



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

YAN PABLO TEIXEIRA FEITOSA CURVINA

**CONTROLE DO NÍVEL DE LÍQUIDO EM RESERVATÓRIOS UTILIZANDO UM
CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL**

São Luís – MA
2018

YAN PABLO TEIXEIRA FEITOSA CURVINA

CONTROLE DO NÍVEL DE LÍQUIDO EM RESERVATÓRIOS UTILIZANDO UM
CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL

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

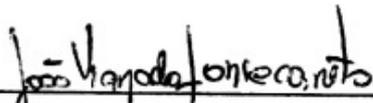
2018

YAN PABLO TEIXEIRA FEITOSA CURVINA

CONTROLE DO NÍVEL DE LÍQUIDO EM RESERVATÓRIOS UTILIZANDO UM
CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL

Aprovada em: 13 / 07 / 2018

BANCA EXAMINADORA



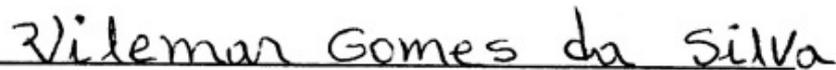
Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto

Orientador – DEE UFMA



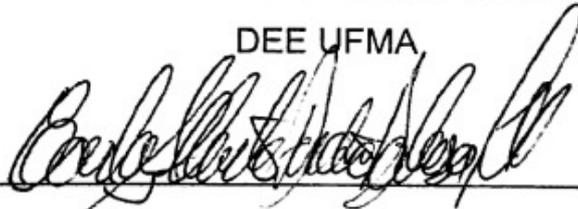
Prof. Bruno França Coelho

Co-Orientador – LAC UFMA



Prof. Dr. Vilemar Gomes da Silva

DEE UFMA



Prof. Dr. Carlos Alberto Brandão Barbosa Leite

DEE UFMA

São Luís – MA

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família pelo apoio e compreensão por todos esses anos de graduação. Em especial gostaria de agradecer a meus pais Aristófanés Mota Curvina e Inês Teixeira, minha irmã Nathalia Curvina, minha avó Márcia Maria.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto por ter me dado a oportunidade de desenvolver esse desafiador trabalho, que me permitiu adquirir mais experiência e conhecimento para a minha formação como engenheiro eletricista.

A Ernesto, Evandro Martins e Bruno França pela ajuda durante o desenvolvimento desse trabalho me auxiliando nas mais diversas tarefas e tirando dúvidas. Agradeço também aos demais colegas de laboratório por todo auxílio prestado à minha pessoa.

Aos meus colegas de graduação que perduraram ao meu lado durante as fases complicadas de estudos e nos momentos de descontração. Agradeço àqueles companheiros que me apoiaram e ajudaram nos momentos mais difíceis da minha caminhada à graduação.

RESUMO

O desenvolvimento de um procedimento para o projeto de sistemas para controle de nível de líquido em reservatórios fortemente acoplados é apresentado neste trabalho de conclusão de curso. O principal objetivo é apresentar o desenvolvimento de procedimentos para controlar o nível de água nos tanques, utilizando um controlador lógico programável (CLP) que executa as estratégias de controle. Estas estratégias são baseadas nas abordagens de sistemas a eventos discretos (SED) e linguagem Ladder. Apresenta-se a modelagem SED para o projeto de sistemas a eventos discretos em que se salienta cada etapa (evento) durante todo o processo do sistema. Para fins de análise do comportamento do sistema em estudo, apresenta-se seu modelo sob a forma de Sistemas à Variáveis Contínuas (SVC). O procedimento de projeto aplicando SED é avaliado em um modelo reduzido de um sistema de nível de líquido, levando em consideração uma configuração de três reservatórios fortemente acoplados e as estratégias de controle SED são implementadas em CLP industrial.

Palavras-chave: Controle *SED*; Controle SVC; Controle de Nível, Sistemas de Reservatórios; Controlador Lógico Programável.

ABSTRACT

The development of a procedure for the design of systems for control of liquid level in strongly coupled reservoirs is presented in this undergraduate thesis. The main objective is to present the development of procedures to control the level of water in the tanks using a programmable logic controller (PLC) that executes the control strategies. These strategies are based on Discrete Event System (SED) and Ladder language approaches. It presents the SED modeling for the design of discrete event systems in which each stage (event) is emphasized during the entire process of the system. For the purpose of analyzing the behavior of the system under study, its model is presented as Continuous Variable Systems (SVC). The design procedure applying SED is evaluated in a reduced model of a liquid level system, taking into account a configuration of three strongly coupled reservoirs and the SED control strategies are implemented in industrial PLC.

Key-words: SED control; SVC control; Level control, Reservoirs Systems; Programmable Logic Controller.

LISTA DE SÍMBOLOS

h	Nível/altura do Tanque	cm
Q_{in}	Vazão de entrada de líquido no tanque	cm ³
Q_{out}	Vazão de saída do tanque	cm ³
R	Resistencia de saída da válvula do tanque	s/m ²
Q_R	Vazão resultante entre a entrada e saída	cm ³
A	Área da secção transversal do tanque	m ²
V	Velocidade que o tanque enche ou seca	cm ³ /s
C	Capacitância do tanque	cm ³
Q_1	Vazão de entrada do tanque 1	cm ³
Q_2	Vazão de entrada do tanque 2	cm ³
Q_3	Vazão de saída do tanque 2 para o tanque 1	cm ³
Q_4	Vazão de saída do tanque 2 para o tanque 3	cm ³
Q_5	Vazão de saída do tanque 1 para o tanque 3	cm ³
h_1	Nível/altura do Tanque 1	Cm
h_2	Nível/altura do Tanque 2	Cm
h_3	Nível/altura do Tanque 3	Cm
R_1	Resistência de saída da válvula do tanque 1	s/m ²
R_2	Resistência de saída da válvula do tanque 2	s/m ²
A_1	Área da secção do tanque 1	m ²
A_2	Área da secção do tanque 2	m ²
A_3	Área da secção do tanque 3	m ²
C_1	Capacitância do tanque 1	cm ³
C_2	Capacitância do tanque 2	cm ³
C_3	Capacitância do tanque 3	cm ³

LISTA DE SIGLAS

SED	Sistema a Eventos Discretos
SVC	Sistema à Variáveis Contínuas
CLP	Controlador Lógico Programável
UCP	Unidade Central de Processamento
MIMO	Multiple Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output
RP	Reservatório Principal
RD	Reservatório de Distribuição
RS	Reservatório Secundário
mP	Sensor de nível baixo do Reservatório Principal
mS	Sensor de nível baixo do Reservatório Secundário
MS	Sensor de nível alto do Reservatório Secundário
mD	Sensor de nível baixo do Reservatório de Distribuição
MD	Sensor de nível alto do Reservatório de Distribuição

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama conceitual dos sistemas de controle de SVC e SED	22
Figura 2. Diagrama Conceitual Básico do Sistema de Controle de SED	22
Figura 3. Sistema de Abastecimento.....	25
Figura 4. Atuadores do sistema de abastecimento	25
Figura 5. Diagrama do Sistema de Abastecimento	27
Figura 6. Diagrama de SED para Controle de Nível de Tanques.....	27
Figura 7. Diagramas (a) do Reservatório Principal (b) em SED.....	28
Figura 8. Diagramas (a) do Reservatório Secundário (b) em SED.....	31
Figura 9. Diagramas (a) do Reservatório de Distribuição (b) em SED	35
Figura 10. Fluxograma do controle SED modelado.....	39
Figura 11. Programa em Ladder do controle SED	40
Figura 12. Tanque simples para modelagem matemática.....	42
Figura 13. Tanques fortemente acoplados para modelagem matemática.....	44
Figura 14. Diagrama de blocos para projeto híbrido SVC e SED.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estados do objeto de controle do Subsistema 1	29
Tabela 2. Relação entre estados e variáveis de estado do subsistema 1	29
Tabela 3. Estados do objeto de controle do Subsistema 2	32
Tabela 4. Relação entre estados e variáveis de estado do subsistema 2	33
Tabela 5. Estados do objeto de controle do Subsistema 3	36
Tabela 6. Relação entre estados e variáveis de estado do subsistema 2	36
Tabela 7. Funcionalidade do programa em Ladder	41

Sumário

Capítulo 1 – Introdução	12
1.1. Motivação.....	14
1.2. Objetivos	14
1.3. Estrutura da Monografia.....	15
Capítulo 2 – Conceitos básicos para um Projeto em Automação e Controle.....	16
2.1. Função de Transferência	16
2.2. Espaço de Estados	17
2.3. Controlador Lógico Programável.....	18
2.4. Controle SVC e SED.....	21
Capítulo 3 – Modelo SED para o Sistema de Abastecimento.....	24
3.1. Sistema de Abastecimento.....	24
3.2. Atuadores e Sensores.....	25
3.3. Funcionamento do Sistema.....	26
3.4. Modelagem do Sistema de Abastecimento por Sistemas À Eventos Discretos (SED)	27
Capítulo 4 – Modelo Matemático para o Sistema de Abastecimento.....	42
4.1. Modelo Genérico por Função de Transferência.....	42
4.2. Modelo Matemático por Espaço de Estado do Sistema de Abastecimento	44
Capítulo 5 – Conclusão.....	48
5.1. Considerações Finais.....	Erro! Indicador não definido.
5.2. Trabalhos Futuros	49

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente há pelo mundo inteiro diversos processos automatizados que exercem grande poder de operação nos mais variados campos da economia, produção, indústria, entre outros. Com os passar dos anos a automatização de sistemas, ou os sistemas de controle, foram evoluindo juntamente com o avanço da tecnologia, de tal maneira que, processos que anteriormente demandavam determinada quantidade de tempo para ser concluindo, hoje é finalizado em um tempo necessário muito menor.

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 [Ogata, 2008]. Um sistema de controle é uma interconexão de componentes formando uma configuração de sistema que produzirá uma resposta desejada do sistema. 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].

Um sistema de controle a malha aberta utiliza um dispositivo de atuação para controlar diretamente o processo sem usar retroação. Um sistema de controle a malha fechada usa uma medida da saída e a retroação deste sinal para compará-lo com a saída desejada [Dorf, 2001].

O controle automático é essencial em qualquer campo da engenharia e da ciência sendo um componente importante e intrínseco nos mais diversos tipos de sistemas, desde aplicações envolvendo veículos espaciais até operações industriais que envolvam o controle de temperatura, pressão e vazão, por exemplo [Ogata, 2008].

A teoria de controle moderno, com base na análise e na síntese em termos de sinais no domínio do tempo com o emprego de variáveis de estado,

foi desenvolvida para lidar com a crescente complexidade dos sistemas modernos e seus rigorosos requisitos relativos a precisão, a importância e ao custo em aplicações militares, espaciais e industriais [Ogata, 2008].

Com o passar dos anos e o desenvolvimento dos estudos a respeito de sistemas de controle, surgem os conceitos de sistemas de controle de variáveis contínuas (SVC) e os sistemas de controle a eventos discretos (SED). De uma forma simplificada, sistemas de controle SVC funcionam sob influências de eventos continuamente ao longo do tempo, por exemplo, a execução completa de uma atividade. Já os sistemas de controle SED sofrem influência apenas quando ocorre um evento específico ao longo do tempo, por exemplo, o início ou término de uma atividade.

Uma das aplicações mais comuns em ambientes industriais é o controle de nível de líquidos em reservatórios, haja visto que esses níveis devem ser mantidos nos patamares desejados para o sucesso da produção. Este tipo de aplicação é de suma importância para o arrefecimento de equipamentos e máquinas, permitindo a renovação por um líquido em menor temperatura, mantendo o resfriamento desejado. Também é aplicado em clubes e residências para a manutenção do nível de água de piscinas, caixas d'água e aquecedores. Essas e outras aplicações justificam um estudo sobre processos automatizados para o controle de níveis de líquidos. Se esse controle for eficiente, simples e de fácil manutenção, os benefícios são ainda maiores [Schmidt, 2008].

Além de todos os conhecimentos teóricos científicos citados acima, pela formação na área de engenharia faz-se necessário o estudo também das normas técnicas que regem os dispositivos, as instalações e todos os sistemas envolvidos em determinado projeto. Para o estudo envolvendo tanques industriais, sabemos que tanto o tipo de material da composição do tanque quando o tipo de líquido que será armazenado no mesmo influencia no projeto, o que é levado em consideração o uso da norma NBR-7821 mostra-se interessante pois esta abrange as exigências mínimas para o uso de tanques de aço-carbono destinados a armazenamento de petróleo e seus derivados líquidos. Há também a norma NBR 12217 para tanques utilizados em abastecimento de água que deve ser consultada para aplicações em escala

real similares a esta abordada neste trabalho. Outra norma que deve ser respeitada para determinados projetos com tanques de líquidos é a norma NR-20, que rege as formas de armazenamento e trabalho com líquidos inflamáveis.

1.1. Motivação

O uso do PLC nas indústrias é atualmente algo de suma importância para o funcionamento dos mais variados tipos de produção. Através deste tipo de controlador, pode-se adicionar conhecimentos científicos visando propor uma solução para determinados processos industriais e mesmo residenciais dos quais são exemplos neste trabalho de conclusão de curso. Utilizando-se de conhecimentos que abrangem desde as pioneiras teorias de controle estudadas em sala de aula até os mais avançados e diversificados métodos de controle, busca-se então aplicar estes conhecimentos em modelo objeto de estudo deste trabalho. Neste trabalho conhecimentos que abrangem a área de automação e controle serão aplicados para implementar o controle de níveis de líquidos em reservatórios utilizando um controlador lógico programável compactlogix 5000.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Neste trabalho de conclusão de curso propõe-se o desenvolvimento de um projeto de controle aplicado em Sistemas a Eventos Discretos (SED) que se baseia em técnicas de sistemas embarcados em CLP para controle de um sistema de nível de tanques através da teoria de eventos discretos. Desenvolvendo um modelo SED do sistema de controle para fluidos dinâmicos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver e aplicar modelo baseado em Sistemas a Eventos Discretos do sistema de controle para fluidos dinâmicos;
- Desenvolver e aplicar modelo baseado em Sistemas à Variáveis Contínuas do sistema de controle para fluidos dinâmicos;

1.3. Estrutura da Monografia

No capítulo 2 apresenta-se alguns conceitos básicos e de grande importância para o desenvolvimento de quaisquer projetos de controle. Os conceitos de Função de Transferência, Espaço de Estado, Controlador Lógico Programável, Controle SED e Controle SVC.

No capítulo 3 é feita uma breve abordagem sobre o sistema de abastecimento estudado neste trabalho e também o modelo matemático baseado em Sistemas à Eventos Discretos (SED).

No capítulo 4 temos a modelagem matemática genérica de um tanque por função de transferência e a modelagem matemática do sistema de abastecimento estudado neste trabalho, composto por dois tanques fortemente acoplados, através do modelo em espaço de estado, assim como algumas futuras possíveis implementações para melhoria deste sistema.

No capítulo 5 é apresentado as considerações finais dos estudos de modo a buscar um fechamento do raciocínio a respeito de tudo que foi mostrado neste trabalho e também apresentado uma proposta de projeto para o futuro, visando a implementação de um sistema híbrido composto pelos modelos SED e SVC estudados neste trabalho.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS BÁSICOS PARA UM PROJETO EM AUTOMAÇÃO E CONTROLE

Os estudos sobre Função de Transferência e Espaço de Estado são abordados neste capítulo, bem como conceitos sobre CLP e Controles SVC e SED. O conhecimento sobre tais conteúdos é de suma importância para projetos na área de automação e controle. A modelagem matemática de sistema de controle, por meio de função de transferência ou espaço de estado por exemplo, é uma ferramenta que disponibiliza ao operador definir os parâmetros necessários para que a resposta do sistema seja a mais aproximada possível baseada na sua referência.

2.1. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

A função de transferência de um sistema representado por uma equação diferencial linear invariante no tempo é definida como a relação entre a transformada de Laplace da saída (função de resposta) e a transformada de Laplace da entrada (função de excitação), admitindo-se todas as condições iniciais nulas [Ogata, 2008].

Um sistema linear invariante no tempo geral pode ser representado por equações diferenciais da forma:

$$\begin{aligned} a_n y^n + a_{n-1} y^{n-1} + \dots + a_1 \dot{y} + a_0 y \\ = b_m u^m + b_{m-1} u^{m-1} + \dots + b_1 \dot{u} + b_0 u \end{aligned} \quad (2.1)$$

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

Ao se aplicar a transformada de Laplace na equação (2.1), considerando que as condições iniciais do sistema sejam nulas, a função de transferência do sistema é dada por:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2.2)$$

A função de transferência, como a equação (2.2) por exemplo, 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, 2013].

2.1.1. Análise de estabilidade por Função de Transferência

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 característico. 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, todos 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].

2.2. ESPAÇO DE ESTADOS

Alguns importantes conceitos devem ser entendidos para que seja possível um embasamento da teoria de controle baseada em espaço de estados, são eles: estados.

O estado de um sistema é um conjunto de variáveis tal que o conhecimento dos valores destas variáveis e das funções de entrada, com as equações que descrevem a dinâmica, fornecem os estados futuros e a saída futura do sistema [Dorf, 2001].

As variáveis de estado de um sistema dinâmico são aquelas que constituem o menor conjunto de variáveis capaz de determinar o estado desse sistema dinâmico. [Ogata, 2008]. As variáveis de estado são as variáveis que determinam o comportamento futuro de um sistema quando são conhecidos o estado presente do sistema e os sinais de excitação [Dorf, 2001].

Se forem necessárias n variáveis de estado para descrever completamente o comportamento de dado sistema, então essas n variáveis de estado poderão ser consideradas os n componentes de um vetor x , este vetor é chamado de *vetor de estado* [Ogata, 2008].

Considerando que em um sistema de múltiplas entradas e saídas haja m entradas $u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)$, j saídas $y_1(t), y_2(t), \dots, y_j(t)$ e n saídas referentes as variáveis de estado $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$, e é dado por:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) + D(t)u(t)\end{aligned}\tag{2.3}$$

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

Para um sistema invariante no tempo a equação (2.3) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\tag{2.4}$$

2.3. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL

O Controlador Lógico Programável, mais comumente chamado de CLP ou PLC (Programmable Logic Controller), é um dispositivo de aplicação industrial em controles microprocessados que assemelha-se bastante a um computador, possuindo capacidade de ser programado e conectado a periféricos ou dispositivos de entrada e saída, a partir dos quais podem gerir sistemas industriais facilitando o trabalho em áreas de risco a saúde humana por exemplo.

O CLP era definido como um dispositivo eletrônico para aplicações industriais que, para execução de funções como operações lógicas,

sequencialização, temporização e computação numérica, possui uma memória onde ficam gravadas na forma de uma lista de palavras de comando que é o procedimento de controle. Baseado no conteúdo desta memória, a operação de máquinas e/ou processos são controlados através de sinais de saída digitais e/ou analógicos [Miyagi, 1996].

O CLP possui uma arquitetura completa assim como outros tipos de computadores, apesar de seu reduzido tamanho ele é composto por:

- Uma Fonte de Alimentação que 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. Há também dois tipos de fontes de alimentação, a fonte *source* que é aquela fonte interna ao controlador e a fonte *sink* que é a fonte externa ao controlador.
- Uma Unidade Central de Processamento (UCP) responsável pela execução do programa do usuário, atualização da memória de dados e memória-imagem das entradas e saídas. A UCP é composta por vários componentes como microprocessador, chip de memória, interface de I/O e outros circuitos integrados para controlar a lógica e monitorar a comunicação.
- Memórias do tipo Fixo e Volátil, que se abrangem ainda em:
 - Memória EPROM: que contém o programa elaborado pelo fabricante e responsável pelo start-up do controlador
 - Memória do Usuário: onde é armazenado o programa aplicativo do usuário.
 - Memória de dados: que armazena os dados retornados da aplicação do usuário.
 - Memória das entradas e saídas: responsável pela reprodução dos estados dos dispositivos de campo de entrada (chaves, seletoras, limitadores) e de saída (partida de motores, solenoides)
- Dispositivos de entrada e saída são os módulos analógicos e digitais acoplados ao controlador programável e que suportam os mais diversos componentes como:

- Módulos Digitais podem ser de entrada (input) ou saída (output) e são estes os responsáveis pela transferência de sinais de tensão para os dispositivos, interpretando como bit “1” ou “0”;
- Módulos Analógicos também podem ser de entrada ou saída, porém possuem a capacidade de comunicação mensurando os dados transferidos, por exemplo um sinal elétrico.
- Terminal de programação é um periférico que serve de meio de comunicação entre o usuário e o controlador, podendo ser um computador ou um dispositivo portátil composto de teclado e display.

Algumas características do CLP que o difere de outros dispositivos de auxílio no controle de sistemas industriais são: linguagens de programação em alto nível (inclusive gráficas, como a linguagem Ladder por exemplo); sua estrutura proporciona uma simplificação dos quadros e/ou painéis elétricos; uma alta confiabilidade operacional, visto que suas alterações de operação se baseiam mais na parte programacional do que na estrutura das conexões de fios e cabos elétricos; possui comunicação em rede (wireless ou cabeada); entre outras.

2.3.1. Programação Em Linguagem Ladder

O Ladder é uma linguagem de alto nível e sua programação se distingue das outras principalmente pela sua característica de implementação gráfica, o uso de “desenhos” e da interpretação de circuitos facilita sua programação, que se assemelha bastante a esquemas elétricos, utilizando de lógicas de diagramas e comandos de contatos. Neste tipo de linguagem, pode-se utilizar dois tipos de instrução, as instruções de entrada que são responsáveis por questionar dados do sistema em comando e as instruções de saída que são responsáveis por executar determinadas ações baseadas nas respostas das instruções de entrada.

A estrutura básica de uma programação em linguagem Ladder parte de duas linhas verticais, também conhecidas como barras alimentadoras, onde os

comandos de entrada (rede de contatos) devem ser inseridos a partir da barra mais a esquerda, conectada por uma linha horizontal com a barra a direita, e os comandos de saída mais próximo da barra da direita (bobina ou relé).

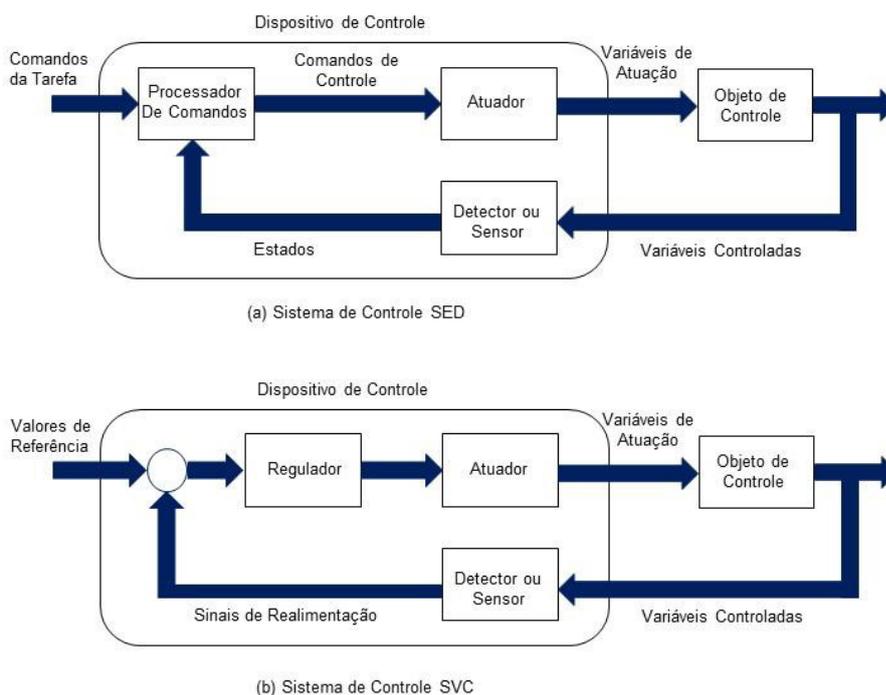
O diagrama ladder é apenas uma representação lógica, trabalhando somente com símbolos, não considerando a tensão envolvida nas barras de alimentação nem a intensidade da corrente pelo circuito. Os contatos e outros dispositivos, no diagrama, estão em cada momento abertos ou fechados, e as bobinas, por consequência, ficam desenergizadas ou energizadas. O Controlador Lógico Programável examina a continuidade de cada linha, isto é, verifica se todas as variáveis de entrada são verdadeiras. Trata-se de uma “continuidade lógica”. Cada linha ladder permite programar desde funções binárias até funções digitais complexas [Castrucci, 2010].

2.4. CONTROLE SVC E SED

O controle de SVC é uma das técnicas mais efetivas para a implementação do controle quantitativo. Esta técnica é utilizada para controlar sistemas que possam ser governados através de valores mensuráveis como o volume de líquido em um tanque. No caso do controle qualitativo, a técnica mais representativa de sua implementação é o controle de SED, onde considera-se que aos vários elementos que compõem o objeto de controle possuem um número finito de estados que podem assumir. Por exemplo: liga/desligar o motor bomba, abrir/fechar a válvula de um tanque [Miyagi, 1996].

Diversas tecnologias presentes em processos de manufatura, rede de comunicação, controle de tráfego aéreo, etc., podem ser descritas por modelos com algumas características em comum. Nestes sistemas, o espaço de estados é em geral discreto e mudanças de estado acontecem somente em resposta à ocorrência de eventos. Essas características os distinguem dos sistemas que tem sua dinâmica dirigida pelo tempo e seu espaço de estado contínuo, cuja modelagem é tradicionalmente feita através das equações diferenciais e das equações a diferenças. Tais sistemas são denominados Sistemas a Eventos Discretos (SED) [Souza, 2006].

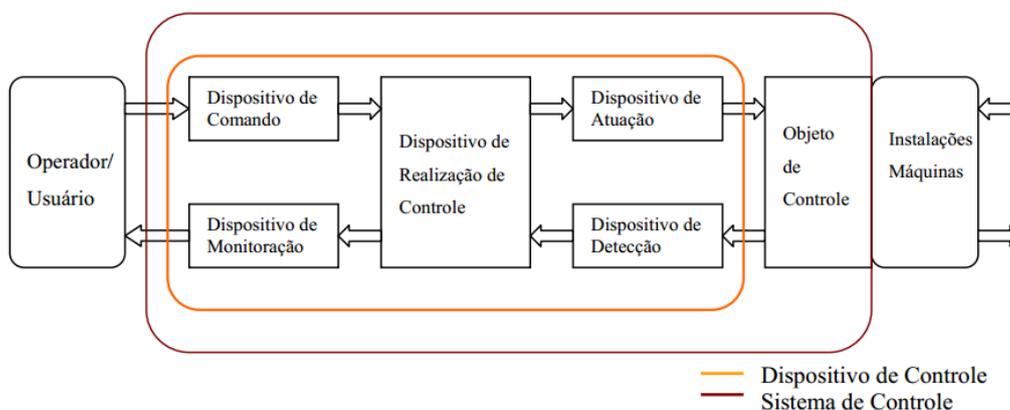
Figura 1. Diagrama conceitual dos sistemas de controle de SVC e SED



Fonte: Adaptado de Miyagi, 1996

A Figura 1 ilustra uma comparação entre o sistema de controle de SVC e o sistema de controle de SED. Nos sistemas de controle de SED, não existe o conceito de valor de referência, que é substituído pelo comando da tarefa. O comando da tarefa, o estado identificado e a saída do processador de comandos são, em geral, valores discretos (ou seja, qualitativos) [Miyagi, 1996].

Figura 2. Diagrama Conceitual Básico do Sistema de Controle de SED



Fonte: Souza, 2006

A Figura 2 ilustra as funções do sistema de controle com SED. Composto pelos blocos operacionais onde possuímos uma divisão para o Dispositivo de Controle e para o Sistema de controle. Dentro do Dispositivo de Controle são dispostos o Dispositivo de Comando que pode ser entendido como a programação pré-escrita pelo Operador ou Usuário; o Dispositivo de Realização de Controle pode ser interpretado como o PLC atuante neste sistema; o Dispositivo de Atuação é interpretado como os atuadores do sistema (bombas de recalque por exemplo); o Dispositivo de Detecção são os sensores responsáveis por comunicar as respostas da planta aos efeitos dos atuadores; e por fim o Dispositivo de Monitoração que pode ser visto como um sinalizador para o Operador/Usuário sobre a resposta do sistema a dado comando.

O tipo de controle chamado de controle híbrido, que une o controle SVC e o controle SED em um só sistema, se tornou cada vez mais frequente na indústria. Com o decréscimo do custo dos CLP's e a evolução das técnicas de transmissão de dados, sistemas de grande porte com funções distribuídas em níveis de planejamento (gerenciamento) e níveis de operação (automática/manual) se tornaram mais usuais [Miyagi, 1996].

No controle SED, operações lógicas, aritméticas e temporizações são realizadas por dispositivos tais como operadores lógicos, aritméticos e temporizadores. Estes dispositivos possuem sinais de entrada e/ou saída que podem assumir valores discretos. Os CLP's são providos de todas estas operações básicas de controle e representam o próprio dispositivo de realização do controle, como peça fundamental para a execução das atividades do dispositivo de controle.

CAPÍTULO 3

MODELO SED PARA O SISTEMA DE ABASTECIMENTO

Neste capítulo é apresentado o sistema de abastecimento estudado neste trabalho, detalhando alguns itens como os atuadores e sensores envolvidos. Também é abordada a modelagem baseada em sistemas a eventos discretos, analisando cada passo dos estados envolvidos no processo.

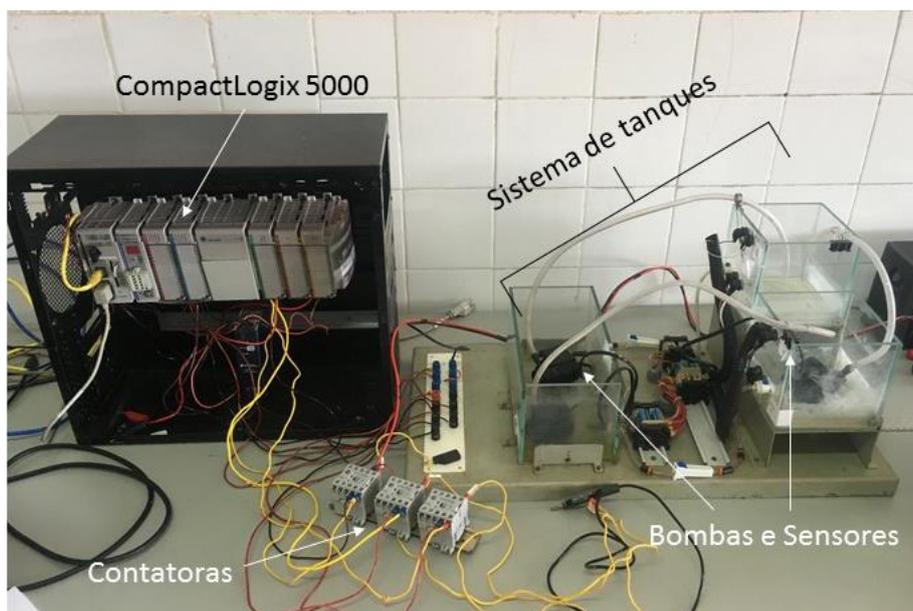
3.1. SISTEMA DE ABASTECIMENTO

O sistema de abastecimento que é objeto de estudo deste trabalho de conclusão de curso pode ser comparado a sistemas de abastecimento de água em um edifício e está ilustrado por foto na Figura 3 e sua representação por diagrama na Figura 5. A composição do sistema é dada por:

- 03 (três) reservatórios de água
- 03 (três) bombas
- 05 (cinco) sensores de nível

Entre os reservatórios; o maior deles é o reservatório inferior e denominado de reservatório principal (RP): ele representa a rede de abastecimento normal da concessionária; o reservatório superior, denominado reservatório de distribuição (RD), representa a caixa de alimentação direta de consumo; e por fim, o último reservatório é denominado como um reservatório secundário (RS).

Figura 3. Sistema de Abastecimento



Fonte: Autor

3.2. ATUADORES E SENSORES

Os atuadores do sistema são aqueles componentes que exercem uma função direta no processo controlado; sem eles não seria possível completar tal tarefa. São os atuadores que ao receberem um sinal de controle geram uma resposta para atuar no sistema. Em nosso sistema podemos citar como atuadores as bombas (1, 2 e 3), essenciais para o fluxo de líquido no sistema, fazendo todo o processo de abastecimento de cada reservatório. Na Figura 4 estão as fotos dos atuadores no sistema implementado neste trabalho, a contatora teve papel de chavear as bombas de acordo com o comando vindo do CLP.

Figura 4. Atuadores do sistema de abastecimento



(a) Atuador

(b) Contatora

Fonte: Autor

Os sensores são partes essenciais de qualquer sistema a ser controlado, visto que esses são os “olhos” do controlador em relação ao que está acontecendo durante todo o processo que está ocorrendo. Em nosso sistema usamos sensores de níveis para detectar o nível de líquido atual no tanque e a partir dessa informação poder precisamente decidir qual tarefa executar em seguida. Nossos sensores são mP (nível baixo no reservatório principal), mS (nível baixo no reservatório secundário), MS (nível alto no reservatório secundário), mD (nível baixo no reservatório de distribuição), MD (nível alto no reservatório de distribuição).

3.3. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

O controle do nível de água dos reservatórios é feita de tal forma que o reservatório de distribuição (RD) é abastecido pelo reservatório principal (RP) até que seja atingido o nível baixo de água (mP) neste reservatório e a partir deste ponto o RD passa a ser abastecido pelo reservatório secundário (RS). Assim é de suma importância que os sensores estejam funcionando de forma a não comprometer o desempenho do sistema. Além do sensor mP, os demais sensores também atuarão da seguinte forma:

- Caso o sensor mP seja acionado, representando que o nível de água neste reservatório está baixo, se uma das bombas (1 e/ou 2) estiverem ativadas, as mesmas serão desligadas. Para o sensor mS, o funcionamento é similar ao mP;

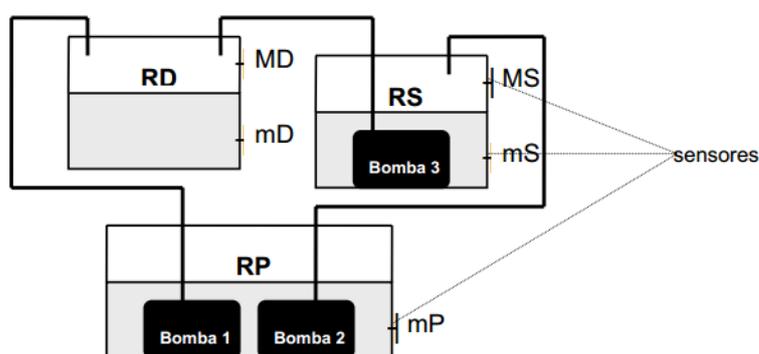
- O sensor mD, quando acionado representa que há a necessidade imediata de fornecimento de água para este reservatório;

- Quando os sensores MD e MS estão acionados representa que o nível de água neste dois reservatórios está alto e o abastecimento de água deve ser desativado.

3.4. MODELAGEM DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO POR SISTEMAS À EVENTOS DISCRETOS (SED)

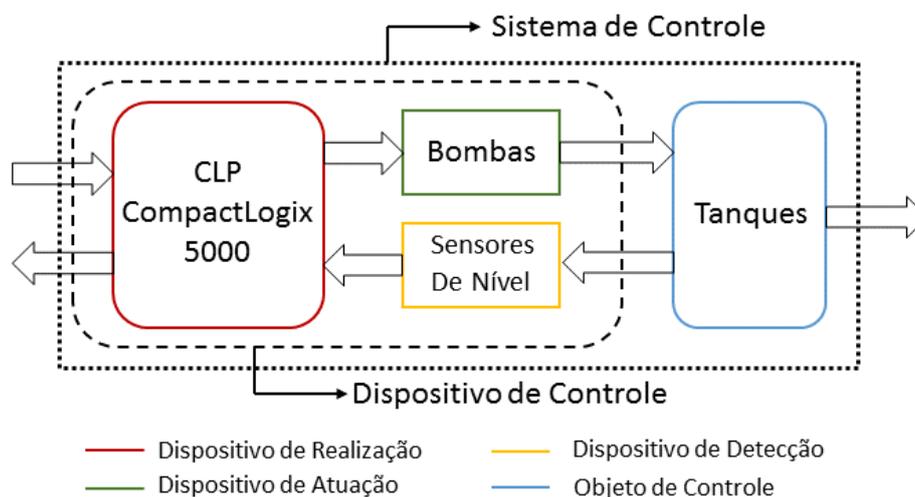
O modelo de sistema representado na Figura 5 pode ser relacionado com o diagrama conceitual básico do sistema de controle de SED representado na Figura 2. Obtemos assim uma nova representação do modelo de sistema de abastecimento, representado na Figura 6.

Figura 5. Diagrama do Sistema de Abastecimento



Fonte: Souza, 2006

Figura 6. Diagrama de SED para Controle de Nível de Tanques



Fonte: Adaptado de Souza, 2006

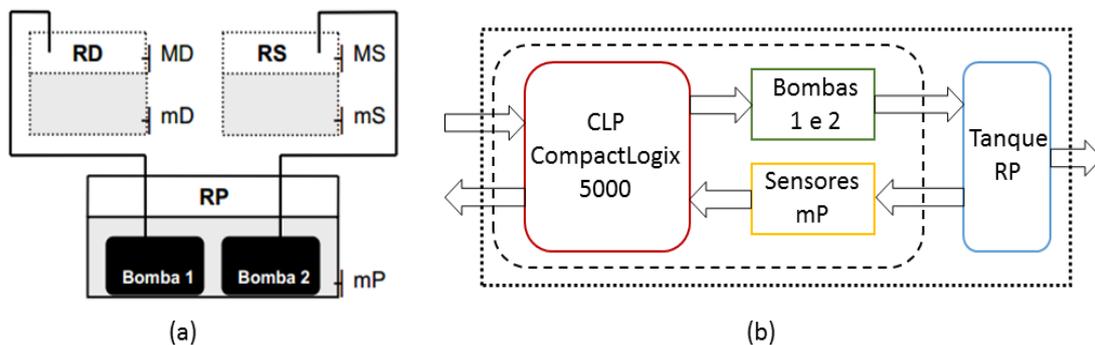
A Figura 6 representa o sistema de abastecimento completo, abrangendo os três tanques como objetos de controle, as três bombas como dispositivos de atuação e os 5 sensores de níveis como dispositivos de detecção. De forma a tornar mais compreensível este estudo, o sistema

completo será dividido em subsistemas, onde cada um possui seu próprio objeto de controle, dispositivo de atuação e detecção. Além de que através dos estudos de eventos discretos, estes subsistemas possuem uma característica de interdependência.

3.4.1. Subsistema 1

No subsistema 1 o objeto de controle será o Reservatório Principal (RP), onde quando o nível de água estiver abaixo do sensor mP (dispositivo de detecção), as bombas 1 e 2 (dispositivos de atuação) serão desligadas e só serão novamente religadas caso o nível de água baixo for detectado no sensores mD (para a bomba 1), e mS (para a bomba 2).

Figura 7. Diagramas (a) do Reservatório Principal (b) em SED



Fonte: Adaptado de Souza, 2006

❖ MODELAGEM DO SUBSISTEMA 1:

- **Modelagem do Objeto de Controle**

As variáveis de estado podem ser definidas como:

- z_1 : variável binária que indica a situação do nível de água dentro do RP: mínimo ou não;
- z_2 : variável binária que indica se existe escoamento do líquido contido no reservatório principal;

Portanto, a quantidade máxima possível de estados que o objeto de controle pode assumir será $2 \times 2 = 4$. Assim, os estados do processo podem ser relacionados como na tabela a seguir:

Tabela 1. Estados do objeto de controle do Subsistema 1

Estado	Descrição
0	(Início do processo) Nível > mP
1	Bombas 1 e/ou 2 acionadas, há escoamento do líquido
2	Nível < mP
3	Bombas 1 e/ou 2 desligadas, não há escoamento do líquido

Há uma particularidade neste processo, como não há uma reposição de água de forma automática, dependendo do operador do sistema fazê-la manualmente, o processo não pode ser considerado cíclico. Há ainda a ressalva de que os Estados 2 e 3 podem ser permutados, caso os tanques RD e RS estejam cheios.

A relação entre os estados e as variáveis de estado podem ser representadas a seguir:

Tabela 2. Relação entre estados e variáveis de estado do subsistema 1

	z_1	z_2
Estado 0	N	\bar{B}
Estado 1	N	B
Estado 2	L	\bar{B}
Estado 3	\emptyset	\bar{B}

Onde, L = nível baixo, N = nível normal, B = bomba 1 e/ou bomba 2 ligadas, \bar{B} = bomba 1 e/ou bomba 2 desligadas.

As variáveis de entrada do objeto de controle do subsistema 1, são:

- v_1 : variável binária que representa os estados ligado/desligado da bomba 1;
- v_2 : variável binária que representa os estados ligado/desligado da bomba 2;

Assim sendo, equações de estado podem ser escritas como:

$$\begin{cases} z_1(k+1) = h_1\{z_1(k), z_2(k)\} \\ z_2(k+1) = h_2\{z_1(k), z_2(k), v_1(k), v_2(k)\} \end{cases} \quad (3.1)$$

Onde h_1 e h_2 são funções.

A variável de saída do objeto de controle é:

- w_1 : variável binária que indica se o nível de água no reservatório atingiu ou não o valor mínimo;

A equação de saída do objeto de controle pode ser escrita como:

$$w_1(k) = q_1\{z_1(k)\} \quad (3.2)$$

Onde, q_1 é uma função.

- **Modelagem do Dispositivo de Controle**

- **Dispositivo de Atuação (Bombas)**

Os sinais de saída das bombas são as variáveis de entrada v_1 e v_2 do objeto de controle. As bombas são controladas diretamente pelo sinal de saída do CLP, logo, os sinais de controle enviados por são as variáveis de entrada das bombas, então:

- y_{b1} : variável binária que controla o liga/desliga da bomba 1;
- y_{b2} : variável binária que controla o liga/desliga da bomba 2;

Considerando que não há atraso na atuação das bombas, temos as seguintes relações:

$$\begin{cases} v_1(k) = g_{b1}\{y_{b1}(k)\} \\ v_2(k) = g_{b2}\{y_{b2}(k)\} \end{cases} \quad (3.3)$$

Onde g_{b1} e g_{b2} são funções.

- **Dispositivo de Detecção (sensor mP)**

O sensor mP possui uma única entrada que é a saída do objeto de controle w_1 . A saída mP será:

- u_{D1} : variável binária que indica o estado ativo ou não do sensor mP

- **Fase 2: Bomba 3 ligada**

A bomba 3 só será ativada quando o nível de água no reservatório de distribuição (RD) estiver abaixo de mD e o nível no reservatório secundário acima do mS. A bomba 3 será desligada quando o nível de água em RD atingir o sensor MD ou ficar abaixo do sensor mS.

- ❖ **MODELAGEM DO SUBSISTEMA 2:**

- **Modelagem do Objeto de Controle**

As variáveis de estado podem ser definidas como:

- z_3 : variável binária que indica a situação do nível de água dentro do RS: mínimo ou máximo;
- z_4 : variável binária que indica se existe introdução de água no reservatório secundário (RS);
- z_5 : variável binária que indica se existe escoamento de água contida no reservatório secundário (RS).

Portanto, a quantidade máxima possível de estados que o objeto de controle pode assumir será $2 \times 2 \times 2 = 8$. Os estados do processo podem ser relacionados como na Tabela 3 a seguir. Os demais estados possíveis não relacionados são considerados estados anormais.

Tabela 3. Estados do objeto de controle do Subsistema 2

Estado	Descrição
0	(Início do processo) Nível < mS, nível mínimo
1	Bomba 2 acionada, há introdução de água
2	Nível = MS, nível máximo atingido
3	Bomba 2 desligada, não há introdução de água
4	Bomba 3 acionada, há escoamento de água
5	Bomba 3 desligada, não há escoamento de água

Este processo, diferentemente do subsistema 1, pode ser considerado cíclico e o próximo estado, após o Estado 5, será o Estado 0. A relação entre os estados e as variáveis de estado estão representadas na Tabela 4.

Tabela 4. Relação entre estados e variáveis de estado do subsistema 2

	z_3	z_4	z_5
Estado 0	L	$\overline{B_2}$	$\overline{B_3}$
Estado 1	L	B_2	$\overline{B_3}$
Estado 2	M	B_2	$\overline{B_3}$
Estado 3	M	$\overline{B_2}$	$\overline{B_3}$
Estado 4	M	$\overline{B_2}$	B_3
Estado 5	L	$\overline{B_2}$	$\overline{B_3}$

Onde, L = nível baixo, M = nível máximo, B_2 = bomba 2 ligada, B_3 = bomba 3 ligada, $\overline{B_2}$ = bomba 2 desligada, $\overline{B_3}$ = bomba 3 desligada.

A variável de entrada do objeto de controle do subsistema 2, é:

- v_3 : variável binária que representa os estados ligado/desligado da bomba 3;

Assim sendo, equações de estado podem ser escritas como:

$$\begin{cases} z_3(k+1) = h_3\{z_3(k), z_4(k), z_5(k)\} \\ z_4(k+1) = h_4\{z_3(k), z_4(k), z_5(k), v_2(k)\} \\ z_5(k+1) = h_5\{z_3(k), z_4(k), z_5(k), v_3(k)\} \end{cases} \quad (3.5)$$

Onde h_3 , h_4 , h_5 são funções.

As variáveis de saída do objeto de controle são:

- w_2 : variável binária que indica se o nível de água no reservatório atingiu ou não o valor mínimo;
- w_3 : variável binária que indica se o nível de água no reservatório atingiu ou não o valor máximo;

A equação de saída do objeto de controle pode ser escrita como:

$$\begin{cases} w_2(k) = q_2\{z_3(k)\} \\ w_3(k) = q_3\{z_4(k)\} \end{cases} \quad (3.6)$$

Onde, q_2 e q_3 são funções.

- **Modelagem do Dispositivo de Controle**

- **Dispositivo de Atuação (Bomba 3)**

A variável de entrada da bomba 3, y_{b3} , é o sinal de saída do CLP. Enquanto a variável de saída, é a variável v_3 de entrada do dispositivo de controle (RS).

- y_{b3} : variável binária que controla o liga/desliga da bomba 3
Considerando que não haja atraso na atuação da bomba 3, temos que a relação entre a saída e a entrada é dada por:

$$v_3(k) = g_{b3}\{y_{b3}(k)\} \quad (3.7)$$

Onde, g_{b3} é uma função.

- **Dispositivo de Detecção (sensores de nível)**

As entradas dos sensores mS e MS são as saídas w_2 e w_3 do Reservatório Secundário, e as suas saídas serão:

- u_{D2} : variável binária que indica o estado ligado/desligado do sensor mS
- u_{D3} : variável binária que indica o estado ligado/desligado do sensor MS

Assim sendo, teremos as seguintes relações entre as entradas e saídas:

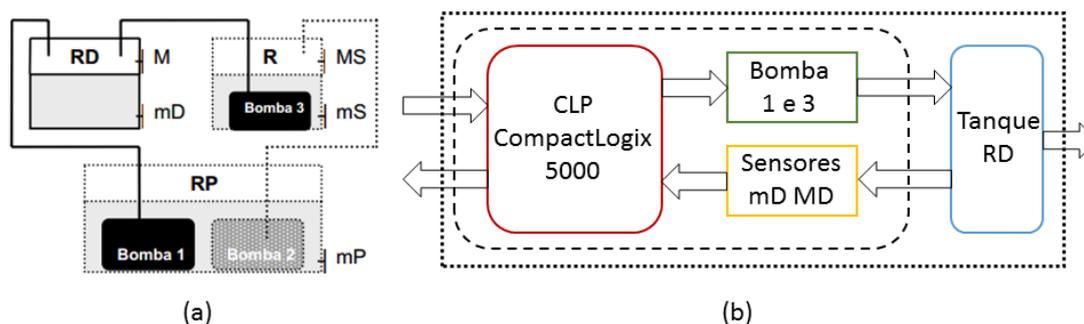
$$\begin{cases} u_{D2}(k) = f_{D2}\{w_2(k)\} \\ u_{D3}(k) = f_{D3}\{w_3(k)\} \end{cases} \quad (3.8)$$

Onde, f_{D2} e f_{D3} são funções.

3.4.3. Subsistema 3

No subsistema 3, representado pela Figura 9, o objeto de controle será o Reservatório de Distribuição (RD), onde a principal característica deste subsistema é a falta de um dispositivo direto de atuação, sendo a bomba 1 e bomba 3 são consideradas dispositivos indiretos, pois o controle principal destes dispositivos de atuação se encontra no subsistema 1 e 2 respectivamente.

Figura 9. Diagramas (a) do Reservatório de Distribuição (b) em SED



Fonte: Adaptado de Souza, 2006

Neste subsistema, assim como no anterior, há dois dispositivos de atuação, ambos de forma indireta, fazemos então uma análise de suas atuações de forma separada, assim teremos duas fases de atuação neste subsistema.

- **Fase 1: Bomba 1 ligada**

A bomba 1 será ativada quando o nível de água do reservatório secundário (RD), estiver abaixo do sensor mD e será desativada quando o sensor MD for chaveado, significando que atingiu o nível máximo de água no reservatório.

Esta análise foi feita considerando que o nível de água no reservatório principal (RP) esteja acima do sensor mP. Caso o nível de água no reservatório principal seja baixo (sensor mP chaveado) a bomba 1 é desligada e somente será ligada novamente quando o nível de água no RD for abaixo de mD e o nível de água no RP for acima de mP.

- **Fase 2: Bomba 3 ligada**

Prioritariamente o abastecimento do reservatório de distribuição (RD) é feito pelo reservatório principal (RP), na falta de líquido suficiente neste (nível < mP) é que o reservatório secundário (RS) entra em operação no sistema.

A bomba 3 só será ativada quando o nível de água no reservatório de distribuição (RD) estiver abaixo de mD e o nível no reservatório secundário acima do mS (assumindo não haver líquido

suficiente para o abastecimento no reservatório principal). A bomba 3 será desligada quando o nível de água em RD atingir o sensor MD ou ficar abaixo do sensor mS, no reservatório secundário (RS).

❖ **MODELAGEM DO SUBSISTEMA 3:**

• **Modelagem do Objeto de Controle**

As variáveis de estado podem ser definidas como:

- z_6 : variável binária que indica a situação do nível de água dentro do RD: mínimo ou máximo;
- z_7 : variável binária que indica se existe introdução de água no reservatório de distribuição (RD);

Portanto, a quantidade máxima possível de estados que o objeto de controle pode assumir será $2 \times 2 = 4$. Os estados do processo podem ser relacionados como na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5. Estados do objeto de controle do Subsistema 3

Estado	Descrição
0	(Início do processo) Nível < mD, nível mínimo
1	Bomba 1 acionada, há introdução de água. *Caso B_1 não possa abastecer, B_3 será ativada
2	Nível = MD, nível máximo atingido
3	Bomba 1 (ou bomba 3) desligada, não há introdução do água no reservatório

Este processo, similar ao subsistema 2, pode ser considerado cíclico e o próximo estado, após o Estado 3, será o Estado 0.

A relação entre os estados e as variáveis de estado estão representadas na Tabela 6.

Tabela 6. Relação entre estados e variáveis de estado do subsistema 2

	z_6	z_7
Estado 0	L	$\overline{B_1}$ (ou $\overline{B_3}$)
Estado 1	L	B_1 (B_3 caso B_1 não possa operar)
Estado 2	M	B_1 (ou B_3)
Estado 3	M	$\overline{B_1}$ (ou $\overline{B_3}$)

Onde, L = nível baixo, I = nível intermediário, M = nível máximo, B_1 = bomba 1 ligada, B_3 = bomba 3 ligada, $\overline{B_1}$ = bomba 1 desligada, $\overline{B_3}$ = bomba 3 desligada.

Não há uma variável de entrada do objeto de controle do subsistema 3, pois não há nenhum dispositivo de atuação direta neste subsistema.

Assim sendo, equações de estado podem ser escritas como:

$$\begin{cases} z_6(k+1) = h_6\{z_6(k), z_7(k)\} \\ z_7(k+1) = h_7\{z_6(k), z_7(k), v_1(k), v_3(k)\} \end{cases} \quad (3.9)$$

Onde h_6, h_7 são funções.

As variáveis de saída do objeto de controle são:

- w_4 : variável binária que indica se o nível de água no reservatório RD atingiu ou não o valor mínimo;
- w_5 : variável binária que indica se o nível de água no reservatório RD atingiu ou não o valor máximo;

A equação de saída do objeto de controle pode ser escrita como:

$$\begin{cases} w_4(k) = q_4\{z_6(k)\} \\ w_5(k) = q_5\{z_7(k)\} \end{cases} \quad (3.10)$$

Onde, q_4 e q_5 são funções.

• Modelagem do Dispositivo de Controle

➤ Dispositivo de Detecção (sensores de nível)

As entradas dos sensores mD e MD são as saídas w_4 e w_5 do objeto de controle (RD), e as suas saídas serão:

- u_{D4} : variável binária que indica o estado ligado/desligado do sensor mD
- u_{D5} : variável binária que indica o estado ligado/desligado do sensor MD

Assim sendo, teremos as seguintes relações entre as entradas e saídas:

$$\begin{cases} u_{D4}(k) = f_{D4}\{w_4(k)\} \\ u_{D5}(k) = f_{D5}\{w_5(k)\} \end{cases} \quad (3.11)$$

Onde, f_{D4} e f_{D5} são uma funções.

3.4.4. Modelagem do Dispositivo de Realização do Controle (CLP) do Sistema Completo de Abastecimento

As variáveis de entrada do CLP, correspondem as saídas dos dispositivos de detecção dos três subsistemas modelados anteriormente e podem ser representadas pelo vetor coluna abaixo:

$$u = \begin{bmatrix} u_{D1} \\ u_{D2} \\ u_{D3} \\ u_{D4} \\ u_{D5} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

As variáveis de saída do CLP são as mesmas variáveis de entrada dos dispositivos de atuação (Bombas 1, 2 e 3). Logo, podemos escrever na forma de um vetor coluna do tipo:

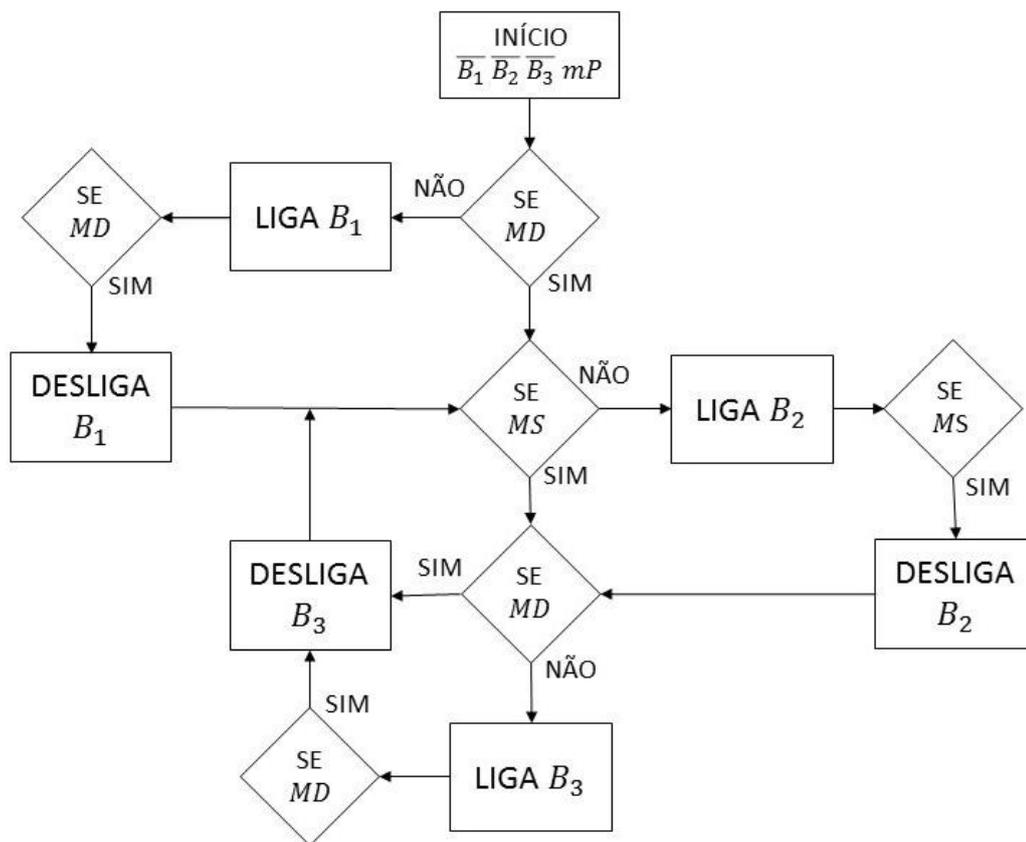
$$y = \begin{bmatrix} y_{b1} \\ y_{b2} \\ y_{b3} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Logo, podemos definir as equações de estado do dispositivo de controle $x(k)$ e da saída $y(k)$ com relação a entrada $u(k)$ da seguinte maneira:

$$\begin{cases} x(k+1) = f\{x(k), u(k)\} \\ y(k) = g\{x(k)\} \end{cases} \quad (3.14)$$

As equações obtidas através do modelamento SED deste capítulo regem o funcionamento do sistema de abastecimento considerando seus estados “ligados” ou “desligados”, assim sendo os valores de todas as variáveis de estados estão sempre sendo representadas por “1” ou “0”. Assim sendo podemos implementar esse modelamento no CLP usando a lógica Ladder de programação.

Figura 10. Fluxograma do controle SED modelado

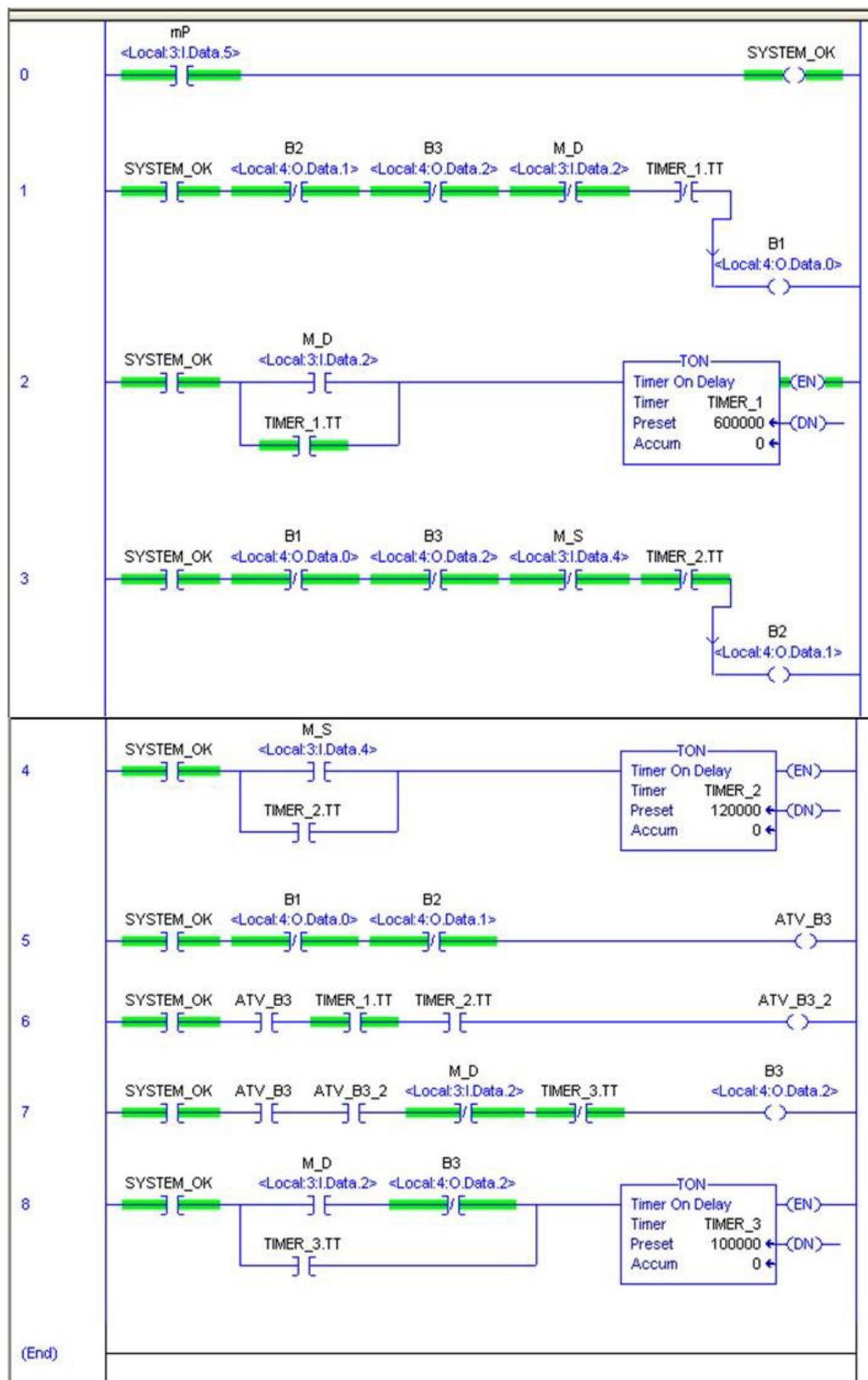


Fonte: Autor

A Figura 10 mostra o fluxograma do comportamento do sistema implementado no CLP utilizando a linguagem Ladder como ferramenta de programação. Temos então a inicialização do sistema com todas as três bombas (B_1, B_2 e B_3) desligadas e pressupondo que há nível de líquido suficiente no Reservatório Principal para a alimentação dos demais tanques. Assim sendo, todas as verificações são feitas para que o sistema aplique o que foi modelado anteriormente. São verificados os níveis de cada tanque e assinalado caso haja necessidade de ligar ou desligar determinado atuador no sistema. Logo o CLP possui autonomia no gerenciamento do líquido em casa reservatório.

Na Figura 11 está ilustrado o programa em linguagem Ladder proveniente do entendimento do funcionamento do sistema de abastecimento a partir da modelagem SED encontrada anteriormente neste capítulo.

Figura 11. Programa em Ladder do controle SED



Fonte: Autor

Na Tabela 7 é feita a descrição das linhas do código Ladder implementado no CLP e representado na Figura 11. Os timers implementados neste código possuem temporização baseada em medições através de testes executados na planta. Foram avaliados o tempo para encher cada um dos tanques, o tempo necessário para esvaziar até o sensor de nível mínimo e a partir de então feito um alinhamento entre os timers para que sempre haja um fornecimento de líquido baseado na modelagem SED.

Tabela 7. Funcionalidade do programa em Ladder

Linha	Funcionalidade
0	Faz o teste inicial do sistema, Se nível de líquido > mP
1	Verifica se precisa de água no RD, se B2 e B3 estão desligadas, liga B1
2	Timer para manter B1 desligada
3	Verifica se precisa de água no RS, se B1 e B3 estão desligadas, liga B2
4	Timer para manter B2 desligada
5	Verifica se B1 e B2 estão desligadas para poder ligar B3
6	Verifica se os timers de B1 e B2 estão em contagem para poder ligar B3
7	Verifica se precisa de água no RD, liga B3
8	Timer para manter B3 desligada

Os Timers implementados durante o código em linguagem Ladder apresentado anteriormente se fazem necessários pois neste caso específico de modelo usamos as saídas dos reservatórios de distribuição e secundário como retorno direto para o reservatório principal, algo que não aconteceria em um sistema real de abastecimento onde este retorno significa o consumo da água em caso de aplicação residencial como indicada no início deste trabalho.

CAPÍTULO 4

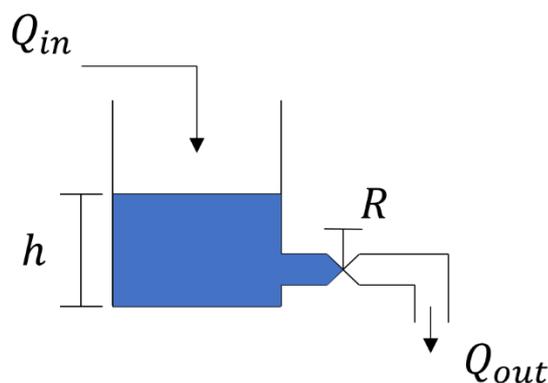
MODELO MATEMÁTICO PARA O SISTEMA DE ABASTECIMENTO

Neste capítulo serão abordados dois tipos de modelagem matemática que podemos explorar a partir do sistema estudado neste trabalho de conclusão de curso, sendo essas modelagens matemáticas por função de transferência e por espaço de estados.

4.1. MODELO GENÉRICO POR FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

A Figura 12 representa um sistema dinâmico de um tanque que possui uma fonte de entrada de líquido, uma saída ou vazão deste líquido e uma válvula de controle representada pela resistência R .

Figura 12. Tanque simples para modelagem matemática



Fonte: Autor

As variáveis do sistema ilustrado pela Figura 12 são Q_{in} , Q_{out} , h e R . Onde Q_{in} representa a vazão de entrada de líquido no tanque, Q_{out} é a vazão de saída de líquido no tanque, h representa a altura do tanque e R é a válvula de resistência ou controle da vazão do líquido no tanque.

A resultante da entrada e saída do sistema representado na Figura 12 é

$$Q_R = Q_{in} - Q_{out} \quad (4.1)$$

Sendo a saída do sistema Q_{out} podendo ser representada na forma

$$Q_{out} = h/R \quad (4.2)$$

Substituindo (4.2) em (4.1)

$$Q_R = Q_{in} - h/R \quad (4.3)$$

A resultante entre a saída e entrada do sistema pode também ser expressada na forma de

$$Q_R = A.V \quad (4.4)$$

Em que A é a área da secção do tanque e V a velocidade com que este tanque seca ou enche, assim sendo podemos ainda representar a expressão (4.4) na forma

$$Q_R = A. \frac{\Delta h}{\Delta t} \rightarrow Q_R = C. \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (4.5)$$

Em que a velocidade V pode ser substituída pela variação da altura do nível do líquido no tanque pelo tempo e A pode ser considerada a capacitância C deste recipiente.

Substituindo então a equação (4.5) na equação (4.3) temos

$$C. \frac{\Delta h}{\Delta t} = Q_{in} - h/R \quad (4.6)$$

A equação (4.6) pode ser reescrita ainda como

$$C. \dot{h} = Q_{in} - h/R \quad (4.7)$$

Aplicando-se então a transformada de Laplace na função de transferência acima, temos

$$\{\mathcal{L}\} \rightarrow C.H(s).s = Q(s) - H(s)/R \quad (4.8)$$

$$H(s).s + \frac{H(s)}{RC} = \frac{Q(s)}{C} \rightarrow H(s) \left(s + \frac{1}{RC} \right) = \frac{Q(s)}{C}$$

$$\frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{1}{s + 1/RC} \cdot \frac{1}{C} \rightarrow \frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{1}{C} \cdot \frac{RC}{RCs + 1}$$

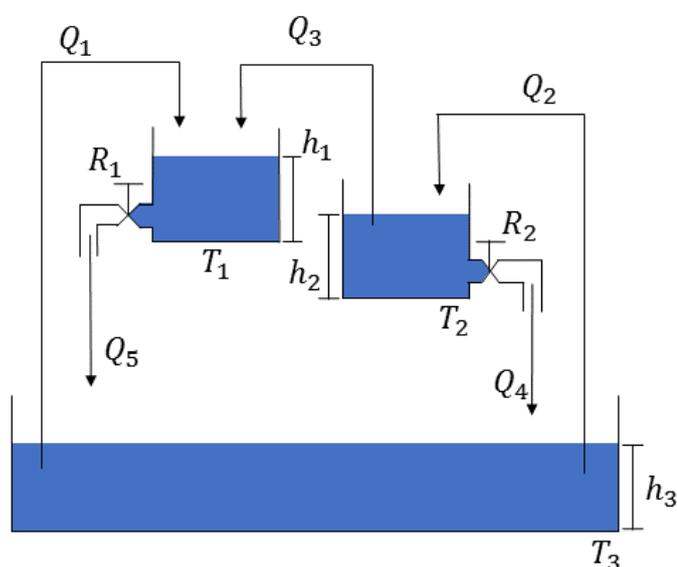
$$\frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (4.9)$$

A equação (4.9) representa a equação final da transformada de Laplace da função de transferência do sistema de tanque representado na Figura 12. Onde RC é a constante de tempo do sistema.

4.2. MODELO MATEMÁTICO POR ESPAÇO DE ESTADO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO

A Figura 13 representa um sistema dinâmico de três tanques em que os dois menores estão fortemente acoplados e são alimentados pelo terceiro tanque maior. Há duas saídas do tanque 3 alimentando os tanques 1 e 2, o tanque 1 também recebe alimentação proveniente do tanque 2. Ambos os tanques, 1 e 2 possuem uma vazão de retorno para o tanque maior inferior.

Figura 13. Tanques fortemente acoplados para modelagem matemática



Fonte: Autor

As variáveis do sistema ilustrado na Figura 13 são Q_1 que representa a vazão de entrada no tanque 1; Q_2 é a vazão de entrada no tanque 2; Q_3 é a vazão de saída do tanque 2 e entrada no tanque 1; Q_4 representa a vazão de saída do tanque 2; Q_5 representa a vazão de saída do tanque 1; h_1 é a altura do volume no tanque 1; h_2 é a altura do volume no tanque 2; h_3 é a altura do volume no tanque 3; R_1 é a válvula de resistência ou controle da vazão no tanque 1; e R_2 é a válvula de resistência ou controle da vazão no tanque 2.

A equação que representa a dinâmica do tanque, ou seja, a variação da altura do líquido multiplicada pela área total deste tanque é igual a diferença entre a vazão de entrada pela vazão de saída, é dada por

$$\Delta h_1 \cdot A_1 = Q_1 + Q_3 - Q_5 \quad (4.10)$$

A capacitância do tanque 1 é dada pela área da secção transversal tanque e que a vazão de saída Q_5 é a razão entre a variação da altura pela resistência de vazão no tanque 1,

$$\frac{\Delta h_1}{\Delta t_1} \cdot C_1 = Q_1 + Q_3 - \frac{\Delta h_1}{\Delta R_1} \quad (4.11)$$

Reajustando os termos nos dois lados da equação temos o resultado da modelagem para o tanque 1,

$$\dot{h}_1 = \frac{-h_1}{R_1 \cdot C_1} + \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_3}{C_1} \quad (4.12)$$

Para o tanque 2 (T_2), podemos equacionar o subsistema similarmente ao subsistema do tanque 1, em que a variação da altura do líquido pela capacitância do tanque é igual a diferença entre as vazões de entrada e saída neste tanque, destacando que há duas vazões de saída visto que a vazão de entrada Q_3 do tanque 1 é dada como uma vazão de saída para o tanque 2, logo

$$\frac{\Delta h_2}{\Delta t_2} \cdot C_2 = -Q_3 + Q_2 - Q_4 = -Q_3 + Q_2 - \frac{h_2}{R_2} \quad (4.13)$$

Reajustando os termos nos dois lados da equação temos o resultado da modelagem para o tanque 2,

$$\dot{h}_2 = -\frac{Q_3}{C_2} - \frac{h_2}{R_2 \cdot C_2} + \frac{Q_2}{C_2} \quad (4.14)$$

O tanque 3 (T_3), é um componente não-controlável deste sistema, ainda que as variações de h_1 e h_2 dependam da variação h_3 , não é apresentado sua modelagem pelas equações de estado. Assim sendo, temos as equações para os subsistemas e podemos montar o sistema de equações que regulam esta modelagem,

$$\begin{cases} \dot{h}_1 = \frac{-h_1}{R_1 \cdot C_1} + 0 + \frac{Q_3}{C_1} + \frac{Q_1}{C_1} \\ \dot{h}_2 = \frac{h_1}{R_1 \cdot C_2} - \frac{h_2}{R_2 \cdot C_2} + 0 + \frac{Q_2}{C_2} \end{cases} \quad (4.15)$$

A partir do sistema de equações encontrado podemos determinar a modelagem em espaço de estado do sistema estudado na forma

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{R_1 \cdot C_1} & 0 \\ \frac{1}{R_1 \cdot C_2} & \frac{-1}{R_2 \cdot C_2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 & \frac{1}{C_1} \\ 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{C_2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

A implementação de um controle em um sistema do tipo MIMO (múltiplas entradas e múltiplas saídas), estudado nesta monografia, é um tanto quanto complexa como podemos ver pela matriz de estado gerada. Sabendo-se que ao invés de uma Função de Transferência, encontrada em sistemas SISO (entradas únicas e saídas únicas), o sistema de abastecimento deste trabalho possui uma Matriz de Transferência, devido sua característica de múltiplas entradas e múltiplas saídas, portanto faz-se necessário a implementação de um controle mais complexo.

4.3. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE SED E SVC

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 usando 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 usando 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 dos sistemas controlados [Miyagi, 1996].

4.4. IMPLEMENTAÇÕES NA PLANTA DO SISTEMA

A seguir são apresentadas algumas sugestões de implementações físicas na planta do sistema com finalidade de aprimoramento do funcionamento do sistema e melhor representação de um sistema real.

Acréscimo de válvulas de controle de vazão dos tanques, possibilitando a modelagem também da vazão de saída, sendo não incluso neste tópico a vazão pelas bombas.

Implementação de um sistema de abastecimento para o reservatório principal, assim não sendo necessário a interferência direta do usuário/operador para que o sistema não interrompa seu funcionamento.

Acréscimo de chaves de comando para início e término da execução do projeto, não sendo necessária a interferência direta no CLP para pausar e reiniciar a execução do programa.

Acréscimo de dispositivos de monitoração (LEDs sinalizadores) para melhor observar a resposta dos dispositivos de detecção (sensores de nível), assim sendo mais visual a apresentação do sistema em funcionamento.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Neste capítulo é feita a conclusão de todo o trabalho apresentado nesta monografia, assim como apresentada uma proposta de projeto futuro para a implementação do sistema híbrido abordado neste trabalho.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento e avaliação de um procedimento para o projeto de sistemas controle de nível de líquidos em reservatórios via controladores lógicos programáveis foi apresentado neste trabalho de conclusão de curso. Associou-se as abordagens para o projeto de sistemas de controle a eventos discretos, aplicação em modelo reduzido e o CLP. Desta forma, o conhecimento adquirido através dos estudos destes três itens básicos é de suma importância para a formação de um engenheiro electricista. São as abordagens para projeto de SED: o problema do mundo real, que é sistema de nível de tanques; o controlador e o CLP, que é o dispositivo executa as estratégias de controle.

A modelagem de sistemas de variáveis contínuas viabilizou uma compreensão da dinâmica da planta, em nível de conhecimento dos parâmetros e variáveis envolvidas, tais como: entrada, saída e controle. A modelagem SVC mostrou ser uma peça fundamental para o desenvolvimento de sistemas de controle. A partir das relações estabelecidas por meio de equações, estima-se os parâmetros da planta e ajusta-se os controladores para que o sistema opere conforme desejado.

As abordagens SED foram aplicadas durante desenvolvimento das estratégias de controle que culminaram na implementação de um código em linguagem Ladder. A referida abordagem possibilitou um detalhamento do processo para fins de projeto, assim sendo possível obter uma boa relação entre o comportamento do processo e sua a modelagem SED. Os testes

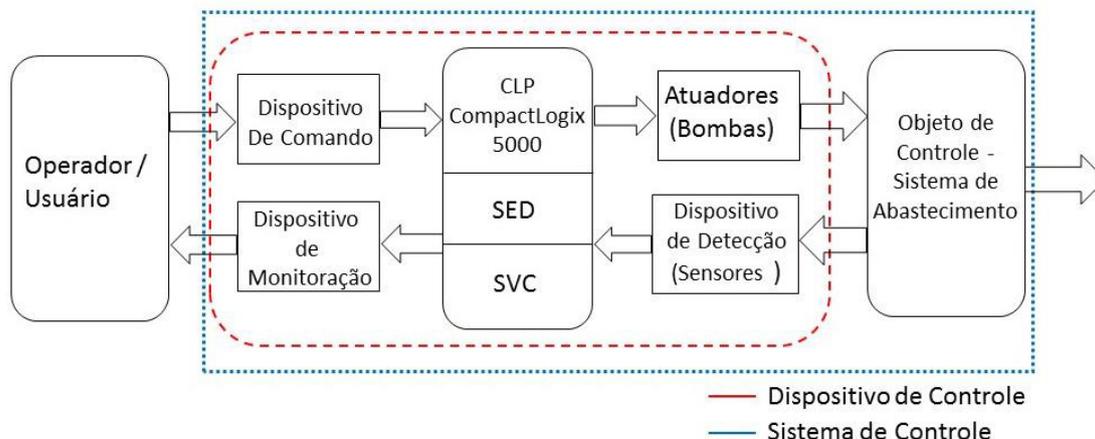
associados a operacionalização da estratégia SED proposta para o controle de nível de tanque mostrou-se que a sua lógica funciona e a sintonia dos parâmetros de temporizadores pode ser realizado pelo operador da planta para estabelecer os sets points do processo.

O desenvolvimento do trabalho por meio de sistemas a eventos discretos possibilitou um detalhamento do processo de forma minuciosa, assim sendo possível obter uma boa precisão na modelagem. A modelagem de sistemas de variáveis contínuas possibilita o controle do sistema nos intervalos de tempo entre os Estados do SED, assim podemos obter uma maior precisão nos controladores. A aplicação e corroboração desta modelagem no sistema físico é de grande interesse para o meio acadêmico de automação e controle, visto que muitos estudos se dão apenas através da aplicação de sistemas de variáveis contínuas para este tipo de projeto.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Ao final deste trabalho, apresenta-se como proposta para futuro desenvolvimento. Um modelo híbrido SED-SVC, a partir dos modelos baseados em sistemas à eventos discretos (SED) e a modelagem matemática do sistema baseado em sistemas de variáveis contínuas (SVC), como ilustrado na Figura 14. Como forma de incentivar os futuros graduandos na área de automação e controle, a proposta de unificar os dois modelos em um só e aplicar seus resultados em um protótipo em laboratório é também um tópico para os trabalhos futuros relacionados a este trabalho de conclusão de curso, a implementação de um controlador PID pode ser estudado abrangendo diversas abordagens teóricas.

Figura 14. Diagrama de blocos para projeto híbrido SVC e SED



Fonte: Autor

A Figura 14 acima apresenta um diagrama de blocos de como poderia ser implementado este sistema, utilizando o CLP como cérebro do sistema e sendo ele o responsável pela aplicação dos resultados tanto da modelagem em SED quanto em SVC, assim sendo os atuadores e sensores deste sistema serviriam simultaneamente para os dois sistemas, ou podemos definir que seria apenas um sistema híbrido de controle baseado em SED e SVC. O comportamento esperado para este sistema é que ele opere baseado nos estados modelados pelo SED e internamente ao tempo entre esses estados é utilizado um controlador baseado em SVC para uma resposta do sistema ainda mais aprimorada em relação aos sistemas SED e/ou SVC aplicados separadamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12217: Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público - Procedimento*. Rio de Janeiro (Rio de Janeiro). 1994

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7821: Tanques soldados para armazenamento de petróleo e seus derivados*. Rio de Janeiro (Rio de Janeiro). 1983.

Bueno, Guilherme S. *Controle Multivariável para Sistemas de Nível de Tanques baseado em Teoria de Eventos Discretos*. 2017. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Maranhão. São Luís. 2017.

Campos, M. C. M. M. de; Teixeira, Herbert C. G. *Controles Típicos de equipamentos e processos industriais*. 2ª edição. São Paulo: Blucher, 2010.

Coelho, B. F. et al. *Fuzzy Controller Embedded in PLC for Multivariable Systems Using a Discrete Event System Approach*. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. 2016.

Dorf, R. C.; Bishop, R. H. *Sistemas de Controle Modernos*. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC S.A. 2001.

Franklin, G. F.; Powell, J. D. & Emami-Naeini, A.,. *Sistemas de Controle para Engenharia*. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman. 2013.

Miyagi, P. E. *Controle Programável: Fundamentos de Controle de Sistemas a Eventos Discretos*. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blucher. 1996.

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

Schmidt, A. M. *Controle de nível de líquido utilizando Controlador Lógico Programável*. Universidade Federal de Ouro Preto. 2008.

Souza, A. C. de. *Modelagem de Sistema de Abastecimento Usando uma Abordagem em Sistemas a Eventos Discretos*. São Luís: UFMA. 2006.