrário da sintonia realizada pelo método CHR, apresenta uma pequena instabilidade, chegando a atingir 60,24 cm de nível antes de se estabilizar, com tempo de acomodação de 15,9 segundos.

#### 5.2.4 Método IAE

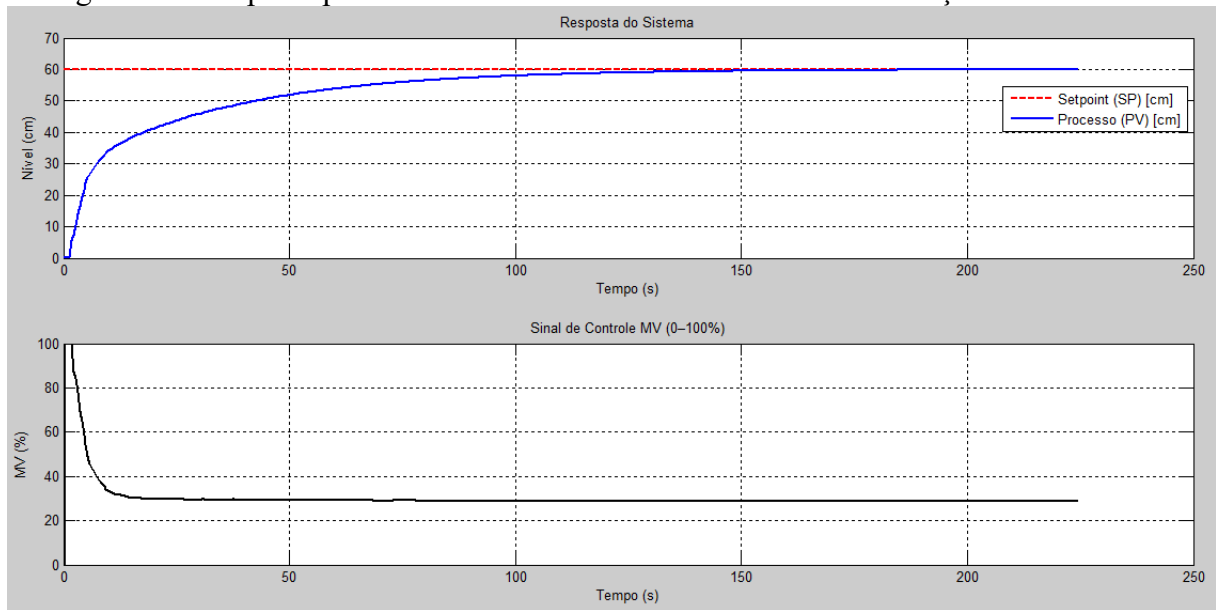
Por fim, pode-se calcular os valores de ganho para o método IAE, esse cálculo pode ser acompanhado nas Equações 5.17 e 5.18.

$$K_P = \frac{0,758}{K} \cdot \left(\frac{L}{T}\right)^{-0,861} = \frac{0,758}{1,1024} \cdot \left(\frac{1,35}{37,43}\right)^{-0,861} = 8,36 \quad (5.17)$$

$$T_i = \frac{T}{1,02 - 0,323 \cdot \frac{L}{T}} = \frac{37,43}{1,02 - 0,323 \cdot \frac{1,35}{37,43}} = 37,14 \quad (5.18)$$

De posse dos valores de ganho, é feita a sintonia do controlador no MATLAB, sua resposta é apresentada na Figura 26.

Figura 26 - Resposta para sintonia utilizando método IAE e identificação com relé Bias.



Fonte: Autor, 2025.

Assim como no método do degrau, a sintonia IAE apresenta uma resposta lenta, com tempo de acomodação de 119 segundos, mas sem sobressinal ou instabilidade.

Com a sintonia realizada para ambos os métodos, é feita a comparação de desempenho entre eles, avaliando dois critérios, sendo eles o sobressinal (*overshot*) e o tempo de acomodação, essa comparação pode ser observada no Quadro 1.

### 5.3 Comparação de sintonias

Ao fim da simulação do controlador submetido a todas as sintonias é realizada uma comparação entre elas, dando destaque a dois parâmetros principais para avaliação de desempenho, são eles o valor de sobressinal e o tempo de acomodação.

Na primeira coluna do Quadro 1 é descrito o método de identificação da planta utilizado, já na segunda coluna é informado o método de sintonia da planta. O valor de *setpoint* informado na coluna 3 foi de 60 cm e adotado para todas as sintonias, de modo a realizar uma comparação mais fidedigna entre os métodos. Na coluna de *Maximus Point* é destacado o maior valor atingido pela variável controlada (PV), esse valor é utilizado com o base para o cálculo do *overshoot*, representado na quinta coluna. Por fim, o tempo que o sinal leva para se acomodar é representado na sexta coluna.

Quadro 1 - Comparação entre as sintonias.

| Entrada | Método se sintonia | Maximus Point (cm) | Overshoot (%) | Tempo de acomodação (s) |
|---------|--------------------|--------------------|---------------|-------------------------|
| Degrau  | Ziegler-Nichols    | 66                 | 10,000%       | 23,4                    |
|         | CHR                | 66,49              | 10,817%       | 25,2                    |
|         | Cohen-Coon         | 65,72              | 9,533%        | 24,7                    |
|         | IAE                | 60                 | 0,000%        | 168,8                   |
| Relé    | Ziegler-Nichols    | 60                 | 0,000%        | 15,6                    |
|         | CHR                | 60                 | 0,000%        | 12,6                    |
|         | Cohen-Coon         | 60,24              | 0,400%        | 15,9                    |
|         | IAE                | 60                 | 0,000%        | 119                     |

Fonte: Autor, 2025.

Ao comparar os métodos de identificação do sistema, o método do relé mostrou-se mais vantajoso para esta aplicação em relação ao método do degrau. O método do relé praticamente não apresenta sobressinal, registrando apenas 0,4% na sintonia pelo método de Cohen-Coon (CC), enquanto a mesma sintonia aplicada ao modelo identificado pelo degrau resulta em um sobressinal de 9,533%, cerca de 23 vezes maior. Além disso, o método do relé oferece um tempo de resposta significativamente mais rápido. Considerando a sintonia mais lenta de cada abordagem, a sintonia IAE, o modelo obtido pelo método do relé apresenta uma resposta

aproximadamente 50 segundos mais rápida, podendo chegar a menos da metade do tempo gasto no método do degrau, como observado na sintonia pelo método CHR.

Já em relação à análise de desempenho entre as sintonias, essa comparação torna-se mais equilibrada, uma vez que elas apresentaram comportamentos muito semelhantes quando aplicadas ao mesmo método de identificação do sistema. No método do degrau, ambas as sintonias resultaram em *overshoot* na casa dos 10% e tempo de acomodação de aproximadamente 25 segundos. No método do relé, o cenário foi semelhante: as sintonias mantiveram o *overshoot* próximo de 0% e o tempo de acomodação em torno de 15 segundos, com exceção da sintonia CHR, que foi cerca de 3 segundos mais rápida. A sintonia IAE, por sua vez, foge desse padrão, apresentando um comportamento mais suave, o que resulta em um tempo de acomodação significativamente maior em relação às demais.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação de estratégias de controle utilizando a tecnologia de comunicação industrial OPC demonstrou, ao longo deste trabalho, seu enorme potencial para aplicações em sistemas de automação. Através dela, foi possível estabelecer uma comunicação eficiente e remota entre três plataformas distintas, Elipse SCADA, MATLAB e o ambiente físico da planta de nível, possibilitando a coleta de dados, simulação e aplicação de diferentes métodos de sintonia de forma integrada e automatizada. Essa interoperabilidade reduziu significativamente o tempo necessário para testes e validações, além de facilitar a análise em tempo real dos resultados.

No contexto industrial, os sistemas de controle de nível são amplamente utilizados, especialmente nos setores petroquímico, de saneamento e alimentício. Para esses processos, o controlador PID continua sendo uma das soluções mais aplicadas, devido à sua simplicidade e eficiência. No entanto, sua eficácia depende diretamente da qualidade da sintonia, etapa essencial para garantir o bom desempenho do sistema. Neste trabalho, foram comparados diferentes métodos de sintonia aplicados a uma planta real, a partir de modelos obtidos por testes de degrau e relé. Cada método apresentou respostas distintas quanto a sobressinal, tempo de acomodação e erro em regime permanente, e todos se mostraram satisfatórios dentro das particularidades da planta estudada.

Entre os métodos testados, destacou-se a configuração baseada na planta identificada por meio do método do relé e sintonizada com a técnica CHR (Chien-Hrones-Reswick). Essa combinação proporcionou uma resposta com menor tempo de estabilização e ausência de sobressinal, tornando-se, portanto, a mais adequada para o cenário analisado. Isso indica que, mesmo com uma dinâmica relativamente simples, a escolha correta do método de identificação e sintonia pode impactar diretamente no desempenho final do sistema de controle.

Entretanto, é importante ressaltar que a escolha do método de sintonia ideal depende de uma série de fatores, incluindo a dinâmica do processo, os objetivos do controle (como velocidade, estabilidade, robustez), e as restrições físicas da planta. Por isso, o estudo comparativo aqui realizado pode servir como base para futuras aplicações, mas deve sempre ser adaptado às exigências específicas de cada situação.

De modo geral, o trabalho alcançou seus objetivos propostos, demonstrando a viabilidade técnica e prática de integrar ferramentas de simulação, controle e aquisição de dados em uma arquitetura OPC. Além disso, contribuiu para a consolidação do conhecimento sobre

identificação de sistemas e sintonia de controladores, oferecendo uma abordagem aplicada, realista e próxima da prática industrial.



## REFERÊNCIAS

ACIOLI JÚNIOR, George. **Sintonia de controladores PID a partir do método do relé**. 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**. 2. ed. North Carolina: Instrument Society of America, 1995

ÅSTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. **Automatic tuning of PID Controllers**. Durham, NC: ISA, Research Triangle Park, 1988.

ÅSTRÖM, Karl Johan; HÄGGLUND, Tore. **Advanced PID control**. Research Triangle Park, NC: ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2006.

BARRETO, L.; ESCOBAR, A. **Aspectos prácticos de implementación em compensadores PID para control de posición de un automóvil**. Ingenium, v. 15, n. 29, p. 148-162, 2014.

BATISTA, Lorena Cristina Faria; FERNANDES, Gustavo Queiroz; MAIA, Antônio Augusto Torres. **Estudo comparativo de técnicas de sintonia de controladores pid para sistemas de primeira ordem com atraso**. In: ABCM Symp Ser Mechatron. 2014. p. 22.

BAYER, Fernando Mariano; ARAÚJO, Olinto César Bassi de. **Controle automático de processos**. 2016.

BUCH JUNIOR, Antonio Carlos; GRUNEWALDER, Marcos. **Desenvolvimento de um concentrador de dados via software Eclipse SCADA para ensaio de desempenho em usina termelétrica: estudo de caso**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

CAMPOS, M. C. M. M. AND TEIXEIRA, H. C. G. **Controles Típicos de Equipamentos de Processos**. Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, Brasil, 2006.

CARMO, M. J. **Ambiente educacional multifuncional integrado para sintonia e avaliação do desempenho de malhas industriais de controle**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006.

CHAI, T.; QIN, S. J.; WANG, H. Optimal operational control for complex industrial processes. **Annual Reviews in Control**, v. 38, p. 81-92, 2014.

CHIEN, I. M.; HRONES, J. A.; RESWICK, J. B. **On the automatic control of generalized passive systems**. Transactions of the ASME, v. 74, p. 175–185, 1952.

COELHO, Antonio Augusto Rodrigues & DOS SANTOS COELHO, Leandro (2004), **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares**, Editora da UFSC, Santa Catarina, SC

COHEN, G. H.; COON, G. A. **Theoretical considerations of retarded control**. **Transactions ASME** 75, p. 827–837, 1953.

COUGHANOWR, D.R.; KOPPEL, L. B. **Análise e Controle de de Processos**. Editora Guanabara S.A, Rio de Janeiro ,1986.

DE ANDRADE, Lucas HS et al. PSO aplicado à sintonia do controlador PI/PID da malha de nível de uma planta didática industrial. **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Fortaleza CE**, v. 13, 2013.

DE BRITO, João Miguel Gago Pontes et al. **Sintonia Automática de Controladores PID: Uma Abordagem Neuro-Genética**. Universidade do Algarve (Portugal), 2004.

DE CAMPOS, Mario Cesar M. Massa; TEIXEIRA, Herbert Campos Gonçalves. **Controle Típicos de Equipamentos e Processos Industriais**. 1º Edição, São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

FERMINO, Fernando. **Estudo Comparativo de Métodos de Sintonia de Controladores PID**. São Paulo: USP, 2014. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014

GONÇALVES, M. G. **Monitoramento e controle de processos: Programa de qualificação de operadores**. Brasília: PETROBRAS, 2003. 99 p.

MAGRI, Renan. **Desenvolvimento de um Protótipo para Realização de Ensaio de Inflamabilidade em Óculos de Sol**. São Paulo: USP, 2015. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

MUYNARSK, Oscar Gomes; GARCIA, Marcus Valério Rocha. **Sistema de monitoramento e controle de máquinas elétricas, utilizando microcontrolador Arduino e supervisor Elipse SCADA para diminuição de paradas não programadas para a manutenção**. Caleidoscópio, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 1-9, 2016.

NEVES, Rafael Vicente das. **Estudo comparativo de métodos de ajuste de PIDs a partir da resposta degrau**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OLIVEIRA JUNIOR, Cidinei Manoel de. **Gerenciamento de nível em reservatório de líquidos por lógica Fuzzy e controle PID**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2023.

PAIXÃO, Isaac Conceição Silva et al. **IDENTIFICAÇÃO DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO SISTEMA: TANQUES DRENADOS POR GRAVIDADE UTILIZANDO O SOFTWARE CONTROL STATION®**. In : CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS CONAPESC, 2019.

PINTO, Jan Erik Mont Gomery et al. **Software baseado no método do relé para sintonia de controladores PID a partir da identificação da dinâmica da malha**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2015, Natal. Anais [...]. Natal: SBA, 2015.

PINTO, Jan Erik Mont Gomery. **Aplicação prática do método de sintonia de controladores PID utilizando o método do relé com histerese**. 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

RIVERA, D. E.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. **Internal model control: PID controller design**. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, v. 25, n. 1, p. 252–265, 1986.

SHAMSUZZOHA, M.; SKOGESTAD, S. **The setpoint overshoot method: a simple and fast closed-loop approach for PID tuning**. Journal of Process Control, v. 20, n. 10, p. 1220–1234, 2010.

SILVA, Eduardo Henrique Fontes da. **Simulação de processo de controle de nível com PID utilizando Factory I/O**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

SILVA, Fábio Caetano da. **Análise comparativa entre métodos de sintonia PID com preditor de Smith otimizado por meta-heurística GWO**. Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinícius Silvério Costa. 2021. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2021.

SILVA, José Nilton; BISPO, Heleno; TEIXEIRA, Herbert; BRANDÃO, Antônio. **Métodos de Auto Sintonia de Controladores para Simuladores Dinâmicos Utilizando Modelos**. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática Belo Horizonte - MG, Setembro / 2014.

SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. **Princípios e prática do controle automático do processo**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. B. **Principles and Practice of Automatic Process Control**. 2st ed., Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1997.

SOARES, Fabrício Magalhães. **Aplicação prática de métodos de sintonia de controladores PID em uma planta didática industrial**. 2018. 98 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SOUZA, Julia Ramalho Costa. **Estudo comparativo de técnicas de sintonia de controladores industriais**. 2024. 45 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2024.

VANDORE, V. **Auto-tuning control using Ziegler-Nichols**. In: 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON. 2006.

VISIOLI, Antonio. **Practical PID control**. Springer Science & Business Media, 2006.

WANG, Qing-Guo, Chang-Chieh Hang & Biao Zou (1997), '**Low-order modeling from relay feedback**', Ind. Eng. Chem. Res 36, 375–381.

# APÊNDICE A – APLICAÇÃO DO MÉTODO DO DEGRAU NO MATLAB

```
% Kennedy Dias dos Santos
% Aplicação do degrau de 0 a 45%

clc; clear;

%% ---<Conexão OPC>---
da = opcda('localhost', 'EllipseSCADA.OPCSvr.1'); % Cria a conexão OPC com
o servidor Ellipse local
connect(da); % Conecta com o servidor OPC

grupo = addgroup(da); % Adiciona um grupo de itens à conexão OPC

% Sincronizar as tags do SCADA com o grupo OPC
TagPV = additem(grupo, 'Tags.tagPV'); % Variável de processo (PV)
TagMV = additem(grupo, 'Tags.tagMVE'); % Variável manipulada (MV)
TagModo = additem(grupo, 'Tags.TagModo'); % Modo de operação do
controlador

%% ---<Parâmetros do degrau>---
MV_inicial = 0; % [V] Valor inicial do degrau
MV_final = 4.5; % [V] Valor final do degrau
Ts = 0.5; % [s] Tempo de amostragem
N = 1000; % Número total de amostras
t = 0:Ts:(N-1)*Ts; % Vetor de tempo das amostras

write(TagModo, 0); % Ativa o modo manual
write(TagMV, MV_inicial); % Aplica o valor inicial da MV
pause(10); % Aguarda 10 segundos para estabilização

write(TagMV, MV_final); % Aplica o degrau na MV

% Coleta os valores da PV durante a resposta ao degrau
PV_log = zeros(1, N); % Inicializa vetor para armazenar os dados
de PV
for k = 1:N
    read(TagPV); % Lê o valor atual de PV
    PV_log(k) = TagPV.Value; % Armazena o valor lido
    pause(Ts); % Aguarda o tempo de amostragem
end

write(TagMV, MV_inicial); % Fecha a válvula
disconnect(da); % Desconecta do servidor OPC

%% ---<Cálculo do ponto de 63,2%>---
PV0 = PV_log(1); % Valor inicial da PV
PVf = PV_log(end); % Valor final da PV
delta_PV = PVf - PV0; % Calcula a variação total da PV

PV_63 = PV0 + 0.632 * delta_PV; % Calcula o valor da PV correspondente a
63,2% da variação
idx_63 = find(PV_log > PV_63, 1); % Encontra o primeiro instante onde PV
ultrapassa 63,2%
```

```

t63 = t(idx_63); % Tempo em que atinge 63,2%

%% ---<Conversão para cm e %>---
PV_cm = PV_log * 30; % Converte PV de volts (0-10 V)
para centímetros (0-300 cm)
MV_percent = ones(1, N) * MV_final * 10; % Converte MV de volts (0-10 V)
para porcentagem (0-100%)

%% ---<Plotagem dos resultados>---
figure;
plot(t, PV_cm, 'b', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(t, MV_percent, 'm--', 'LineWidth', 1.2);

% Linha horizontal marcação valor de 63,2% da resposta
plot(t, ones(size(t)) * PV_63 * 30, 'r--'); % Linha para 63,2% da PV
text(t(end)*0.7, PV_63 * 30 + 5, '63,2%', 'Color', 'r'); % Rótulo do nível
de 63,2%

% Linha vertical marcação do tempo correspondente a 63,2%
plot([t63 t63], ylim, 'g--'); % Linha no tempo que
atinge 63,2%
text(t63, PV_cm(1) + 15, 't_{63,2%}', 'Color', 'g', 'VerticalAlignment',
'bottom'); % Rótulo indicando o tempo de 63,2%

% Rótulos e legenda do gráfico
xlabel('Tempo (s)'); % Rótulo do eixo X
ylabel('PV [cm] / MV [%]'); % Rótulo do eixo Y
title('Resposta ao Degrau'); % Título do gráfico
legend('PV [cm]', 'MV [%]', '63,2% da variação', 't_{63,2%}'); % Legenda
grid on; % grade no gráfico

```

## APÊNDICE B – APLICAÇÃO DO MÉTODO DO RELÉ NO MATLAB

```
%Kennedy Dias dos Santos
%Aplicação método do relé

clc; clear;

%% Conexão OPC
da = opcda('localhost', 'EclipseSCADA.OPCSvr.1'); % Cria a conexão OPC com o
servidor Eclipse local
connect(da); % Conecta com o servidor OPC
grupo = addgroup(da); % Adiciona um grupo de itens à conexão OPC

% Sincronizar as tags do SCADA com o grupo OPC
TagPV = additem(grupo, 'Tags.tagPV'); % Variável de processo (PV)
TagMV = additem(grupo, 'Tags.tagMVE'); % Variável manipulada (MV)
TagModo = additem(grupo, 'Tags.TagModo'); % Modo de operação do
controlador

%% Parâmetros
Tamostra = 1; % Tempo de amostragem (s)
N = 300; % Número de amostras
ref = 5; % Referência alvo (cm)

h = 2; % Amplitude do relé
h0 = 1; % Bias
u_op = 5; % Ponto de operação da válvula (MV)
eps = 0.1; % Histerese

dmax = u_op + h + h0; % Valor máximo de MV
dmin = u_op - h + h0; % Valor mínimo de MV

u = zeros(1, N); % Vetor da variável manipulada (MV)
PV = zeros(1, N); % Vetor da variável de processo (PV)
erro = zeros(1, N); % Vetor erro
trocas = []; % Armazena instantes de troca do relé

write(TagModo, 1); % Modo automático

%% Loop de Excitação
for k = 2:N
    read(TagPV); % Lê o valor atual da PV
    PV(k) = TagPV.Value; % Armazena o valor lido
    erro(k) = ref - PV(k); % Calcula o erro

    % Relé com histerese
    if erro(k) > eps
        u(k) = dmax;
    elseif erro(k) < -eps
        u(k) = dmin;
    else
        u(k) = u(k-1);
    end
end
```

```

    % Enviar para MV
    write(TagMV, u(k));

    % Detectar troca
    if u(k) ~= u(k-1)
        trocas = [trocas, k];
    end

    pause(Tamostra);
end

write(TagModo, 0); % Voltar ao modo manual

t = (0:N-1)*Tamostra;

%% Plot
figure;
subplot(2,1,1);
plot(t, PV, 'b', 'LineWidth', 1.5);
ylabel('PV (cm)'); title('Resposta do Processo');
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(t, u, 'r', 'LineWidth', 1.5);
ylabel('MV (V)'); xlabel('Tempo (s)');
title('Sinal de Controle (Relé)');
grid on;

%% Cálculos Automáticos
if length(trocas) >= 6
    Tu1 = (trocas(6) - trocas(5)) * Tamostra;
    Tu2 = (trocas(5) - trocas(4)) * Tamostra;
    Tu = Tu1 + Tu2;

    aux1 = trocas(3); aux2 = trocas(5);
    faixaPV = PV(aux1:aux2);
    Au = max(faixaPV) - ref; % Amplitude superior da PV
    Ad = ref - min(faixaPV); % Amplitude inferior da PV

    % Ganho Estático K via área
    yi = faixaPV;
    ui = u(aux1:aux2);
    ti = (0:length(yi)-1)*Tamostra;
    A1 = trapz(ti, yi); % Área da resposta
    A2 = trapz(ti, ui); % Área do sinal de entrada
    K = A1 / A2; % Ganho estático do processo
    % Cálculo de T (tau) e L (theta)
    l1 = (h + h0)*K - eps;
    l2 = (h + h0)*K - Au;
    L = log(l1 / l2);
    x1 = 2*h*K*exp(L) - (h - h0)*K + eps;
    x2 = (h + h0)*K - eps;
    tau = Tu1 / log(x1 / x2);
    theta = tau * L;

    %% Exibir resultados
    fprintf('--- Resultados do Teste de Relé ---\n');
    fprintf('Período de oscilação Tu = %.2f s\n', Tu);
    fprintf('Ganho estático K = %.4f\n', K);

```



```
fprintf('Constante de tempo T = %.2f s\n', tau);  
fprintf('Atraso L = %.2f s\n', theta);  
else  
    warning('Oscilações insuficientes para cálculo. Verifique h, h0 ou  
eps.');
```