



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ELETRICIDADE**  
**LABORATÓRIO DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE**

**GUILHERME SARAIVA BUENO**

**CONTROLE MULTIVARIÁVEL PARA SISTEMAS DE NÍVEL DE TANQUES  
BASEADO EM TEORIA DE EVENTOS DISCRETOS**

São Luís – MA

2017

GUILHERME SARAIVA BUENO

CONTROLE MULTIVARIÁVEL PARA SISTEMAS DE NÍVEL DE TANQUES  
BASEADO EM TEORIA DE EVENTOS DISCRETOS

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto

São Luís – MA

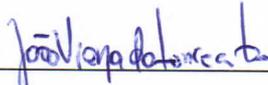
2017

GUILHERME SARAIVA BUENO

CONTROLE MULTIVARIÁVEL PARA SISTEMAS DE NÍVEL DE TANQUES  
BASEADO EM TEORIA DE EVENTOS DISCRETOS

Aprovada em 26 de julho de 2017

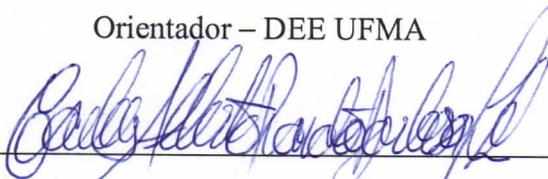
BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto

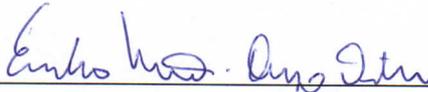
Orientador – DEE UFMA



---

Prof. Dr. Carlos Alberto Brandão Barbosa Leite

DEE - UFMA



---

Prof. Evandro Martins Araújo Filho

DMM - IFMA

São Luís – MA

2017

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Bueno, Guilherme.

CONTROLE MULTIVARIÁVEL PARA SISTEMAS DE NÍVEL DE  
TANQUES BASEADO EM TEORIA DE EVENTOS DISCRETOS / Guilherme  
Bueno. - 2017.

83 p.

Orientador(a): João Viana.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica,  
Universidade Federal do Maranhão, Laboratório de Automação  
e Controle - LAC, 2017.

1. Controlador Lógicos Programáveis. 2. Controlador  
PI. 3. SED. 4. Sistemas de Reservatórios. 5. SVC. I.  
Viana, João. II. Título.

*“O sucesso é ir de fracasso em fracasso  
sem perder entusiasmo. ”  
(Winston Churchill)*

## **AGRADECIMENTOS**

---

Agradeço aos meus pais Guilherme Bueno e Rosiclé Saraiva por toda ajuda durante esses anos, compreendendo as dificuldades e as falhas durante a graduação, sempre me apoiando.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto por ter me dado a oportunidade de desenvolver esse trabalho, que me permitiu adquirir mais experiência.

A Evandro Martins pela ajuda durante o desenvolvimento desse trabalho me auxiliando e tirando dúvidas.

Ao Prof. Jose Pinheiro pelo curso de programação e configuração de CLP, que foi de grande ajuda no desenvolvimento dos trabalhos práticos.

Aos amigos de graduação que sempre estiveram me apoiando desde o início do curso em todas as etapas, Caio Caetano, Deocarolo Guinzani, Daniel Trovão, Igor Castro, Juarez Rocha, Manoel Neto, Matheus Barbosa, Yan Pablo. Além dos amigos do LABSECI Breno Pinheiro, Bruno Coelho, Carol Meireles.

## RESUMO

---

O desenvolvimento de um sistema de controle de nível de líquido em três tanques dispostos em cascata com base em eventos discretos e variáveis contínuas é apresentado nesta monografia. O objetivo é controlar o nível de água nos dois tanques mais elevados. Para isto, desenvolveu-se um sistema de controle de velocidade das bombas, utilizando a função PID do controlador lógico programável em linguagem *Ladder*. Por meio de modulação, a rotação do motor é reduzida quando o nível de fluido se aproxima do nível máximo evitando que o motor desligue, e à medida que o nível do líquido diminui a rotação do motor aumenta. Caso o nível máximo de cada tanque seja alcançado as bombas são desligadas por segurança.

O trabalho apresenta duas abordagens. A primeira baseia-se no modelo matemático do processo para representar o comportamento do sistema de nível de tanques. A segunda na realização do projeto e de experimentos, no desenvolvimento dos dispositivos de controle de largura de pulso e sensores de nível, para aplicar no sistema as técnicas de controle assimiladas na teoria.

**Palavras-chave:** SED; SVC; Controlador PI; Sistemas de Reservatórios; Controlador Lógicos Programáveis.

## **ABSTRACT**

The development of a liquid level control system in three tanks arranged in a cascade based on discrete events and continuous variables is presented in this monograph. The objective is to control the water level in the two highest tanks. For this, a system of speed control of the pumps was developed, using the PID function of the programmable logic controller in Ladder language. By means of modulation, the engine speed is reduced when the fluid level approaches the maximum level preventing the engine from turning off, and as the liquid level decreases the engine speed increases. If the maximum level of each tank is reached the pumps are switched off for safety.

The paper presents two approaches. The first is based on the mathematical model of the process to represent the behavior of the tank-level system. The second in the realization of the project and experiments, in the development of pulse width control devices and level sensors, to apply in the system the control techniques assimilated in theory.

**Keywords:** Discrete Event System; Continuous Variables Systems; PI controller; Reservoir Systems; Programmable Logic Controller.

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

### Símbolos Latinos

h1	Nível do Tanque 1	cm
h2	Nível do Tanque 1	cm
B1	Bomba 1	
B2	Bomba 2	
R1	Resistencia de saída da válvula do tanque 1	s/m <sup>2</sup>
R2	Resistencia de saída da válvula do tanque 2	s/m <sup>2</sup>
q1	Vazão da bomba 1	cm <sup>3</sup>
q2	Vazão da bomba 2	cm <sup>3</sup>
q3	Vazão de saída do tanque 1	cm <sup>3</sup>
q4	Vazão de saída do tanque 2	cm <sup>3</sup>
C1	Capacitância do tanque 1	cm <sup>2</sup>
C2	Capacitância do tanque 2	cm <sup>2</sup>
v	Volume	cm <sup>3</sup>
h	Potencial de nível	cm
H	Distancia vertical do eixo do potenciômetro à superfície da água	cm
L	Comprimento da haste de madeira	cm
K	Constante de proporcionalidade determinada através da relação entre o valor do ângulo máximo do potenciômetro e o seu valor máximo medido pelo CLP	
MT1	Nível máximo do tanque 1	cm
mT1	Nível mínimo do tanque 1	cm
MT2	Nível máximo do tanque 2	cm
mT2	Nível mínimo do tanque 2	cm

### Símbolos Gregos

$\alpha$	Ângulo inicial do potenciômetro	rad
$\beta$	Ângulo formado pelo deslocamento do nível de água	rad
$\theta$	Ângulo total medido pelo potenciômetro	rad

## LISTA DE SIGLAS

---

SED	Sistema à Eventos Discretos
SVC	Sistema de Variáveis Contínuas
CLP	Controlador Lógico Programável
UCP	Unidade Central de Processamento
MIMO	Multiple-input and multiple-output
PID	Proporcional Integral Derivativo
LIT	Linear Invariante no Tempo
EDO	Equação Diferencial Ordinária
NEMA	<i>National Electrical Manufactures Association</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1 - Diagramas de blocos: sistemas de controle em malha fechada. ....	7
Figura 2.2 - Representação de Mudança de Estados. ....	11
Figura 2.3 - Sistema de Controle SED .....	12
Figura 2.4 - Sistema de Controle SVC .....	13
Figura 2.5 - Sistema distribuído e hierárquico .....	14
Figura 2.6 – Função Compute .....	18
Figura 2.7 – Função PID .....	19
Figura 2.8 - Digrama de Bloco do CLP.....	19
Figura 2.9 - Curva típica de reação de processo.....	20
Figura 2.10 - Taxa de Decaimento de 0,25.....	21
Figura 2.11 - Sistema neutralmente estável.....	22

---

Figura 3.1 – Planta do sistema de reservatórios .....	24
Figura 3.2 – Caixa com os circuitos de controle. ....	24
Figura 3.3 – Circuito controlador da velocidade de rotação.....	25
Figura 3.4 - Disposição dos sistemas de tanques .....	26
Figura 3.5 – Polos e Zeros da função G(11).....	31
Figura 3.6 – Diagrama de Bode da função G(11).....	32
Figura 3.7 – Polos e Zeros da função G(12).....	33
Figura 3.8 - Diagrama de Bode da função G(12) .....	33
Figura 3.9 - Polos e Zeros da função G(22) .....	34
Figura 3.10 - Diagrama de Bode da função G(22) .....	35
Figura 3.11 - Motobomba Pa6 GB GF 30 .....	36
Figura 3.12 - Circuito Integrado SG3525A .....	37
Figura 3.13 - Optoacoplador.....	38
Figura 3.14 - Circuito controlador da velocidade de rotação da bomba.....	39
Figura 3.15 – Variação resistência do potenciômetro com nível de água .....	40

---

Figura 4.1 - Dinâmica da Planta .....	42
Figura 4.2 - Estrutura de Controle da planta .....	43
Figura 4.3 - Resposta do tanque 1 ao degrau.....	44
Figura 4.4 - Resposta do tanque 2 ao degrau.....	44
Figura 4.5 – Simulação do tanque 1 para entrada de referência de 4 cm .....	46
Figura 4.6 - Simulação do tanque 2 para entrada de referência de 3 cm.....	46
Figura 4.7 – Resposta do tanque 1 com PI .....	47
Figura 4.8 - Resposta do tanque 2 com PI.....	48
Figura 4.9 - Resposta do sistema às perturbações no tanque 1 .....	49
Figura 4.10 - Resposta do sistema às perturbações no tanque 2 .....	50

---

Figura A.1 - Cartões de Digitais de Entrada (esquerda) e Saída (direita) .....	59
Figura A.2 – Cartões de Analógicos Entrada (esquerda) e Saída (direita).....	60
Figura A.3 - Ciclo de Processamento .....	61

---

Figura B.1 - Circuito Motor Imã Permanente .....	62
--	----

---

Figura C.1 - Potenciômetro Aberto .....	64
Figura C.2 - Aspectos construtivos do potenciômetro de carbono.....	65

---

Figura D.1 – Programa em ladder utilizado .....	66
---	----

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 - Proposta de Ziegler Nichols para taxa de decaimento de 0,25.....	21
Tabela 2 - Proposta de Ziegler-Nichols para o método de sensibilidade crítica .....	22
Tabela 3 - Testes para determinar a resistência de saída do tanque 1 .....	28
Tabela 4 - Testes para determinar a resistência de saída do tanque 2 .....	29
Tabela 5 - Classe de tensão modulo de entrada.....	57
Tabela 6 - Classe de tensão modulo de saída .....	58
Tabela 7 - Classe de Operação dos Módulos de Entrada e Saída.....	59

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação .....	3
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura da Monografia.....	4
<b>CAPÍTULO 2 - PRELIMINARES E SISTEMAS DE CONTROLE HÍBRIDO.....</b>	<b>5</b>
2.1 Estabilidade .....	5
2.2 Realimentação de Controle.....	6
2.3 Controlador Proporcional Integral Derivativo.....	7
2.3.1 Controlador Proporcional .....	8
2.3.2 Controlador Integral .....	8
2.3.3 Controlador Derivativo.....	9
2.4 Sistemas à Eventos Discretos .....	9
2.5 Sistemas de Variáveis Contínuas.....	12
2.6 Sistemas Híbridos (SVC e SED) .....	13
2.7 Função de Transferência.....	14
2.8 Espaço de Estados .....	15
2.9 Controlador Lógico Programável .....	16
2.9.1 Características Gerais .....	17
2.9.2 Linguagem Ladder.....	18
2.9.3 Arquitetura.....	19
2.10 Método de Sintonia de Ziegler–Nichols.....	20
<b>CAPÍTULO 3 - PROJETO DE SISTEMA HÍBRIDO DE NÍVEIS DE TANQUES .....</b>	<b>23</b>
3.1 Montagem dos Tanques.....	23
3.2 Descrição do Sistema de Tanques .....	25
3.3 Modelo Matemático.....	27
3.4 Polos e Zeros do Sistema.....	30
3.5 Atuadores.....	36
3.5.1 Circuito de Controle .....	37
3.6 Sensor de Nível.....	39

<b>CAPÍTULO 4 - EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS E HARDWARE.....</b>	<b>42</b>
4.1 Diagrama de Blocos do Sistema de Tanques.....	42
4.2 Resposta da Planta ao Degrau .....	43
4.3 Sintonia do Controlador PI.....	45
4.4 Resposta da Planta com Controlador PI .....	47
4.5 Resposta da Planta às Perturbações com Controlador PI .....	49
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO .....</b>	<b>51</b>
5.1 Trabalho Futuros .....	51
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>53</b>

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

---

Os sistemas de controle automático são essenciais em qualquer campo da engenharia e da ciência, são componentes importantes em sistemas de veículos espaciais, sistemas robóticos, modernos sistemas de manufatura e quaisquer operações industriais. Dentro das indústrias são encontrados de diversas formas, seja desempenhando atividades de controle de processo, regulagem de nível de líquidos em tanques ou concentrações químicas em cuba, sendo o computador digital principal ferramenta para auxiliar e aperfeiçoar esse processo. O Controle pode ser definido como a "aplicação de uma ação pré-planejada para que aquilo que se considera como objeto de controle atinja certos objetivos" (Miyagi, 1996).

A engenharia de controle baseia-se no princípio da realimentação e objetiva o controle de determinadas variáveis de um sistema. Embora esteja tradicionalmente ligada à engenharia elétrica, a engenharia de controle é interdisciplinar e encontra aplicações em engenharia química, mecânica, aeronáutica, biomédica, entre outras (Franklin, et al., 2010).

A tendência moderna dos sistemas de engenharia é aumentar sua complexidade em virtude principalmente de necessidade de realizar tarefas complexas e de alta precisão, esses sistemas podem ter entradas e saídas múltiplas e ser variante no tempo (Dorf, 2001).

Em razão da necessidade de atender as crescentes e rigorosas exigências de desempenho dos sistemas de controle, ao aumento da complexidade dos sistemas e ao acesso fácil e em larga escala aos computadores, a teoria de controle moderno, que é uma nova abordagem para a análise e o projeto de sistemas de controle complexas, tem sido desenvolvida desde 1960. Essa nova teoria tem como base o conceito de estado (Ogata, 2008).

A teoria de controle moderno contrasta com a teoria de controle convencional porque a primeira é aplicada a sistemas de entradas e saídas múltiplas, que podem ser lineares ou não lineares, enquanto a última é aplicável somente a sistemas lineares invariantes no tempo, de entrada e saída únicas. A teoria de controle moderno é, também, essencialmente uma

abordagem no domínio de tempo, enquanto a teoria de controle convencional é uma abordagem no domínio da frequência (Ogata, 2008).

Com necessidade de realizar tarefas complexas e de alta precisão, também surgiu a necessidade de controladores mais eficiente e robustos. Destacando-se o Controlador Lógico Programável (CLP) que é um tipo de computador industrial que pode ser programado para executar funções de controles (Maia, 2005), utilizado em sistemas de automação flexíveis. Permitem desenvolver e alterar facilmente a lógica para acionamento das saídas em função das entradas. Desta forma, pode-se associar diversos sinais de entrada para controlar diversas cargas ligadas em pontos de saída. Foi criado para atender a indústria automobilística, especificamente na *Hydronic Division* da *General Motors* em 1968, devido à grande dificuldade de mudar a lógica de controle de painéis de comando a cada mudança na linha de montagem. Tais mudanças implicaram em altos gastos de tempo e dinheiro (Petruzella, 2013).

Nos inícios dos anos 90, graças aos baixos custos das unidades centrais de processamento (UCP's) de mercado, deu-se grande ênfase ao desenvolvimento de CLP com microprocessadores comuns. Além disso, o preço destes componentes baixou muito, principalmente pela atuação da microeletrônica e otimização de hardware, o que favoreceu a popularização destes dispositivos (Nise, 2011).

A utilização de computadores no processo fornece vantagens sobre os sistemas analógicos, tais como custo reduzido, flexibilidade no resultado de alterações de projeto e a imunidade ao ruído. Sistemas modernos exigem o controle de vários processos ao mesmo tempo como, por exemplo, pressão, posição, velocidade e tensão (Nise, 2011).

A grande vantagem na utilização de CLP's, é que podemos usar o mesmo controlador para vários tipos de sistemas diferentes e para modificar sistema de controle e as rotinas por ele utilizadas, tudo que se precisa fazer é alterar as instruções dadas ao controlador, o que resulta em um sistema versátil, o qual se pode ser utilizado em sistemas com grande variação em seu comportamento (Bolton, 2015).

Arelado ao avanço tecnológico do CLP, a crescente complexidade dos processos industriais gera a necessidade de novos meios de modelá-los e controlá-los, para isso várias ferramentas matemáticas são criadas com o objetivo de estruturar o sistema de controle, entre essas técnicas pode-se citar a lógica de controle de sistemas a eventos discretos (SED) (Maia, 2005).

Um SED é um sistema dinâmico cujas variações de estado são estritamente condicionadas pela ocorrência de eventos. O conceito de evento é fundamental, caracterizado como algo sem duração e única causa possível para as mudanças de estado. Portanto, em um

SED, as mudanças de estado ocorrem estritamente num conjunto enumerável de instantes de tempo. Diz também que um SED tem sua dinâmica dirigida pela ocorrência de eventos. Essas características distinguem os SED dos sistemas que têm sua dinâmica dirigida pelo tempo e seu espaço de estado contínuo, cuja modelagem é tradicionalmente feita através das equações diferenciais e das equações à diferenças (Maia, 2005).

## 1.1 Motivação

A principal motivação para o desenvolvimento desta monografia foi a construção de uma planta para avaliar o desempenho dos métodos, técnicas e algoritmos que são apresentados nas disciplinas de automação de sistemas Industriais e de controle clássico do curso de engenharia elétrica da UFMA. Desta forma, tem-se a oportunidade de colocar em prática parte dos conhecimentos adquiridos na área de controle, implementando técnicas de controle de estabilidade em níveis de tanques à eventos discretos utilizando um controlado lógico programável, seguido da montagem da planta e do circuito de controle, além do estudo da linguagem de programação *Ladder*.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral desta monografia é apresentar o desenvolvimento de um sistema de controle que baseia-se em técnicas teóricas de controle clássico, sistema de variáveis contínuas (SVC) e controladores lógicos programáveis (CLP-SED) para controle de um sistema com múltiplas entradas e saídas (MIMO) de nível de tanques. A seguir, lista-se os objetivos específicos:

- Modelar de sistemas dinâmicos para controle de fluidos;
- Estudar do CLP, suas funcionalidades e como embarcar controle a níveis de tanques;
- Projetar um Sistema de Controle baseado nas abordagens SVC e SED
- Implementar linguagens de programação para CLP, como *ladder* e bloco estruturado, fazendo um comparativo entre eles;
- Implementar algoritmos utilizando o software MATLAB® que proporcionem as aplicações de SED;

- Desenvolver uma nova planta de estudos para uso em laboratório na disciplina prática de automação e controle.

### 1.3 Estrutura da Monografia

A monografia é constituída de capítulos e apêndices que descrevem o desenvolvimento do referido texto. Os apêndices foram elaborados para complementar e apoiar a compressão da proposta que foi desenvolvida nesta monografia.

A fundamentação teórica para entendimento/compreensão desta monografia é apresentada no Capítulo 2. Neste capítulo descreve-se como o trabalho foi desenvolvido e como funciona: sistemas de controle, estabilidade, realimentação de controle, controlador proporcional integral derivativo, eventos discretos, modelagem matemática em função de transferência e espaço de estados, controlador lógico programável e o método de sintonia.

No Capítulo 3 trata-se do projeto de sistemas de níveis, do seu diagrama de funcionamento, seu modelo matemático, os atuadores e sensor utilizado. No Capítulo 4 são apresentados os experimentos computacionais e seus resultados em malha aberta e malha fechada, além dos resultados obtidos com os testes na planta do sistema.

No Capítulo 5 apresenta-se conclusão a respeito dos experimentos realizados. Os apêndices são divididos em três, sendo o anexo A tratando da arquitetura do CLP, o anexo B de algumas características de máquinas de corrente contínua a ímãs permanente, o anexo C trata do funcionamento e característica dos potenciômetros, o anexo D apresenta o programa *ladder* utilizado e o anexo E apresenta o algoritmo implementado no MATLAB®.

# Capítulo 2

## PRELIMINARES E SISTEMAS DE CONTROLE HÍBRIDO

---

*Nesta capítulo apresenta-se o referencial teórico para o desenvolvimento da monografia, abordando-se tópicos em SED e SVC. Em SVC, aborda-se a questões da modelagem, estabilidade e sintonia de controladores proporcional integral derivativo (PID). Em SED, aborda-se, a arquitetura do controlador lógico programável e linguagem Ladder,*

### 2.1 Estabilidade

Um sistema de controle consiste de uma interconexão de componentes que formam a configuração de um sistema ou conjunto de sistemas que produzirá uma resposta desejada. A base para análise de um sistema é formada pelos fundamentos teoria dos sistemas lineares, que supõe uma relação de causa e efeito para os componentes de um sistema (Dorf, 2001).

Para o desenvolvimento de um sistema de controle, é necessário conhecer o comportamento dinâmico de seus componentes, sendo a informação mais importante do comportamento dinâmico do sistema, a estabilidade. Assim um sistema de controle linear e invariante no tempo é estável se a saída sempre retorna ao estado de equilíbrio quando o sistema é submetido a uma condição inicial, e é considerado instável quando o sistema for sujeito a uma condição inicial, a saída divergir sem limites a partir do estado de equilíbrio (Franklin, et al., 2010).

## 2.2 Realimentação de Controle

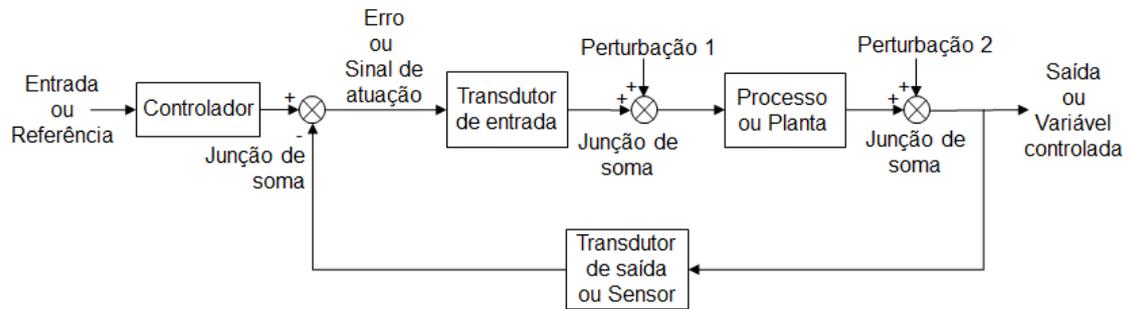
Os sistemas de controle com realimentação, também denominados sistemas de controle de malha fechada estabelecem uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência, utilizando a diferença ou sinal de erro como meio de controle realimentando o controlador, de modo a minimizar o erro e acertar a saída do sistema ao valor desejado (Ogata, 2008).

Os chamados sistemas de controle de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada. Assim, cada entrada de referência corresponde uma condição fixa de operação sendo essas operações efetuadas em um sequencia baseada em função do tempo. Dessa maneira, a precisão do sistema depende de uma calibração. Na presença de distúrbios, um sistema de controle de malha aberta não vai executar a tarefa desejada. Entretanto o sistema de controle de malha aberta é mais fácil de ser construído, pelo fato de a estabilidade ser um problema menos significativo (Franklin, et al., 2010).

Nos sistemas de controle de malha fechada o uso da realimentação faz com que a resposta do sistema seja relativamente insensível a distúrbios externos e a variações internas nos parâmetros do sistema. Dessa forma, com componentes relativamente imprecisos e baratos é possível realizar o controle de determinado sistema, ao passo que isso não é possível nos sistemas de malha aberta. Nos sistemas de controle de malha fechada a estabilidade constitui um problema importante que podem apresentar uma tendência de correção de erros além do necessário, causando oscilações de amplitude constante ou variável (Ogata, 2008).

A estrutura básica dos sistemas convencionais de controle de realimentação é ilustrada na Figura 2.1 usando uma representação de diagrama de blocos. O objetivo é fazer a variável de saída seguir o valor de referência determinado. Para isso, a variável  $u$  é manipulada no comando do controlador, sendo suscetíveis a distúrbios diversos de forma tal que influencia a variável de processo.

**Figura 2.1 - Diagramas de blocos: sistemas de controle em malha fechada.**



**Fonte: (Nise, 2011)**

- Planta: Qualquer objeto físico a ser controlado, pode ser parte de um equipamento ou um conjunto de componentes de equipamentos.
- Sensor: Dispositivo que permite receber uma resposta da ação de controle do sistema.
- Referência: Valor que é convertido em uma tensão que o processo em direção.
- Erro: Diferença entre o sinal de referência e o sinal realimentado.
- Distúrbio: Sinal que tende a afetar de maneira adversa o valor da variável de saída de um sistema. Podendo ser um distúrbio interno quando for gerado dentro do sistema e/ou distúrbio externo quando for gerado fora do sistema.
- Controlador: Componente que calcula o sinal de controle desejado. Ele vai ler o valor de referência, processar o erro e dar a saída para a planta.

### 2.3 Controlador Proporcional Integral Derivativo

As ações de controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID) geram o algoritmo de controle, mais utilizado em todo o mundo, para sistemas de controle industrial. A popularidade de controladores PID pode ser atribuída em parte ao seu bom desempenho em uma ampla gama de condições de funcionamento e em parte à sua simplicidade funcional, que permite aos engenheiros operá-los de uma forma simples e direta (National Instruments, 2017). Essa técnica de controle combina as ações de controle do termo proporcional, integral e diferencial, com um ganho ajustável para cada termo.

Definindo  $u(t)$  como a saída do controlador, a forma final do algoritmo PID é dada pela Equação (1)

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{d}{dt} e(t), \quad (1)$$

sendo  $K_p$  o ganho proporcional,  $T_i$  é o ganho integral,  $T_d$  o ganho derivado,  $e$  o erro, que é a diferença entre valor de referência e sinal realimentado, e  $t$  o tempo.

### 2.3.1 Controlador Proporcional

A ação de controle proporcional altera a saída do controlador de forma proporcional ao erro que é pela Equação (2)

$$U_p = K_p * e(t) \quad (2)$$

Dessa forma, se o erro aumentar, a ação de controle ficará maior, uma vez que mais ação de controle é necessária para corrigir grandes erros.

A configuração ajustável para controle proporcional é chamada de controlador de ganho ( $K_p$ ). Um controlador de ganho elevado irá aumentar a ação de controle proporcional para um determinado erro. Se o ganho do controlador for muito alto para determinada malha, o controle começará a oscilar tornando-se instável, caso o ganho seja definido um ganho muito baixo para o controlador, não vai responder adequadamente a perturbações. O uso de apenas o controlador proporcional possui a desvantagem do erro de estado estacionário, entretanto esse erro pode ser corrigido pelo controle integrativo (Dorf, 2001).

### 2.3.2 Controlador Integral

A ação de controle integral atua no sentido de eliminar o erro de regime da variável controlada. Enquanto houver erro, o modo de controle integral irá continuamente aumentar ou diminuir a saída do controle para reduzi-lo. Com tempo suficiente, ação integral irá conduzir a saída do controlador o suficiente para reduzir o erro para zero.

Se o tempo integrativo for muito longo, resultará em um controlador lento, um tempo integral curto resulta em uma ação integral rápida, o loop de controle oscilará e se tornará instável. Se o erro for grande, o modo integrativo aumentará e/ou diminuirá a saída do controlador rapidamente, se o erro for pequeno, as mudanças serão mais lentas. Para um determinado erro, a velocidade da ação integral é definida pelo ajuste integral do tempo do controlador ( $T_i$ ) (Franklin, et al., 2010). O termo derivativo é dado pela Equação (3)

$$U_I = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt, \quad (3)$$

a vantagem desse controlador é que ele elimina o erro de estado estacionário, mas tem uma desvantagem que é o fato de que a estabilidade do sistema é afetada. Em relação à Equação (3), é observado que o termo integral depende dos valores de passagem do erro (Dorf, 2001).

### 2.3.3 Controlador Derivativo

A terceira ação de controle em um controlador PID é derivativo, não é muito utilizado no controle de processos, pois é muito sensível à medição de ruídos, o que torna os ajustes de tentativa e erro mais difíceis por essa razão não foi utilizado na implementação de controle do sistema desenvolvido, mas é usado com frequência no controle de movimento. O modo de controle derivativo de um controlador pode fazer um loop de controle responder um pouco mais rápido do que com o controle PI sozinho (Dorf, 2001).

O modo de controle derivativo produz uma saída com base na taxa de variação do erro, produzindo mais ação de controle se o erro mudar a um ritmo mais rápido, se não houver alteração no erro, a ação derivativa é zero. O modo derivativo tem uma configuração ajustável chamado Tempo Derivativo ( $T_d$ ). Quanto maior o ajuste de tempo derivativo, mais ação derivativa é produzida. Um ajuste de tempo derivativo de zero desativa efetivamente este modo. Se o tempo derivativo for definido muito longo, ocorrerão oscilações e o loop de controle será instável (Dorf, 2001). O termo derivativo é dado pela Equação (4)

$$U_D = T_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (4)$$

## 2.4 Sistemas à Eventos Discretos

Tradicionalmente, o controle SED (Sistemas a Eventos Discretos) foi desenvolvido em função do controle sequencial, as plantas de cada instalação funcionavam por meio de circuitos baseados em reles, o que permitia uma análise da correspondência entre o comportamento do circuito e as operações dos dispositivos. Entretanto, resultava em uma dificuldade na identificação de falhas e na evolução dos procedimentos de controle. Como a estrutura de

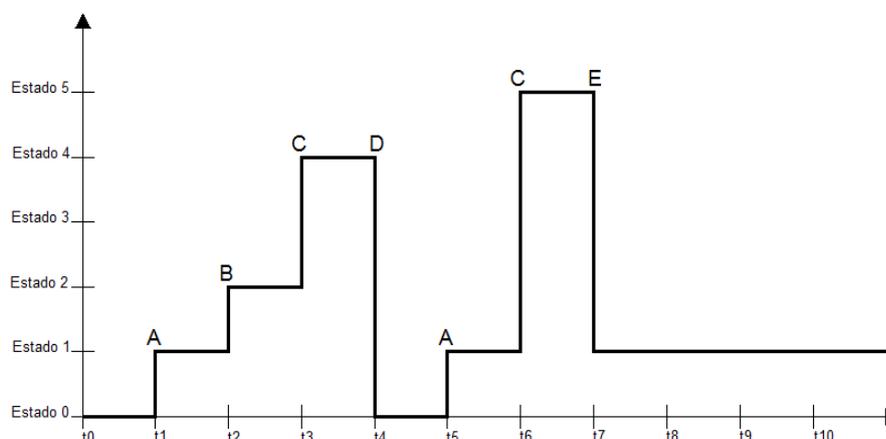
controle era diferente para cada processo seu projeto e construção eram específicos para cada operação (Miyagi, 1996).

Até a década de 40, o sistema de controle de SED era dividido em três funções: operador, dispositivo de controle e objeto de controle. Entretanto, a partir da década de 50, com a introdução do conceito de monitoração e controle remoto, o sistema de controle de SED foi modificado para as funções: operador, dispositivo de monitoração, dispositivo de controle, dispositivo de atuação, objeto de controle. (Miyagi, 1996).

No final da década de 60, os circuitos integrados permitiram o desenvolvimento de minicomputadores, que foram logo utilizados para o controle on-line de processos industriais. O controle programável, é baseado na execução de um algoritmo que fica armazenado numa memória interna do controlador que define os processos, qualquer alteração dos procedimentos pode ser realizada muito facilmente, mesmo os processos específicos, independem da estrutura de hardware. A partir disso a tecnologia de software ficou cada vez mais importante como base para uma efetiva aplicação dos controladores e envolve temas, tais como: linguagens de programação específicas para o controle de SED e facilmente utilizáveis pelos usuários; análise da interação entre o controlador e o objeto de controle; formas de representação apropriadas para a análise; teste do funcionamento da instalação com os controladores; metodologias para o projeto de sistemas que permitam a identificação fácil de erros e falhas (Miyagi, 1996).

Eventos discretos podem ser considerados como os resultados das ações que ocorrem no sistema que podem ser intencionais (pressionar um botão, abrir uma porta), de ocorrência espontânea controlada (falha na rede de comunicação, sub-tensão elétrica na rede de distribuição) ou com a verificação de uma condição (termino de uma atividade, o fim de uma temporização, temperatura fora da faixa), os eventos restringem-se ao início e o termino de uma operação, mas não sua execução. A ocorrência de um evento causa, em geral, uma mudança interna no sistema, a qual pode ou não se manifestar a um observador externo, essas mudanças se caracterizam por serem abruptas, sendo que a simples passagem do tempo não é suficiente para garantir que o estado do sistema se modifique, assim um sistema só mudará de estado quando ocorrer um evento, se não ocorrer nenhum evento, o sistema permanecerá no mesmo estado (Montgomery, 2004).

A forma que um sistema SED evolui no tempo pode ser representada pela trajetória percorrida no seu espaço de estados, conforme ilustrado na Figura 2.2.

**Figura 2.2 - Representação de Mudança de Estados.**

**Fonte: Autor**

Ao analisar a representação de um sistema SED verifica-se que um mesmo evento pode resultar em efeitos diferentes, dependendo do estado em que ocorre. Quando o sistema está no estado 1 e ocorre o evento C o é modificado para o estado 5, já quando ocorre no estado 2 o é modificado para o estado 4. A trajetória pode continuar indefinidamente como mostrado após a ocorrência do evento E mudando de estado apenas quando ocorrer um evento (Montgomery, 2004).

Dentre os estados representando destaca-se o estado inicial, representado pelo estado 0, este é o estado em que o sistema se encontra antes de ocorrer o primeiro evento no caso o evento A. Em geral é possível forçar um sistema a voltar a esse estado inicial, antes de iniciar sua utilização para um determinado fim, processo denominado de reinicialização, que é representado pelo evento D. O número de estados pode ser ilimitado, embora a classe de sistemas com um número finito de estados seja um caso particular importante (Montgomery, 2004).

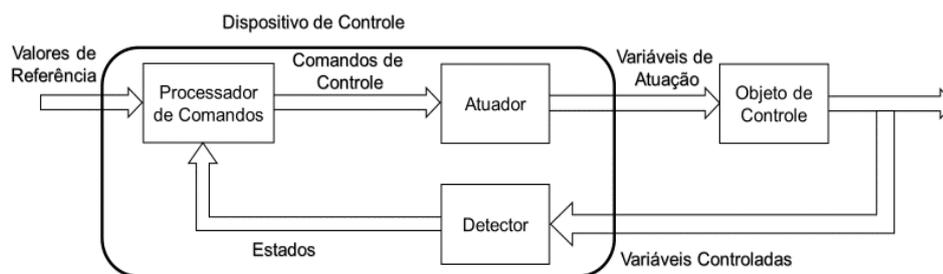
A evolução dos passos de um processo de controle SED pode ser caracterizada pelo assincronismo e pelo paralelismo. Quando dependem exclusivamente da satisfação das condições de evolução são considerados processos de natureza assíncrona, e de natureza paralela quando o sistema de controle SED é formado por vários subsistemas, cuja a evolução dos passos em cada um destes subsistemas ocorre de forma independente (Miyagi, 1996).

Dessa forma "controle de SED é o controle que, baseia-se num procedimento pré-estabelecido ou numa lógica fixa que estabelece um procedimento, executa ordenadamente cada estágio do controle", enquanto o controle de SVC (sistema de variáveis contínuas), geralmente

corresponde a igualar o valor de uma certa variável física a um valor de referência, mudando de estado a cada instante, tendo o seu comportamento descrito por uma função que relaciona o estado (variável dependente) ao tempo (variável independente). Nos sistemas de controle de SED, não existe o conceito de valor de referência, que é substituído pelo comando da tarefa, podem permanecer um tempo arbitrariamente longo em um mesmo estado. Com comando da tarefa, o estado identificado e a saída do processador de comandos são, em geral, valores discretos (Miyagi, 1996).

As funções do sistema de controle para SED são por sua vez estruturados de acordo com a Figura 2.3.

**Figura 2.3 - Sistema de Controle SED**



Fonte: (Miyagi, 1996)

## 2.5 Sistemas de Variáveis Contínuas

No controle moderno o sistema de variáveis contínuas são amplamente aplicadas para problemas difíceis de serem tratados pelas técnicas de controle tradicional, como análise da estrutura de sistemas de controle e análise do comportamento dinâmico visto que consistem em igualar o valor de uma certa variável física a um valor de referência.

Visando melhorias nos processos de produção, nas instalações, equipamentos, máquinas e sistemas de controle, novas tecnologias são introduzidas para atender essas exigências destacando-se a automatização que pode ser dividida em duas grandes classes (Miyagi, 1996):

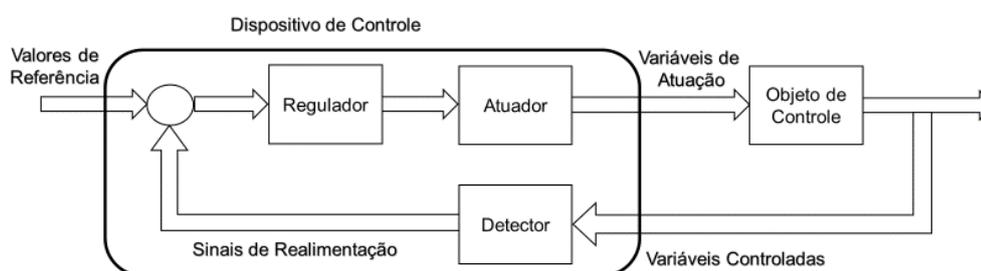
Controle quantitativo: neste caso, o conteúdo dos comandos de controle possui uma quantidade infinita de informações, isto é, informações analógicas e/ou informações contínuas

onde destaca-se o controle SVC pois é utilizada para controlar sistemas que possam ser governados através de valores mensuráveis (Miyagi, 1996).

Controle qualitativo: neste caso, o conteúdo dos comandos de controle possui um número finito (muitas vezes binário) de informações, isto é, informações discretas e/ou informações digitais (Miyagi, 1996).

As funções do sistema de controle SVC são estruturados de acordo com a Figura 2.4.

**Figura 2.4 - Sistema de Controle SVC**



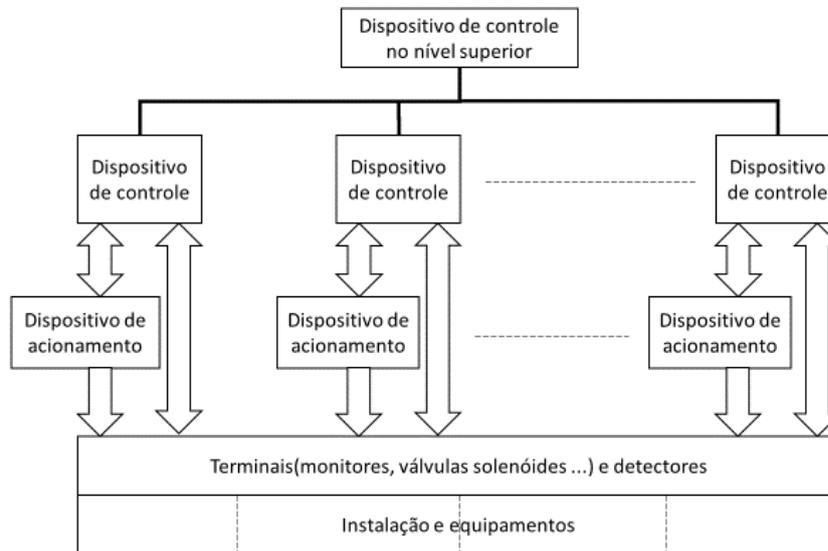
Fonte: (Miyagi, 1996)

## 2.6 Sistemas Híbridos (SVC e SED)

O conceito de SED em um sistema produtivo industrial é tão importante quanto o conceito de SVC. Entretanto, a sistematização e a base teórica de SED ainda estão no início se comparadas as de SVC (Miyagi, 1996). No controle de SVC vários conceitos e teorias foram desenvolvidas e validadas, como a função de transferência de objetos de controle com 1 entrada e 1 saída (SISO), a equação dos espaços de estados que fornece a base teórica para o tratamento indistinto de sistemas com 1 variável ou muitas variáveis (Miyagi, 1996).

O aperfeiçoamento das funções de comunicação dos CLP, permitiu sua aplicação dentro de um sistema de controle em rede onde são integradas as técnicas de SED, SVC e processamento de informações para gerenciamento industrial. Dessa forma, com o barateamento dos controladores programáveis e a evolução das técnicas de transmissões de dados, estão sendo concebidos sistemas de grande porte com funções distribuídas, com níveis de planejamento (gerenciamento) e níveis de operação (automática/manual), que são hierarquizadas para assegurar a segurança e a manutenção como mostrado na figura 2.5 (Miyagi, 1996).

Figura 2.5 - Sistema distribuído e hierárquico



Fonte: (Miyagi, 1996)

## 2.7 Função de Transferência

A função de transferência de um sistema linear invariante no tempo é definida como a razão da transformada de Laplace da saída para a transformada de Laplace da entrada, considerando nulas todas as condições iniciais (Franklin, et al., 2010).

Considere um sistema linear invariante no tempo (LIT) geral representado equação diferencial ordinária (EDO) que é dada por

$$a_n y^n + a_{n-1} y^{n-1} + \dots + a_1 \dot{y} + a_0 y = b_m u^m + b_{m-1} u^{m-1} + \dots + b_1 \dot{u} + b_0 u, \quad (5)$$

sendo  $y$  a saída do sistema  $u$  é a entrada e  $n \geq m$ .

Aplicando a transformada de Laplace a ambos os membros da Equação (5), considerando nulas todas as condições iniciais, obtém-se a seguinte função de transferência para o sistema que é dada por

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (6)$$

A função de transferência é uma expressão em termos dos parâmetros do sistema, e caracteriza o próprio sistema independentemente da entrada (função de excitação). Pela utilização deste conceito pode-se representar a dinâmica do sistema via equações algébricas em  $s$ . A maior potência de  $s$  no denominador da função de transferência é igual à ordem do termo de maior derivada na saída. Se a maior potência de  $s$  é  $n$ , o sistema é de ordem  $n$  (Franklin, et al., 2010).

Por meio da função de transferência de um sistema de controle linear invariante no tempo pode-se determinar sua estabilidade, a partir da localização de seus polos e zeros, sendo os zeros as raízes do polinômio do numerador e os polos as raízes do polinômio do denominador ou polinômio característicos. Assim um sistema linear invariante no tempo é dito estável se todas as raízes do polinômio no denominador de sua função de transferência têm parte real negativa, isto é, todas polos do sistema estão estritamente no semiplano esquerdo do plano  $s$  e é instável se possuir algum polo do sistema no semiplano direito do plano  $s$ . Os zeros do sistema podem reduzir a influência na resposta total dos polos se estiverem próximos a eles (Dorf, 2001).

## 2.8 Espaço de Estados

Com aumento da complexidade dos sistemas de engenharia, que passaram a ter entradas e saídas múltiplas, e necessidade de atender a crescentes e rigorosas exigências de desempenho dos sistemas de controle variantes no tempo e de alta precisão e ao acesso fácil e em larga escala aos computadores. Desenvolveu-se a partir da década de 1960, a teoria de controle moderno que tem como base o conceito de estado, essa teoria é essencialmente uma abordagem no domínio de tempo (Franklin, et al., 2010).

Para entender essa teoria é preciso definir estado, variáveis de estado e espaço de estados. O estado de um sistema dinâmico é definido como o menor conjunto de variáveis, tais que o conhecimento dessas variáveis em  $t = t_0$ , junto ao conhecimento da entrada para  $t > t_0$ , determina completamente o comportamento do sistema para qualquer instante  $t > t_0$  (Ogata, 2008). As variáveis de estado são definidas como aquelas que constituem o menor conjunto de variáveis capaz de determinar o estado de um sistema dinâmico, não necessitam ser grandezas fisicamente mensuráveis ou observáveis. Entretanto, é conveniente escolher, para as variáveis de estado, grandezas que sejam facilmente mensuráveis, se isso for possível, porque as leis do

controle ótimo requerem a realimentação de todas as variáveis de estado com ponderação adequada (Dorf, 2001).

O espaço de estados é definido o espaço n-dimensional, cujos eixos coordenados são formados pelos eixos de  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , onde  $x_1, x_2, \dots, x_n$  são as variáveis de estado, é denominado espaço de estados. Qualquer estado pode ser representado por um ponto no espaço de estados (Ogata, 2008).

A análise no espaço de estados envolve três tipos de variáveis que estão presentes na modelagem de sistemas dinâmicos: variáveis de entrada, variáveis de saída e variáveis de estado (Ogata, 2008).

O número de variáveis de estado que definem completamente a dinâmica de um sistema é igual ao número de integradores existentes no sistema (Ogata, 2008). Para um sistema de equações linearizadas em torno de um ponto de operação. Consequentemente, as equações de estado e de saída linearizadas são dadas por

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) + D(t)u(t)\end{aligned}\tag{7}$$

Sendo  $A(t)$  a matriz de estado.,  $B(t)$  é a matriz de entrada,  $C(t)$  e a matriz de saída e  $D(t)$ , de matriz de transmissão direta.

Se o sistema for invariante no tempo as equações na forma padrão são dadas por

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\tag{8}$$

## 2.9 Controlador Lógico Programável

Em 1978 a *National Electrical Manufactures Association* (NEMA) determinou a seguinte definição para CLP, denominada NEMA Standard ICS3-1978:

Um equipamento de lógica digital, operando eletronicamente que usa memória programável para armazenamento interno das instruções de implementação específica, tais como: lógica sequencial, temporização, contagem e operações aritméticas, para controle de

máquinas e processos industriais com vários modelos de módulos de entradas e saídas digitais e analógicas em máquinas ou processos.

Com o desenvolvimento de minicomputadores, por meio de circuitos integrados no final da década de 1960, pode-se realizar o controle on-line de processos industriais. Dessa forma em 1969, surgiram os primeiros controladores baseados numa especificação da General Motors que são listadas:

- Deve ser fácil de programado;
- Deve ser de fácil manutenção com conceito plug-in;
- Alta confiabilidade;
- Dimensões menores que painéis de relés, para redução de custo;
- Deve ter capacidade de envio de dados para processamento centralizado;
- Preço competitivo em relação aos atuais dispositivos a relés e/ou eletrônicos;
- Deve ter capacidade de receber sinais de entrada de 115V CA;
- Deve ter capacidade de enviar sinais de saída de 115V CA;
- Possibilidade de expansão em módulos;
- Mínimo de 4000 palavras na memória.

A partir da metade da década de 1970, os controladores multiplicaram suas funções quando passaram a ter microprocessadores, sendo então denominados Controladores Programáveis (CLP's). Na década de 1980, as funções de comunicação dos CLP's foram aperfeiçoadas, sendo então utilizados em rede de comunicação de dados.

### **2.9.1 Características Gerais**

O controlador lógico programável tem várias características, onde destacam-se as seguintes (Couto, 2001):

- Linguagens de programação de alto nível caracterizando um bastante amigável com relação ao operador.
- Simplificação nos quadros e painéis elétricos.
- Confiabilidade operacional, as alterações podem ser realizadas através do programa aplicativo, necessitando de muito pouca ou de nenhuma alteração da fiação elétrica.
- Funções avançadas, realizar grande variedade de tarefas de controle através de funções matemáticas, controle da qualidade, informações para relatórios.

- Comunicação em rede.

### 2.9.2 Linguagem Ladder

Uma das primeiras técnicas de programação da ação dos CLP foi chamada linguagem “de relés” ou *Ladder*, devido a facilidade do desenho e da inspeção de circuitos, e pela longa experiência e tradição dos engenheiros projetistas dos quadros de comando elétrico. Essa técnica mantém as regras e símbolos tradicionais no projeto de quadros de comando.

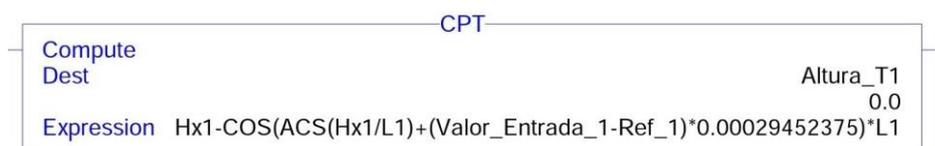
O diagrama elétrico parte duas linhas verticais, que alguns também chamam de barras de alimentação. Cada representação de causalidade é feita por uma linha horizontal. Esta linha, por sua vez, é formada por, pelo menos, um elemento controlado (bobina de relés) e um conjunto de condições para o controle desse elemento (rede de contatos).

O diagrama *Ladder* é apenas uma representação lógica, trabalhando somente com símbolos, não considerando a tensão envolvida nas barras de alimentação e nem a intensidade da corrente pelo circuito. Os contatos e outros dispositivos, no diagrama estão em cada momento abertos ou fechados e as bobinas, por consequência, ficam desenergizadas ou energizadas.

O CLP examina a continuidade da linha, verifica se todas as instruções de entrada são verdadeiras. Trata-se de uma continuidade lógica. Cada linha *Ladder* permite programar desde funções binárias até funções digitais complexas (Couto, 2001).

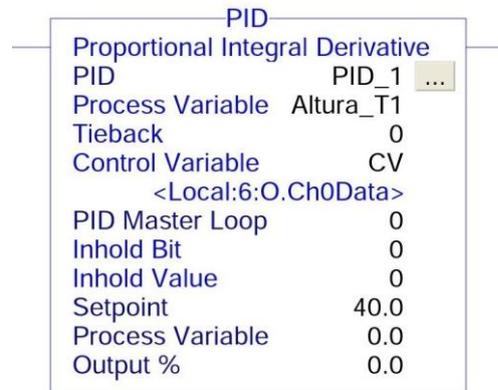
As principais funções utilizadas nessa monografia foram as Computer mostrada na Figura 2.6 e a PID mostrada na Figura 2.7

**Figura 2.6 – Função *Compute***



**Fonte: Autor**

**Figura 2.7 – Função PID**

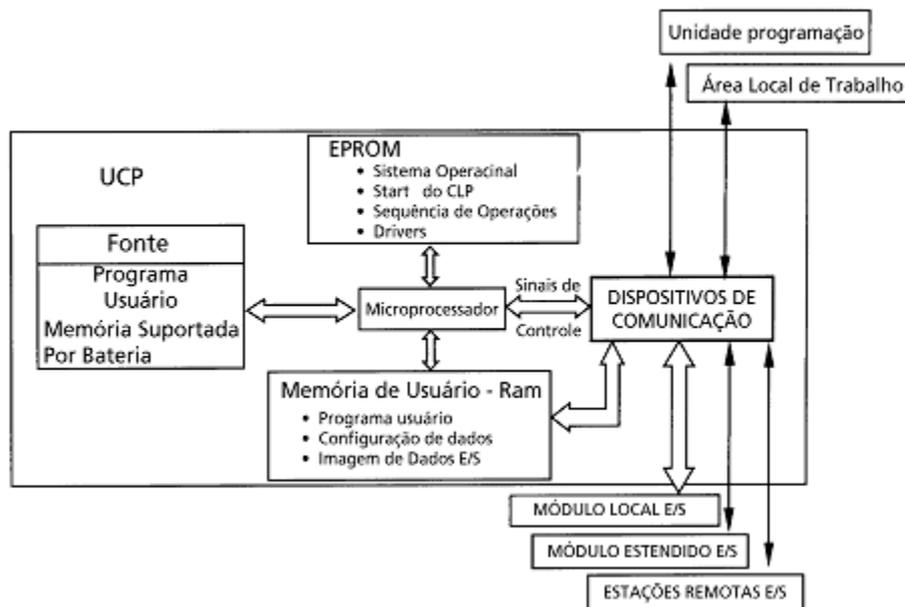


Fonte: Autor

### 2.9.3 Arquitetura

A fonte de alimentação, unidade central de processamento (UCP) memórias dos tipos fixo e volátil, dispositivos de entrada e saída e Terminal de programação são os principais componentes da arquitetura de um CLP, conforme apresentado na Figura 2.8. Maiores referências a respeito da arquitetura são encontradas no anexo I

**Figura 2.8 - Diagrama de Bloco do CLP**

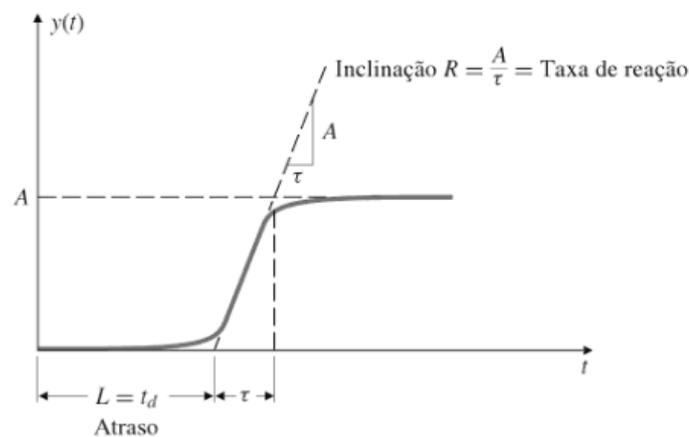


Fonte: (Couto, 2001)

## 2.10 Método de Sintonia de Ziegler–Nichols

Quando o controlador PID foi desenvolvido para melhorar a produtividade da planta industriais, os engenheiros de controle procuraram maneiras de sistematizar a sintonia do controlador (Franklin, et al., 2010) J. G. Ziegler e N. B. Nichols (1942-43), observaram que um grande número de sistemas de controle, que não possuem integradores ou polos complexos conjugados dominantes apresentam uma curva de reação em forma de S como resposta ao degrau, como mostrado na Figura 2.9.

**Figura 2.9 - Curva típica de reação de processo**



**Fonte: (Franklin, et al., 2010)**

Essa curva pode ser aproximada pela resposta ao degrau de uma planta com função de transferência que é dada por

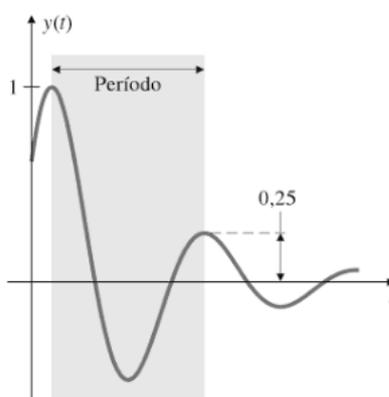
$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ae^{-st_d}}{\tau s + 1} \quad (9)$$

que representa um sistema de primeira ordem com retardo no tempo ou "atraso de transporte" de  $t_d$  s. As constantes na Equação (9) podem ser determinadas a partir da resposta do processo ao degrau unitário se uma reta tangente é traçada no ponto de inflexão da curva de reação do processo, então a inclinação da reta será  $R = \frac{A}{\tau}$ , a interseção da reta tangente com o eixo do tempo identifica o retardo no tempo  $L = t_d$  o valor final da curva fornece o valor de  $A$ .

Dessa forma Ziegler e Nichols propuseram dois métodos de sintonia para o controlador PID (Franklin, et al., 2010).

No primeiro método de Ziegler e Nichols, aplica-se o degrau ao sistema. Desta resposta ao degrau, obtém parâmetros, tais como: tempo de atraso e constante de tempo, que são utilizados para determinar os ganhos controlador PID, como resultado da aplicação deste método, tem-se uma resposta com taxa de decaimento de aproximadamente 0,25 ao degrau em malha fechada, como mostrado na Figura 2.10.

**Figura 2.10 - Taxa de Decaimento de 0,25**



**Fonte: (Franklin, et al., 2010)**

Os parâmetros do regulador sugeridos por Ziegler e Nichols são definidos para o controlador (Franklin, et al., 2010).

$$D_C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right), \quad (10)$$

sendo os valores de  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ , escolhido de acordo com formula que aparece na Tabela 1.

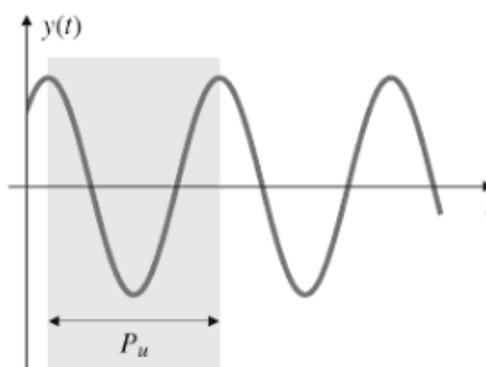
**Tabela 1 - Proposta de Ziegler Nichols para taxa de decaimento de 0,25**

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
<b>PID</b>	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

O segundo método (método sensibilidade crítica) facilita os ajustes nos parâmetros do controlador. Estes ajustes são baseados na amplitude e a frequência do sistema no limite da estabilidade, e não na resposta ao degrau.

Esse método consiste em aumentar o ganho proporcional até que o sistema se torne marginalmente estável com oscilações persistentes, as quais podem ter amplitudes limitadas pela saturação do atuador, este ganho proporcional é definido como  $K_u$  (chamado de ganho crítico), e o período de oscilação é  $P_u$  (chamado de período crítico).  $P_u$  deve ser medido quando a amplitude das oscilações é a menor possível como mostrado nas Figura 2.11. Então, os valores de  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  são escolhidos de acordo com a Tabela 2 (Franklin, et al., 2010).

**Figura 2.11 - Sistema neutralmente estável**



Fonte: (Franklin, et al., 2010).

Então, os valores de  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  são escolhidos de acordo com a Tabela 2.

**Tabela 2 - Proposta de Ziegler-Nichols para o método de sensibilidade crítica**

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$0,5K_{cr}$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2} P_{cr}$	0
<b>PID</b>	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

# Capítulo 3

## PROJETO DE SISTEMA HÍBRIDO DE NÍVEIS DE TANQUES

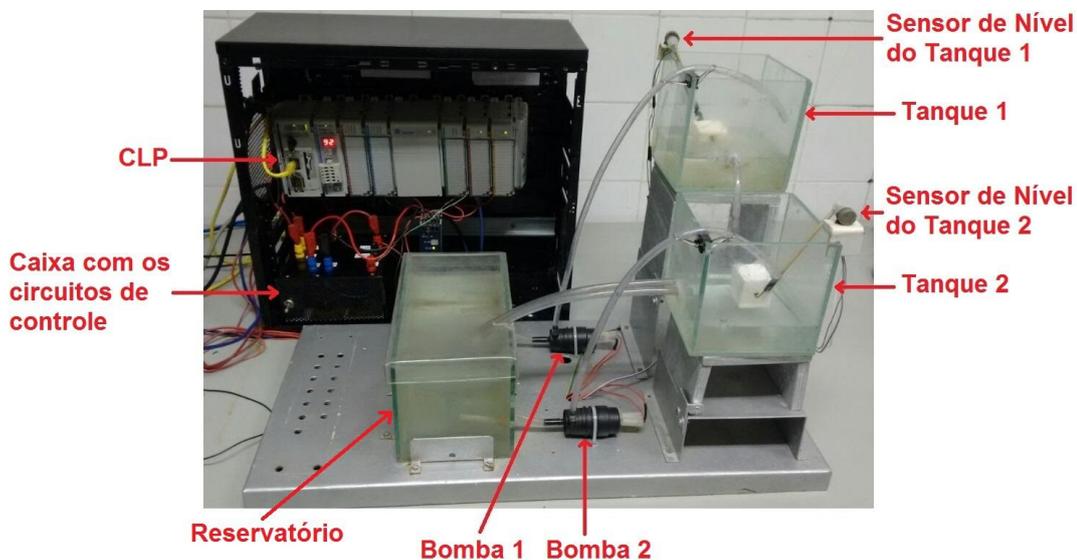
---

*Este capítulo contém a descrição do sistema de tanques em cascata, do sensor utilizado bem como a explicação de seu funcionamento, além dos tipos de atuadores utilizados e funcionamento. A última seção deste capítulo trata-se sobre a modelagem matemática do sistema de nível de líquidos, trazendo o desenvolvimento para linearizar o sistema em torno do ponto de operação e fazendo a representação do sistema no Espaço de Estados.*

### 3.1 Montagem dos Tanques

A planta desenvolvida para a representação do sistema de nível baseia-se no sistema de tanques em casca. Esse kit consiste basicamente em três tanques, sendo o maior, o tanque reservatório com dimensões de 12 x 12 x 24 cm e os tanques 1 e 2 com dimensões de 12 x 12 x 12. O sistema também possui um circuito de controle de velocidade para cada bomba, localizados dentro da caixa de controle. Os sensores de níveis consistem de potenciômetros adaptados. A Figura 3.1 mostra uma foto do sistema utilizado.

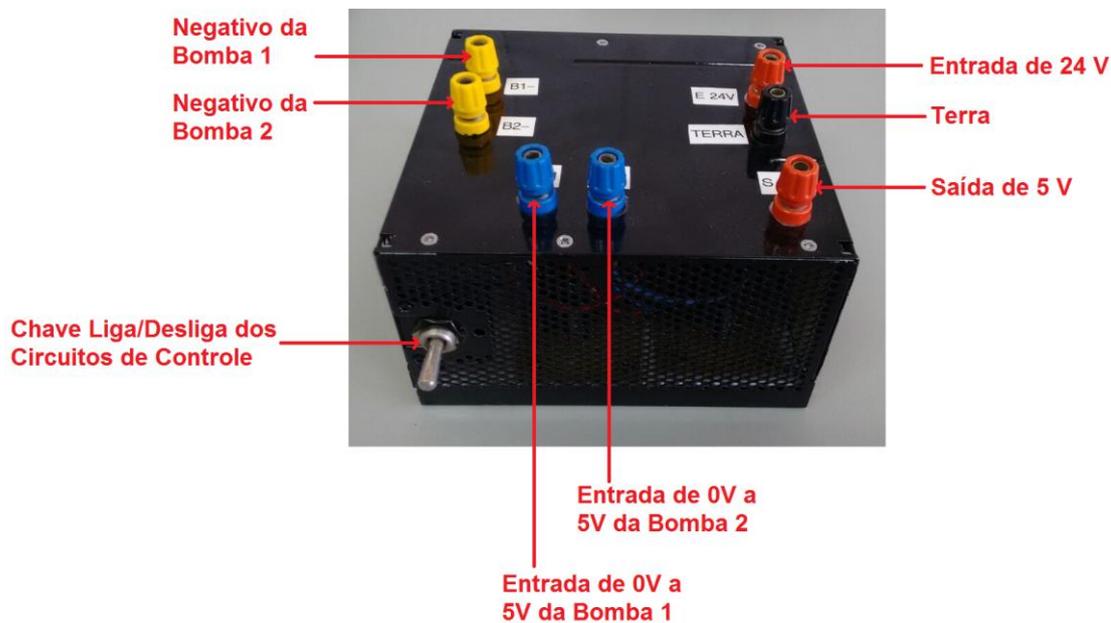
Figura 3.1 – Planta do sistema de reservatórios



Fonte: Autor

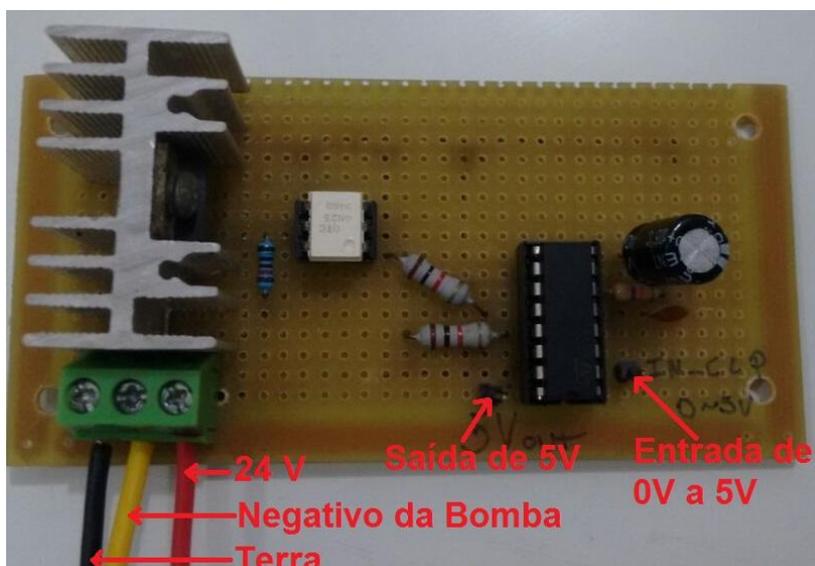
A caixa com os circuitos de controle, onde estão localizados os circuitos controladores da velocidade de rotação das bombas é mostrada na Figura 3.2, e na Figura 3.3 é mostrado o circuito de controle de uma das bombas, os circuitos para as bombas são idênticos.

Figura 3.2 – Caixa com os circuitos de controle.



Fonte: Autor

Figura 3.3 – Circuito controlador da velocidade de rotação.



Fonte: Autor

O tanque de reservatório possui duas perfurações para conectar as mangueiras ligadas aos atuadores 1 e 2 do sistema, cada um desses atuadores por sua vez são conectados a mangueiras que os ligam aos tanques 1 e 2 respectivamente. O tanque 1 possui apenas uma perfuração onde é conectada a mangueira que o liga ao tanque 2. O tanque 2 possui duas perfurações de modo a produzir uma resistência menor que no tanque 1, a essas duas perfurações são conectadas as mangueiras que o liga ao tanque de reservatório. Os sensores de altura são instalados em cada um dos tanques. Detalhes sobre as escolhas dos sensores e atuadores serão dadas nas próximas seções.

As bombas que serão utilizadas para transferir água de um tanque a outro são dispositivos elétricos de corrente contínua de 24 Volts, o que tornará possível controlar o fluxo de água que elas retirarão do reservatório e lançarão para os tanques.

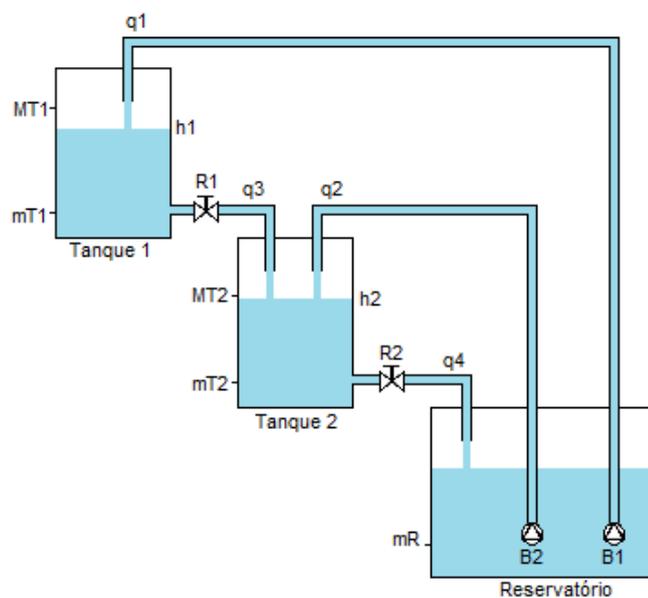
### 3.2 Descrição do Sistema de Tanques

Nesta secção é apresentado o diagrama do sistema de reservatório que é constituído de três tanques, conforme ilustrado na Figura 3.4, bem como a descrição da sua estrutura de eventos, sendo

B1 Bomba 1

B2	Bomba 2	
R1	Resistência ao fluxo de líquido do tanque 1	$s/m^2$
R2	Resistência ao fluxo de líquido do tanque 2	$s/m^2$
q1	Vazão da bomba 1	$cm^3/s$
q2	Vazão da bomba 2	$cm^3/s$
q3	Vazão de saída do tanque 1	$cm^3/s$
q4	Vazão de saída do tanque 2	$cm^3/s$
C1	Capacitância do tanque 1	144 $cm^2$
C2	Capacitância do tanque 2	144 $cm^2$

**Figura 3.4 - Disposição dos sistemas de tanques**



**Fonte: Autor**

Considere a representação dos três reservatórios de água, Figura 3.4, de um sistema de distribuição de água. O reservatório inferior representa o reservatório de água potável da empresa de distribuição, o tanque 1 é a caixa de distribuição do bairro, o tanque 2, a caixa d'água na residência do consumidor.

Após acionar a chave dos circuitos de controle, a água do reservatório pode ser bombeada para o tanque 1 que alimenta o bairro, ou para o tanque 2 que alimenta o consumidor. O reservatório é destinado a alimentar o tanque 1 do bairro, que por sua vez visa alimentar o

tanque 2 das residências. Caso o tanque 1 não consiga suprir o tanque 2 por seu nível ser insuficiente, o reservatório pode atuar para alimenta diretamente a rede do bairro, se a chave dos circuitos de controle for acionada para desliga-lo as bombas são desligadas.

A bomba 1 eleva do reservatório da distribuidora para o tanque 1, (caixa do bairro), a bomba 2 eleva do reservatório para o tanque 2 (caixa do consumidor), a válvula R1 permite a queda de água do tanque 1 para o tanque 2, ou seja, permite a caixa do bairro alimentar a caixa dos consumidores.

Os tanques 1 e 2 possuem os níveis máximo de líquido que comportam indicados por MT1, MT2, e seus níveis mínimos de operação indicados por mT1, mT2. O sistema deve ser capaz de manter os níveis de referência de líquidos estabelecidos para cada um dos reservatórios, corrigindo qualquer perturbação, caso o nível máximo de algum tanque seja atingido o sistema desliga a bomba que o alimenta.

### 3.3 Modelo Matemático

Em hidráulica, define-se vazão como a relação entre o a variação do volume pela variação do tempo. A vazão pode ser determinada a partir do escoamento de um fluido através de determinada seção transversal de um condutor (Ogata, 2008). A vazão é dada por

$$Q = \frac{dv}{dt}, \quad (11)$$

sendo  $v$  o volume ( $m^3$ ) e  $t$  é o tempo (s).

A resistência ( $R$ ) ao fluxo de líquido em uma tubulação é definida como a variação na diferença de nível (a diferença entre o nível dos líquidos nos dois reservatórios) necessária para causa a variação unitária na taxa de escoamento (Ogata, 2008), isto é

$$R = \frac{dh}{dQ} \quad (12)$$

sendo  $dh$  a variação no potencial de nível (m) e  $dQ$  a variação da vazão em volume ( $m^3$ ).

Para determinar a resistência ao fluxo de água na saída de cada um dos tanques, foram realizados testes que consistiam em enche-los até um nível máximo (4 cm) pré-estabelecido e depois esvazia-los até um nível mínimo (1 cm) verificando quanto tempo é necessário para

esvaziar o tanque, esses testes foram repetidos 10 vezes em cada um dos tanques. Uma vez encontrado o tempo necessário para esvaziar e tendo conhecimento do volume pôde-se determinar a vazão do tanque utilizando a Equação (11). Em seguida com valor da vazão e da altura que o nível de água variava pode-se determinar a resistência de saída ao fluxo de água utilizando a Equação (12), com os valores de resistência de cada um dos testes foi determinada uma média para o valor da resistência de cada tanque.

Os valores de resistências determinados em cada teste para o tanque 1 são encontrados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Testes para determinar a resistência de saída do tanque 1**

Teste	Tempo (s)	Altura (cm)	Vazão (cm <sup>3</sup> )	Resistência (s/m <sup>2</sup> )
1	14,990	3,002975	28,847789	0,104097
2	14,880	2,995673	28,990388	0,103333
3	15,080	2,989159	28,543690	0,104722
4	14,890	3,018246	29,189220	0,103403
5	14,990	2,999079	28,810367	0,104097
6	15,000	3,026723	29,056538	0,104167
7	14,980	2,982565	28,670848	0,104028
8	15,100	3,021158	28,811041	0,104861
9	14,990	2,958609	28,421594	0,104097
10	15,000	3,009748	28,893582	0,104167

Assim o valor médio da resistência de saída do tanque 1 é  $R1 = 0,104097222$ .

Os valores de resistências determinados em cada teste para o tanque 2 são encontrados na Tabela 4.

**Tabela 4 - Testes para determinar a resistência de saída do tanque 2**

Teste	Tempo (s)	Altura (cm)	Vazão (cm <sup>3</sup> )	Resistência (s/m <sup>2</sup> )
1	11,890	2,989160	36,201772	0,082569
2	11,790	3,026344	36,962974	0,081875
3	11,780	2,998102	36,649122	0,081806
4	11,780	3,021875	36,939728	0,081806
5	11,790	3,026344	36,962974	0,081875
6	11,670	3,011122	37,155234	0,081042
7	11,660	2,982434	36,832804	0,080972
8	11,770	2,995432	36,647600	0,081736
9	11,670	2,995432	36,961632	0,081042
10	11,780	3,011122	36,808284	0,081806

Assim o valor médio da resistência de saída do tanque 2 é  $R_2 = 0,081652778$

A capacitância (C) de um reservatório é definida como a variação na quantidade de líquido armazenado necessária para causar uma mudança unitária no potencial (altura). (O potencial é a grandeza que indica o nível de energia do sistema) (Ogata, 2008).

$$C = \frac{dV}{dh}, \quad (13)$$

sendo dV é variação na quantidade de líquido armazenado e dh a variação do potencial do nível.

A EDO que representa a dinâmica do tanque 1 é dada por

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} = q_1 - q_3, \quad (14)$$

a partir Figura 3.4 temo que  $q_3 = \frac{h_1}{R_1}$  assim,

$$C_1 \dot{h}_1 = q_1 - \frac{h_1}{R_1}, \quad (15)$$

$$\dot{h}_1 = \frac{q_1}{C_1} - \frac{h_1}{R_1 C_1} \quad (16)$$

A EDO que representa a dinâmica do tanque 2 é dada por

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = q_3 + q_1 - q_4, \quad (17)$$

a partir Figura 3.4 temo que  $q_3 = \frac{h_1}{R_1}$  e  $q_4 = \frac{h_2}{R_2}$  assim,

$$C_2 \dot{h}_2 = \frac{h_1}{R_1} + q_1 - \frac{h_2}{R_2}, \quad (18)$$

$$\dot{h}_2 = \frac{h_1}{R_1 C_2} + \frac{q_1}{C_2} - \frac{h_2}{R_2 C_2}, \quad (19)$$

O modelo matemático em espaço de estados é dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 \\ \frac{1}{R_1 C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_1} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

Substituindo os parâmetros da Equação (20) tem-se que

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.066711 & 0 \\ 0.066711 & -0.08504 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.00694 & 0 \\ 0 & 0.00694 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

### 3.4 Polos e Zeros do Sistema

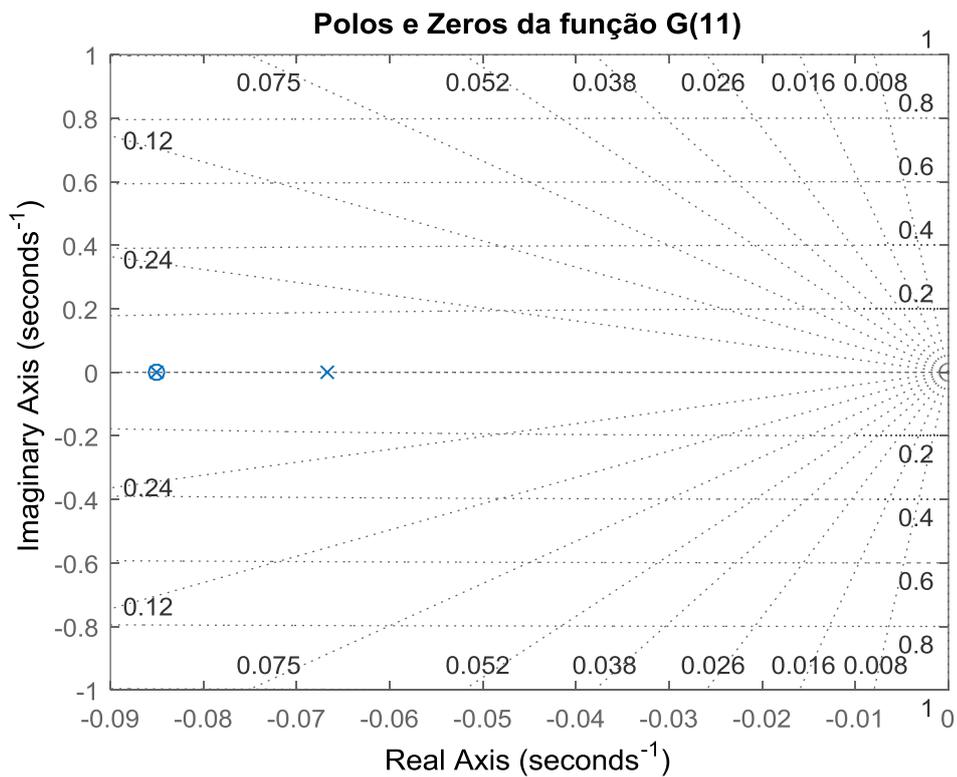
Para representar o sistema de níveis no modelo de função de transferência, foi utilizado o software MATLAB® para fazer a transformação de modelos matemáticos, assim a matriz de funções de transferência  $G(s)$  que representa o sistema é

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}, \tag{23}$$

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.006944s + 0.0005906}{s^2 + 0.1518s + 0.005674} & \frac{0.0004633}{s^2 + 0.1518s + 0.005674} \\ 0 & \frac{0.006944s + 0.0004633}{s^2 + 0.1518s + 0.005674} \end{bmatrix}, \tag{24}$$

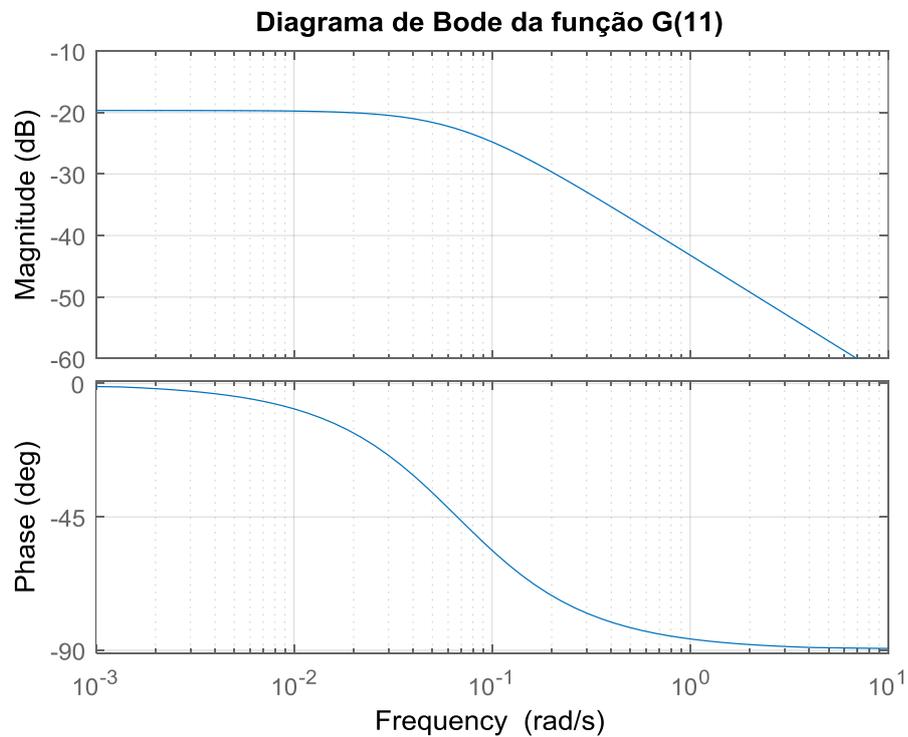
A localização dos polos e zeros da função G(11) é mostrado na Figura 3.5 e seu diagrama de Bode na Figura 3.6.

Figura 3.5 – Polos e Zeros da função G(11)



Fonte: Autor

Figura 3.6 – Diagrama de Bode da função G(11)

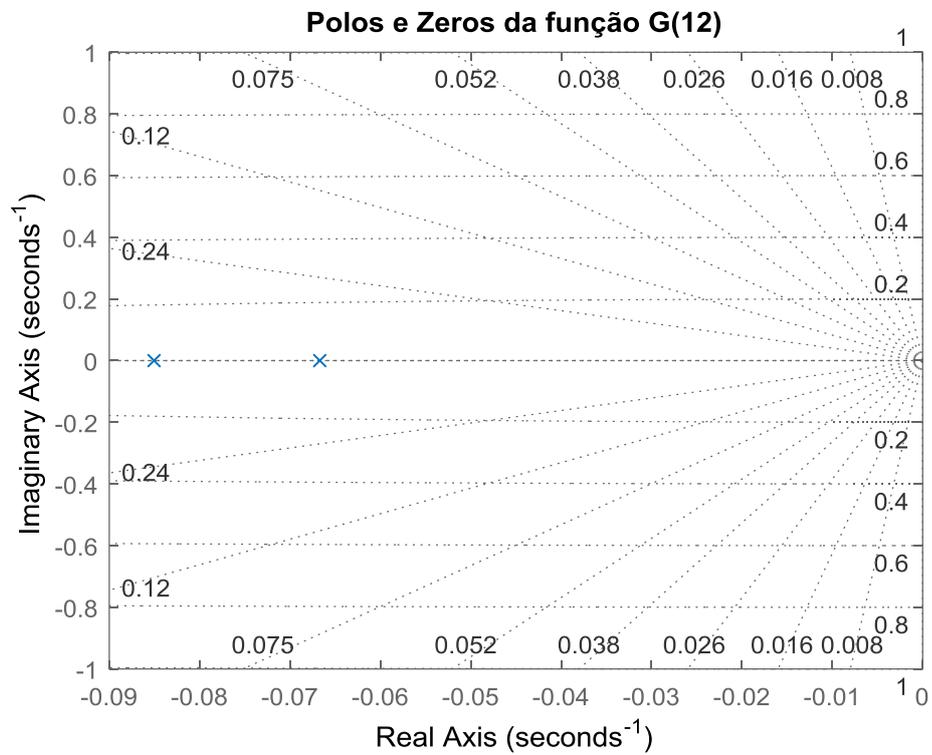


**Fonte: Autor**

Observando as Figuras 3.5 e 3.6 verifica-se que a função G(11) possui dois polos reais negativos localizados em -0.0850 e -0.0667 e um zero localizado em -0.0850. Como um polo cancela um zero, o sistema pode ser simplificado para um de primeira ordem. Essa função possui uma margem de ganho e de fase que tendem ao infinito.

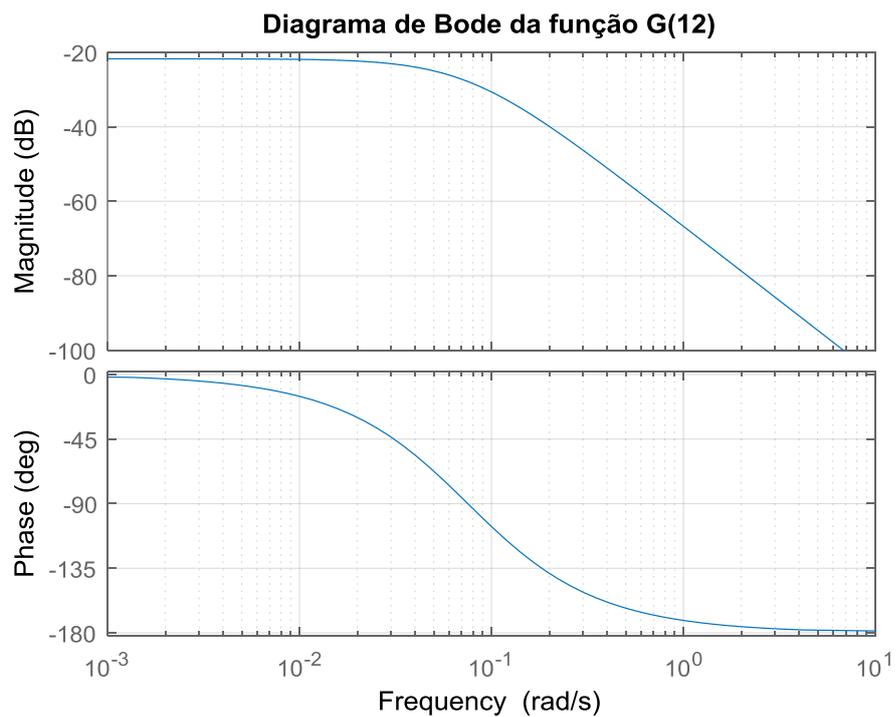
A localização dos polos e zeros da função G(12) é mostrado na Figura 3.7 e seu diagrama de Bode na Figura 3.8.

Figura 3.7 – Polos e Zeros da função G(12)



Fonte: Autor

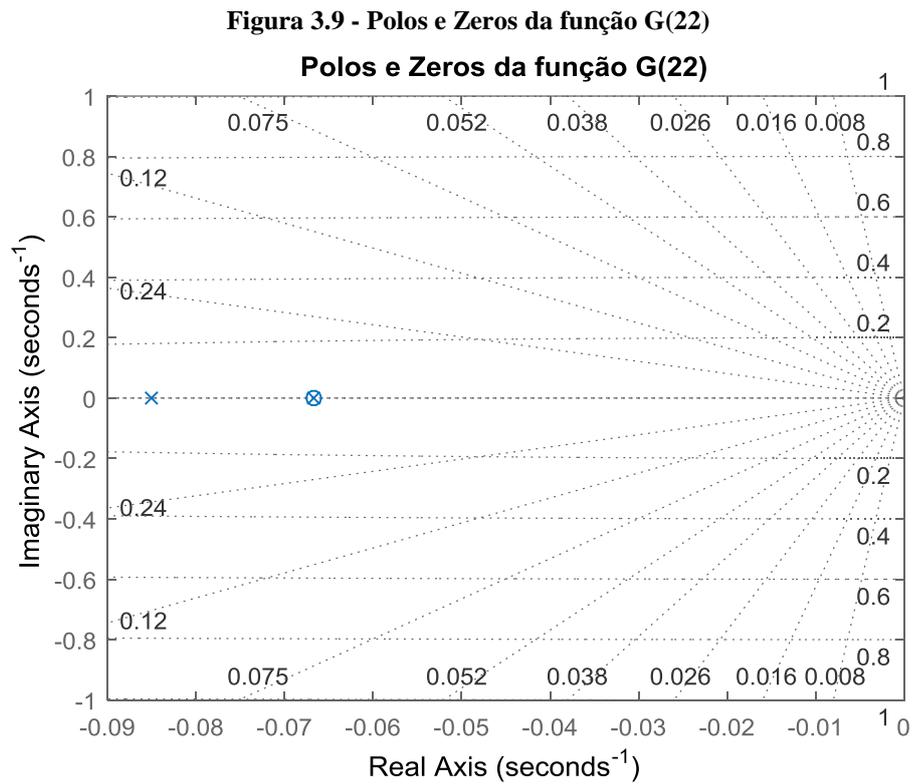
Figura 3.8 - Diagrama de Bode da função G(12)



Fonte: Autor

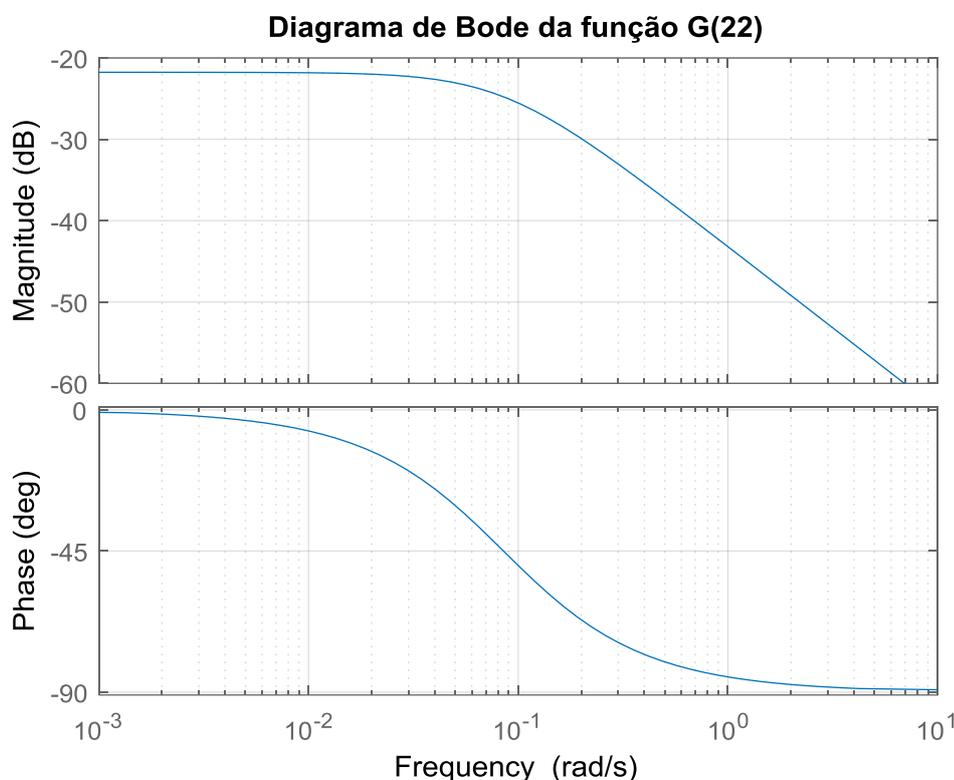
Observando as Figuras 3.7 e 3.8 verifica-se que a função  $G(12)$  possui dois polos reais negativos localizados em  $-0.0850$  e  $-0.0667$ . Essa função possui uma margem de ganho e de fase que tendem ao infinito.

A localização dos polos e zeros da função  $G(22)$  é mostrado na Figura 3.9 e seu diagrama de Bode na Figura 3.10.



**Fonte: Autor**

Figura 3.10 - Diagrama de Bode da função G(22)



Fonte: Autor

Observando as Figuras 3.9 e 3.10 verifica-se que a função G(22) possui dois polos reais negativos localizados em  $-0.0850$  e  $-0.0667$  e um zero localizado em  $-0.0667$ . Como um polo cancela um zero, o sistema pode ser simplificado para um de primeira ordem. Essa função possui uma margem de ganho e de fase que tendem ao infinito.

Todas as funções de transferência do sistema MIMO têm o mesmo denominador  $s^2 + 0.1518s + 0.005674$ , cujas raízes definem os polos do sistema, em  $-0.0850$  e  $-0.0667$ .

Como os polos do sistema são reais negativos, ou seja, estão localizados no semi-plano esquerda do plano  $s$ , o que torna o sistema estável. A função de transferência G11 possui um zero em  $-0.0850$  e a função G22 um zero em  $-0.0667$ , que correspondem exatamente a localização dos polos do sistema. Em geral um zero perto de um polo reduz a influência desse polo ou no caso anularia esse polo. Entretanto os zeros de cada uma das funções de transferência do sistema, não são necessariamente os zeros do sistema MIMO.

Pelo diagrama de Bode, verifica-se que o sistema tem margem de ganho e margem de fase que tendem ao infinito, ou seja, o sistema é naturalmente estável em malha aberta tendendo a se estabilizar mesmo para quaisquer valores elevados nos ganhos.

### 3.5 Atuadores

As motobombas utilizadas consistem em motores de corrente contínua Pa6 GB GF 30, como mostra a Figura 3.11, cujos polos são feitos de ímãs permanentes, com isso não precisam de um circuito de campo externo. Uma descrição do circuito interno de uma máquina de corrente contínua a ímã permanente, assim como alguma de suas características pode ser encontrado no anexo II.

**Figura 3.11 - Motobomba Pa6 GB GF 30**



**Fonte: Autor**

Para um motor de corrente contínua à ímã permanente, os métodos de controle de velocidade disponíveis são, o de controle linear de velocidade que feito pelo ajuste da tensão de armadura e/ou ajuste da resistência de armadura.

O controle linear de velocidade tem como principais desvantagens não conseguir manter a velocidade constante nas baixas rotações, pois a qualquer variação da carga resulta no circuito, perdas de potência e até oscilações. Outro problema nesse tipo de controle é que ele não consegue proporcionar uma partida suave para o motor que tende a dar "um salto" quando a tensão mínima que o tire do repouso é alcançada (Chapman, 2013).

Outro método de controle de velocidade de motores CC à ímã permanente é controle Modulação por Largura de Pulso (em inglês *Pulse Width Modulation* ou PWM) quem tender eliminar esse comportamento dos controles lineares.

A Modulação por Largura de Pulso transforma um sinal contínuo em sinais discretos que possuem frequências fixas, onde a largura desses sinais varia de acordo com o sinal de entrada do modulador. Essa técnica controla a potência entregue a carga através da variação da tensão média, sendo assim para aumentar a potência aplicada, obtendo-se maior velocidade

basta aumentar a largura do pulso, e para diminuir a velocidade consequente a potência aplicada, basta diminuir a largura do pulso, como cada pulso tem a tensão máxima nominal, o motor não sente com a inércia que ocorre quando aplicamos baixas tensões, mantendo seu torque constante (Braga, 2012).

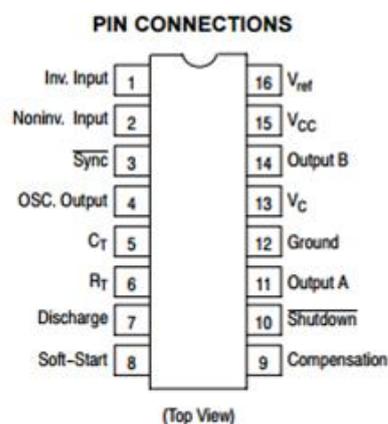
### 3.5.1 Circuito de Controle

O controle do nível dos tanques foi feito usando bombas cc de 24 V, para transferir a água de um tanque para outro, entretanto um dos grandes problemas do controle de pequenos motores de corrente contínua é manter o torque constante. A não linearidade do comportamento desses motores dificulta o uso de controles lineares, principalmente a baixas rotações onde não se consegue manter a velocidade e o torque constante, pois a variação da carga resulta em uma variação na velocidade e no torque, outro problema é não conseguir proporcionar uma partida suave para o motor que tende a dar "um salto" quando a tensão mínima que o tire do repouso é alcançada, sendo assim a solução usada foi o emprego de um controle PWM. (Braga, 2012)

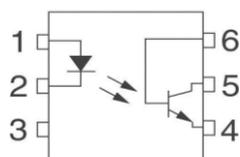
Para que a carga seja alimentada com pulsos de tensão constante e que a duração destes pulsos seja controlada, foi usada uma chave eletrônica IRF 3205, que por sua vez foi controlada por um circuito eletrônico, assim a partir desse circuito foi possível variar a média da tensão aplicada à carga.

O circuito de controle é composto pelo modulador de largura de pulso SG 3525A cuja identificação a respeito dos seus pinos é mostrada na Figura 3.12 e pelo optoacoplador 4n25 cujas suas informações são mostradas na Figura 3.13.

Figura 3.12 - Circuito Integrado SG3525A



Fonte: Datasheet ON Semiconductor

**Figura 3.13 - Optoacoplador**

**Fonte: Datasheet Toshiba adaptado**

O controle da largura de pulso ocorre a partir da variação da tensão de entrada do SG3525A, que deve variar de 0 Volt até 5.1 Volts, ao variar a tensão de entrada o valor médio da tensão de saída varia de 0 Volt a aproximadamente 24 Volts.

O optoacoplador tem o valor máximo de corrente para o anodo do LED (Pino 1) de 20 mA, a qual foi limitada através do uso de um resistor ( $R_{r1}$ ) de 1 k $\Omega$ .

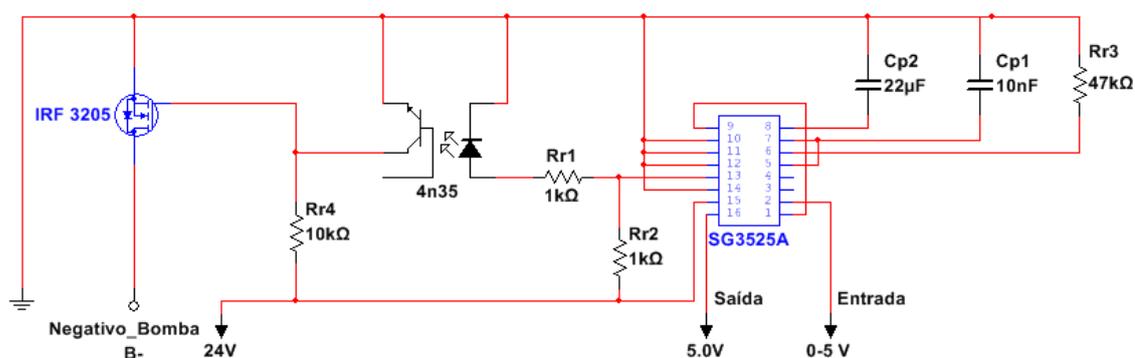
O transistor IRF 3205 do tipo pnp tem valor máximo de corrente no dreno de 110 A e um valor máximo de tensão entre o dreno e a fonte de 55 Volts.

Uma vez conhecida às especificações dos dispositivos do circuito integrado SG3523A e dos componentes eletrônicos optoacoplador 4n25 e transistor IRF 3205 utilizados na construção do circuito de controle, foram configurados para operarem adequadamente no controle da velocidade das bombas, respeitando as devidas especificações de seu fabricante, como mostrado na Figura 3.14.

O pino 1 e 9 são curto circuitados, o sinal de entrada de referência do pino 2 é fornecido pelo CLP cuja variação irá determinar a largura do pulso, os pinos 3 e 4 são mantidos abertos, os pinos 5 e 7 são curto circuitados e conectados a um capacitor ( $C_{p1}$ ) de 10 nF, o pino 6 é conectado a um resistor ( $R_{r3}$ ) de 47 k $\Omega$  o pino 8 é conectado a um capacitor ( $C_{p2}$ ) de 22 $\mu$ F, os pinos 10,11,12 e 14 são curto circuitados e aterrados, o pino 13 fornece o sinal de saída, o pino 15 é conectado à fonte de alimentação, o pino 16 fornece a tensão de referência de 5.1V usada para alimentar o sensor de nível é mantido aberto.

O Sinal de saída do pino 13 do PWM alimenta o anodo do diodo emissor de luz (LED) pino 1 do optoacoplador 4n35 que por sua vez além de proteger o circuito da placa, permite um chaveamento correto do transistor IRF 3205, diminuindo dessa forma a perda de potência do circuito. O optoacoplador é conectado à porta do transistor através de seu coletor (pino 5).

Figura 3.14 - Circuito controlador da velocidade de rotação da bomba



Fonte: Autor

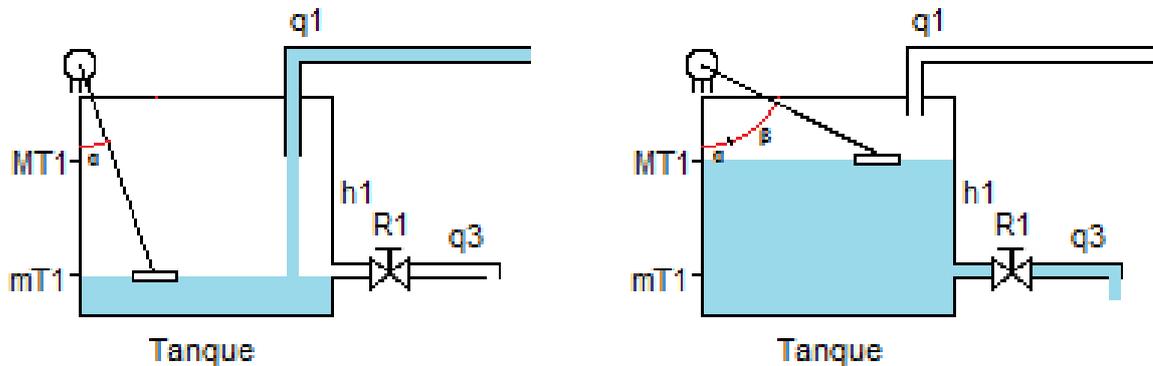
### 3.6 Sensor de Nível

Para o sensor de nível foi utilizado um potenciômetro, cujo funcionamento consiste na variação de sua resistência e conseqüentemente da tensão verificada pelo controlador lógico programável a medida que o nível de líquido aumenta.

Os potenciômetros permitem alterar constantemente a resistência de um componente de maneira muito mais cômoda, converte o deslocamento linear ou angular em variação de resistência. (Braga, 2012)

Os sensores de níveis utilizados foram potenciômetros lineares tipo B rotativos com resistência nominal de 10k. Cada potenciômetro teve seu eixo ligado à uma haste de madeira que por sua vez estava ligada a uma pequena boia de isopor, o que permite alterações no valor da resistência do potenciômetro a medida que o nível de água no tanque é modificado. A representação da montagem do potenciômetro é mostrada na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Variação resistência do potenciômetro com nível de água



Fonte: Autor

Sabendo que a resistência ( $R$ ) é diretamente proporcional ao ângulo ( $\theta$ ) pode-se determinar uma relação entre esta mesma resistência ( $R$ ) e a altura dos níveis ( $h$ ) que é dado por

$$\cos(\theta) = \frac{H - h}{L}, \quad (25)$$

$$h = H - \cos(\theta) * L, \quad (26)$$

sendo

$\theta$  : ângulo total medido pelo potenciômetro

$h$ : Altura do nível de água

$H$ : Distância vertical do eixo do potenciômetro à superfície da água

$L$ : Comprimento da haste de madeira

Por meio de uma régua o valor encontrado da distância vertical do eixo do potenciômetro à superfície da água é 10,2 cm e o comprimento da haste de madeira é de 11,2 cm. Para o tanque 2 o valor da distância vertical do eixo do potenciômetro à superfície da água é 11,8 cm e o comprimento da haste de madeira é de 13,2 cm.

Como o potenciômetro depois de fixado no tanque pode não estar no seu ponto inicial, para a medição correta do nível do tanque esse deslocamento inicial foi levado em consideração, esse ângulo foi chamado de ângulo  $\alpha$  que marca o nível mínimo do tanque. O deslocamento da coluna de água resulta em um aumento do ângulo, esse novo ângulo formado entre a posição inicial que formava o  $\alpha$  e a posição final é chamado de ângulo  $\beta$ . Dessa forma, as equações são dadas por

$$\theta = \alpha + \beta, \quad (27)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{H}{L}, \quad (28)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{H}{L}\right), \quad (29)$$

$$\beta = (VE - Ref) * K, \quad (30)$$

$$h = H - \cos\left[\arccos\left(\frac{H}{L}\right) + (VE - Ref) * K\right] * L, \quad (31)$$

sendo

VE: Valor medido pelo potenciômetro.

Ref: Valor de referência do potenciômetro.

A constante K de proporcionalidade é dada por

$$K = \frac{\text{ângulo máximo do potenciômetro}}{\text{valor digital máximo medido pelo CLP}}, \quad (32)$$

# Capítulo 4

## EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS E HARDWARE

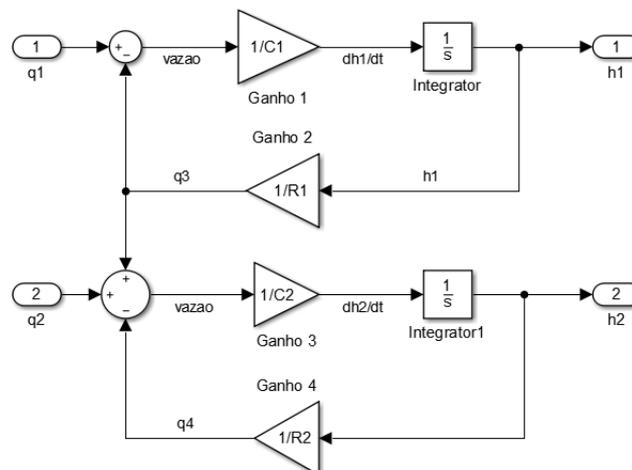
---

Nesse capítulo são apresentados os experimentos computacionais e os experimentos realizados na planta, com base no modelo matemático determinado, esses experimentos consistem em verificar a resposta da planta a um degrau, observando seu comportamento e avaliando sua estabilidade, sintonizar o PI no ambiente Simulink, e comparar a resposta do sistema no ambiente computacional e a resposta real da planta.

### 4.1 Diagrama de Blocos do Sistema de Tanques

Com base no modelo matemático de espaço de estados encontrado na Equação (20), a dinâmica da planta foi montada no ambiente Simulink do software MALTBAB®, o diagrama de blocos da planta é mostrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Dinâmica da Planta

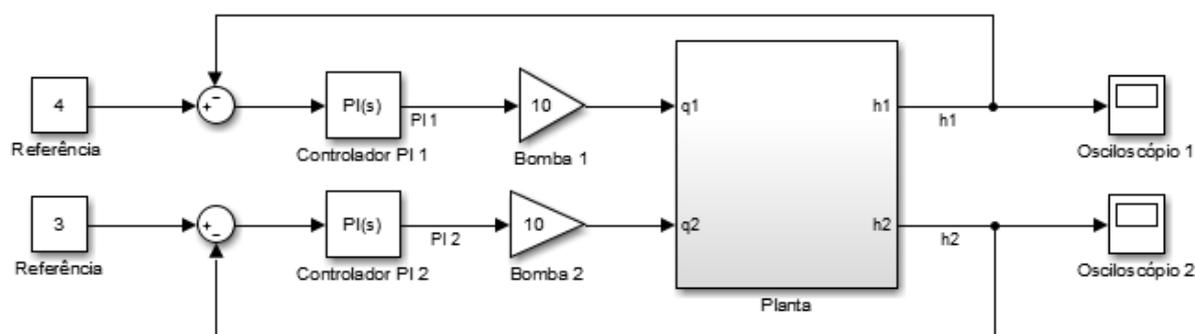


Fonte: Autor

Uma vez determinado o comportamento da planta, foi feita a sintonia dos controladores PIs, utilizando técnicas clássicas de sintonia, assim para os valores dos sinais de entrada, para os valores de capacitância ( $C1 = 144 \text{ cm}^2$  e  $C2 = 144 \text{ cm}^2$ ), resistência ( $R1 = 0,1040$  e  $R2 = 0,0816$ ) e para o valor máximo de tensão que o CLP pode fornecer para o controle das bombas (24V).

Na Figura 4.2 temos que as constantes correspondem aos valores de níveis que se deseja controlar de cada tanque sendo para o tanque 1 o nível de 3 cm e para o tanque 2 o nível de 4 cm. Os ganhos 10 representam as bombas 1 e 2, as bombas d'água utilizadas para deslocar a água de um tanque para o outro possuem uma faixa linear de operação, dessa faixa foi extraída a relação de 10 entre a tensão aplicada a bomba e sua vazão de água

Figura 4.2 - Estrutura de Controle da planta

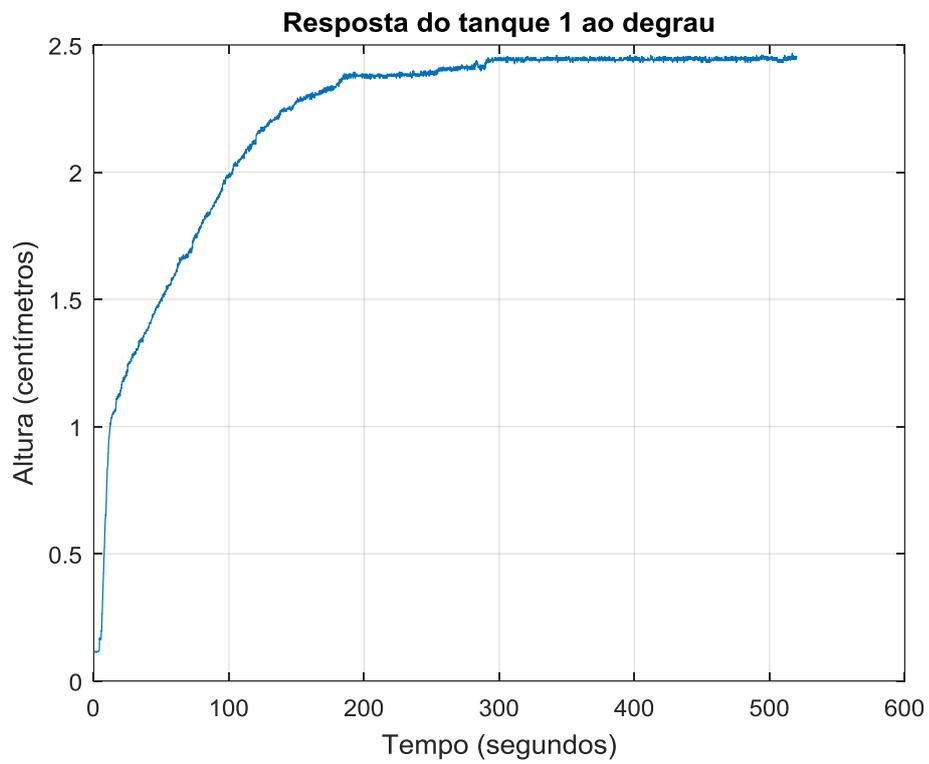


Fonte: Autor

## 4.2 Resposta da Planta ao Degrau

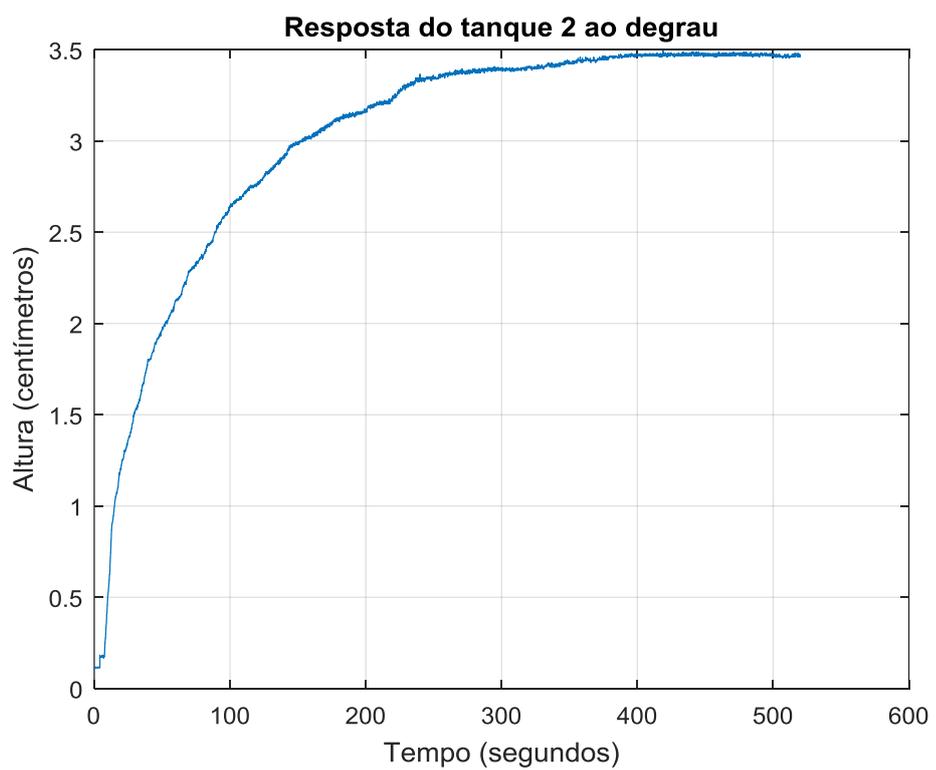
Como primeiro teste, foi aplicado para o sistema em malha aberta uma entrada do tipo degrau as bombas 1 e 2 no valor de aproximadamente 2,4 V para a bombas 1 e 2,2 Volts para a bomba 2 e com isso confirmar a estabilidade do sistema. As respostas ao degrau são apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.4.

**Figura 4.3 - Resposta do tanque 1 ao degrau**



Fonte: Autor

**Figura 4.4 - Resposta do tanque 2 ao degrau**



Fonte: Autor

Observando-se as Figuras 4.3 e 4.4 tem-se a resposta do tanque 1 a entrada ao degrau, verificando-se um tempo de subida de aproximadamente 2 minutos 25 segundos e um tempo de estabilização de aproximadamente 5 minutos.

Para resposta do tanque 2 verifica-se um tempo de subida de aproximadamente 3 minutos 32 segundos e um tempo de estabilização de aproximadamente 6 minutos e 40 segundos.

Dessa forma após a aplicação do sinal de teste e a partir dos resultados verificou-se que o sistema tende a se equilibrar naturalmente.

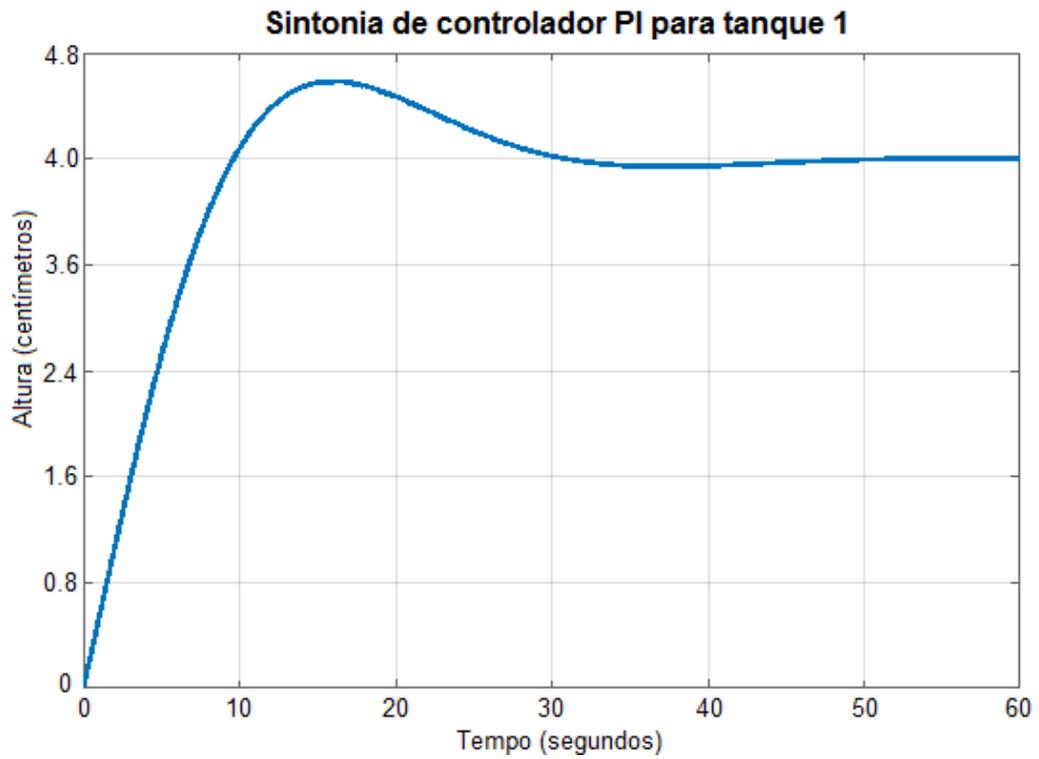
### **4.3 Sintonia do Controlador PI**

Mesmo verificando que o sistema é naturalmente estável ainda não satisfaz os objetivos, visto que o interesse principal é controlar o nível de água em qual valor de referência escolhido. Para isso faz-se necessário o uso de uma técnica de controle, no caso a escolhida é a Proporcional-Integral implementada no CLP. Assim o primeiro passo é sintonizar o controlador, e para isso fez-se uso do ambiente Simulink do software MALTAB®.

Para o controlador da bomba 1, de acordo com o resposta obtida na Figura 4.5, o ganho determinado pelo Simulink é de aproximadamente 1.483 proporcional e 0.297 integral. Para o controlador da bomba 2, para a respostas obtida na Figura 4.6, o Simulink determinou um ganho de aproximadamente 1.891 proporcional e 0.482 integral.

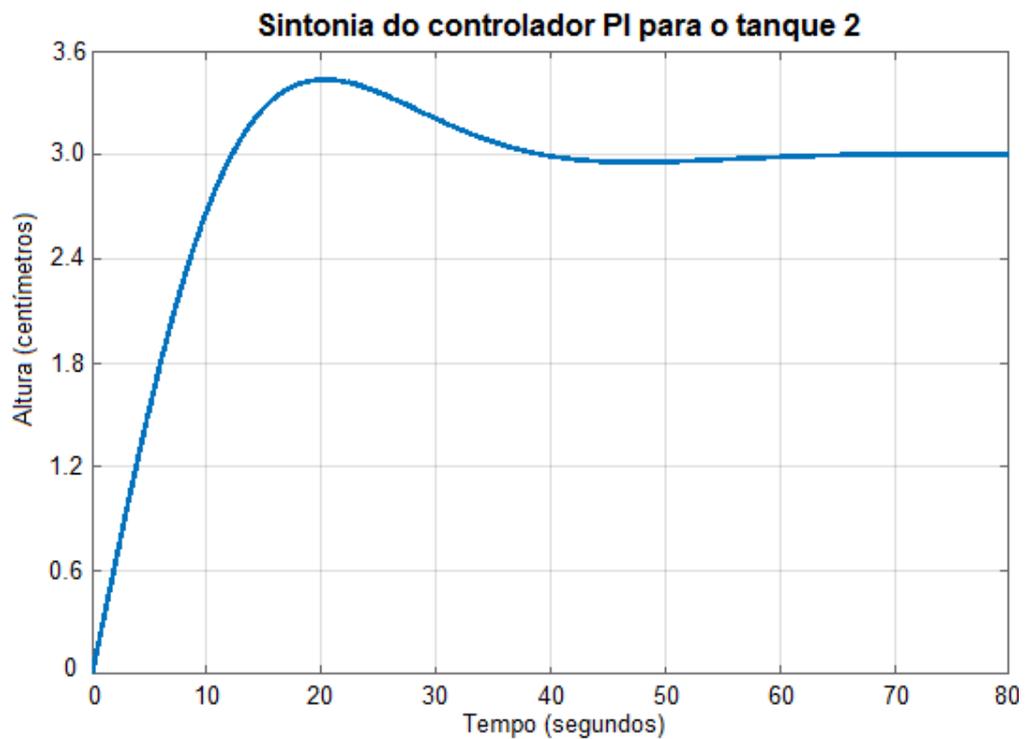
Uma vez encontrado os ganhos dos controladores foi simulada as respostas dos sistema para entadas de referencia de 4 cm para o tanque 1 e de 3 cm para o tanque 2,

Figura 4.5 – Simulação do tanque 1 para entrada de referência de 4 cm



Fonte: Autor

Figura 4.6 - Simulação do tanque 2 para entrada de referência de 3 cm



Fonte: Autor

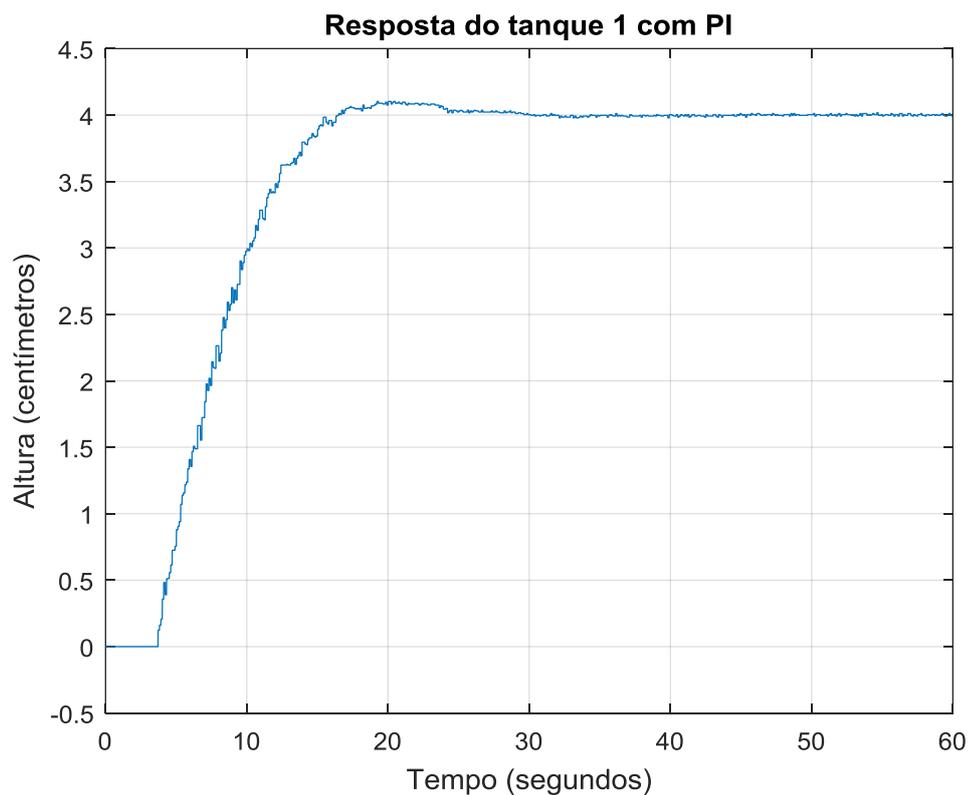
Na simulação da resposta do tanque 1 à entrada de referência de 4 cm com controlador PI mostrada na figura 4.5, verifica-se um tempo de subida de aproximadamente 10 segundos, um tempo de estabilização de aproximadamente 35 segundos e um sobressinal de 14%.

Para a simulação da resposta do tanque 2 na Figura 4.6, verifica-se um tempo de subida de aproximadamente 8 segundos e um tempo de estabilização de aproximadamente 28 segundos e um sobressinal de 15%.

#### 4.4 Resposta da Planta com Controlador PI

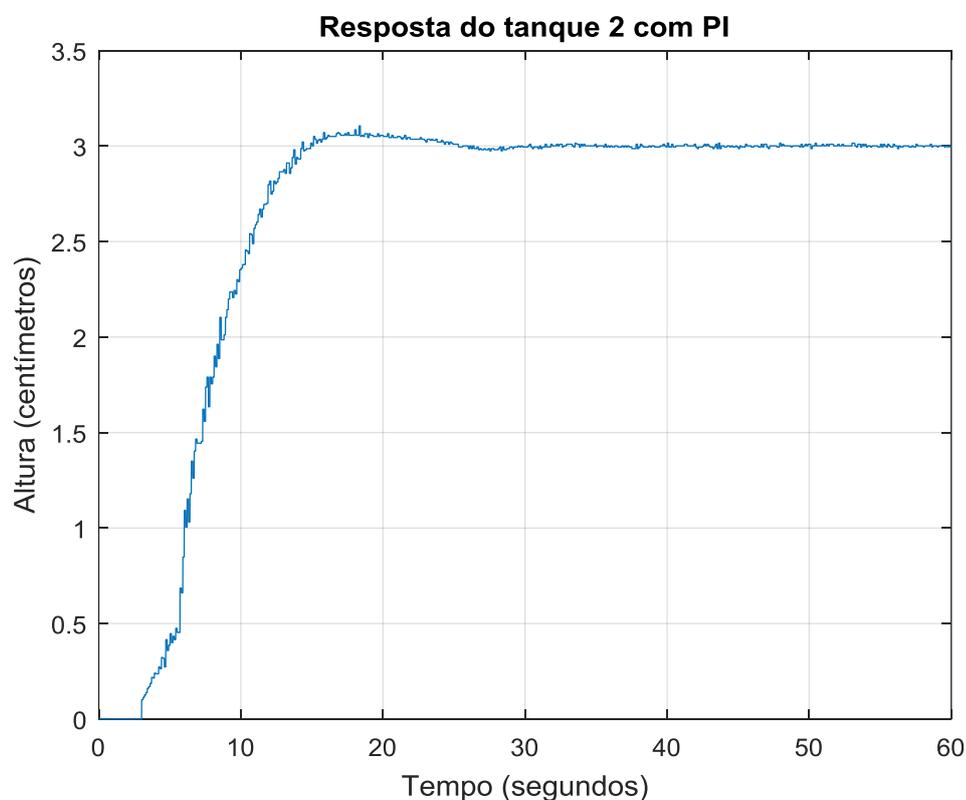
Com a determinação dos os ganhos proporcionais e integrativos do controlador de cada tanque, foram realizados testes e o resultados estão mostrados nas Figuras 4.7 e 4.8.

**Figura 4.7 – Resposta do tanque 1 com PI**



**Fonte: Autor**

Figura 4.8 - Resposta do tanque 2 com PI



Fonte: Autor

Como observado na Figura 4.7 a resposta do tanque 1 à entrada de referência de 4 cm com uso do controlador PI, verifica-se um tempo de subida de aproximadamente 10 segundos, um tempo de estabilização de aproximadamente 25 segundos e um sobressinal de no máximo 2,5%.

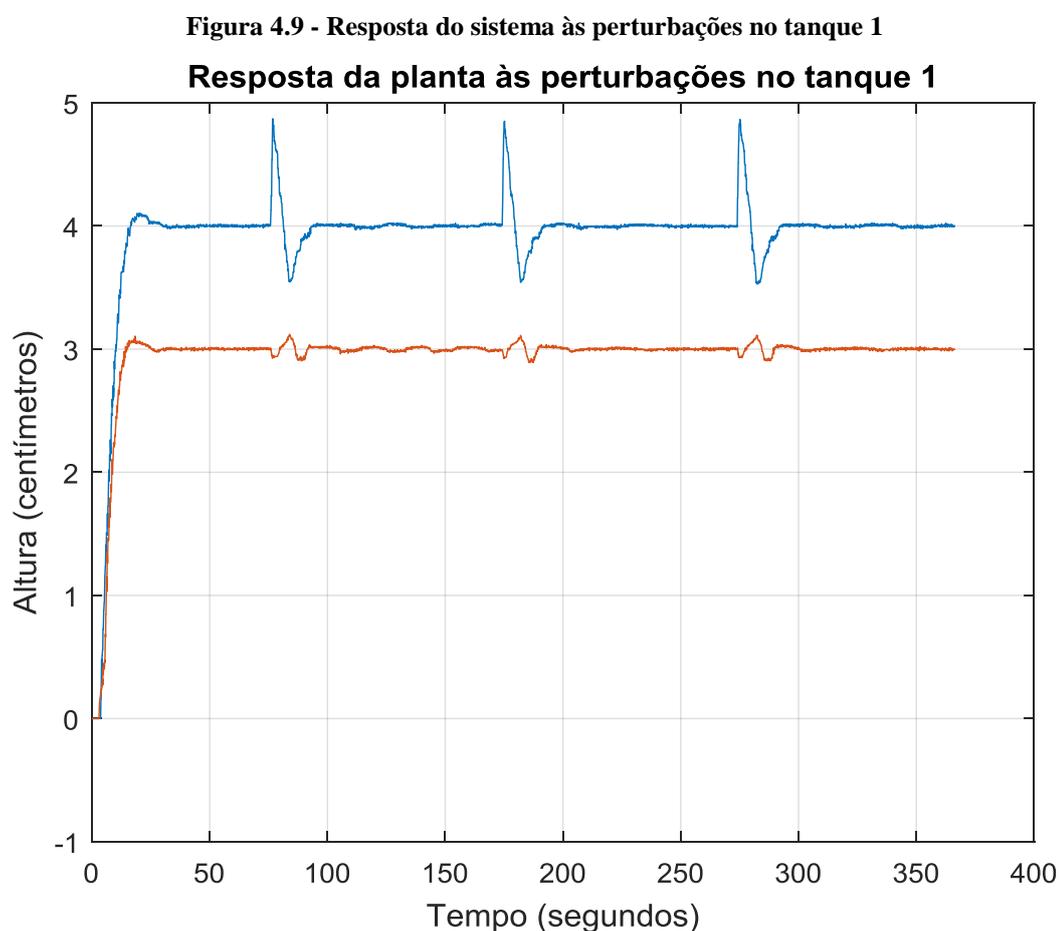
Para resposta do tanque 2 mostrada na Figura 4.8, verifica-se um tempo de subida de aproximadamente 9 segundos e um tempo de estabilização de aproximadamente 25 segundos e um sobressinal de 4%.

Comparando as respostas das simulações com a respostas reais, observa-se que o experimento teve um desempenho melhor do que o esperado, tendo para o tanque 1 um tempo de subida aproximadamente o mesmo, um tempo de acomodação aproximadamente 10 segundos menor e apresentando um sobressinal 11,5% menor, mantendo em regime permanente oscilações de no máximo 1% do sinal de referência.

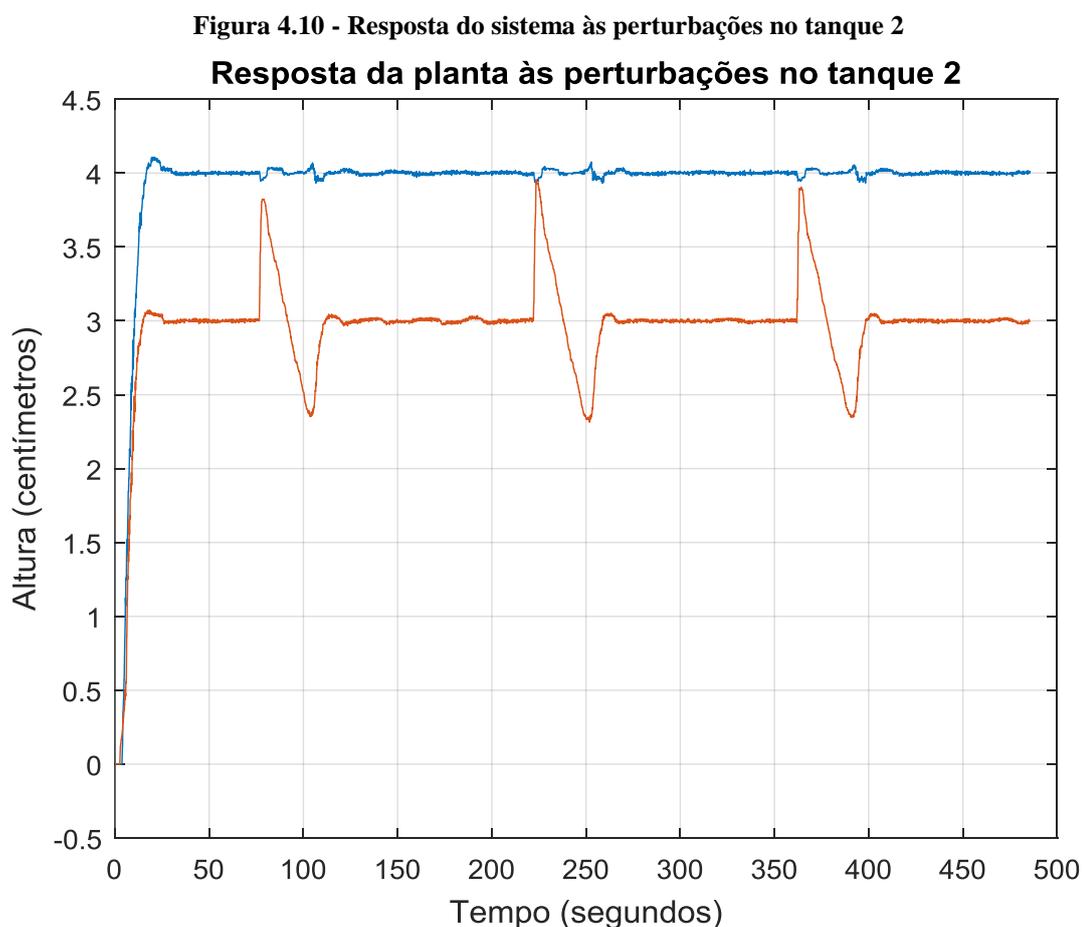
Para o tanque 2 verifica-se um tempo de subida de aproximadamente 1 segundo maior do que o esperado, um tempo de acomodação aproximadamente 3 segundos menor e com sobressinal 11 % menor.

## 4.5 Resposta da Planta às Perturbações com Controlador PI

Para verificar a resposta do sistema às perturbações foram realizados alguns testes, que consistiam em elevar o nível de cada tanque jogando mais água diretamente neles e observar seu comportamento. A resposta do sistema à perturbação no tanque 1 mostrada na Figura 4.9, e a resposta do sistema às perturbações no tanque 2 é mostrada na Figura 4.10



Fonte: Autor



Fonte: Autor

Da Figura 4.9 confirma-se que qualquer perturbação no tanque 1 gera uma perturbação no tanque 2, visto que a saída do tanque 1 é uma das entradas do tanque 2. O sistema respondeu corretamente, corrigindo cada um dos três distúrbios em aproximadamente 20 segundos.

Na Figura 4.10 as perturbações foram realizadas no tanque 2 e como observado gerou um pequeno distúrbio no tanque 1, visto que as duas bombas estão ligadas a mesma fonte de alimentação de 24 V e qualquer variação abrupta na tensão da bomba 2 acaba gerando uma variação na tensão da bomba 1 (e vice-versa). Entretanto o sistema também respondeu corretamente, corrigindo cada um dos três distúrbios aplicados em aproximadamente 45 segundos.

# Capítulo 5

## CONCLUSÃO

---

Nesta monografia foi apresentado o desenvolvimento de um sistema de controle de níveis de reservatórios, mostrou-se desde o projeto do circuito de controle e dos sensores de níveis utilizados, até o efetivo controle do nível de líquidos nos reservatórios através da implementação do algoritmo PID no CLP.

Como mostrados a partir dos testes na planta, o sistema tende a naturalmente a estabilidade, confirmando o que foi verificado na análise teoria da localização dos polos e zeros e diagrama de Bode. Quanto a análise da resposta transitória do sistema, o controlador teve um desempenho melhor do que o esperado para os dois tanques, tanto para o tempo de subida quanto para o tempo de acomodação, mesmo com os ruídos obtido na leitura dos sensores utilizados que permitiram uma análise como relativa precisão. O sistema também manteve uma relativa estabilidade com oscilações de no máximo 1% do valor de referência para o regime permanente. Durante as perturbações o sistema respondeu como esperado minimizando-as e retornando a seu estado anterior a elas.

Desta forma, conclui-se que o sistema proposto para o controle de níveis de líquidos em reservatórios apresentou resultados satisfatórios melhor do esperado.

### 5.1 Trabalho Futuros

Ganhos da Bombas: estudar outras formas de determinar o ganho dos atuadores de maneira mais precisa, uma possibilidade é inserir um sensor de vazão nos atuadores.

Calibração dos sensores: inserir outro sensor de nível ao sistema, de modo a comparar os resultados, além encontrar meios para realizar uma medição mais precisa dos parâmetros de

comprimento da haste e altura do potenciômetro até o nível mínimo de água, visto que, erros na ordem de 1 milímetro geram uma influência considerável no valor final medido.

Diminuição dos ruídos: melhorar a lubrificação do eixo dos potenciômetros visto que o atrito causado entre o eixo e a parte de suporte geram ruídos consideráveis, outra alternativa é aplicar técnicas de filtragem digital.

Interferência das bombas uma na outra: alimentar as bombas com fontes de tensões independentes, de modo que, quando houve uma variação abrupta de tensão em uma delas para efetuar uma correção de distúrbios no nível medido, não haja interferência na outra.

Identificação do sistema: fazer uma comparação entre o levantamento do modelo do sistema pelos parâmetros dos componentes medidos versus identificação do sistema.

# REFERÊNCIAS

---

---

- Bolton, W., 2015. *PLC Systems In Instrumentation and Control Systems*. 2 ed. s.l.:Newnes.
- Boylestad, R. L., 2004. *Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos*. 8 ed. São Paulo: Pearson Education.
- Bradley, A., 2016. *Programação e Configuração de CLP CLX*. s.l.:Rockwell Automation.
- Braga, N. C., 2012. *Curso de Eletrônica - Eletrônica Básica*. São Paulo: Saber.
- Branco, E. M., 2008. *Sistema de Controle Digital para Nível de Reservatório*. Itatiba: Universidade São Francisco.
- Chapman, S. J., 2013. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. 5 ed. Porto Alegre: AMGH.
- Couto, C. M., 2001. *Engenharia de Automação Industrial*. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC S.A.
- Couto, G. R., 2006. *Modelagem e Desenvolvimento de Controles de Sistema Termo-Hidráulico, e Interfaces para a Aquisição e Controle de Dados*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto.
- Dorf, R. C., 2001. *Sistemas de Controle Modernos*. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC S.A.
- Franklin, G. F., Powell, J. D. & Emami-Naeini, A., 2010. *Feedback Control of Dynamic Systems*. 6ª ed. New Jersey: Addison-Wesley.
- Gosmann, H. L., 2002. *Um Sistema Multivariável de Tanques Acoplados para Avaliação de Técnicas de Controle*. Brasília: Universidade de Brasília.
- LYRA, G. J., 2013. Controle de Nível de Reservatório, Através do Controle de Rotação do Motor-Bomba, por Meio do Inversor de Frequência. p. 4.
- Maia, C., 2005. Estratégias de Controle por Modelo de Referência de Sistemas a Eventos Discretos Max-Plus Lineares..
- Mesquita, F. N., 2012. Modelagem da Resposta de um Sistema de Reservatório de Água. p. 7.
- Miyagi, P. E., 1996. *Controle Programável: Fundamentos de Controle de Sistemas a Eventos Discretos*. 1 ed. São Paulo: Edgard Blucher.
- Montgomery, E., 2004. *Introdução aos Sistemas a Eventos Discretos e À Teoria de Controle Supervisório*. s.l.:Alta Books.

National Instruments, 2017. *National Instruments*. [Online]  
Disponível em: <http://www.ni.com/pt-br.html>

Nise, N. S., 2011. *Engenharia de Sistemas de Controle*. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC.

Ogata, K., 2008. *Engenharia de Controle Moderno*. 5ª ed. São Paulo(São Paulo):  
Prentice Hall.

Patané, E. J., 2008. *Implementação de Controle de Velocidade em Malha Fechada para Motores de Corrente Contínua Utilizando Sistema de Aquisição de Dados*. São Caetano do Sul: Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia.

PELZ, G. M., 2014. Implementação de um Sistema de Controle de Nível de Dois Tanques Acoplados. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, p. 7.

Petruzella, F. D., 2013. *Controladores Lógicos Programáveis*. 4ª ed. Porto Alegre: McGraw-Hill.

Ramos, A. P., 2008. *Sistema Didático de Nível de Líquidos*. Brasília: Universidade de Brasília.

Rodrigues, M. J. M., 2011. *PID Control of Water in a tank*. s.l.:University of Gavle.

Silva, P. R. A. d., 2010. Controle de Nível em Tanques Acoplados Usando Sistemas. p. 6.

Vieira, A. D., 2007. *Método de Implementação do Controle de Sistemas a Eventos Discretos com Aplicação da Teoria de Controle Supervisório*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

# Anexo A

## ARQUITETURA DO CLP

---

Como mostrado na Figura 2.6 um Controlador Logico Programável é constituído basicamente de:

### **FONTE DE ALIMENTAÇÃO**

Converte corrente alternada em contínua para alimentar o controlador. Caso falte energia, há uma bateria que impede a perda do programa do usuário. Ao retornar a energia, o programa se reinicia.

Existem dois tipos de fontes:

- Source: fonte de energia interna ao controlador.
- Sink: fonte de energia externa ao controlador.

### **UNIDADE CENTRAL DE PROCESSAMENTO (UCP);**

Responsável pela execução do programa do usuário, atualização da memória de dados e memória-imagem das entradas e saídas.

## **MEMÓRIAS DOS TIPOS FIXO E VOLÁTIL;**

### **Memória EPROM**

Contém o programa monitor elaborado pelo fabricante que faz o start-up do controlador, armazena dados e gerencia a sequência de operações. Este de memória não é acessível ao usuário do controlador programável.

### **Memória do Usuário**

Armazena o programa aplicativo do usuário. A CPU processa esse programa, atualiza a memória de dados internos e imagem E/S e retorna novamente para essa área da memória.

A memória possui dois estados:

- RUN: em operação, com varredura cíclica.
- PROG: parado, quando se carrega o programa aplicativo no CLP.

### **Memória de Dados**

Encontram-se aqui dados referentes ao processamento do programa do usuário, isto é, uma tabela de valores manipuláveis.

### **Memória-Imagem das Entradas e Saídas**

Memória que reproduz o estado dos periféricos de entrada e saída.

- Circuitos das entradas são provenientes de chaves, seletoras, limitadoras.
- Circuitos das saídas destinados a dar partida em motores, solenoides.

A correspondência entre níveis 0 e 1 e níveis de tensão varia conforme a necessidade.

## DISPOSITIVOS DE ENTRADA E SAÍDA;

Módulos analógicos e digitais do controlador programável são identificados a partir de uma série de caracteres formados por números e letras que fornecem informações a respeito da identificação da família, tipo do módulo, classe de tensão, do número de entradas e saída por módulo e tipo de acionamento (Bradley, 2016).

### Módulos Digitais

Os módulos digitais podem ser de entrada (Input) ou saída (Output) como mostrado na Figura A.1.

A classe de tensão dos módulos de entrada é mostrada abaixo.

**Tabela 5 - Classe de tensão modulo de entrada**

Entrada		
Identificador	Tensão	Modalidade
A	120 CA	
M	240 CA	
N	24 CA	
B	12/24 CC	sink
C	48 CC	sink
H	125 CC	sink/source
V	12/24 CC	source

**Autor:** (Bradley, 2016)

A classe de tensão dos módulos de saída é mostrada abaixo.

**Tabela 6 - Classe de tensão modulo de saída**

Saída		
Identificador	Tensão	Modalidade
W	Rele	NA
X	Rele	NA / NF
A	120/240 CA	
N	24 CA	
B	12/24 CC	source
C	48 CC	source
H	125 CC	
V	12/24 CC	sink

**Autor:** (Bradley, 2016)

Podem ter 8, 16 ou 32 pontos de entrada ou saída por modulo.

Quanto ao tipo de acionamento pode ser por diagnostico (D), fusível eletrônico (E) ou isolado (I)

**Figura A.1** - Cartões de Digitais de Entrada (esquerda) e Saída (direita)



Fonte: Autor

## Módulos Analógicos

Os módulos analógicos podem ser de entrada (Input) ou saída (Output) como mostrado na Figura A.2.

A classe de tensão para os módulos de entrada e módulos de saída é a mesma, entretanto os módulos ainda podem operar com sinais de corrente.

Tabela 7 - Classe de Operação dos Módulos de Entrada e Saída

Cartão	Descrição
F	- 10 a + 10 CC 0 a 10 CC 0 a 5 CC 0 a 20 mA

Autor: (Bradley, 2016)

Podem ter 4, 8, 16 ou 32 pontos de entrada ou saída por módulo.

Quanto ao tipo de acionamento pode ser por tensão (T), Corrente (C), isolado (I).

**Figura A.2 – Cartões de Analógicos Entrada (esquerda) e Saída (direita)**



Fonte: Autor

### Terminal de programação.

É um periférico que serve de meio comunicação entre o usuário e controlador, nas fases de implementação do software aplicativo. Pode ser um computador ou um dispositivo portátil composto de teclado e display;

- Autodiagnostico
- Alterações online.
- Programação de instruções
- Monitoração;

- Gravação e a limpeza da memória.

### Ciclo de execução (Scan) em operação normal (Modo — RUN)

Em um ciclo, o CLP realiza as seguintes etapas básicas:

- Atualização das entradas;
- Processamento das instruções do programa;
- Atualização das saídas.

A varredura é processada em ciclo fechado, como mostra a Figura A.3.

Figura A.3 - Ciclo de Processamento



Fonte: (Couto, 2001)

O controlador lê a porta de entrada, gravando a informação na imagem de entrada. Em seguida ocorre o processamento, e, por fim, ele copia a imagem de saída na porta de saída. Para o primeiro ciclo, a imagem das variáveis de entrada é zerada. O processamento desenvolve-se a partir dessa situação, atualizando a palavra e a imagem de saída. Toda vez que a varredura da imagem de entrada se efetua, a palavra de entrada é atualizada (Couto, 2001).

# Anexo B

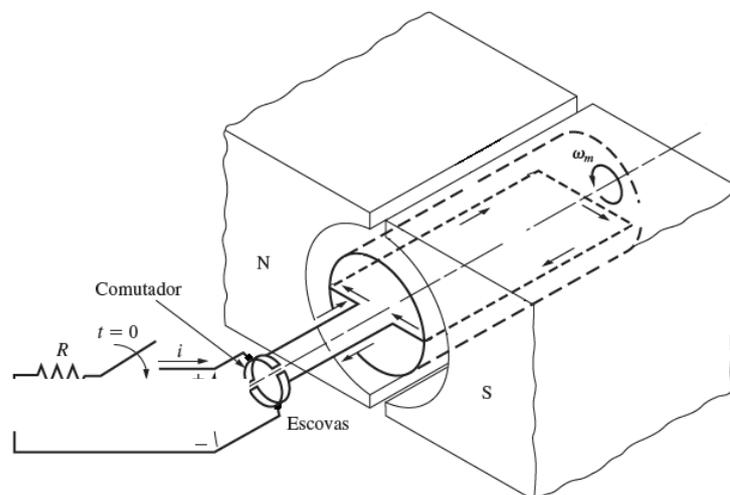
## MOTOR DE CORRENTE CONTINUA

---

Diferentemente dos motores CC com campos eletromagnéticos separados, eles não têm perdas que ocorrem no cobre do circuito de campo, outra vantagem de não possuir circuito de campo separado é o tamanho e o custo reduzido do estator, dessa forma, esses motores são em geral, mais baratos, de tamanho menor, mais simples. Entretanto os ímãs permanentes não conseguem produzir uma densidade de fluxo tão elevada quanto a de um campo eletromagnético de alimentação externa. Desse modo, um motor CC à ímã permanente tem um conjugado induzido menor por ampère de corrente de armadura do que um motor CC com campo eletromagnético separado de mesmo tamanho e construção. Além de correrem o risco de desmagnetização (Chapman, 2013).

As armaduras dos motores CC à ímãs permanentes são idênticos às armaduras dos motores com circuitos separados de campo como mostrado na Figura B.1.

**Figura B.1 - Circuito Motor Imã Permanente**



Fonte: (Chapman, 2013)

Em uma máquina CC à ímãs permanentes, o fluxo dos polos consiste apenas em fluxo residual presente nos ímãs permanentes. Se a corrente de armadura se tornar muito elevada, então haverá algum risco de que a força magneto motriz da armadura possa desmagnetizar os polos, reduzindo permanentemente e orientando de outra forma o fluxo residual presente neles. A desmagnetização também pode ser causada pelo aquecimento excessivo devido a um choque (queda do motor) ou a períodos prolongados de sobrecarga (Chapman, 2013).

# Anexo C

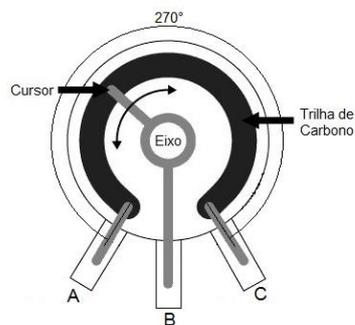
## POTENCIÔMETRO

---

Apresenta-se os potenciômetros que são pequenos resistores variáveis temos um cursor em forma de anel incompleto de 270 graus, para os tipos rotativos, um material resistivo (carbono) sobre o qual desliza um cursor como mostrado na Figura C.1 (Braga, 2012).

Nas extremidades do anel de carbono temos a ligação de dois terminais A e C, e o cursor no terminal B.

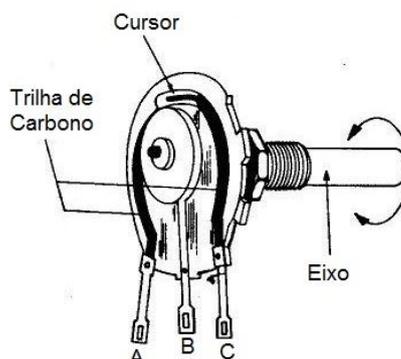
**Figura C.1 - Potenciômetro Aberto**



**Fonte: (Braga, 2012)**

Quando atuamos sobre o eixo que comanda o cursor ele gira e a resistência entre o terminal central e as extremidades do elemento resistivo varia como mostrado na Figura C.2.

Assim, girando de A para C, enquanto a resistência entre A e B aumenta, a resistência entre B e C diminui.

**Figura C.2 - Aspectos construtivos do potenciômetro de carbono**

Fonte: (Braga, 2012)

Os potenciômetros não têm apenas o carbono como material de construção do elemento resistivo. Também se encontra nestes elementos os fios de nicromo (níquel + cromo). O uso do fio de nicromo permite que o componente trabalhe com intensidades de corrente maiores, pois existe um limite, como no caso dos resistores, para a potência máxima que pode ser convertida em calor sem que ele seja danificado. Se uma corrente muito intensa passar por um potenciômetro ele pode queimar. Outra característica que encontrada nos potenciômetros é a maneira como a resistência varia quando atuamos sobre o cursor. Nos potenciômetros chamados lineares, a resistência varia linearmente com o movimento do cursor, ou seja, o ângulo de giro do cursor. Nestes componentes a resistência apresentada é proporcional ao giro do cursor (Braga, 2012).



# Anexo E

## ALGORITMO IMPLEMENTADO NO MATLAB

---

```
R1=0.104097;
R2=0.081653;
C1=144;
C2=144;

A=[-1/(R1*C1) 0; 1/(R1*C2) -1/(R2*C2)];
B=[ 1/C1 0; 0 1/C2];
C=eye(2);
D=zeros(2);

%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
Para determinar os Polos e Zeros do Sistema e o Diagrama de Bode
%%%%%%%%%%

estados ={'h2' 'h3'};
in={'q1' 'q2'};
out={'h2' 'h3'};

sys_mimo=ss(A,B,C,D,'statename',estados,'inputname',in,'outputname',out);
[num1,den1]=ss2tf(A,B,C,D,1);
[num2,den2]=ss2tf(A,B,C,D,2);

G11=tf(num1(1,:),den1)
figure(1)
pzplot(G11); title ('Polos e Zeros da função G(11)');
margin(G11); title ('Diagrama de Bode da função G(11)');
%%%%%%%%%%
G12=tf(num1(2,:),den1)
figure(2)
```

```

pzplot(G12); title ('Polos e Zeros da função G(12)');
margin(G12); title ('Diagrama de Bode da função G(12)');
%%%%%%%%%%
G21=tf(num2(1,:),den2)
figure(3)
pzplot(G21); title ('Polos e Zeros da função G(21)');
margin(G21); title ('Diagrama de Bode da função G(21)');
%%%%%%%%%%
G22=tf(num2(2,:),den2)
figure(4)
pzplot(G22); title ('Polos e Zeros da função G(22)');
margin(G22); title ('Diagrama de Bode da função G(22)');

%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
Para determinar a resposta dos tanques ao degrau
%%%%%%%%%%
t:0:0.10:519990
figure(1)
plot(t,b1t);
title ('Resposta do tanque 1 ao degrau')
xlabel('Tempo (segundos)')
ylabel('Altura (centímetros)')
grid on

%%%%%%%%%%
figure(2)
plot(t,b2t)
title ('Resposta do tanque 2 ao degrau')
xlabel('Tempo (segundos)')
ylabel('Altura (centímetros)')
grid on

%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
Para determinar a resposta dos tanques com controlador PI
%%%%%%%%%%
t1: 0:0.10:59990

figure(1)
plot(t1,PIT1)
title ('Resposta do tanque 1 com PI')
xlabel('Tempo (segundos)')
ylabel('Altura (centímetros)')
grid on
%%%%%%%%%%
figure(2)

```

```
plot(t1,PIT2)
title ('Resposta do tanque 2 com PI')
xlabel('Tempo (segundos)')
ylabel('Altura (centímetros)')
grid on
```

```
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
```

Para determinar a resposta do sistema de tanques às perturbações com controlador PI

```
%%%%%%%%%%
```

```
Pap1t = 0: 0.10:366410
```

```
Pap2t = 0: 0.10:485680
```

```
figure(1)
plot(Pap1t,Pap1T1,Pap1t,Pap1T2)
title ('Resposta da planta às perturbações no tanque 1')
xlabel('Tempo (segundos)')
ylabel('Altura (centímetros)')
grid on
```

```
%%%%%%%%%%
```

```
figure(2)
plot(Pap2t,Pap2T1,Pap2t,Pap2T2)
title ('Resposta da planta às perturbações no tanque 2')
xlabel('Tempo (segundos)')
ylabel('Altura (centímetros)')
grid on
```