

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ

CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**APLICAÇÃO DA TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO À
PLANTA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO DO PARQUE
TECNOLÓGICO ITAIPU**

ANGEL AMBROCIO QUISPE

FOZ DO IGUAÇU

2020

Angel Ambrocio Quispe

Aplicação da Teoria de Controle Supervisório à Planta de Produção de Hidrogênio do Parque Tecnológico Itaipu

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e Computação. Área de Concentração: Sistemas Dinâmicos e Energéticos

Orientador: Prof. Dr. Romeu Reginatto

Coorientador: Prof. Dr. Sandro Battistella

Foz do Iguaçu

2020

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Ambrocio Quispe, Angel

Aplicação da Teoria de Controle Supervisório à Planta de Produção de Hidrogênio do Parque Tecnológico Itaipu / Angel Ambrocio Quispe; orientador(a), Romeu Reginatto ; coorientador(a), Sandro Battistella, 2020.
138 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, 2020.

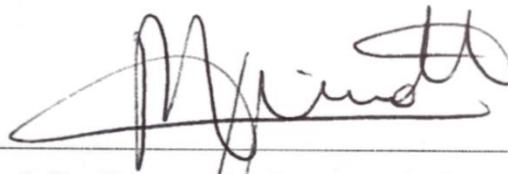
1. Autômatos. 2. Controle Supervisório. 3. Indústria de Processos. 4. Planta de Produção de Hidrogênio. I. Reginatto , Romeu. II. Battistella, Sandro . III. Título.

Aplicação da Teoria de Controle Supervisório à Planta de Produção de Hidrogênio do Parque Tecnológico Itaipu

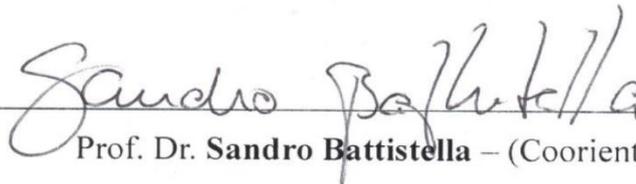
Angel Ambrocio Quispe

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação e aprovada pela Banca Examinadora:

Data da Defesa pública: 28/02/2020



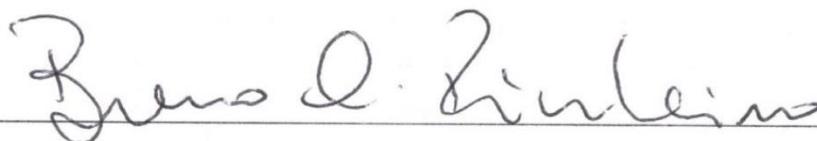
Prof. Dr. **Romeu Reginatto** – (Orientador)
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – (UNIOESTE)



Prof. Dr. **Sandro Battistella** – (Coorientador)
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – (UNIOESTE)



Prof. Dr. **Ricardo José Ferracin**
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – (UNIOESTE)



Prof. Dr. **Breno Carneiro Pinheiro**
Universidade Dinâmica das Cataratas – (UDC)

Resumo

Nos tempos atuais, sistemas na indústria de processos buscam eficiência e redução de custos para melhorar a competitividade do mercado. Diante disso, a tecnologia de automação exerce um papel fundamental na indústria por meio da coordenação dos subsistemas, a fim de que as operações individuais e o funcionamento global do sistema sejam garantidos, mas também pela possibilidade de ter um maior controle sobre o processo da produção e qualidade do produto. Plantas de Produção de Hidrogênio (PPH) são infraestruturas que necessitam destas tecnologias de automação, com o objetivo de otimizar o desempenho de seu processo de produção. O presente trabalho propõe a aplicação de duas abordagens: uma para a implementação do controle lógico dos subsistemas e outra abordagem para o controle sequencial da operação da PPH do Parque Tecnológico Itaipu (PTI). A primeira abordagem baseia-se na aplicação da Teoria de Controle Supervisório (TCS), para propiciar um processo automático de síntese de controladores minimamente restritivos. Para a modelagem utilizou-se linguagem regular em forma de autômatos deterministas de estados finitos, que foram aplicados para modelar o comportamento livre e as especificações de controle lógico dos subsistemas da planta. Foi discutida também a arquitetura da implementação da TCS em Controladores Lógicos Programáveis (CLP's) e a metodologia de implementação de um projeto de controle. A segunda baseia-se no desenvolvimento de um fluxograma onde foi modelada a sequência de estados da operação do ciclo de produção de hidrogênio. Para a comprovação destas duas abordagens foi construída uma bancada laboratorial que representa planta de hidrogênio do PTI e os códigos das duas abordagens de controle foram implementados em CLP's. Os resultados obtidos demonstram a sistematização, flexibilidade e eficiência para realização do projeto do sistema de controle de uma planta de hidrogênio, além de permitir a estruturação e comprovação destas em uma bancada laboratorial.

Palavras-chaves: Autômatos, controlador lógico programável, controle supervisório, indústria de processos, planta de produção de hidrogênio, sistemas a eventos discretos.

Abstract

Nowadays, process industries are looking for efficiency and cost reduction to improve market competitiveness. Therefore, automation technology plays a fundamental role in the industry through the coordination of subsystems, so that individual operations and the overall functioning of the system are guaranteed, but also by the possibility of having greater control over the production process, and product quality. Hydrogen Power Plants (PPH) are infrastructures that need these automation technologies, in order to optimize the performance of the production process. The present work proposes the application of an approach for the implementation of a logical control of the subsystems and another approach for the sequential control of the operation of the PPH installed at the Technologic Park Itaipu (PTI). The first one is based on the application of the Supervisory Control Theory (TCS), to provide an automatic synthesis process for minimally restricted controllers. For the modeling, regular language was used in the form of deterministic automata of finite states, which were applied to model the free behavior and the specifications of logical control of the plant subsystems. Also, it was discussed the architecture for implementing TCS in Programmable Logic Controllers (PLCs) and the methodology for implementing a control project. The second approach is based on the development of a flowchart where the sequence of states of operation of the hydrogen production cycle was modeled. To verify these two approaches, a laboratory benchtop that represents PTI's hydrogen plant was built and the codes of both approaches were implemented in PLC's. The results obtained demonstrate the systematization, flexibility and efficiency to carry out the design of system control of a hydrogen plant, in addition to allowing the structuring and verification of these in a laboratory benchtop.

Keywords: Automata, programmable logic controller, supervisory control, process industry, hydrogen power plant, discrete event systems.

Este trabalho é dedicado a meus pais,
Ananias e Constanina

Agradecimento

A Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) pela oportunidade de atuar como aluno no Programa de Pós-graduação. O meu respeito por esta grande e importante universidade.

Faço um agradecimento especial aos Professores: Prof. Dr. Sandro Battistella, Prof. Dr. Romeu Reginatto, pelo apoio incondicional, compressão, paciência e conhecimento transmitidos. Levo-os como exemplo para minha vida.

Aos meus pais e irmãos pelo amor, paciência, pelas cobranças e principalmente me ajudar a manter o foco e calma, mesmo em meio de dificuldades.

A minha namorada Brenda, que com sua paciência e afeto me apoiou ao longo desses anos e me deu não só a força para vencer esta etapa, obrigado amor.

A meus amigos pelo apoio que vivenciaram todas as dificuldades e sempre me incentivaram nesta longa e difícil jornada. Em especial a meus amigos Moises, Alexandre e Victor.

Ao pessoal do Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio (NUPHI), pela ajuda de idealizar e acreditarem no projeto. Em especial Ricardo, Leonardo, Isnel, Everton e Lucas.

Ao pessoal do Centro Latino-americano de Tecnologias Abertas (Celtab), pela ajuda e colaboração. Em especial Cesar, José e Miguel.

A minha colega veterana de mestrado Mailla, por sua ajuda, paciência e contribuições que ajudaram a idealizar este trabalho.

A todos os professores do PGEEC pela oportunidade oferecida e por acreditarem na realização do trabalho.

A todos os meus colegas de mestrado que contribuía, de maneira direta e indireta, formal ou informal na elaboração deste trabalho.

Sumário

Lista de Figuras	15
Lista de Tabelas	19
Lista de Símbolos.....	21
Lista de Siglas e Abreviaturas	23
1. Introdução.....	25
1.1 Motivação e Justificativa	25
1.2 Delimitação do Trabalho	29
1.3 Objetivos.....	30
1.3.1 Objetivo Geral	30
1.3.2 Objetivo Específicos.....	30
1.4 Estrutura.....	31
2. Planta de Produção de Hidrogênio.....	33
2.1 Estado da Arte.....	33
2.2 Unidades de Processamento de uma Planta de H ₂	36
2.3 Subsistemas da PPH.....	37
2.4 Automação e Controle da Planta de H ₂	39
3. Sistemas a Eventos Discretos e Teoria de Controle Supervisório.....	45
3.1 Sistemas a Eventos Discretos	45
3.1.1 Linguagens	47
3.1.2 Autômato.....	49
3.2 Teoria de Controle Supervisório.....	52
3.2.1 Supervisor Monolítico.....	56
3.2.2 Supervisor Monolítico Minimizado	58
3.2.3 Processo de Síntese de Supervisor	58
3.2.4 Arquitetura de Implementação do Controle Supervisório.....	59
3.2.5 Metodologia de Implementação do Projeto de Controle.....	65

4. Modelagem e Síntese de Supervisores para a PPH.....	69
4.1 Tanque de Água.....	70
4.1.1 Modelagem do Tanque de Água e da Válvula <i>V1</i>	71
4.1.2 Modelagem da Especificação do Tanque de Água com a Válvula <i>V1</i>	72
4.2 Tanque de Lavagem de H_2	73
4.2.1 Modelagem do Tanque do H_2 e da Válvula <i>V2</i>	74
4.2.2 Modelagem da Especificação do Tanque de H_2 com a Válvula <i>V2</i>	75
4.3 Separador Líquido de H_2	75
4.3.1 Modelagem do Separador de H_2 e da Válvula <i>V4</i>	77
4.3.2 Modelagem da Especificação do Separador de H_2 com a Válvula <i>V4</i>	77
4.4 Filtro de H_2	78
4.4.1 Modelagem do Filtro de H_2 e da Válvula <i>V12</i>	79
4.4.2 Modelagem da Especificação do Filtro de H_2 com a Válvula <i>V12</i>	79
4.5 Tanque de Lavagem de O_2	80
4.5.1 Modelagem do Tanque do O_2 e da Válvula Solenoide <i>V3</i>	81
4.5.2 Modelagem da Especificação do Tanque de O_2 com a Válvula <i>V3</i>	82
4.6 Separador Líquido de O_2	82
4.6.1 Modelagem do Separador de O_2 e da Válvula <i>V5</i>	83
4.6.2 Modelagem da Especificação do Separador de O_2 com a Válvula <i>V5</i>	84
4.7 Tanques Separadores Horizontais de H_2 e O_2	84
4.7.1 Modelagem dos Separadores, <i>Buffer I</i> , Bomba e Válvulas	88
4.7.2 Modelagem da Especificação dos Separadores, <i>Buffer I</i> com a Bomba e as Válvulas	91
4.8 Refrigeração	94
4.8.1 Modelo do Sensor Temperatura e as Válvulas	95
4.8.2 Modelo da Especificação do Sensor de Temperatura com as Válvulas	96
4.9 Compressor.....	97
4.9.1 Modelo do <i>Buffer II</i> e o Compressor	97
4.9.2 Modelo de Especificação do <i>Buffer II</i> com o Compressor	98
4.10 Síntese dos Supervisores Monolíticos.....	98
4.11 Controle Sequencial da Operação da PPH	101
5. Implementação em um Controlador Lógico Programável	105

5.1	Visão Geral da Implementação	105
5.2	Implementação dos Supervisores no CLP	106
5.2.1	Software <i>Supremica</i>	107
5.2.2	Geração de Código Automático em ST para os Supervisores.....	108
5.3	Implementação da linguagem <i>Ladder</i> para o Controle Sequencial de Operação	113
5.4	Bancada Laboratorial	115
5.5	Discussões.....	117
6.	Conclusão e Perspectivas	119
6.1	Trabalhos Futuros	122
	Referências Bibliográficas	123
	Apêndice A	129
	Apêndice B	131
	Apêndice C	133
	Apêndice D	135
	Apêndice E	137

Lista de Figuras

Figura 2.1: Demanda anual global por hidrogênio desde 1975.	34
Figura 2.2: Vista panorâmica e interna da PPH instalada no PTI.	36
Figura 2.3: Unidades de processamento da PPH do PTI.	37
Figura 2.4: Esquema dos subsistemas nas unidades de processamento da PPH do PTI.	38
Figura 2.5: Elementos de um sistema automatizado.	39
Figura 2.6: Fluxograma do controle sequencial da operação da PPH.	41
Figura 3.1: Sistema guiados por eventos.	46
Figura 3.2: Diagrama de transição de estados de um autômato.	49
Figura 3.3: Estrutura do controle monolítico.	57
Figura 3.4: Arquitetura proposta por Belami, Hoffmann, Gyugyi, Wong-Toi e Franklin.	61
Figura 3.5: Arquitetura proposta por Martins e Cury.	63
Figura 3.6: Arquitetura proposta por Queiroz e Cury.	64
Figura 3.7: Metodologia de implementação do projeto de controle.	65
Figura 4.1: Vista interna do tanque de água com seu sensor de nível.	70
Figura 4.2: Modelo do tanque de água.	72
Figura 4.3: Modelo da válvula solenoide <i>V1</i>	72
Figura 4.4: Modelo de especificação do tanque de água e a válvula solenoide <i>V1</i>	73
Figura 4.5: Vista interna do tanque de lavagem do H ₂ com seu sensor de nível.	73
Figura 4.6: Modelo do tanque de lavagem de H ₂	74
Figura 4.7: Modelo da válvula solenoide <i>V2</i>	75
Figura 4.8: Modelo de especificação do tanque de lavagem de H ₂ e a válvula <i>V2</i>	75
Figura 4.9: Vista interna do separador líquido de H ₂ e seu sensor de nível.	76
Figura 4.10: Modelo do separador líquido de H ₂	77
Figura 4.11: Modelo da válvula solenoide <i>V4</i>	77
Figura 4.12: Modelo de especificação do separador de H ₂ e a válvula solenoide <i>V4</i>	77
Figura 4.13: Vista interna do filtro de H ₂ e seu sensor de nível.	78
Figura 4.14: Modelo do filtro de H ₂	79
Figura 4.15: Modelo da válvula solenoide <i>V12</i>	79

Figura 4.16: Modelo de especificação do filtro de H ₂ e a válvula solenoide V12.....	79
Figura 4.17: Vista interna do tanque de lavagem do O ₂ com seu sensor de nível.....	80
Figura 4.18: Modelo do tanque de lavagem de O ₂	81
Figura 4.19: Modelo da válvula solenoide V3.	81
Figura 4.20: Modelo de especificação do tanque de lavagem de O ₂ e a válvula V3.	82
Figura 4.21: Vista interna do separador líquido de O ₂ e seu sensor de nível.	82
Figura 4.22: Modelo do separador líquido de O ₂	83
Figura 4.23: Modelo da válvula solenoide V5.	84
Figura 4.24: Modelo de especificação do separador de O ₂ e a válvula solenoide V5.....	84
Figura 4.25: Vista interna dos separadores horizontais de H ₂ , O ₂ e seus sensores de nível...	85
Figura 4.26: Modelo do separador horizontal de O ₂	89
Figura 4.27: Modelo do separador horizontal de H ₂	89
Figura 4.28: Modelo da pressão interna da linha no <i>Buffer I</i>	89
Figura 4.29: Modelo da válvula solenoide V6.	90
Figura 4.30: Modelo da válvula solenoide V7.	90
Figura 4.31: Modelo da válvula solenoide V8.	90
Figura 4.32: Modelo da válvula solenoide V9.	90
Figura 4.33: Modelo da bomba de água B1.	91
Figura 4.34: Modelo de especificação dos separadores, <i>buffer I</i> , com a bomba, e válvulas. .	93
Figura 4.35: Modelo do sensor de temperatura T1.	95
Figura 4.36: Modelo da válvula solenoide V23.	95
Figura 4.37: Modelo da válvula solenoide V24.	96
Figura 4.38: Modelo da válvula solenoide V25.	96
Figura 4.39: Modelo de especificação do sensor T1 e as válvulas V23, V24 e V25.....	96
Figura 4.40: Modelo do <i>Buffer II</i>	97
Figura 4.41: Modelo do compressor.	98
Figura 4.42: Modelo de especificação do <i>Buffer II</i> com o compressor.	98
Figura 4.43: Fluxograma do controle sequencial da operação da planta.	102
Figura 5.1: Diagrama de integração geral do projeto de controle da PPH.	106
Figura 5.2: <i>Supremica</i> , mostrando os modelos do subsistema tanque de H ₂ O.....	108
Figura 5.3: Geração do código no IDES2ST.	109
Figura 5.4: Estrutura do código implementado no CLP.	110
Figura 5.5: Bloco funcional do supervisor com a arquitetura de Queiroz e Cury.	111

Figura 5.6: Bloco funcional do sistema produto com a arquitetura de Queiroz e Cury.....	112
Figura 5.7: Bloco da sequência operacionais com a arquitetura de Queiroz e Cury.....	113
Figura 5.8: Código <i>Ladder</i> para o controle sequencial da operação da planta.	114
Figura 5.9: Bancada laboratorial que representa as unidades de processamento da PPH....	115
Figura 5.10: Imagem da bancada experimental que representa o tanque de água.	116
Figura A.1: Vista explodida dos subsistemas e dispositivos da PPH instalado no PTI.	129
Figura B.1: Diagrama de processo e instrumentação da PPH instalado na PTI.....	131
Figura C.1: Subsistemas que operam no controle sequencial da operação da PPH.....	133

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Procedimento de síntese de controle supervisorio.	59
Tabela 4.1: Eventos dos dispositivos do tanque de água.	71
Tabela 4.2: Eventos do tanque de lavagem de H ₂	74
Tabela 4.3: Eventos do separador líquido de H ₂	76
Tabela 4.4: Eventos do filtro de H ₂	78
Tabela 4.5: Eventos do tanque de lavagem de O ₂	81
Tabela 4.6: Eventos de tanque de lavagem de O ₂	83
Tabela 4.7: Eventos dos tanques separadores de H ₂ e O ₂	87
Tabela 4.8: Eventos do subsistema de refrigeração.....	94
Tabela 4.9: Eventos do sistema de compressor.	97
Tabela 4.10: Dados da síntese dos supervisores monolíticos.....	100
Tabela A.1: Legenda da Figura A.1.	130
Tabela D.1: Sequência de <i>on</i> e <i>off</i> de dispositivos nas etapas de operação da PPH.	135
Tabela E.1: Características técnicas do CLP modelo DUO-351.....	137

Lista de Símbolos

Σ	Alfabeto/Alfabeto de eventos
Σ^*	Conjunto de palavras possíveis e factíveis do alfabeto incluindo a cadeia vazia
ε	Cadeia vazia
L	Linguagem gerada
s	Palavra
t	Prefixo
u	Subpalavra
v	Sufixo
\bar{L}	Linguagem prefixo fechamento
L^*	Linguagem fechamento de Kleene
G	Autômato/Planta
Q	Conjunto finito não-vazio de estados
\emptyset	Conjunto vazio
δ	Função de transição parcial
q_0	Estado inicial
Q_m	Conjunto de estados marcados
q_m	Estado marcado
L_m	Linguagem marcada
\bar{L}_m	Prefixo fechamento da linguagem marcada
Γ	Estrutura de controle
σ, γ	Eventos
Σ_c	Eventos controláveis
Σ_u	Eventos não controláveis
2^Σ	Conjunto de todos os subconjuntos do alfabeto de eventos
S	Supervisor
E	Especificações
S/G	Ação do supervisor sobre a planta

K Linguagem alvo

\bar{K} Prefixo fechamento da linguagem alvo

$SupC(G, K)$ Máxima linguagem controlável da linguagem alvo

Lista de Siglas e Abreviaturas

CLP	Controlador Lógico Programável
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CNTP	Condições Padrão de Temperatura e Pressão
CO ₂	Dióxido de Carbono
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GEF	<i>Global Environment Facility</i>
H ₂	Hidrogênio
IHM	Interface Home Máquina
KOH	Hidróxido de Potássio
LD	Diagrama <i>Ladder</i>
N ₂	Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
PPH	Planta de Produção de Hidrogênio
PTI	Parque Tecnológico Itaipu
PNUD	Programa de Nações Unidas para o Desenvolvimento
SED	Sistema a Eventos Discretos
ST	Texto Estruturado
SCADA	Controle Supervisório e Aquisição de Dados
S1, S2, ..., S32	Interruptores dos Sensores de Nível
TCS	Teoria de Controle Supervisório
V1, V2, ..., V32	Válvulas Solenoides

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e Justificativa

Nos tempos atuais, a necessidade de desenvolver vantagens comparativas que tornem a cadeia produtiva e o produto em ser diferenciado dos demais, levou à criação de diversas tecnologias que tem como objetivo melhorar a produtividade e qualidade na linha de produção (Jammes & Smit, 2005). Diante disso, a automatização industrial nas empresas tem ganhado cada vez mais espaço. Investimentos nessa área têm se tornado cada vez mais contundentes, não apenas pelo fato da diminuição de custos, como também pela possibilidade de maior controle sobre o volume de produção e a qualidade dos produtos (Pessôa & Spinola, 2014).

Plantas de produção de energia, em sua maioria, estão regidas pelas tecnologias automatizadas, a fim de otimizar o desempenho nos processos de produção e controle (IDC-Technologies, 2012). A aplicação de estas tecnologias permite o monitoramento contínuo do *status* e execução dos dispositivos para assim aprimorar a disponibilidade da planta, segurança do processo e a qualidade constante do produto (Wang & Tan, 2006). Um exemplo de plantas de produção de energia são as de hidrogênio energético por eletrólise alcalina de água que são normalmente compostas por múltiplas unidades de processamento, denominados subunidade de produção, subunidade de purificação, subunidade de refrigeração, unidade de compressor e unidade de armazenamento (Spinola, *et al.*, 2017). Essas plantas apresentam uma infraestrutura de controle industrial para a regulação automática e/ou computadorizada de suas subunidades de processamento e seus dispositivos associados, bem como a integração e coordenação (Groover, 2002; Pessôa & Spinola, 2014).

As indústrias podem ser classificadas em duas categorias básicas: (1) indústrias de processo e (2) indústria de manufatura discreta. A indústria de processo executa suas operações

de produção em quantidades de materiais, tais como líquidos, gases, pós e materiais similares, enquanto as indústrias de manufatura discreta realizam suas operações em quantidades de matérias, tais como peças e produtos discretos (Groover, 2002). A distinção significativa entre elas se estende nas variáveis e parâmetros que caracterizam as respectivas operações de produção, definido como variáveis as saídas das operações de produção e parâmetros como sendo as entradas. Tais variáveis e parâmetros tendem a ser contínuos na indústria de processo, enquanto na manufatura discreta são discretos. Parâmetro ou variável contínua está relacionada a um sinal durante um intervalo contínuo de tempo e o parâmetro ou variável discreta, com sinal definido apenas em instantes discretos de tempo (Ogata, 2003). Assim como há dois tipos de variáveis ou parâmetros, também há dois tipos de sistemas: estático e dinâmico.

Um sistema na indústria é uma combinação de componentes que atuam conjuntamente e realizam um certo objetivo. Ele contém em suas estruturas subsistemas como características próprias e comportamentos independentes dos demais componentes do sistema (Ogata, 1982). Um sistema é considerado estático quando as variáveis são independentes dos valores passados da entrada e dinâmico quando as variáveis dependem dos valores passados da entrada (Villate, 2016). No caso dos sistemas dinâmicos os comportamentos das variáveis podem ser variante no tempo ou invariante no tempo (Marques, 2013).

Sistemas dinâmicos com comportamento invariantes no tempo são classificados em dois tipos: linear e não linear (Ogata, 1982). Os sistemas lineares invariantes no tempo são aqueles onde suas variáveis de saída dependem linearmente dos parâmetros de entrada e possíveis perturbações nos sistemas. A linearidade implica o princípio de superposição¹, o que significa que se pode calcular a saída do sistema excitado por qualquer tipo de entrada dividindo-se a entrada em componentes simples e adicionando-se as respostas de cada componente. Por outro lado, sistemas não lineares invariantes no tempo não satisfazem o princípio de superposição. Assim, a resposta a qualquer parâmetro de entrada será afetada pelo comportamento das outras entradas, de forma que é necessário identificar as relações entre todas as entradas e saídas simultaneamente (Ogata, 2003). Assim, os sistemas dinâmicos invariante no tempo não linear também são classificados em dois tipos: contínuo e discreto (Groover, 2002).

Sistema dinâmico contínuo representa uma classe de sistemas onde o estado evolui durante um intervalo contínuo de tempo. Sistemas dinâmicos discretos podem ser de dois tipos.

¹ O princípio de superposição afirma que a resposta produzida pela aplicação simultânea de duas funções diversas é a soma das duas respostas individuais. Isto quer dizer que em um sistema linear, para calcular a resposta de diversas entradas pode-se tratar cada entrada individualmente e somar os resultados (Ogata, 2003).

O primeiro tipo corresponde a sistemas em que o estado só muda durante instantes discretos de tempo, sendo o espaço de estados um conjunto contínuo ou discreto de valores. No segundo tipo de sistemas discretos, o estado muda devido à ocorrência de eventos discretos (Montgomery, 2004). Assim, o sistema dinâmico discreto dirigido pelo tempo possui variáveis que assume valores no espaço de estado que são alterados em momentos discretos de tempo. Por outro lado, sistemas dinâmicos discretos dirigidos por eventos, as transições de estados são dadas com a ocorrência de eventos, normalmente irregulares e desconhecidos, e são conhecidos como sistemas a eventos discretos, ou SED's (Cury, 2001; Cassandras & Lafortune, 2008). Na prática poucos sistemas são totalmente discretos ou contínuos, contudo, depois de se efetuar algum tipo de mudança para uma das categorias é possível classificar o sistema como sendo discreto ou contínuo (Marques, 2013).

Formalmente, os SED's são modelos de sistemas dinâmicos com mudanças de estado impulsionados pela ocorrência de eventos individuais (Cassandras & Lafortune, 2008). Um evento pode descrever a ocorrência abrupta e sem duração no tempo de um fenômeno no sistema e que pode afetar o comportamento deste (Ramadge & Wonham, 1989). Ao perceber a ocorrência de um evento, o sistema reage imediatamente, onde permanece até que ocorra um novo evento (Cury, 2001). Assim, a dinâmica dos SED's é regida pela ocorrência de eventos. Cada transição de estado a estado é forçada pela ocorrência ordenada de eventos pertencentes a um conjunto finito discreto (Cassandras & Lafortune, 2008). SED's representam uma área de pesquisa de interesse atual, pois a tendência de crescimento do setor de serviço no cenário nacional e mundial, aliada à complexidade atribuída a esses sistemas dirigidos a eventos, tem estimulado a realização de pesquisas nesta área (Claure, 2003; Sakurada & Miyake, 2009; Kaszubowski, 2016).

No controle de SED's existem diversas abordagens que vêm sendo utilizadas para o desenvolvimento do sistema de controle. Entre as principais abordagens é possível citar: Autômatos, Redes de Petri, Cadeias de Markov e Teoria de Filas (Queiroz & Cury, 2002b; Cassandras & Lafortune, 2008). Em particular, a Teoria de Controle Supervisório (TCS) de Ramadge-Wonham (RW) (Ramadge & Wonham, 1989) fornece uma estrutura que permite a síntese ou obtenção automática de supervisores e possui a noção sobre a máxima linguagem controlável que garante a síntese de controladores que são minimamente restritivos. A não utilização de um método formal para o controle lógico conduz a dificuldades no entendimento, manutenção, alteração e detecção de erros no programa de controle (Chandras, Orunganti, & Kumar, 2002; Chandra, Huang, & Kumar, 2003).

A Teoria de Controle Supervisório (TCS) foi desenvolvida com o objetivo de prover um método formal para a síntese de controladores de SED's (Ramadge & Wonham, 1989). O controlador é um supervisor que restringe o comportamento do sistema físico, satisfazendo a um conjunto de especificações (Cury, 2001). A TCS é baseada em linguagens formais e autômatos, fazendo a distinção clara entre o sistema a ser controlado, denominado planta, e a entidade que a controla, a qual é denominada supervisor. A planta é um modelo que reflete o comportamento fisicamente possível dos diversos subsistemas, isto é, todas as ações que estes são capazes de executar na ausência de qualquer controle (Molina, 2007; Montgomery, 2011).

Para o desenvolvimento e implementação de sistemas de controle na indústria de processos discretos é necessário seguir uma metodologia que permita a integração de todas as áreas envolvidas no processo produtivo. Há diversas metodologias para o desenvolvimento desse tipo de sistemas. Entretanto, há aquelas onde somente é concebido o desenvolvimento da Interface Homem Máquina (IHM), enquanto outras buscam abranger desde o planejamento da arquitetura SCADA até os níveis hierárquicos de automação (Groover, 2002; Portilla, 2011). Moraes & Castrucci (2008), por exemplo, propõe uma metodologia onde as etapas devem compor: 1) entendimento do processo a ser automatizado; 2) tomada de dados (variáveis); 3) planejamento de banco de dados; 4) planejamento de alarmes; 5) planejamento de hierarquia de navegação entre telas de IHM; 6) desenho de telas; 7) gráficos de tendências dentro das telas; 8) planejamento de um sistema de segurança; 9) escolha de uma plataforma como Windows ou Linux. Reyes (2007, *apud* Portilla, 2011), define outra metodologia composta por três fases: 1) Definição - determinação das necessidades e objetivos do processo e posteriormente, definição dos requerimentos do sistema a implementar; 2) Especificações - elaboração de especificações funcionais para seleção posterior da arquitetura do sistema e seus componentes; 3) Implementação do sistema - realização da configuração final do sistema e instalação e operação do sistema. Por outro lado, Portilla (2011), propõe outra metodologia, composta por oito fases: 1) projeto informal; 2) sínteses de controle supervisório; 3) emulação de atuação dos supervisores na planta; 4) implementação do controladores no Controlador Lógico Programável (CLP); 5) implementação de funcionalidades básicas do sistema SCADA; 6) avaliação de funcionamento do sistema real; 7) implementação de funcionalidades gerais do sistema SCADA; 8) validação do sistema integrado.

Desse modo, este trabalho opta pela metodologia proposta por Portilla (2011) devido às vantagens para o desenvolvimento e aplicações no controle de processos, contribuindo com a flexibilidade e eficiência no projeto, além de permitir uma maior estruturação na análise,

deixando a lógica de controle e sua programação mais clara para os projetistas e os operadores do sistema (Portilla, 2011; Faustino, 2015). A metodologia desempenha uma função importante quando uma empresa decide desenvolver um projeto de automação, seja na indústria do processo ou na manufatura discreta, pois estabelece os procedimentos sistematizados que caracterizam a ordem de desenvolvimento de análise e implementação de sistemas automatizados com maior eficácia, eficiência e confiabilidade (Chandras, Orunganti, & Kumas, 2002).

Sendo assim, como principal motivação para este trabalho é apresentar uma primeira análise do projeto de controle lógico de uma planta de H_2 que garante a caracterização, integração e sistemática da planta, já que hoje em dia estas infraestruturas apresentam uma tecnologia automação fechada, inflexível que ainda não é dominada no Brasil. Diante de isso, destaca-se a utilização do formalismo matemático da TCS que em conjunto com a metodologia proposta por Portilla (2011) será implementado o projeto de controle dos principais subsistemas além de garantir o funcionamento de controle sequencial de operação a Planta de Produção de Hidrogênio (PPH) que se encontra instalada no Parque Tecnológico Itaipu (PTI).

1.2 Delimitação do Trabalho

O trabalho propõe a aplicação da metodologia da TCS para a caracterização do modelo formal e para a síntese de supervisores com objetivo de desenvolver um algoritmo de controle para os principais subsistemas da PPH, bem como o desenvolvimento do controle sequencial lógico da operação da planta. Dessa forma, é utilizada a metodologia proposta por Portilla (2011) para a estruturação do projeto de controle, limitada, porém, às 4 primeiras fases as quais são: 1) projeto informal; 2) sínteses de controle supervisão; 3) emulação de atuação dos supervisores na planta; 4) implementação dos controladores no Controlador Lógico Programável (CLP). A metodologia de Portilla (2011) é apresentada na subseção 3.2.5. A comprovação do projeto é realizada em uma bancada experimental, desenvolvida para este trabalho, e que representa todas as unidades de processamento da planta. Os supervisores (controladores) são implementados em um CLP, procurando realizar a comprovação da modelagem experimental.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste na caracterização de um modelo lógico formal e no projeto de implementação de uma arquitetura de controle, baseados na teoria de SED's dos diversos subsistemas da PPH do PTI, além de o controle sequencial da operação da planta que é realizado a partir do conhecimento das etapas do ciclo de produção de hidrogênio.

1.3.2 Objetivo Específicos

- Revisar os principais conceitos relacionados à teoria de SED's;
- Entender a sistemática de operação da PPH instalado no PTI;
- Aplicar metodologia do projeto de controle para SED's que permita a integração de todas unidades de processamento envolvidas no processo produtivo;
- Modelagem do comportamento dos subsistemas da planta utilizando a metodologia formal da TCS;
- Estabelecer as restrições de operação e segurança dos subsistemas da planta utilizando a abordagem formal da TCS;
- Obter a estrutura de controle, o supervisor minimamente restritivo dos subsistemas da planta utilizando a metodologia formal da TCS;
- Desenvolver o controle sequencial lógico da operação da planta por meio de um diagrama de fluxo de operação;
- Implementar as estruturas de controle de operação da planta em equipamento industrial (CLP);
- Construir uma bancada experimental que represente todo o processo produtivo da PPH, para avaliação das abordagens da TCS e do controle sequencial lógico de operação;
- Integrar a bancada experimental com o sistema de controle desenvolvido, com objetivo de realizar testes;

- Contribuir para o uso de metodologias formais para o projeto de controle de plantas de produção de hidrogênio.

1.4 Estrutura

O trabalho está dividido em seis capítulos. No capítulo 1 (Introdução) são apresentados a motivação, justificativa, delimitação, objetivos gerais e específicos.

No capítulo 2 são realizadas revisões sobre o estado da arte, unidades de processamento, subsistemas, automação e controle da PPH.

O capítulo 3 traz a fundamentação necessária ao entendimento do trabalho, contemplando os temas de sistemas de eventos discretos, linguagens, autômatos, teoria de controle supervisão, supervisor monolítico, processo de síntese de supervisores, arquitetura de controle supervisão e metodologia de implementação do projeto.

No capítulo 4 é apresentado o método aplicado, incluindo a modelagem e sínteses de supervisores para a PPH.

O capítulo 5 mostra a implementação do controle supervisão em uma bancada experimental, servindo como experimento para avaliação da metodologia empregada.

E ao final, no capítulo 6 são apresentadas a conclusão geral do trabalho e sugestões de futuros trabalhos.

Capítulo 2

Planta de Produção de Hidrogênio

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão do estado da arte e da evolução mundial da indústria de produção de hidrogênio a partir da eletrólise alcalina da água. Também são descritas as unidades de processamento, subsistemas, automação e controle da Planta de Produção de Hidrogênio (PPH) instalada no Parque Tecnológico Itaipu (PTI) em Foz do Iguaçu.

2.1 Estado da Arte

As primeiras demonstrações de eletrólises de água e células a combustível capturaram a imaginação dos engenheiros nos anos 1800. O hidrogênio (H_2) foi usado para abastecer os primeiros motores de combustão interna há mais de 200 anos. O H_2 forneceu sustentação aos balões e aeronaves nos séculos 18 e 19, e impulsionou a humanidade para a lua na década de 1960 (Hoffmann, 2001). O H_2 no fertilizante de amônia ajudou a alimentar uma crescente população global. E o H_2 faz parte integrante da indústria de energia desde meados do século 20, quando seu uso se tornou comum na refinação de petróleo (Gull & Turk, 2019).

O abastecimento de H_2 a usuários industriais é atualmente um grande negócio global (Gull & Turk, 2019). A sua demanda cresceu mais de três vezes desde 1975, e continua aumentando como mostrado na Figura 2.1. A demanda por H_2 em sua forma pura é de cerca de 70 milhões de toneladas por ano. Esse H_2 é quase inteiramente fornecido a partir de combustíveis fósseis, com 6% do gás natural global e 2% do carvão global destinados à produção de H_2 . Como consequência, a produção de H_2 a partir dessas fontes é responsável pelas emissões de dióxido de carbono (CO_2) de cerca de 830 milhões de toneladas de CO_2 (Hurbet, Boom-Brett, & Buttner, 2018). Porém, quando é produzido a partir de fontes renováveis, pode reduzir emissões de gases de efeito estufa e fornecer combustível limpo, acessível e seguro para geração, transporte e outros setores de eletricidade (Sasaki, *et al.*, 2016).

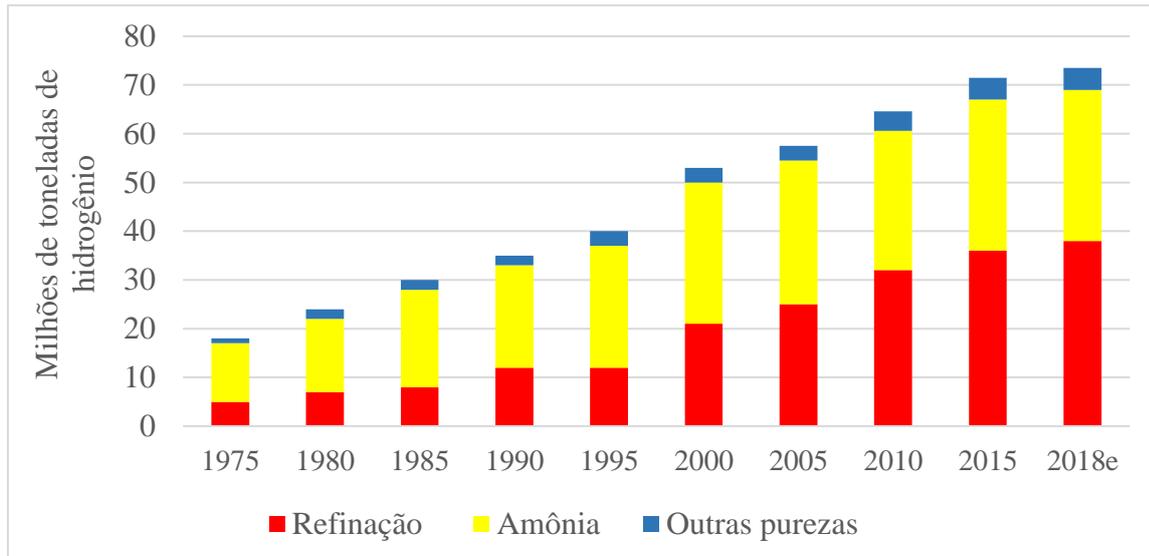


Figura 2.1: Demanda anual global por hidrogênio desde 1975.

Fonte: Adaptado de Gull & Turk (2019).

As tecnologias já disponíveis hoje permitem que o hidrogênio produza, armazene, mova e use energia de maneiras diferentes. O hidrogênio pode ajudar a enfrentar vários desafios críticos de energia. Oferece maneiras de descarbonizar uma variedade de setores, incluindo transporte, produtos químicos, ferro e aço, onde é difícil de reduzir significativamente as emissões. Também pode ajudar a melhorar a qualidade do ar e reforçar a segurança energética (Sasaki, *et al.*, 2016). O hidrogênio pode ser transformado em eletricidade e metano para alimentar casas, indústrias e como combustível para carros, caminhões, navios e aviões. O H₂ também tem o potencial de ajudar na suavização da produção variável de fontes renováveis, como a energia solar fotovoltaica e a energia eólica, cuja disponibilidade é intermitente e nem sempre é adequada à demanda. O hidrogênio é uma das principais opções para armazenar energia de fontes renováveis e pode ser armazenado por dias, semanas ou até meses (Gupta, 2009).

Os mercados existentes de H₂ baseiam-se em seus atributos: é leve, armazenável, reativo, possui alto conteúdo de energia por unidade de massa e pode ser facilmente produzido em escala industrial. O crescente interesse no uso de H₂ para sistemas de energia limpa repousa amplamente na característica de ser produzido a partir de uma gama diversificada de fontes de energia de baixo carbono. Porém, o H₂ puro não está prontamente disponível e é preciso obtê-lo a partir de outras matérias primas, realizando certos processos de transformação. Entre os principais processos, o método mais comum é pela eletrólise alcalina da água (Silveira, 2016).

A eletrólise alcalina da água é um processo eletroquímico que quebra a molécula da água (H_2O) em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2). O sistema consiste, essencialmente, em uma fonte de eletricidade (corrente contínua), eletrodos (ânodo e cátodo) e uma solução de eletrólito como condutor. A eletrólise ocorre quando uma corrente elétrica circula entre os dois eletrodos imersos na solução, causando a oxidação no ânodo e a redução no cátodo, com uma subsequente produção de hidrogênio (Gull & Turk, 2019).

A eletrólise alcalina da água tem uma longa história na indústria química, tendo sido praticada comercialmente na década de 1890. Algumas instalações estavam operando em torno do início do século XIX. Nas décadas de 1920 e 1930, várias plantas de grande capacidade foram instaladas com capacidades de ordem de 20.000 a 30.000 Nm^3/h (Dincer & Zamfirescu, 2016; Sasaki, *et al.*, 2016). A eletrólise alcalina da água é uma tecnologia madura e comercial, que apresenta caminho promissor para produção sustentável, já que oferece praticamente nenhuma poluição ou subproduto tóxico, se a corrente elétrica utilizada é gerada pelas fontes renováveis (Gull & Turk, 2019).

Internacionalmente, as primeiras grandes plantas de produção de H_2 por eletrólise da água foram instaladas em Europa e América do Norte em 1920 pelas empresas Lurgi, DeNora, Norsk Hydro e Brawan Boveri com uma capacidade de produção de 20.000 Nm^3/h a 30.000 Nm^3/h . Outras planta foram instaladas em 1960 pela Asea Brown Boveri (ABB) em Aswan (Egito) com uma capacidade de produção de 22.000 Nm^3/h , na cidade de Ryukan (Noruega) em 1965 com uma capacidade de cerca de 27.900 Nm^3/h da empresa Norsk Hydro (agora incorporada a Statoil). Além disso, outras plantas de eletrólise também foram instaladas em Trail no Canadá (1939), Cuzco no Peru (1958); Nangal na Índia (1958), Alabama nos Estados Unidos (1971) e Pico Truncado na Argentina (2006) (Vian, 2006; Ursúa, Gandía, & Sanchis, 2012; Sasaki, *et al.*, 2016).

No Brasil existem projetos em diversas empresas que utilizam a água para produzir hidrogênio via eletrólise. Um deles é a Companhia Energética de São Paulo (CESP) em colaboração com a Hytron e Hydrogenics (CESP, 2019). Outra empresa é a Itaipu Binacional em parceria com a Eletrobras e o Parque Tecnológico Itaipu (PTI) (Alvaro, 2014). Outros projetos são: o projeto do Ministério de Minas e Energia em conjunto com a Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos – São Paulo (EMTU/SP), com apoio do Programa de Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), Global Environment Facility (GEF) e Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) (Paladino, 2013); o projeto da AES Tietê, empresa da geração da AES Brasil em associação com a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

e com os institutos Aqua Génesis e Hytron (Oliveira, 2012); e, finalmente, o projeto da Cemig (Companhia de Energia de Minas Gerais), em associação com o Centro Nacional de Excelência em Energia de Hidrogênio (CENEH) (Carnieletto, 2011).

O sistema estudado neste trabalho consiste na Planta de Produção de Hidrogênio (PPH) instalada no Parque Tecnológico Itaipu (PTI) localizado na cidade de Foz de Iguaçu, Paraná. O sistema possui uma capacidade nominal de produção de $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (normal metro cúbico/hora), consumo médio total de 52,2 kWh, consumo de energia específica de $0,0045 \text{ MWh}/\text{Nm}^3$, e uma eficiência global do sistema de 27,6%. A capacidade de armazenamento máxima é de 800 m^3 (CNTP), consumindo aproximadamente 10 L/h de água desmineralizada durante a operação. A Figura 2.2 apresenta a vista panorâmica e interna da PPH.



Figura 2.2: Vista panorâmica e interna da PPH instalada no PTI.

2.2 Unidades de Processamento de uma Planta de H_2

A estrutura de uma planta de produção de H_2 a partir de eletrólise da água é formada por um conjunto de máquinas e ferramentas de produção, equipamentos de manuseio, dispositivos de inspeção e sistemas de computador que controlam todo o processo de produção. As instalações também incluem o *layout* da planta, que é a maneira como os equipamentos são organizados fisicamente.

Os dispositivos em geral são organizados em agrupamentos lógicos e esses se referem a arranjos de dispositivos que operam como os sistemas de fabricação em uma fábrica (Groover, 2002). Dessa forma, a PPH instalada no PTI está dividida em unidades de processamento, como apresentado na Figura 2.3.

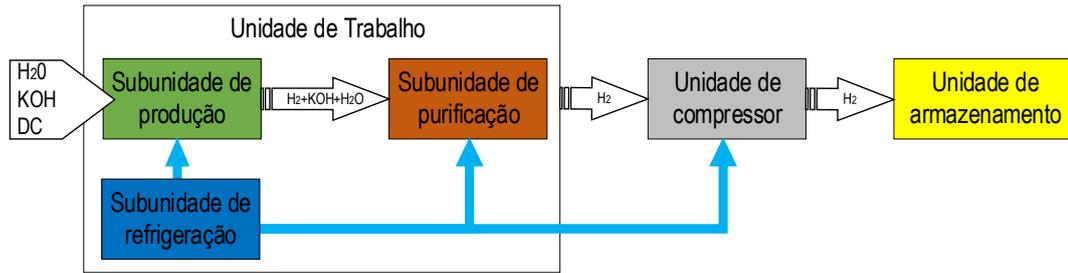


Figura 2.3: Unidades de processamento da PPH do PTI.

A subunidade de produção (Figura 2.3) é o estágio onde o H_2 é produzido e as principais insumos para seu funcionamento são: água desmineralizada (H_2O), eletrólito de hidróxido de potássio (KOH) e energia elétrica (em corrente contínua, DC). A subunidade de purificação é o segundo estágio, onde o H_2 passa por um processo de limpeza, que remove impurezas como a água saturada, eletrólito e oxigênio. A unidade do compressor e armazenamento são os últimos estágios, onde o H_2 é comprimido, armazenado e disponibilizado para uso. Finalmente, a subunidade de refrigeração é o estágio que mantém a temperatura de operação constante no sistema, a fim de obter uma melhor performance da planta.

2.3 Subsistemas da PPH

Um subsistema está composto por um conjunto de dispositivos interdependentes que complementam a operação global do sistema. Os subsistemas da PPH são: tanque de água, tanque de lavagem de H_2 , separador líquido de H_2 , filtro de H_2 , tanque de lavagem de O_2 , separador líquido de O_2 , separadores horizontais de H_2 e O_2 , entre outros. A Figura 2.4 apresenta os subsistemas que se encontram distribuídos em suas respectivas unidades e subunidades de processamento, na qual as linhas pretas representam o fluxo da matéria e as vermelhas, o fluxo de energia. A linha de produção de H_2 está indicada a partir da saída do eletrolisador no estado (7) indo até o estado (16), enquanto a linha de oxigênio vai do estado (3) até o (6). A produção de H_2 inicia-se quando retificadores induzem correntes elétricas contínuas entre placas metálicas externas dos eletrolisadores (20), conectadas em série com eletrodos bipolares e separados por diafragmas, imersos em solução eletrolítica alcalina composta de água (H_2O) e hidróxido de potássio (KOH), provocando assim uma reação eletroquímica da quebra da molécula de água e gerando bolhas gasosas de H_2 , O_2 e calor. As bolhas de H_2 e O_2 são transportadas separadamente por tubulações até tanques separadores horizontais (7 e 3). Os gases seguem até trocadores de calor (8 e 4), e são resfriados e

direcionados para os tanques de lavagem de H_2 e O_2 (9 e 5). O H_2 é levado para o vaso de pressão de H_2 (*Buffer-I*, 10) até atingir a pressão de operação, enquanto o O_2 é ventilado para o ambiente (6). No caso do H_2 , para ser eliminado no ambiente (30), deve estar em uma etapa de purga, despressurização ou energização, caso contrário, o H_2 continua na linha de purificação (10).

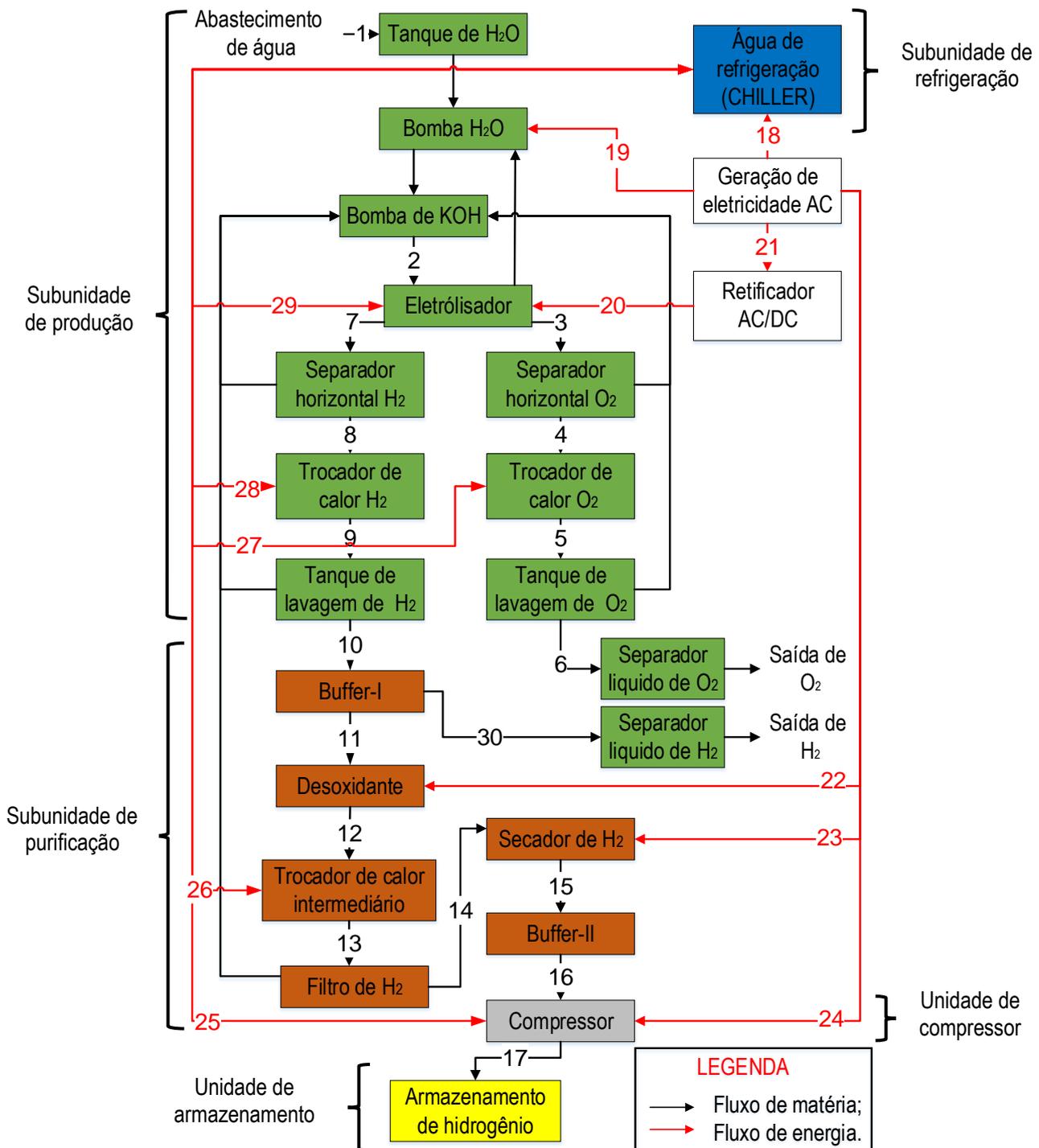


Figura 2.4: Esquema dos subsistemas nas unidades de processamento da PPH do PTI.

Fonte: Adaptado de Galeano, *et al.* (2017).

Seguindo a linha de H_2 o reator desoxidante (11) é empregado para reter contaminações de O_2 por meio de uma reação química de catálise, onde a quantidade mínima de O_2 em conjunto com o H_2 forma vapor de água. Seguindo o H_2 a linha é refrigerada pelo trocador de calor, onde irá ocorrer a condensação do vapor de água (12) gerada pelo reator desoxidante. Na sequência o H_2 é enviado para o filtro (13) onde é retirada a água e realimentada no eletrolisador. Na continuação, o H_2 é enviado para os secadores (14), e por fim, a produção é enviada para vaso de pressão (*Buffer-II*, 15) e assim evitar a flutuação da produção e assegurar a quantia mínima para a etapa de compressão (16) e armazenamento (17) em conjunto de cilindros externos.

2.4 Automação e Controle da Planta de H_2

Automação é uma tecnologia pela qual um processo ou procedimento é realizado sem assistência humana (Rosario, 2009). Ela tem como objetivo aumentar a eficiência do processo e maximizar a produção como o menor consumo de energia, menor emissão de resíduos e melhores condições de segurança, seja material ou humana (Lamb, 2015). A automação é implementada usando um programa de instruções combinado com um sistema de controle que executa tais instruções. Para automatizar o processo, são necessários três elementos básicos: energia elétrica para operar o sistema; programa de instruções para direcionar o processo; sistema de controle para acionar as instruções. A relação entre esses elementos é ilustrada na Figura 2.5.

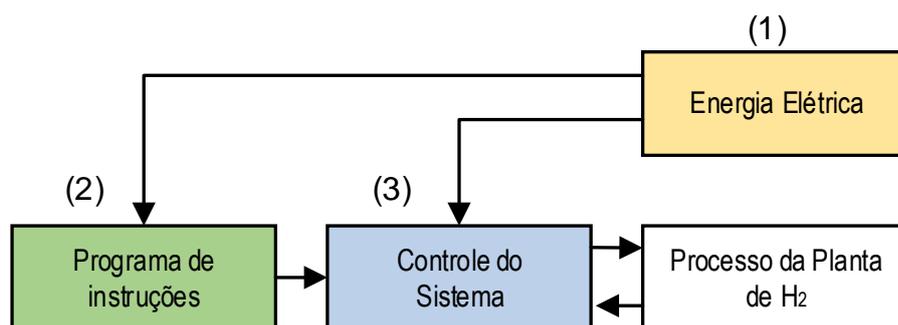


Figura 2.5: Elementos de um sistema automatizado.

Fonte: Adaptado de Groover, (2002).

Em um sistema automatizado de uma planta é necessário a energia elétrica (1) para conduzir o processo, bem como para o sistema de controle. A energia elétrica pode ser usada para realizar funções como sinal de transmissão, processamento de informação e

armazenamento de dados. Entretanto, ela também pode ser convertida em várias formas de energia alternativa, tais como: química, mecânica e térmica. As ações executadas pelo processo automatizado de uma planta são definidas por um programa de instruções (2). Se a operação da planta envolve baixa, média ou alta complexidade, cada forma de produto requer uma ou mais unidades de processamento. Essas unidades de processamento são executadas durante um ciclo de operação. Para cada ciclo de operação um novo produto é concluído. O elemento de controle do sistema (3) executa o programa de instruções e faz com que o processo cumpra sua função definida (Lamb, 2015). O sistema automatizado de uma planta também pode ser capaz de executar funções avançadas que não são especificadas para as unidades de processamento. Em geral essas funções estão preocupadas pelo monitoramento de segurança, diagnóstico de manutenção, diagnóstico de reparação e detecção de erros e recuperação, entre outros (Groover, 2002).

Considerando o caso de estudo, a PPH instalada no PTI tem um sistema automatizado centralizado em um Controlador Lógico Programável (CLP) com um conjunto de elementos dinamicamente relacionados entre si. Este controlador contém o programa de instruções e o controle do sistema, os quais operam sobre entradas que são sinais dos sensores. Os sensores são dispositivos que transformam variáveis físicas em variáveis digitais ou analógicas a serem processadas (temperatura, pressão, nível, etc). Com isso, o CLP fornece saídas que correspondem a comandos e sinais enviados aos atuadores, que também são dispositivos utilizados para executar uma ação (Junior, 2016).

A PPH instalada no PTI apresenta dois níveis de controle: controle lógico dos subsistemas e o controle sequencial da operação da planta. O programa de instruções em execução em um equipamento industrial, compondo o sistema de controle do sistema, tem a finalidade de estabelecer o funcionamento correto destes dois níveis. O controle lógico dos subsistemas se encarrega de garantir o funcionamento coerente e seguro de cada subsistema, com seus respectivos dispositivos. Cada um destes subsistemas possui um comportamento independente em relação ao controle sequencial da operação. Por sua vez, o controle sequencial da operação da planta consiste em garantir a execução, de forma contínua e segura, o ciclo de produção de hidrogênio em toda a planta.

Assim, os dois níveis de controles no presente trabalho são tratados de formas diferentes. O controle lógico dos subsistemas é abordado por meio do formalismo matemático da TCS e o controle sequencial da operação da planta é desenvolvido a partir do funcionamento de

produção de H_2 , representado por um fluxograma contendo a sequência de estados do ciclo de produção de H_2 . No capítulo 4 são apresentadas as duas abordagens com mais detalhamento.

A Figura 2.6 apresenta, resumidamente, o fluxograma com o funcionamento sequencial da planta que segue o ciclo de produção de H_2 .

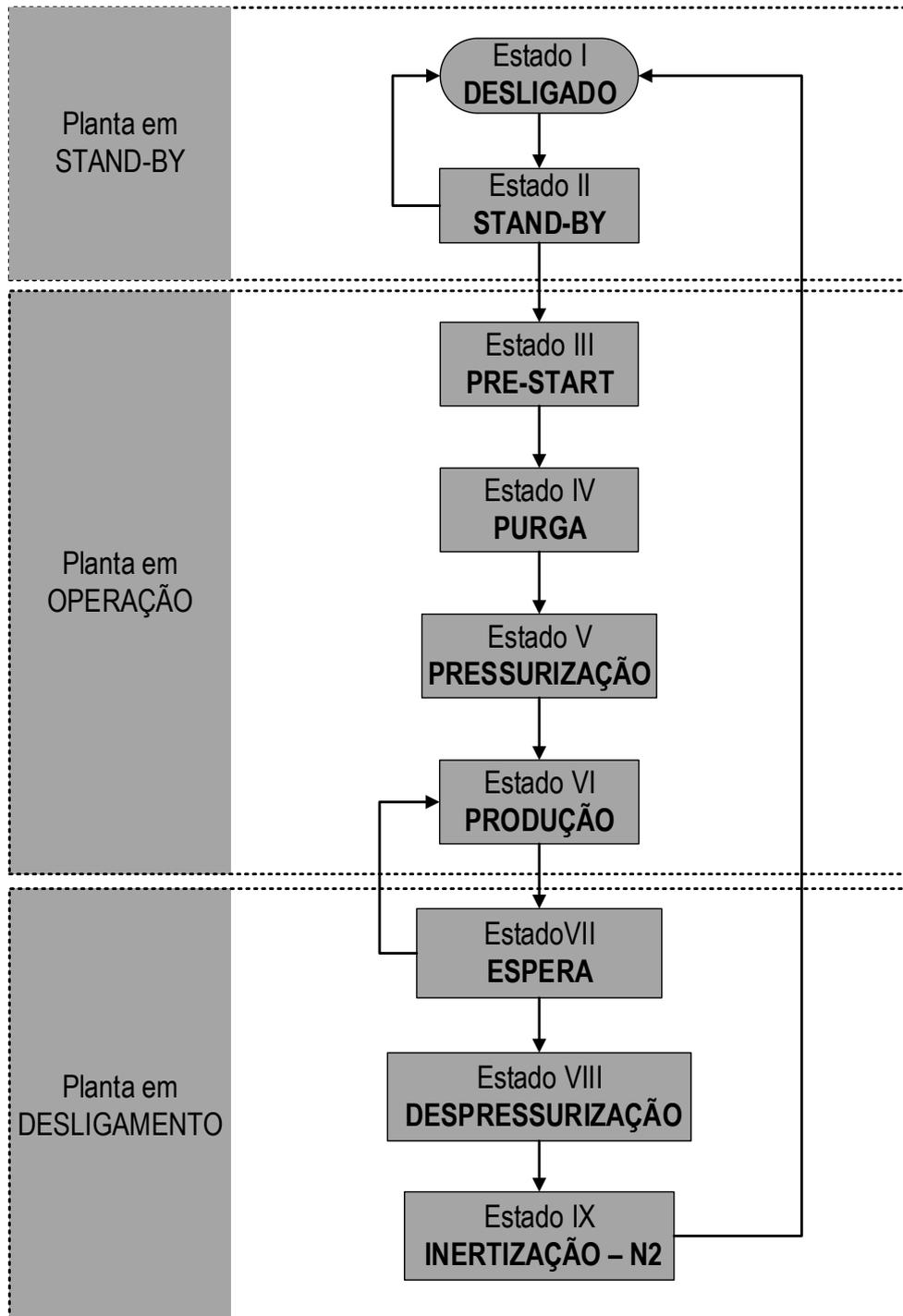


Figura 2.6: Fluxograma do controle sequencial da operação da PPH.

A seguir, segue uma breve descrição de cada um dos estados mostrados na Figura 2.6:

- Estado I - **DESLIGADO**: Estado onde a planta não está conectada à energia elétrica, e todos os subsistemas e dispositivos estão desenergizados.
- Estado II - **STANB-BY**: Estado onde a planta está ligada e inicia a verificação de alarmes ativos antes de evoluir para o próximo estado. Este processo de verificação de alarmes é obrigatório para manter a operação segura do processo.
- Estado III - **PRE-START**: Estado onde é energizada a bomba de Hidróxido de Potássio (KOH). Inicia a limpeza nos analisadores de gases e começa o processo de circulação da solução pelos eletrolisadores e os separadores horizontais de O₂ e H₂. O estado tem uma duração de 60 segundos.
- Estado IV - **PURGA**: Estado onde são energizados os eletrolisadores, bomba de *chiller* e duas válvulas solenoides de alívio. Inicia a produção de H₂ e O₂ que são liberados para o meio ambiente por estas duas válvulas. O procedimento serve para retirar o resíduo de nitrogênio (N₂) dos separadores horizontais, trocadores de calor, tanques de lavagem, *Buffer I* e nas linhas de tubulação de H₂ e O₂. Este estado tem uma duração de 420 segundos.
- Estado V - **PRESSURIZAÇÃO**: Estado onde as válvulas solenoides de alívio são desenergizadas e o sistema inicia a pressurizar. Quando a pressão no *Buffer I* alcança 3 Bar são energizados o reator desoxidante, secadores e um conjunto de válvulas solenoides na subunidade de purificação.
- Estado VI - **PRODUÇÃO**: Estado de operação em regime permanente de produção de H₂ e O₂ com pressão maior que 3 Bar. A pressão interna na linha de H₂ aumenta até atingir 17 Bar. Quando a pressão interna do *Buffer II* alcança 17 Bar, o compressor é ligado e inicia o processo de armazenamento de H₂ nos tanques de alta pressão. Quando a pressão interna do *Buffer II* diminui e alcança 14 Bar, o compressor é desligado e novamente o sistema inicia a pressurização. Esse ciclo é repetido até que ocorra uma operação manual e o botão *Stanb-by* seja ativado e o sistema mude de estado.
- Estado VII - **ESPERA**: Estado onde os eletrolisadores, o reator desoxidante, os secadores e um conjunto de válvulas solenoides são desenergizados, ainda mantendo o sistema pressurizado. Caso ocorra uma operação manual e o botão *Start* seja ativado o

sistema volta para o estado de produção. Se o estado de espera superar os 30 minutos o sistema automaticamente entra em despressurização.

- Estado VIII - **DESPRESSURIZAÇÃO**: Estado de despressurização na linha de H₂ e O₂. Quando a pressão no *Buffer I* chegar próximo a 0 Bar, o sistema evolui para o próximo estado.
- Estado IX - **INERTIZAÇÃO**: Estado onde os separadores horizontais, os trocadores de calor, os tanques de lavagem e o Buffer I são obrigados a passar por um processo de limpeza com N₂ por um intervalo de tempo de 180 segundos. Essa etapa é fundamental para manter a linha de produção livre da presença de H₂ e assim garantir a operação segura para o próximo ciclo de operação na produção de H₂.

Capítulo 3

Sistemas a Eventos Discretos e Teoria de Controle Supervisório

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão dos fundamentos da Teoria de Controle Supervisório (TCS), proposta por Ramadge e Wonham (1989). A apresentação da TCS é feita de forma objetiva e direcionada a mostrar o formalismo adotado neste trabalho para a representação e análise do comportamento de um Sistema a Eventos Discretos.

3.1 Sistemas a Eventos Discretos

Sistemas a Eventos Discretos (SED's) é uma área de pesquisa de interesse atual, voltada a uma classe de sistemas dinâmicos, onde as transições de estado são iniciadas por eventos que ocorrem em instantes discretos de tempo (Wonham, Cai, & Rudie, 2017). Entre as principais aplicações do SED's é possível citar: indústria de processos, indústrias de manufatura, sistemas de tráfego, sistemas de gerenciamento de dados e protocolos de comunicação (Wonham & Cai, 2010).

Do ponto de vista formal, um SED é um sistema dinâmico que evolui de acordo com a ocorrência assíncrona de certas ocorrências, chamados eventos (Cassandras & Lafortune, 2008). Um evento pode descrever a ocorrência abrupta e sem duração no tempo de um fenômeno no sistema, e assim, pode afetar o comportamento desse. Ao perceber a ocorrência de eventos, o sistema reage imediatamente gerando uma transição de estado a estado, onde este permanece até que ocorra um novo evento (Cury, 2001). Uma transição é definida como uma mudança abrupta de um estado a outro estado, e está definida como uma medida mensurável do comportamento do sistema num instante discreto de tempo (Spricigo, 2018).

Seja um exemplo do comportamento de um SED, representado na Figura 3.1, onde: e_1, e_2, \dots e e_7 representam os eventos e $s_1, s_2, s_3 \dots$ e s_6 os estados. Por exemplo, a ocorrência do evento e_4 no tempo discreto t_4 provoca a transição no estado do sistema de s_4 a s_1 . Desta forma, os eventos ocorrem em ponto de tempo discreto, e considerados instantâneos, e a transição de estados depende apenas destes eventos e do estado atual (Hrúz & Zhou, 2007).

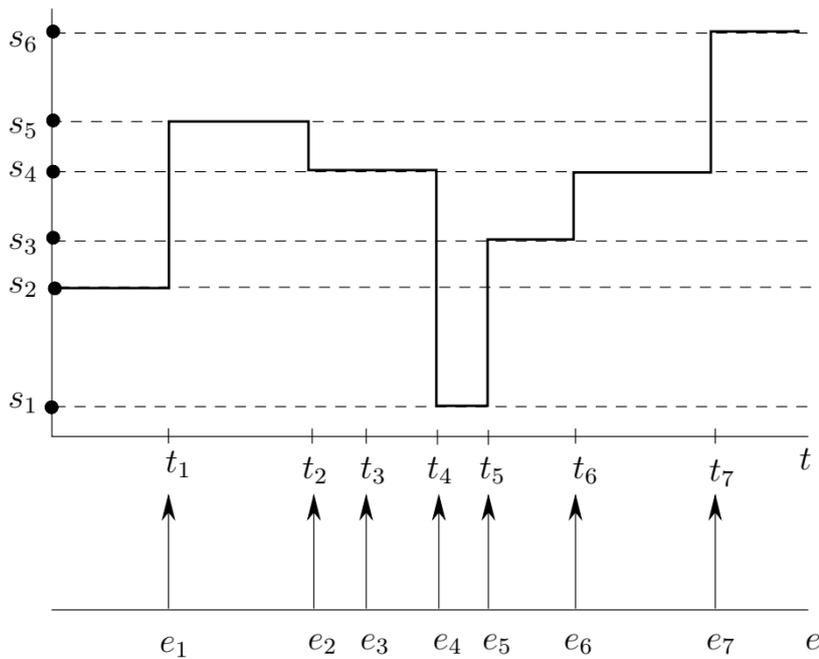


Figura 3.1: Sistema guiados por eventos.

Fonte: Cassandras & Lafortune (2008).

Devido a suas características específicas e principalmente à sua natureza discreta, um SED não pode ser tratado pelos modelos matemáticos baseados em equações diferenciais ou a diferenças, normalmente utilizados para tratar sistemas de variáveis contínuas e discretas no tempo (Wainer, 2009). Sendo assim, existem diversas abordagens que vêm sendo utilizadas para o desenvolvimento da modelagem de SED's, entre elas: Teoria de Filas (Kleinrock, 1975), Autômatos Finitos (Ramadge & Wonham, 1989), Redes de Petri (Murata, 1989), Cadeias de Markov (Glynn, 1989) e Álgebra de Max-Plus (Baccelli, Cohen, Olsder, & Quedrat, 1992).

Neste trabalho será utilizada a abordagem de Ramadge e Wonham para a modelagem de SED's, que se encontra baseada na teoria de linguagens e autômatos. Assim, nas próximas seções será apresentado o formalismo das linguagens regulares, autômatos finitos e a teoria de controle supervisor.

3.1.1 Linguagens

Ao considerar a evolução dos estados de um SED, preocupa-se, principalmente, pelo conjunto de todas as possíveis sequências de eventos que causaram as correspondentes transições de estado. Estas sequências de eventos são chamadas de palavras (ou cadeias) do sistema, e o conjunto de palavras é chamado linguagem do sistema (Kumar & Garg, 1995). Dessa forma, a linguagem pode ser vista como um modelo capaz de descrever o comportamento de SED's.

Um alfabeto é um conjunto de símbolos finitos e não vazio, denotado por Σ . Cada símbolo representa ou está associado a um evento distinto. Uma linguagem é definida sobre um alfabeto Σ , que é um subconjunto de palavras formadas pelas sequências de eventos finitos pertencentes a este alfabeto. O comprimento da palavra é definido pelo número de símbolos que ela contém que corresponde ao número de ocorrências de eventos na referida sequência. Seja Σ^* o conjunto de todas as palavras possíveis, ou cadeias finitas, formadas pelos eventos constituintes do alfabeto Σ , incluindo a cadeia vazia ϵ . Assim, uma linguagem definida sobre Σ é sempre um subconjunto de Σ^* (Cassandras & Lafortune, 2008; Marchand, 2017).

Antes de continuar com a definição das propriedades de operação da linguagem é importante definir o que é uma expressão regular. Essa é uma notação formal clara e concisa que define uma linguagem, também está intimamente relacionada a um autômato e pode ser pensada como uma alternativa fácil de representar na notação desse autômato. A expressão regular também pode ser considerada uma linguagem de programação, com algumas aplicações importantes, como aplicativos de pesquisa ou componentes do compilador (Carroll & Long, 1989; Cassandras & Lafortune, 2008).

Operações sobre linguagens

As operações matemáticas usuais para a teoria de conjuntos, também podem ser executadas sobre linguagens, tais como, união, interseção, diferença e complemento (Cury, 2001). Outras operações adicionais, tais como, concatenação, prefixo fechado e fechamento-Kleene, permitem a construção e descrição da sequência de eventos pertencente à linguagem. Assim, antes de definir estas operações, é necessário definir as terminologias relacionadas a sequência. Considera-se a palavra $s \in \Sigma^*$, particionada arbitrariamente da forma $s = tuv$ em

que $t, u, v \in \Sigma^*$, as sequências t, u, v são subsequências de s , onde: t é chamado de prefixo de s ; u é chamado de subpalavra de s ; e v chamado de sufixo de s .

- Concatenação

A concatenação é uma operação que consiste na associação de uma palavra pertencente a uma linguagem L_a , seguida de uma palavra pertencente a outra linguagem L_b , sendo $L_a, L_b \subseteq \Sigma^*$. A referida concatenação é representada pela cadeia $L_a L_b$, e é definida como:

$$L_a L_b = \{s \in \Sigma^* : (s = s_a s_b) \text{ e } (s_a \in L_a) \text{ e } (s_b \in L_b)\} \quad (3.1)$$

Logo, uma cadeia que está em $L_a L_b$ pode ser escrita como a concatenação de uma cadeia de L_a com uma cadeia de L_b .

- Prefixo-fechamento

O prefixo de fechamento, ou simplesmente fechamento de uma linguagem L , é definido como o conjunto de todos os prefixos das palavras pertencentes à referida linguagem incluindo a palavra vazia ε . Dessa forma, seja uma linguagem $L \subseteq \Sigma^*$, então o fechamento de L é representado por \bar{L} , definido como:

$$\bar{L} = \{s \in \Sigma^* : (\exists t \in \Sigma^*) [st \in L]\} \quad (3.2)$$

Dessa forma, \bar{L} é então formado por todas as cadeias que são prefixos de L e, em geral, $L \subseteq \bar{L}$. Diz-se que L é chamado de prefixo fechado se $L = \bar{L}$. Assim, a linguagem L é prefixo fechado se qualquer prefixo de qualquer cadeia em L também é um elemento de \bar{L} . O comportamento de um SED pode ser representado por uma linguagem L prefixo fechado, mas o comportamento marcado² nem sempre.

- Fechamento Kleene

O fechamento Kleene de uma linguagem é formado pela concatenação de um número finito de cadeias L , incluindo a cadeia vazia ε . Seja a linguagem $L \subseteq \Sigma^*$, então o fechamento Kleene de L é representado por L^* , e é definida como:

² Conjunto de cadeias em L que correspondem a tarefa completadas que o sistema pode realizar (Cury, 2001).

$$L^* := \{\varepsilon\} \cup L \cup LL \cup LLL \cup \dots \quad (3.3)$$

3.1.2 Autômato

Um autômato é definido como um modelo matemático capaz de representar uma linguagem, de acordo com as regras definidas, através de uma representação gráfica, ou seja, através de um diagrama de transição de estados. Na Figura 3.2 é representado um diagrama de transição de estado, no qual cada nó está associado a um estado do sistema e as transições estão associadas aos eventos (a , b e c) que promovem as mudanças de estado. Nesses diagramas, os estados marcados são os que indicam o fim do processo e são caracterizados por nós desenhados com linhas duplas e o estado inicial é identificado por uma seta (Queiroz, 2000; Silva, 2014).

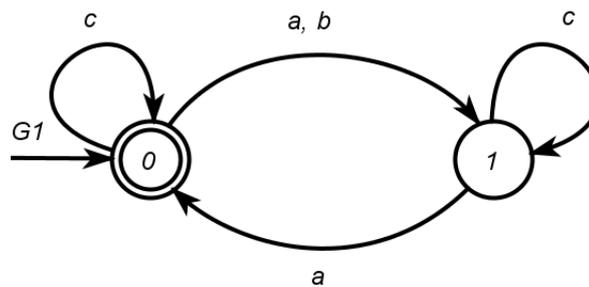


Figura 3.2: Diagrama de transição de estados de um autômato.

Fonte: Adaptado de Silva, (2014).

Um autômato pode ser determinístico ou não determinístico. Um autômato determinístico é aquele que se encontra em um único estado depois da ocorrência de uma sequência de eventos, ou seja, se refere ao fato de que para uma determinada sequência de eventos existe somente um estado ao qual o autômato pode transitar a partir do estado atual. Por outro lado, um autômato não determinístico é aquele em que há estados nos quais a ocorrência de um mesmo evento pode levar a estados seguintes diferentes, ou seja, há probabilidades associadas a ocorrência de certos eventos em determinados estados. Deste modo, a execução de uma mesma sequência de eventos pode levar o autômato a alcançar estados subsequentes diferentes (Hopcroft, Motwani, & Ullman, 2001; Anderson, 2007).

A relação entre linguagens e autômatos está nos eventos que representam as transições entre um estado e outro. Formalmente, um autômato determinístico é definido pela seguinte expressão (Cassandras & Lafortune, 2008):

$$G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m) \quad (3.4)$$

onde Q é um conjunto finito não-vazio de estados; Σ é o conjunto finito de eventos; δ é a função de transição parcial de estados, definida por $\delta: \Sigma \times Q \rightarrow Q$; $q_0 \in Q$ é o estado inicial e; $Q_m \subseteq Q$ é o conjunto de estados marcados que determinam o sucesso do término do processo.

Em geral é possível visualizar G como um dispositivo que gera palavras (gerador), iniciando no estado inicial q_0 e executando apenas transições para as quais sua função de transição δ é definida, ou seja, apenas um subconjunto de elementos do domínio $\Sigma \times Q \rightarrow Q$ (Wonham & Cai, 2010).

Linguagens Representadas por Autômatos

O conjunto de todas as sequências de eventos que partem do estado inicial q_0 é denominado linguagem gerada pelo autômato $L(G)$. Ou seja, caso o autômato seja usado para representar o comportamento de um SED, a linguagem gerada constitui o conjunto de todas as possíveis sequências de eventos que o sistema pode realizar. Por sua vez, o subconjunto da linguagem que parte de um estado inicial q_0 e que atinge um estado marcado $q_m \in Q_m$ é denominado linguagem marcada $L_m(G)$. Neste caso, com a inclusão da linguagem marcada, o autômato representa o comportamento de um SED constituído por um conjunto de tarefas completadas no sistema (Cury, 2001; Rezende, 2012; Costa, 2015). Estas duas linguagens são definidas sobre o alfabeto Σ e fazem parte do conjunto Σ^* , definidas como:

$$L(G) = \{s \in \Sigma^*: \delta(q_0, s) \text{ é definida}\} \quad (3.5)$$

e

$$L_m(G) = \{s \in L(G): \delta(q_0, s) \in Q_m\} \quad (3.6)$$

Quando um sistema possui um número de estados infinito é impossível encontrar um autômato que o represente, ainda que exista uma expressão regular que represente o sistema. O teorema de Kleene relaciona os autômatos de estados finitos às linguagens regulares, e formalmente é definido como (Cassandras & Lafortune, 2008):

Teorema de Kleene: Se L é regular, existe um autômato determinístico de número finito de estados G tal que $L_m(G) = L$. Se G é um autômato determinista de estados finitos, então $L_m(G)$ é regular.

Assim, pode-se afirmar que os autômatos deterministas de estados finitos e as expressões regulares possuem o mesmo poder de expressão. Isso quer dizer que ambos conseguem representar as mesmas classes de linguagens, as linguagens regulares (Cunha, 2003).

Propriedades e Operações com Autômatos

Um autômato determinístico de estados finitos G pode apresentar estados de acessibilidade, co-acessibilidade e aparados (*trim*). Os estados de um autômato que são alcançáveis a partir do estado inicial q_0 são chamados acessíveis. O estado inicial é acessível por definição e se todos os estados de um autômato forem acessíveis, o autômato é chamado acessível. Por outro lado, os estados de um autômato a partir dos quais é possível atingir pelo menos um estado marcado $q \in Q_m$ são chamados coacessíveis. Estados marcados são coacessíveis por definição. Se todos os estados de um autômato forem coacessíveis, o autômato é chamado de coacessível. Finalmente G é *trim* se for acessível e coacessível (Wonham & Cai, 2010; Kaszubowski, 2016).

Quando a evolução do autômato se restringe a um estado ou conjunto de estados nos quais não há possibilidade de alcançar um estado marcado então o sistema encontra-se em bloqueio. Geralmente um evento indesejável leva a um bloqueio do sistema, existindo dois tipos de bloqueio: *livelock* e *deadlock*. O *livelock* ocorre quando a condição de evolução do autômato está contida em um grupo de estados a partir dos quais não é possível alcançar um estado marcado fora deste. Por sua vez, *deadlock*, é a condição que leva o autômato a um estado não marcado em que não há possibilidade de saída do mesmo e nem de avanço a outro estado (Cassandras & Lafortune, 2008; Spricigo, 2018). Formalmente um autômato é dito não bloqueante se satisfaz a seguinte expressão (Wonham & Cai, 2010):

$$\overline{L_m(G)} = L(G) \quad (3.7)$$

ou seja, sempre que todos os estados acessíveis de um autômato forem coacessíveis, o autômato é não bloqueante (Ramadge & Wonham, 1989). Naturalmente G *trim* implica em G não bloqueante, mas o inverso é falso: um autômato não bloqueante pode ter estados não acessíveis. (Kaszubowski, 2016)

Existem sistemas compostos que podem ser compreendidos pelo funcionamento concorrente de vários subsistemas que o constituem e que integram entre si (Battistella, 2015). Esta composição pode representar a combinação dos comportamentos dinâmicos dos

subsistemas através da operação de composição ou produto síncrono entre os autômatos que representam tais subsistemas (Cassandras & Lafortune, 2008). O produto síncrono de dois autômatos $G_1 = (Q_1, \Sigma_1, \delta_1, q_{01}, Q_{m1})$ e $G_2 = (Q_2, \Sigma_2, \delta_2, q_{02}, Q_{m2})$ é representado por:

$$G_1 \parallel G_2 := (Q_1 \times Q_2, \Sigma_1 \cup \Sigma_2, \delta_{1\parallel 2}, (q_{01}, q_{02}), Q_{m1} \times Q_{m2}) \quad (3.8)$$

onde,

$$\delta_{1\parallel 2}((q_1, q_2), \sigma) = \begin{cases} (\delta_1(q_1, \sigma), \delta_2(q_2, \sigma)) & \text{se } (\delta_1(q_1, \sigma) \text{ e } \delta_2(q_2, \sigma) \text{ estão definidos}) \\ (\delta_1(q_1, \sigma), q_2) & \text{se } \delta_1(q_1, \sigma) \text{ está definido e } \sigma \notin \Sigma_2 \\ (q_1, \delta_2(q_2, \sigma)) & \text{se } \delta_2(q_2, \sigma) \text{ está definido e } \sigma \notin \Sigma_1 \\ \text{Indefinido} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.9)$$

O produto síncrono é obtido evoluindo em paralelo os autômatos G_1 e G_2 , de forma que caso exista um evento comum (σ) aos dois autômatos, este evento somente é executado se ambos o executarem de maneira síncrona. Por outro lado, os eventos particulares existentes somente em um dos autômatos não estão sujeitos a tal restrição, podem ser executados quando possíveis no autômato ao qual estão relacionados. Caso o alfabeto de dois autômatos seja idêntico, então $L(G) = L(G_1) \cap L(G_2)$ e $L_m(G) = L_m(G_1) \cap L_m(G_2)$. Caso os autômatos não possuam eventos em comum o autômato G representa o comportamento concorrente e assíncrono dos dois autômatos (Matsumi, 2012).

3.2 Teoria de Controle Supervisório

A Teoria de Controle Supervisório (TCS), formulada por Ramadge & Wonham (1989), constitui uma importante metodologia formal de síntese de controladores ótimos para SED's. A TCS propõe o desenvolvimento de modelos formais de sistemas de controle baseada na teoria de autômatos e linguagens, a qual propicia um processo automático de síntese de supervisores que atendam de forma menos restritiva possível as especificações de controle, garantindo que o sistema funcione conforme o desejado. O sistema final projetado é minimamente restritivo e não bloqueante, ou seja, o supervisor é capaz de desabilitar o menor número possível de eventos, evitando sequências indesejadas de eventos, a fim de garantir um comportamento seguro em malha fechada (Portilla, 2011; Battistella, 2015; Ribeiro, 2016).

A TCS propõe uma estrutura clara entre o sistema a controlar, denominado planta, e o agente controlador, denominado supervisor (Ramadge & Wonham, 1989). A planta é um sistema a ser controlado e que geralmente corresponde a um conjunto de dispositivos arranjados

segundo uma distribuição espacial dada. Assume-se que a planta gere eventos de forma espontânea e assíncrona no tempo, desconsiderando-se qualquer tipo de ação de controle. O supervisor é uma entidade que exerce uma ação de controle na planta, restringindo dinamicamente a ocorrência de um conjunto mínimo de eventos e garantindo, assim, o atendimento às especificações desejadas. O supervisor observa os eventos ocorridos na planta e estabelece quais eventos são desabilitados, tendo como referência o estado atual da planta (Cury, 2001; Balieiro, 2007; Faustino, 2015). Especificações representam as imposições de restrição sobre o comportamento da planta, ou seja, definem sequências de eventos que devem ser impedidos de ocorrer garantindo que o comportamento desejado em malha fechada seja realizado (Spricigo, 2018).

Dentro dessa abordagem, o comportamento livre de uma planta, denotada por G , possui o comportamento da linguagem gerada $L(G)$ e marcada $L_m(G)$. É possível que existam cadeias de eventos em G que levam o sistema a estados indesejados e, conseqüentemente, a situações de bloqueios ou dano da planta. Uma especificação E é um conjunto de restrições, que tem a finalidade de limitar o comportamento da planta, evitando que certos estados indesejados sejam alcançados. As especificações também são representadas por autômatos (Sivolella, 2005; Spricigo, 2018).

Para evitar esses estados indesejados na planta, um agente de controle tem que ser implementado. Na TCS, esse agente de controle é denominado de supervisor, e é representado por S . O supervisor S exerce sobre a planta G uma ação de controle restritiva, ou seja, restringe o comportamento da mesma àquele definido pelas especificações. Um supervisor também pode ser representado por um autômato mais uma função de habilitações e desabilitações de eventos. Sua construção é realizada por um processo de síntese, que constitui na composição síncrona dos autômatos que modelam a planta e as especificações (Costa, 2015; Faustino, 2015).

Para associar as estruturas de controle a uma planta G , o alfabeto de eventos Σ é particionado em dois: um conjunto Σ_c de eventos controláveis, cuja ocorrência pode ser inibida ou desabilitada, e um conjunto Σ_u de não controláveis, os quais estão sempre habilitados e o supervisor não tem influência (Sivaraman, Ramkrishma, & Maharana, 2011). Assim, o conjunto de eventos, ou alfabeto, da planta é dado por:

$$\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_u \quad (3.10)$$

Para que seja possível interferir no comportamento dinâmico do autômato da planta G , esta precisa ser dotada de uma interface através da qual se possa informar quais eventos devem ser habilitados e quais devem ser inibidos. Assim, considera-se uma estrutura de controle Γ que representa o conjunto de entradas de controle de uma planta G . A partir disso, considera-se também um subconjunto de eventos γ que deseja habilitar como uma entrada de controle em G . Naturalmente, esta entrada de controle não inibe eventos não controláveis (Ramadge & Wonham, 1989). Dessa maneira, formalmente, define-se uma estrutura de controle associada a G como o conjunto de entradas de controle:

$$\Gamma = \{\gamma \in 2^\Sigma: \Sigma_u \subseteq \gamma\} \quad (3.11)$$

onde 2^Σ é o conjunto de todos os subconjuntos do alfabeto de eventos Σ e a condição de $\Sigma_u \subseteq \gamma$ indica simplesmente que os eventos não controláveis estão sempre habilitados.

De modo geral, o supervisor é uma função que corresponde a $S: L(G) \rightarrow \Gamma$, e que associa cada palavra $s \in L(G)$ gerada pela planta a uma entrada de controle $\gamma = S(s)$, restringindo o comportamento da planta até a ocorrência de um novo evento. Isso significa que o supervisor controla a função de transição de G , no sentido de que os eventos controláveis podem ser habilitados e desabilitados, e se associa um conjunto de eventos habilitados a cada cadeia de eventos observadas na planta. Assim, a planta G não consegue executar um evento que não está no conjunto de eventos ativos se esse evento também não está nos eventos habilitados por S (Ramadge & Wonham, 1989; Balieiro, 2007).

O comportamento do sistema composto pela planta G sujeita à ação de um supervisor S é denotado por S/G (Ramadge & Wonham, 1989), cujo comportamento pode ser descrito pelo SED resultante da composição síncrona de S e G , isto é, $S \parallel G$, mais a ação de habilitação e desabilitação de eventos do supervisor S . O supervisor pode ser representado por um autômato, com estados e transições, e em cada estado, associa-se a ação de habilitação e desabilitação de eventos controláveis. Desse fato, na composição síncrona $S \parallel G$ somente as transições permitidas tanto no sistema controlado G como no supervisor S são permitidas (Cury, 2001). O sistema S/G pode ser caracterizado pela sua linguagem gerada $L(S/G)$ e sua linguagem marcada $L_m(S/G)$, e dessa forma, $L(S/G)$ representa a linguagem do comportamento do sistema sob supervisão, sendo definida formalmente como (Balieiro, 2007):

$$L(S/G) \subseteq L(G) \quad (3.12)$$

e satisfaz:

- $\varepsilon \in L(S/G)$;
- $s\sigma \in L(S/G) \Leftrightarrow s \in L(S/G), s\sigma \in L(G) \text{ e } \sigma \in S(s)$.

onde a cadeia vazia ε e as palavras s, σ geradas pelo supervisor da planta sempre pertencem à $L(S/G)$ desde que ela esteja contida em $L(G)$.

A linguagem marcada $L_m(S/G)$ representa o comportamento marcado do sistema sob supervisão e é definida como:

$$L_m(S/G) = L(S/G) \cap L_m(G) \quad (3.13)$$

onde $L_m(G)$ representa as tarefas que podem ser completadas pela planta, então $L_m(S/G)$ representa as tarefas completadas no sistema sob supervisão.

O supervisor S é dito não bloqueante (próprio) caso as sequências de eventos geradas pela planta sob supervisão sempre permitam concluir uma tarefa considerada completa, ou seja:

$$L(S/G) = \overline{L_m(S/G)} \quad (3.14)$$

isto implica que as sequências de eventos geradas pelo sistema sob supervisão sempre possam evoluir no sentido de se concluir uma tarefa imposta pelo sistema (Battistella, 2015).

Controlabilidade

A Controlabilidade é uma condição necessária e suficiente para a existência de um supervisor não bloqueante que satisfaz um comportamento desejado (Ramadge & Wonham, 1989). O comportamento desejado é especificado na forma de uma linguagem alvo $K = L_m(G)$. Desse modo, sejam as linguagens K e L definidas sobre Σ , em que $K \subseteq L$ e $L = \bar{L}$, e que o conjunto de eventos seja particionado como $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_u$. K é controlável em relação a L e Σ_u se (Ramadge & Wonham, 1989; Ribeiro, 2016):

$$\bar{K}\Sigma_u \cap L(G) \subseteq \bar{K} \quad (3.15)$$

Por definição, a controlabilidade, expressa na condição 3.15, é uma propriedade de prefixo fechado de uma linguagem, ou seja, K é controlável se \bar{K} é controlável. Isto significa que a ocorrência de um evento não controlável em G não gera uma sequência de eventos que desconsidere a especificação (Sivaraman, Ramkrishma, & Maharana, 2011).

A verificação da controlabilidade de uma linguagem torna-se importante pelo fato da existência de um supervisor que gere essa linguagem estar condicionada à controlabilidade, conforme mostrado no teorema a seguir.

Teorema de Controlabilidade: Seja $K \subseteq L(G)$, $K \neq \emptyset$. Existe um supervisor não bloqueante S para G tal que $L(S/G) = \bar{K}$ se, e somente se K é controlável com relação a $L(G)$ e Σ_u .

Máxima Linguagem Controlável

A máxima linguagem controlável, chamado $SupC(G, K)$ é a linguagem máxima que pode ser executada e que atende $L(S/G)$, o seja, que contém a máxima linguagem de K que é controlável em relação a G . O supervisor, portanto, deve ser não-bloqueante e minimamente restritivo para atender à $SupC(G, K)$ (Silva, 2014). A máxima linguagem é um procedimento iterativo que identifica os estados onde há a desabilitação de eventos não controláveis no autômato K , tal que (Ramadge & Wonham, 1989):

$$S: L_m(S/G) = SupC(G, K) \quad (3.16)$$

Para o cálculo de $SupC(G, K)$, deve-se identificar os maus estados de K e eliminá-los juntamente com suas transições. Um mau estado é identificado quando existe uma cadeia de eventos que não pertence a cadeias de eventos de G . Depois dessa etapa, é realizado o cálculo de sua componente acessível e coacessível para assim obter um autômato K *trim* (Claure, 1999; Cury, 2001).

3.2.1 Supervisor Monolítico

O controle de SED's utilizando a TCS é dito monolítico quando existe apenas um único supervisor para restringir o comportamento global de uma planta, que também é global (Portilla, 2011). O controle monolítico tem como objetivo projetar um único supervisor S (Figura 3.3) cuja função é habilitar ou desabilitar eventos controláveis, conforme a sequência de eventos observados na planta G , de forma que o sistema em malha fechada obedeça a algumas regras operacionais específicas (Ramadge & Wonham, 1989; Queiroz, 2004).

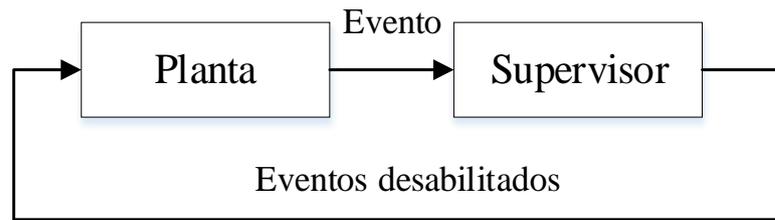


Figura 3.3: Estrutura do controle monolítico.

Fonte: Adaptado de Ramadge & Wonham (1989)

O processo de síntese do supervisor monolítico é realizado através do produto síncrono da planta G com a especificação E . A planta G é obtida através do produto síncrono de todos os m modelos que representam o comportamento livre dos dispositivos dos subsistemas num único autômato G :

$$G = G_1 \parallel \dots \parallel G_m \quad (3.17)$$

Para todas as n especificações que restringem o comportamento livre de G também é encontrado um único autômato E através do produto síncrono destas especificações:

$$E = E_1 \parallel \dots \parallel E_n \quad (3.18)$$

O comportamento desejado, ou linguagem alvo K , é obtido pela composição síncrona de G e E , ou seja:

$$K = G \parallel E \quad (3.19)$$

Finalmente, o supervisor monolítico S é obtido a partir da linguagem específica, ou linguagem alvo, K , tal que a máxima linguagem controlável é:

$$S: L_m(S/G) = SupC(G, K) \quad (3.20)$$

Uma das desvantagens no uso desta abordagem é que, para plantas mais complexas, na composição do modelo do sistema, o número de estados cresce exponencialmente com o número de modelos envolvidos. Da mesma maneira, para a síntese do supervisor se obtém um número elevado de estados pela composição síncrona de todas as especificações. Assim, pode se tornar impraticável a implementação em sistemas com limitação de recursos, como memória e processamento (Cantillo, 2007). Alternativas para este problema consistem nas abordagens do controle supervisorio modular, modular local e controle hierárquico (Ramadge & Wonham,

1989; Queiroz & Cury, 2002a; Claire T. , 2003), porém tais abordagens fogem ao escopo deste trabalho e não serão apresentadas.

3.2.2 Supervisor Monolítico Minimizado

O supervisor monolítico minimizado é um processo onde os estados e transições do supervisor podem ser reduzidos através da operação de minimização de autômatos. O procedimento é refinado e sem alterar as propriedades da linguagem do autômato (Cassandras & Lafortune, 2008). A minimização no supervisor é fundamental, pois o número de estados do supervisor obtido pode determinar a viabilidade da implementação no programa do Controlador Lógico Programável (CLP), tendo em vista que o número total de estado do supervisor determina o número de variáveis alocadas para a implementação (Wonham & Cai, 2010). No presente trabalho a minimização do supervisor foi calculada através da opção de minimização do software *Supremica*, ferramenta de modelagem SED's usada neste trabalho (Akenson, Fabian, Flordal, & Malik, 2006).

3.2.3 Processo de Síntese de Supervisor

Basicamente, a aplicação do controle supervísório monolítico no contexto deste trabalho é resumido nos seguintes passos:

- **Passo I:** Obtenção dos modelos dos dispositivos que conforma os subsistemas para o cálculo de um único modelo da planta do sistema, ou seja, a obtenção do autômato G ;
- **Passo II:** Após a classificação dos eventos controláveis e não controláveis, define-se as especificações de controle evitando os comportamentos indesejados e para que o sistema funcione de maneira segura e desejável. Da mesma forma, cada especificação é modelada separadamente, resultando em um autômato para cada especificação, e, finalmente, a especificação final E é obtida através da composição síncrona de todas as especificações;
- **Passo III:** Processo de síntese do supervisor S , uma vez garantido o teste de controlabilidade da especificação E , pois, este teste garante a existência e, portanto, a possibilidade de obtenção do supervisor minimamente restritivo.

Na Tabela 3.1 é apresentado o procedimento resumido da sistemática da síntese do controle supervisorio.

Tabela 3.1: Procedimento de síntese de controle supervisorio.

Passo I	Passo II	Passo III
<p>Obtenção de modelos dos subsistemas a ser controlada:</p> <p>a) Identificar os subsistemas que compõem a planta;</p> <p>b) Definir o alfabeto de eventos, classificando os eventos em controláveis e não controláveis;</p> <p>c) Construir os modelos de autômatos G_i para $i = 1, \dots, m$, dos m dispositivos identificados;</p> <p>d) Obter um único modelo G, da planta a ser controlada através do produto síncrono de todos os subsistemas, $G = G_1 \parallel \dots \parallel G_n$, identificando os eventos controláveis Σ_c e não controláveis Σ_u.</p>	<p>Obtenção dos modelos das especificações de controle:</p> <p>a) Identificar as restrições dos comportamentos indesejados para os subsistemas da planta;</p> <p>b) Construir os modelos de autômatos E_j para $j = 1, \dots, n$, das n especificações de controle dos subsistemas;</p> <p>c) Obter o modelo E, das especificações, pelo produto síncrono de todos os modelos, $E = E_1 \parallel \dots \parallel E_n$;</p> <p>d) Obter a linguagem alvo K, $K = G \parallel E$;</p> <p>e) Realizar o teste de controlabilidade.</p>	<p>Síntese de supervisores não bloqueantes:</p> <p>a) Síntese do supervisor ótimo S, tal que a máxima linguagem controlável seja $S: L_m(S/G) = SupC(G, K)$.</p>

3.2.4 Arquitetura de Implementação do Controle Supervisorio

A arquitetura de implementação de controle permite a tradução dos modelos usados na etapa de modelagem e síntese dos supervisores para a implementação em Controladores Lógicos Programáveis (CLP's). Dessa forma, o objetivo consiste em estruturar a execução do supervisor monolítico para ser implementada em linguagem de CLP's (Diagrama *Ladder*, Graficet, Texto Estruturado, etc.) (Faustino, 2015).

A estrutura apresentada na Figura 3.3, planta e supervisor, permite um funcionamento adequado nos modelos de autômatos baseados em eventos. No entanto, traduzir os modelos de autômatos para a linguagem do CLP apresenta dificuldades (Vieira, 2007; Rezende, 2012). Essas dificuldades encontradas na implementação de estruturas de controle supervisorio são: causalidade, efeito avalanche, sincronização inexata, simultaneidade e escolha (Queiroz & Cury, 2002b; Vieira, 2007):

- **Causalidade:** A TCS assume que todos os eventos são gerados espontaneamente pela planta e que os supervisores devem enviar os sinais de desabilitação dos eventos para a planta de acordo com a Figura 3.3. Contudo, nas aplicações práticas, os eventos controláveis não são gerados espontaneamente pela planta, mas são gerados a partir das respostas aos comandos dados pelos supervisores. Deste modo, o problema da causalidade é gerado devido à seguinte pergunta: quem é responsável por gerar os eventos controláveis, o supervisor ou a planta? (Vieira, 2007).
- **Efeito avalanche:** Ele ocorre quando a mudança do valor no CLP é registrada por meio de um evento e este provoca a transição indevida de mais de um estado do sistema num mesmo ciclo de varredura do CLP, resultando na quebra de sincronia entre a planta e o supervisor implementado no CLP e, como resultado, as futuras ações de controle serão inválidas (Lemes, 2011).
- **Sincronização inexata:** O CLP trabalha em uma iteração contínua chamada de ciclo de varredura (*scan*). Durante seu ciclo de *scan* o CLP executa basicamente três tarefas em momentos distintos: a leitura de entradas, a execução do programa e a escrita nas saídas. Assim, durante a execução do programa, o CLP não observa possíveis alterações de estado na planta. Uma alteração na planta poderá ocorrer durante a execução do programa. Então o problema de sincronização inexata surge quando uma mudança de sinal na entrada no CLP invalida a ação do controle correspondente a geração de um evento controlável (Rezende, 2012).
- **Simultaneidade:** Também chamado de incapacidade de reconhecer a ordem de eventos não controláveis. Este problema ocorre devido à natureza cíclica de execução do CLP, a qual a leitura de seus sinais de entrada é feita somente no início de cada ciclo de varredura. A ocorrência de eventos não controláveis da planta é identificada pelo CLP, a partir da alteração do valor dos sinais de entrada. Assim, se entre uma leitura e outra das entradas, houver uma mudança de valor de dois ou mais sinais, haverá o registro simultâneo de ocorrência de eventos não controláveis. No sistema real esta mudança nos sinais pode ser simultânea ou não, mas ela é registrada num mesmo ciclo de varredura do CLP (Lemes, 2011).
- **Escolha:** Tendo em vista que o supervisor gerado pela TCS é minimamente restritivo, assim, a planta tem maior grau de liberdade possível que atenda às especificações de controle. Isso normalmente resulta em supervisores que possuem estados onde há mais

eventos controláveis habilitados. Então, nesse estado, a escolha de qual dos eventos controláveis deverá ser o único habilitado é necessária. Tal escolha pode levar a uma implementação bloqueante de um supervisor não bloqueante (Kaszubowski, 2012).

Além destes, destaca-se a questão de abstração empregada para a modelagem aplicada na planta real. Geralmente o modelo considera apenas parte dos eventos efetivamente associados ao comportamento livre do sistema a ser controlado durante a síntese do supervisor. Tal abstração é importante para evitar a explosão de número de estados do modelo e do supervisor durante a síntese do segundo. Comumente são considerados apenas eventos necessários para coordenar o comportamento concorrente dos diversos sistemas (Vieira, 2007).

Há várias metodologias e métodos de implementação de supervisores que procuram tratar os problemas citados, entre elas é possível citar três propostas: Belami *et. al.* (1993), Martins & Cury (1997) e Queiroz & Cury (2002).

Arquitetura proposta por Belami, Hoffmann, Gyugyi, Wong-Toi e Franklin

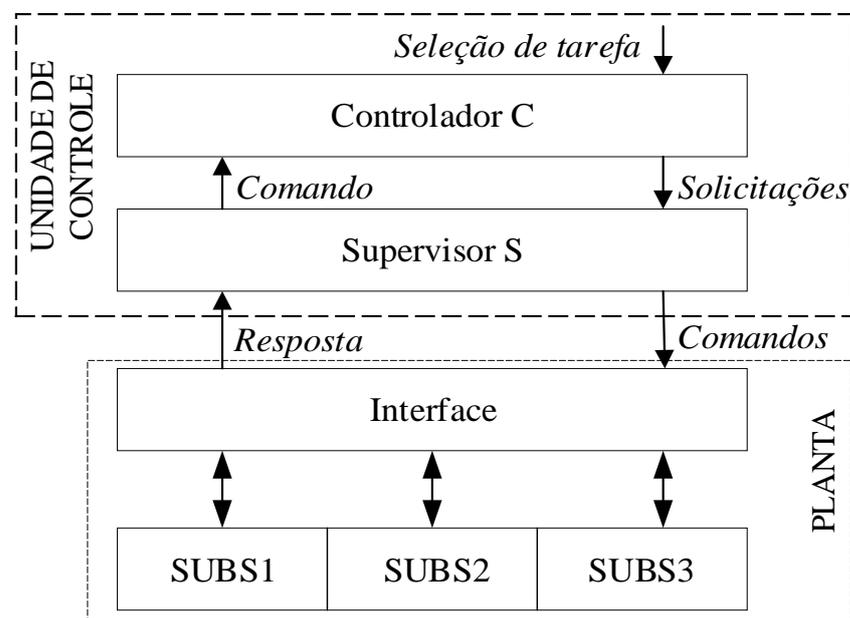


Figura 3.4: Arquitetura proposta por Belami, Hoffmann, Gyugyi, Wong-Toi e Franklin.

Fonte: Balemi *et. al.* (1993).

A arquitetura física de Belami *et. al.* (1993) é apresentada na Figura 3.4 e está compreendida por quatro módulos: Controlador, Supervisor, Interface e subsistemas. A unidade

de controle é particionada em duas entidades, um controlador ativo C , e um supervisor passivo S . O controlador gera *comandos* para a planta e tem a capacidade de conduzir ativamente a planta para um estado desejado, enquanto o supervisor é considerado um filtro dinâmico que só pode desativar os comandos que derivam do controlador por meio de um mecanismo de sincronização e que, desse modo, impede passivamente a planta de entrar em estados indesejados. A interface, por sua vez, recebe os sinais dos subsistemas 1, 2 e 3 e os mapeia em eventos controláveis e não controláveis para assim, por meio da interface, gerar *respostas* ao supervisor (Balemi, Hoffmann, Gyugyi, Wong-Toi, & Franklin, 1993).

Arquitetura proposta por Martins e Cury

A arquitetura física de Martins & Cury (1997) é apresentada na Figura 3.5 e consiste em quatro módulos: Supervisor, Módulo Intermediário (MI), Planta e Interface. Quando o sistema inicia sua evolução, o supervisor habilita a operação do processo. A função do supervisor é habilitar e desabilitar eventos correspondentes ao estado atual, com a finalidade de enviar esta informação para o MI. O MI é capaz de gerar eventos que são comandos enviados ao nível físico. Dependendo da informação vinda do supervisor, o MI decide pelo envio de algum comando. Este MI pode ser dividido em dois submódulos: um para de eventos controláveis (MIC) e outro para os eventos forçáveis³ (MIF). Quando existe uma mudança do estado, o supervisor envia ao MIC a informação tanto dos eventos controláveis habilitados quando os desabilitados (ϕ_c), pois ao receber esta informação, o MIC deve enviar imediatamente os comandos a nível físico (γ_c). No caso dos eventos forçáveis, o supervisor envia ao MIF somente eventos habilitados (ϕ_f), uma vez que a desabilitação destes eventos significa apenas a não aplicação do comando associado. O MIF, em seguida deve decidir se aplica ou não o comando de associação ao evento (γ_f). Além disso, deve também decidir, entre outros eventos forçáveis, qual efetivamente será aplicado. Se um evento forçável for aplicado (γ_f), o MIF deve enviar esta informação de volta ao supervisor (η_f) de modo a alertá-lo sobre a ocorrência do evento. Isto ocorre porque a planta não pode fornecer este tipo de informação, pois a mesma é gerada exclusivamente pelo MIF. A planta é um gerador de eventos que são enviados ao supervisor

³ Na arquitetura proposta por Martins e Cury um evento forçável é um evento que é imposto a ocorrer de forma instantânea em um estado da planta. Por exemplo, todos os eventos ao início da operação da planta são modelados como forçáveis para uma correta inicialização (Pinha, Queiroz, & Cury, 2010).

por meio do módulo da interface. O módulo da interface recebe os sinais dos sensores do nível físico e os mapeia em eventos controláveis e não controláveis (η_c, η_u) (Martins & Cury, 1997).

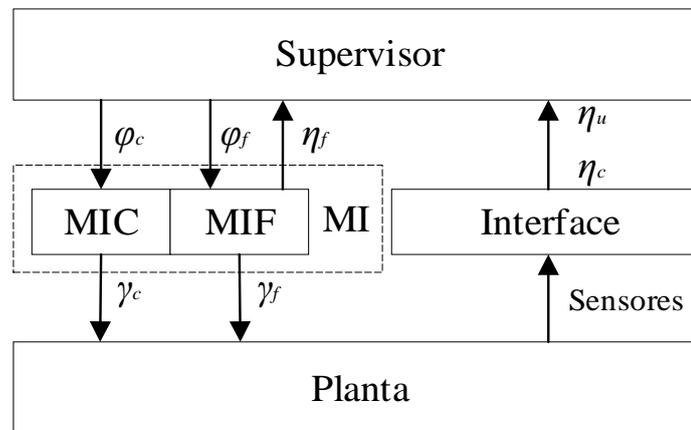


Figura 3.5: Arquitetura proposta por Martins e Cury.

Fonte: Martins & Cury (1997).

Arquitetura proposta por Queiroz e Cury

A arquitetura física de Queiroz & Cury (2002) é apresentada na Figura 3.6 e consiste em quatro módulos: Supervisor, Sistema Produto, Sequência Operacionais e Sistema Real. A ação de controle no nível dos supervisores se baseia nos estados ativos dos supervisores, que são atualizados de acordo com a ocorrência de *eventos* gerados pelo nível do sistema produto. Em cada estado do supervisor pode ocorrer uma ação de *desabilitação* de eventos controláveis que controlam o nível do sistema produto. O nível sistema produto contém os modelos que representam o comportamento livre da planta ou sistema. O sistema produto tem como principal função executar os *comandos* que são permitidos e não são desabilitados pelo supervisor, também receber *respostas* enviadas pelas sequências operacionais sinalizando, então, as mudanças de estado para os supervisores. Os supervisores são atualizados cada vez que o sistema produto envia comandos ou recebe respostas. As sequências operacionais são procedimentos de baixo nível, e no nível das sequências operacionais é feita a interface entre a solução de controle proposta e o sistema real. Este nível recebe os comandos do nível do sistema produto para gerar os sinais de *saída* para o sistema real e, por sua vez, ler os sinais de *entrada* provenientes do sistema real gerando respostas lógicas ao sistema produto. Sinais de entrada estão associados a eventos não controláveis e comandos, a eventos controláveis. Finalmente, no nível mais inferior tem-se o sistema real cuja representação baseada em autômatos é modelada no nível sistema produto (Queiroz & Cury, 2002a).

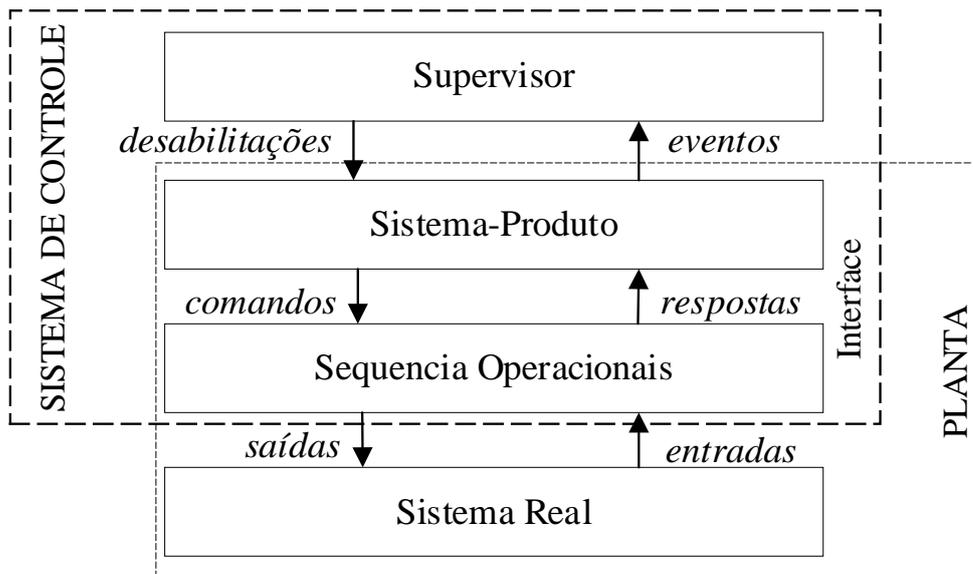


Figura 3.6: Arquitetura proposta por Queiroz e Cury.

Fonte: Queiroz & Cury (2002).

Para o desenvolvimento e a implementação dos supervisores nos CLP's, no presente trabalho foi utilizada a proposta de Queiroz e Cury. Esta arquitetura foi escolhida porque propõe solucionar alguns dos problemas apresentados anteriormente. Por exemplo, a causalidade, aponta para uma solução com a adoção da arquitetura multinível apresentada por Queiroz & Cury (2002). Ela apresenta o supervisor e o sistema produto separadamente. O supervisor apenas desabilita os eventos controláveis enquanto o sistema produto gera esses eventos e o sistema real (planta física) gera os demais eventos. A sequência operacional traduz os eventos internos do sistema de controle para os sinais de saída e entrada do CLP realizando a comunicação como o sistema real (Kaszubowski, 2012). Para o problema do efeito avalanche, propõe-se a utilização de duas memórias, onde a primeira é utilizada para armazenar os eventos gerados pela planta e a segunda é para proporcionar as transições dos estados do sistema produto e dos supervisores (Lemes, 2011). No caso do problema de escolha, deve-se avaliar o supervisor, identificando em quais estados este problema está presente e quais são os eventos envolvidos na escolha em cada estado. Para os demais problemas, tais como a simultaneidade e sincronização inexata, a arquitetura não apresenta uma solução sobre o ponto de vista da implementação e com base no argumento de que eles não podem ser solucionados em virtude da forma de funcionamento dos CLP's (Kaszubowski, 2012).

3.2.5 Metodologia de Implementação do Projeto de Controle

A Figura 3.7 apresenta a metodologia do projeto de controle proposta por Portilla et. al. (2014) que na sequência serão apresentadas a definição e etapas usadas.

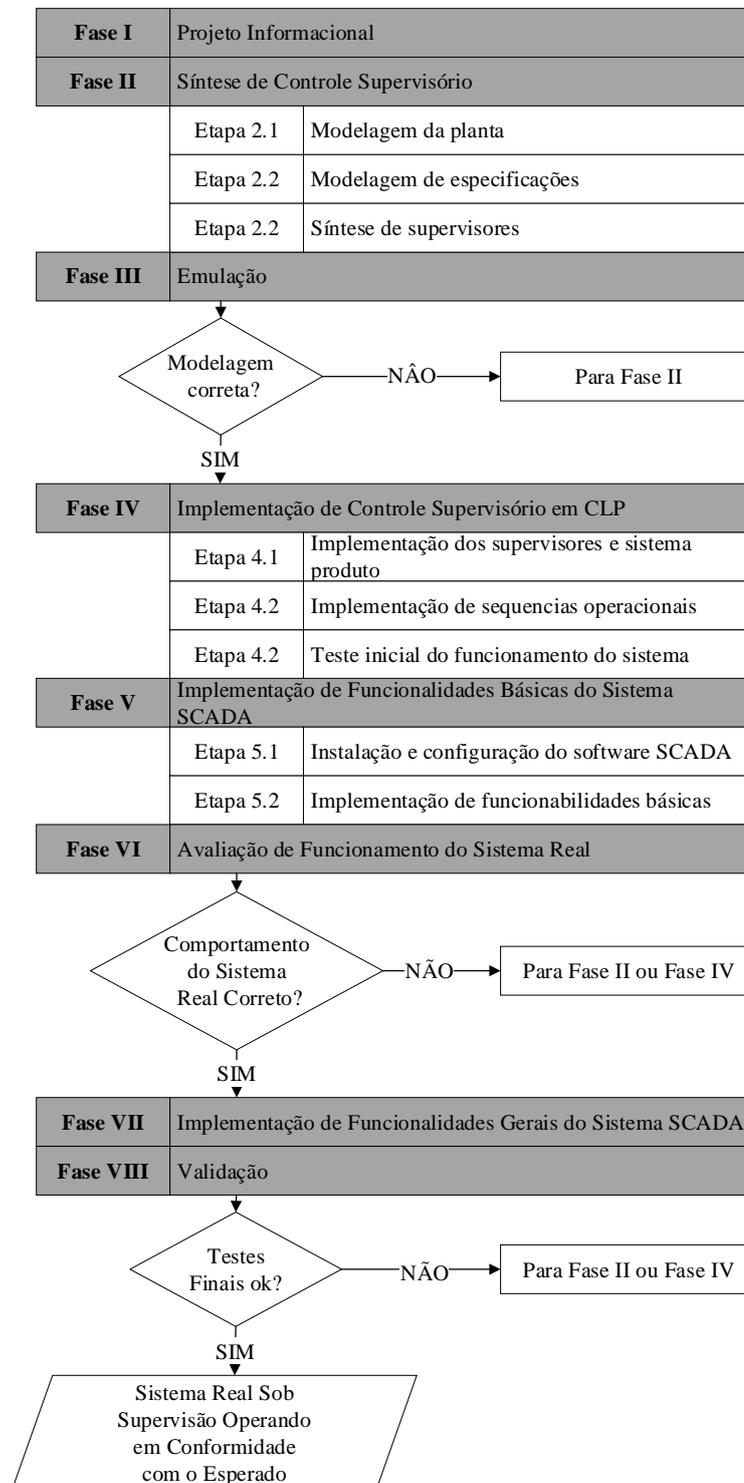


Figura 3.7: Metodologia de implementação do projeto de controle.

Fonte: Portilla et. al. (2014).

Para o desenvolvimento na implementação de projeto de controle em uma indústria de processos, Portilla *et. al.* (2014), apresenta uma metodologia de desenvolvimento integrado dividida em oito fases. Esta metodologia foi adotada neste trabalho porque envolve a TCS, a arquitetura proposta e as ferramentas para traduzir os autômatos em linguagem de CLP, além de incluir, também, etapas relacionadas ao monitoramento e supervisão da planta, com integração com os demais níveis. Contudo, no presente trabalho foram utilizadas somente as quatro primeiras fases, as quais são: Projeto Informacional; Síntese de Controle Supervisório; Emulação e Implementação de Controle Supervisório em CLP's. As demais fases não foram adotadas, notadamente as etapas referentes ao projeto e integração com SCADA (do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*) pois fogem ao escopo do presente trabalho. Na continuação são comentadas as quatro fases utilizadas.

- **Fase I - Projeto informacional:** são abordadas as especificações técnicas do projeto mediante a obtenção das informações do processo de operação a ser controlado e supervisionado. Nesta fase é necessário também descrever o comportamento fisicamente possível do sistema e subsistemas, a fim de definir as restrições do comportamento e coordenação desejada. Essas informações facilitam o desenvolvimento da fase de modelagem ao projetista. Outro fator importante é a definição de dispositivos de campo como atuadores e sensores, que fazem parte do sistema sob controle, tecnologias a serem utilizadas no desenvolvimento do projeto tais como: CLP's e microcontroladores, ferramentas computacionais que permitam a modelagem e sínteses do controle supervisório, software de configuração e programação dos CLP's e microcontroladores e finalmente, protocolos de comunicação entre o equipamento de controle e a estação de supervisão (Portilla, 2011).
- **Fase II - Síntese de Controle Supervisório:** nesta fase inicia-se a modelagem da planta a ser controlada, modelagem das especificações, síntese de supervisores não-bloqueantes, teste de controlabilidade e redução de supervisores. Na etapa de modelagem da planta, são construídos os autômatos que representam o comportamento livre da planta, incluindo cada um dos subsistemas ou equipamentos, definindo assim, todas as atividades e eventos relevantes referentes ao comportamento fisicamente possível. Na etapa de modelagem de especificações, constroem-se os autômatos que representam a operação coordenada e desejada dos subsistemas, pelos quais é possível restringir o comportamento livre da planta evitando assim estados proibidos na operação. Na etapa de síntese de supervisores, calcula-se a máxima linguagem

controlável contida em cada linguagem alvo, e por último, verifica-se a controlabilidade do supervisor (Faustino, 2015).

- **Fase III - Emulação:** nesta fase são realizados os testes lógicos de controle, por meio de uma ferramenta computacional definida na Fase I. A emulação permite acompanhar a atuação dos supervisores na planta, possibilitando identificar erros ocorridos na modelagem. Caso a modelagem não cumpra com a lógica proposta, é possível retornar à Fase II e fazer as correções repetitivas. Caso contrário, os supervisores e o sistema produto podem ser implementados (Portilla, Queiroz, & Cury, 2014).
- **Fase IV – Implementação em CLP:** a fase da implementação do controle supervísório no CLP é realizada segundo a arquitetura de implementação proposta por Queiroz & Cury (2002), e é dividida em três etapas. A primeira refere-se à implementação do controle supervísório. A segunda etapa é a implementação das sequências operacionais definida pelo programador do CLP e a última etapa são testes iniciais do funcionamento do sistema (Portilla, Queiroz, & Cury, 2014).

Capítulo 4

Modelagem dos Subsistemas e Controle Sequencial da Operação da PPH

Neste capítulo será apresentada a modelagem dos subsistemas de acordo com a TCS além do controle sequencial da operação da Planta de Produção de Hidrogênio (PPH). Para o primeiro, os subsistemas foram desenvolvidos pelo método formal apresentado no capítulo 3 que, em conjunto como a metodologia proposta por Portilla (2011), garante uma melhor flexibilidade e eficiência na estruturação da análise da lógica de controle dos subsistemas. Para o segundo, o controle sequencial de operação, será desenvolvido um fluxograma onde são modelados os estados da operação da planta, para assim fornecer uma visão geral da sequência operacional da PPH e assim garantir a operação da mesma.

A planta está composta por subsistemas independentes, como será visto mais adiante, e, portanto, é possível aplicar a abordagem de controle monolítico a cada um destes subsistemas separadamente. Cada subsistema será detalhado com seus modelos, que descrevem o comportamento livre de seus dispositivos, e as especificações de controle com os respectivos eventos controláveis e não controláveis que representarão o comportamento desejado dos subsistemas. O caso de estudo, a Planta de Produção de Hidrogênio (PPH) instalada no Parque Tecnológico Itaipu (PTI), está composto pelo seguinte conjunto de subsistemas:

- Tanque de água;
- Tanques de lavagem de H₂;
- Separador líquido de H₂;
- Filtro de H₂;
- Tanques de lavagem de O₂;

- Separador líquido de O_2 ;
- Tanques separadores horizontais de H_2 e O_2 ;
- Refrigeração;
- Compressor.

Estes por sua vez, estão formados por um conjunto de dispositivos os quais são sensores de temperatura, sensores de nível, transdutores de pressão e válvulas solenoides que são responsáveis para correto funcionamento de cada subsistema. A Figura A.1 (Apêndice A) apresenta uma vista expandida dos subsistemas e os dispositivos para um melhor entendimento da distribuição espacial do *layout* da planta.

4.1 Tanque de Água

O tanque de água é o equipamento que armazena água residual dos processos de tratamento de gases e a mescla com a água destilada de alimentação, para logo ser bombeado para os eletrolisadores. A Figura 4.1, mostra o interior do tanque com o sensor de nível *LS1*.

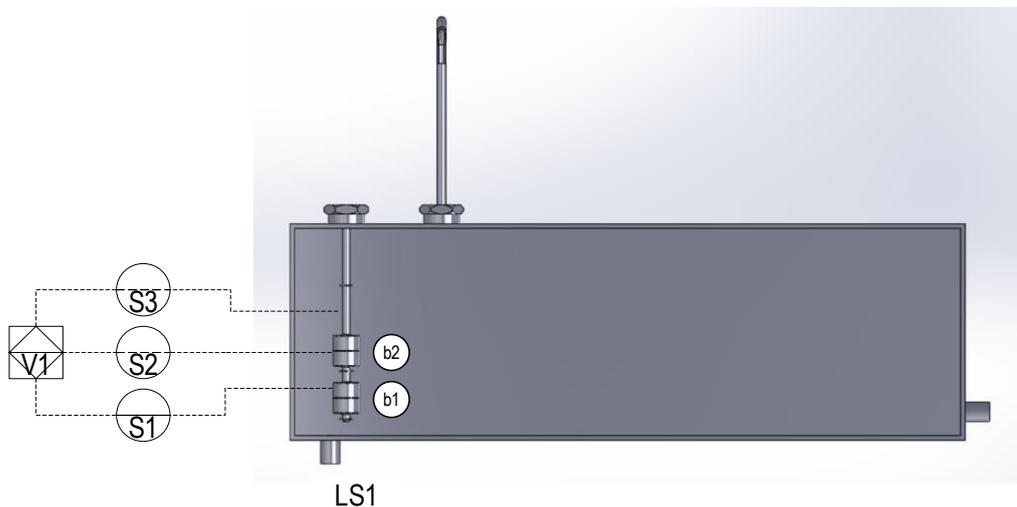


Figura 4.1: Vista interna do tanque de água com seu sensor de nível.

Na Figura B.1 (Apêndice B) observa-se que a válvula solenoide *V1* tem uma interdependência operacional com o sensor de nível *LS1*, instalado no interior do tanque de água. O funcionamento (Figura 4.1) consiste em armazenar água residual no tanque, de modo que a boia *b2* está no nível de *S3* e a válvula solenoide está desligada. Quando a água residual é bombeada por meio da bomba de H_2O para o sistema, o nível da água desce e a boia *b2* muda

de posição para o nível *S2*. Nesse momento, a válvula solenoide *VI* liga e inicia o processo de carregamento de água destilada no tanque até que, novamente, a boia *b2* atinja o nível *S3*. Se o nível de água descer e a boia *b1* atingir o nível *S1* o sistema entra no modo de alarme.

A terminologia adotada para os eventos do nível físico é apresentada na Tabela 4.1:

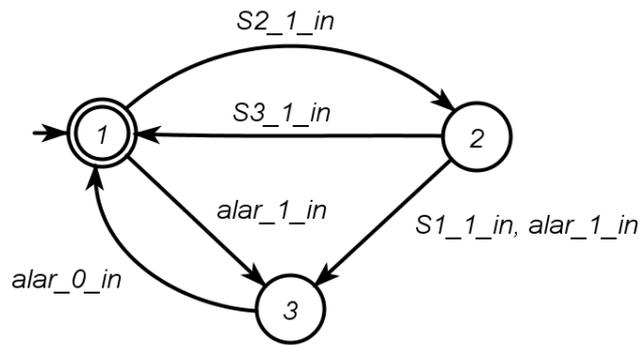
Tabela 4.1: Eventos dos dispositivos do tanque de água.

Evento	Descrição	Tipo de Evento
S1_1_in ⁴	Interruptor de nível <i>S1</i> . O evento ocorre quando o nível de água no tanque está muito baixo.	Não controlável
S2_1_in	Interruptor de nível <i>S2</i> . O evento ocorre quando o nível de água no tanque está baixo.	Não controlável
S3_1_in	Interruptor de nível <i>S3</i> . O evento ocorre quando o nível de água no tanque está alto.	Não controlável
alar_0_in	Alarme desativa. O evento ocorre quando o sistema identifica que não existe alarme ativo. O sistema e os subsistemas operam com total normalidade.	Não controlável
alar_1_in	Alarme ativa. O evento ocorre quando o sistema identifica um alarme ativo. Imediatamente se desliga a válvula <i>VI</i> e o sistema entra no Estado VIII – DESPRESSURIZAÇÃO (Controle sequencial da operação da planta, Figura 2.6).	Não controlável
L_V1_Co	Ligar válvula <i>VI</i> . O evento ocorre quando o tanque de água precisa de carga de água.	Controlável
D_V1_Co	Desligar válvula <i>VI</i> . O evento quando o tanque de água não precisa de carga de água.	Controlável

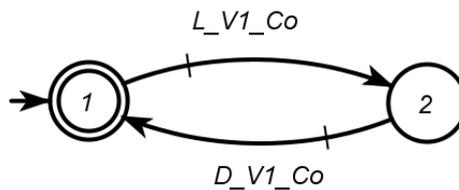
4.1.1 Modelagem do Tanque de Água e da Válvula *VI*

O autômato G1 (Figura 4.2) representa o modelo do comportamento livre do tanque de água. O estado 1 representa o tanque a nível alto de água residual, o estado 2, tanque a nível baixo de água residual e o estado 3, tanque a nível muito baixo de água residual.

⁴ Para desenvolvimento do análise dos sensores de nível foi considerado que o interruptor (S1_0_in, S2_0_in, S3_0_in..., S32_0_in) estão normalmente abertos e só mudam de estado para normalmente fechado quando a boia está alinhada com o interruptor (S1_1_in, S2_1_in, S3_1_in..., S32_1_in). Esta consideração também será aplicada nos próximos sensores de nível.

G1:**Figura 4.2:** Modelo do tanque de água.

O autômato G2 (Figura 4.3) representa o modelo do comportamento livre da válvula solenoide *VI*. O estado 1 representa a válvula solenoide *VI* fechada, e o estado 2, a válvula solenoide *VI* aberta.

G2:**Figura 4.3:** Modelo da válvula solenoide *VI*.

4.1.2 Modelagem da Especificação do Tanque de Água com a Válvula *VI*

Este tipo de especificação corresponde ao comportamento não desejado ou que deve ser restringido pelo supervisor no funcionamento do tanque de água com a válvula solenoide *VI*. Para este caso, assume-se que o estado 1 representa o tanque a nível de água residual alto com a válvula solenoide *VI* desligada, o estado 2, o tanque a nível de água residual baixo com a válvula solenoide *VI* ligada e o estado 3, com o tanque a nível de água residual muito baixo com *VI* desligada e alarme ativado no sistema. A restrição sobre o modelo da especificação consiste que nos estados 1 e 3 não pode ocorrer o evento de ligar a válvula *VI*, e no estado 2, não ocorrer o evento de desligar a válvula *VI*. O modelo desta especificação é dado pelo autômato E1 na Figura 4.4.

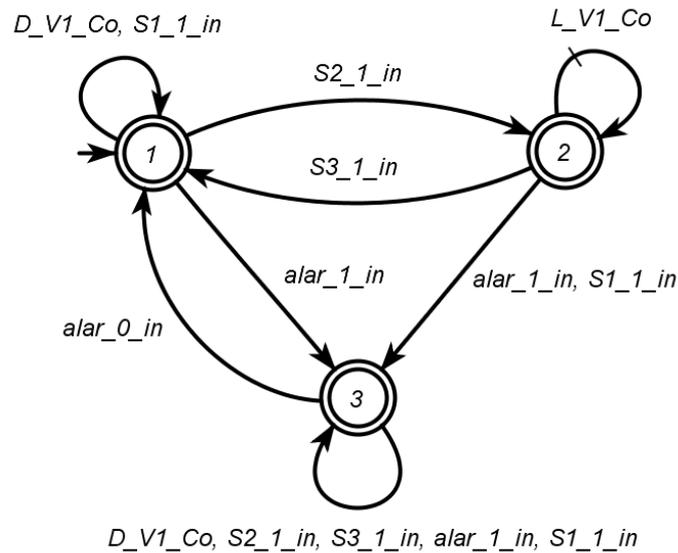
E1:

Figura 4.4: Modelo de especificação do tanque de água e a válvula solenoide V1.

4.2 Tanque de Lavagem de H₂

O tanque de lavagem de H₂ é o equipamento que está instalado na saída do separador horizontal de H₂, com a função de separar o gás de H₂ do líquido saturado restante do processo anterior. Seu funcionamento se baseia num processo cinético, no qual o gás de H₂ é lavado com a solução de água residual de eletrólito que se encontra em repouso na parte inferior do tanque. A Figura 4.5 mostra a vista interior do tanque com seu sensor de nível LS2.

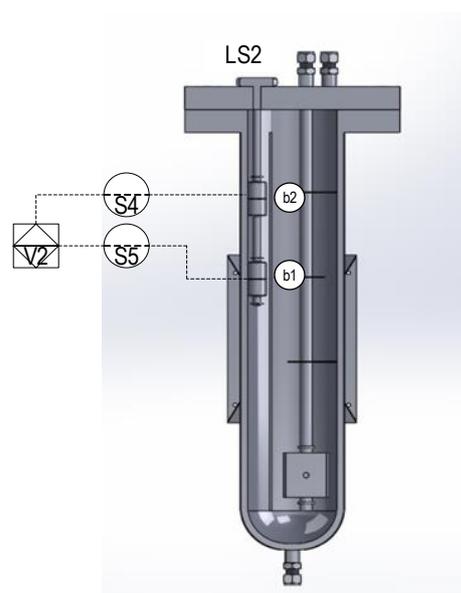


Figura 4.5: Vista interna do tanque de lavagem do H₂ com seu sensor de nível.

Na Figura B.1 (Apêndice B) se observa que a válvula solenoide V2 tem uma interdependência operacional com o sensor de nível LS2, instalado no interior do tanque de lavagem do H₂. O funcionamento consiste em manter a solução de água residual de eletrólito sob a boia *b1*, de tal forma que a boia *b1* esteja na posição do nível S5 com a válvula V2 desligada. Quando a água residual aumenta desloca a boia *b1* para fora da posição S5 e a boia *b2* chega no nível S4. Quando isto ocorre, a válvula V2 liga e ocorre o processo de descarga até que a boia *b2* retorne a sua posição inicial e a boia *b1* volte para a posição S5.

A terminologia adotada para os eventos do nível físico é apresentada na Tabela 4.2:

Tabela 4.2: Eventos do tanque de lavagem de H₂.

Eventos	Descrição	Tipo de Evento
S4_1_in	Interruptor de nível S4. O evento ocorre quando o nível da solução de água residual de eletrólito no tanque está alto.	Não controlável
S5_1_in	Interruptor de nível S5. O evento ocorre quando o nível da solução de água residual de eletrólito no tanque está baixo.	Não controlável
L_V2_Co	Ligar válvula V2. O evento ocorre quando o tanque precisa de um processo de descarga de água residual de eletrólito.	Controlável
D_V2_Co	Desligar válvula V2. O evento ocorre quando o tanque não precisa de uma descarga de água residual de eletrólito.	Controlável

4.2.1 Modelagem do Tanque do H₂ e da Válvula V2

O autômato G3 (Figura 4.6) representa o modelo do comportamento livre do tanque de lavagem de H₂. O estado 1 representa o tanque a nível baixo de água residual de eletrólito e o estado 2, tanque a nível alto de água residual eletrólito.

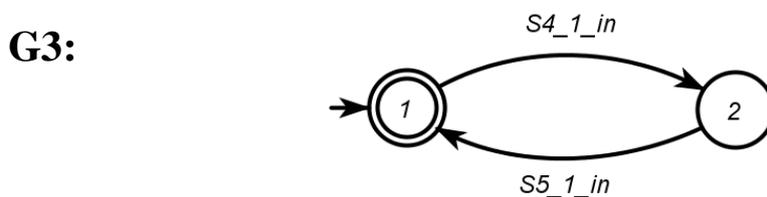
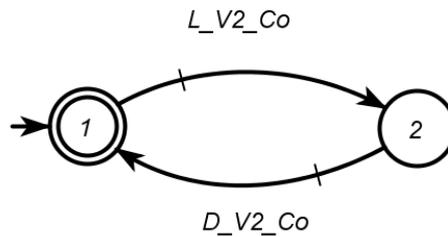


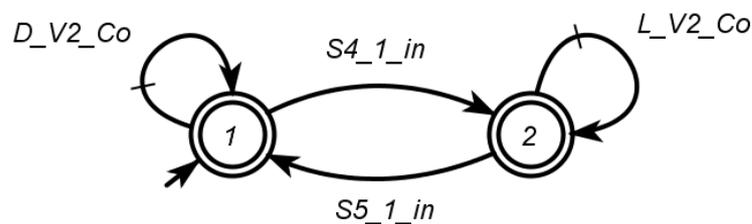
Figura 4.6: Modelo do tanque de lavagem de H₂.

O autômato G4 (Figura 4.7) representa o modelo do comportamento livre da válvula solenoide V2. O estado 1 representa a válvula solenoide V2 fechada e o estado 2, a válvula solenoide V2 aberta.

G4:**Figura 4.7:** Modelo da válvula solenoide V2.

4.2.2 Modelagem da Especificação do Tanque de H₂ com a Válvula V2

Este tipo de especificação corresponde ao comportamento não desejado ou que deve ser restringido pelo supervisor no funcionamento do tanque de lavagem de H₂ com a válvula solenoide V2. Para este caso, assume-se que o estado 1 representa o tanque a nível baixo de água residual de eletrólito com válvula solenoide V2 desligada e o estado 2, o tanque a nível alto de água residual de eletrólito com válvula solenoide V2 ligada. As restrições sobre o modelo da especificação é que no estado 1 não pode ocorrer o evento de ligar a válvula V2 e no estado 2 não pode ocorrer o evento de desligar a válvula V2. O modelo desta especificação é dado pelo autômato E2 da Figura 4.8.

E2:**Figura 4.8:** Modelo de especificação do tanque de lavagem de H₂ e a válvula V2.

4.3 Separador Líquido de H₂

O separador de líquido do H₂ é o equipamento que está instalado na saída do tanque de lavagem de H₂. Seu funcionamento é armazenar solução de água residual de eletrólito, para depois ser conectada ao tanque de água e assim realimentar o processo. A Figura 4.9, mostra uma vista interior do separador com seu sensor de nível LS3.

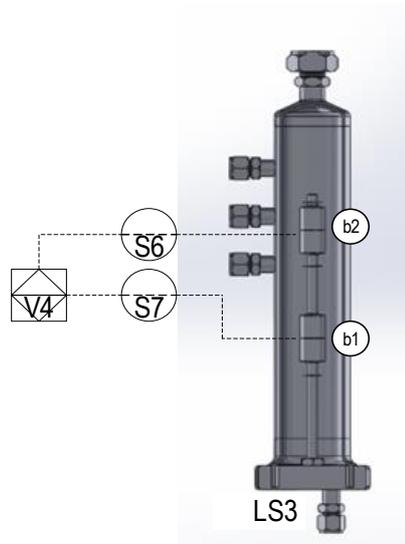


Figura 4.9: Vista interna do separador líquido de H₂ e seu sensor de nível.

Na Figura B.1 (Apêndice B), observa-se que a válvula solenoide *V4* tem uma interdependência operacional com o sensor de nível *LS3*, instalado no interior do separador líquido. O funcionamento é manter o separador com um nível baixo de água residual de eletrólito, assim a boia *b1* permanece no nível *S7* com a válvula solenoide *V4* desligada. Quando a água residual aumenta, desloca a boia *b1* para fora da posição *S7* e a boia *b2* chega no nível *S6*. Quando isto ocorre a válvula *V4* liga e ocorre o processo de descarga até que a boia *b2* retorne a sua posição inicial e a boia *b1* volte para a posição *S7*.

A terminologia adotada para os eventos do nível físico é apresentada na Tabela 4.3:

Tabela 4.3: Eventos do separador líquido de H₂.

Eventos	Descrição	Tipo de Evento
S6_1_in	Interruptor de nível <i>S6</i> . O evento ocorre quando o nível da solução de água residual de eletrólito no tanque está alto.	Não controlável
S7_1_in	Interruptor de nível <i>S7</i> . O evento ocorre quando o nível da solução de água residual de eletrólito no tanque está baixo.	Não controlável
L_V4_Co	Ligar válvula <i>V4</i> . O evento ocorre quando o tanque precisa de um processo de descarga de água residual de eletrólito.	Controlável
D_V4_Co	Desligar válvula <i>V4</i> . O evento ocorre quando o tanque não precisa de um processo de descarga de água residual de eletrólito.	Controlável

4.3.1 Modelagem do Separador de H₂ e da Válvula V4

O autômato G5 (Figura 4.10) representa o modelo do comportamento livre do separador líquido de H₂. O estado 1 representa o separador a nível baixo de água residual de eletrólito e o estado 2, separador a nível alto de água residual de eletrólito.

G5:

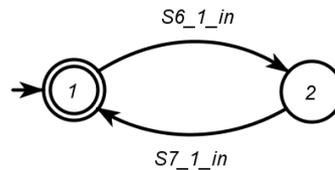


Figura 4.10: Modelo do separador líquido de H₂.

O autômato G6 (Figura 4.11) representa o modelo de comportamento livre da válvula solenoide V4. O estado 1 representa a válvula solenoide V4 fechada e o estado 2, válvula solenoide V4 aberta.

G6:

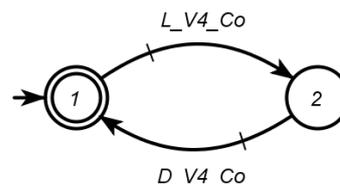


Figura 4.11: Modelo da válvula solenoide V4.

4.3.2 Modelagem da Especificação do Separador de H₂ com a Válvula V4

Este tipo de especificação corresponde ao comportamento não desejado ou que deve ser restringido pelo supervisor no funcionamento do separador líquido de H₂ com a válvula solenoide V4. Para este caso, assume-se que o estado 1 representa o separador a nível baixo de água residual de eletrólito com a válvula solenoide V4 desligada e o estado 2, separador a nível alto de água residual de eletrólito com a válvula solenoide V4 ligada. As restrições sobre o modelo da especificação é que no estado 1 não pode ocorrer o evento de ligar a válvula V4 e no estado 2 não pode ocorrer o evento de desligar a válvula V4. O modelo desta especificação é dado pelo autômato E3 da Figura 4.12.

E3:

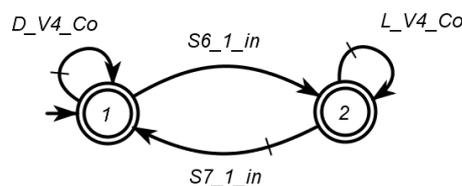


Figura 4.12: Modelo de especificação do separador de H₂ e a válvula solenoide V4.

4.4 Filtro de H₂

O filtro de H₂ é o equipamento que está instalado na saída do separador de líquido de H₂. Seu funcionamento consiste em retirar a humidade do H₂ saturado por um processo de adsorção. A Figura 4.13, mostra uma vista interna do filtro de H₂ com o sensor de nível *LS4*.

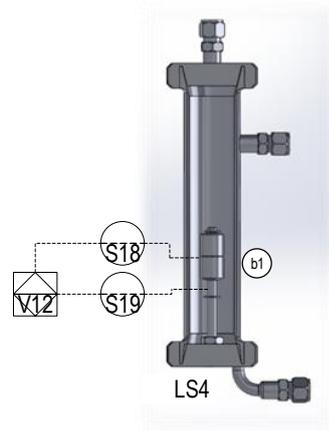


Figura 4.13: Vista interna do filtro de H₂ e seu sensor de nível.

Na Figura B.1 (Apêndice B), observa-se que válvula solenoide *V12* possui uma interdependência operacional com o sensor de nível *LS4*, instalado no interior do filtro de H₂. O funcionamento consiste em ter o filtro de H₂ com um nível baixo de água residual. Assim, a boia *b1* permanece no nível *S19* com a válvula solenoide *V12* desligada. Quando a água residual aumenta, deslocando a boia *b1* para a posição *S18* e ligando válvula solenoide *V12* e gerando o processo de descarga até que a boia *b1* volte para a posição *S19*.

A terminologia adotada para os eventos do nível físico é apresentada na Tabela 4.4:

Tabela 4.4: Eventos do filtro de H₂.

Eventos	Descrição	Tipo de Evento
S18_1_in	Interruptor de nível <i>S18</i> . O evento ocorre quando o nível de água residual no filtro está alto.	Não controlável
S19_1_in	Interruptor nível <i>S19</i> . O evento ocorre quando o nível da água residual no filtro está baixo.	Não controlável
L_V12_Co	Ligar válvula <i>V12</i> . O evento ocorre quando o filtro precisa de um processo de descarga de água residual.	Controlável
D_V12_Co	Desligar válvula <i>V12</i> . O evento ocorre quando o filtro não precisa de um processo de descarga de água residual.	Controlável

4.4.1 Modelagem do Filtro de H₂ e da Válvula V12

O autômato G7 (Figura 4.14) representa o modelo de comportamento livre do filtro de H₂. O estado 1 representa o filtro a nível baixo de água residual e o estado 2, filtro a nível alto de água residual.

G7:

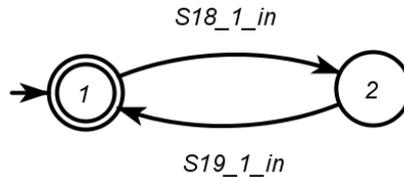


Figura 4.14: Modelo do filtro de H₂.

O autômato G8 (Figura 4.15) representa o modelo de comportamento livre da válvula solenoide V12. O estado 1 representa a válvula solenoide V12 fechada e o estado 2, válvula solenoide V12 aberta.

G8:

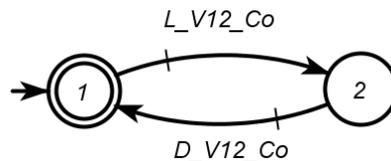


Figura 4.15: Modelo da válvula solenoide V12.

4.4.2 Modelagem da Especificação do Filtro de H₂ com a Válvula V12

Este tipo de especificação corresponde ao comportamento não desejado ou que deve ser restringido pelo supervisor no funcionamento do filtro de H₂ com a válvula solenoide V12. Para este caso, assume-se que o estado 1 representa o filtro a nível baixo de água residual com válvula solenoide V12 desligada e o estado 2, filtro a nível a nível alto de água residual com válvula solenoide V12 ligada. As restrições sobre o modelo da especificação é que no estado 1 não pode ocorrer o evento de ligar a válvula V12 e no estado 2 não pode ocorrer o evento de desligar a válvula V12. O modelo desta especificação é dado pelo autômato E4 da Figura 4.16.

E4:

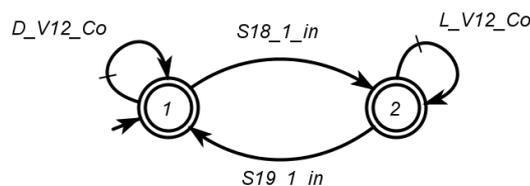


Figura 4.16: Modelo de especificação do filtro de H₂ e a válvula solenoide V12.

4.5 Tanque de Lavagem de O₂

O tanque de lavagem do O₂ é o equipamento que está instalado na saída do separador horizontal de O₂, com a função de separar o gás de O₂ do líquido saturado restante do processo anterior. Seu funcionamento se baseia num processo cinético, no qual é lavado o gás de O₂ através da solução de água residual de eletrólito que se encontra em repouso na parte inferior do tanque. A Figura 4.17, mostra uma vista interior do tanque com seu sensor de nível *LS5*.

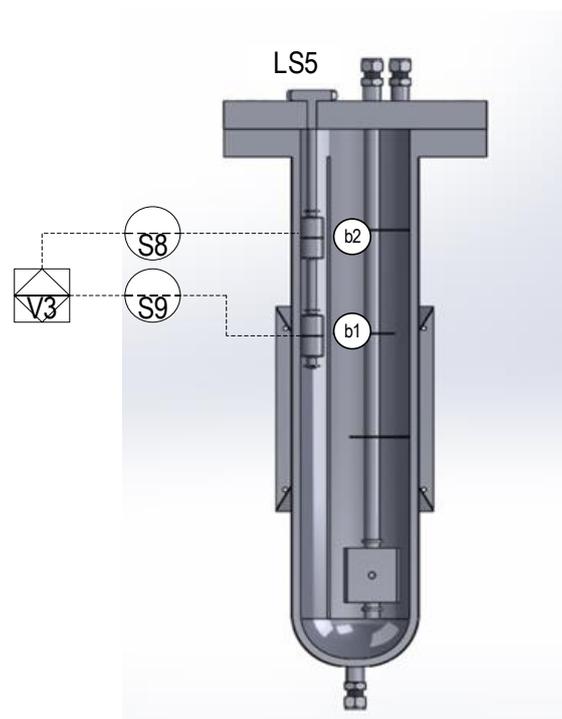


Figura 4.17: Vista interna do tanque de lavagem do O₂ com seu sensor de nível.

Na Figura B.1 (Apêndice B), observa-se que a válvula solenoide *V3* tem uma interdependência operacional como o sensor de nível *LS5*, instalado no interior do tanque de lavagem do O₂. O funcionamento consiste em manter a solução de água residual de eletrólito sob a boia *b1*, de forma que a boia *b1* esteja na posição do nível *S9* com a válvula *V3* desligada. Quando a água residual aumenta, esta desloca a boia *b1* para fora da posição *S9* e a boia *b2* alcança o nível *S8*. Quanto isto ocorre, a válvula *V3* liga e ocorre o processo de descarga até que a boia *b2* retorne a sua inicial e a boia *b1* volta para a posição *S9*.

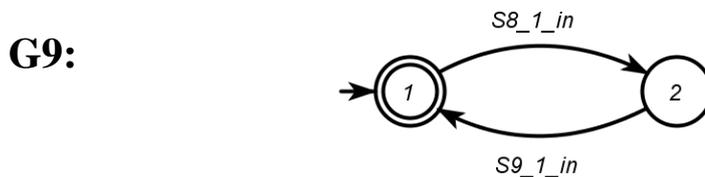
A terminologia adotada para os eventos do nível físico é apresentada na Tabela 4.5:

Tabela 4.5: Eventos do tanque de lavagem de O₂.

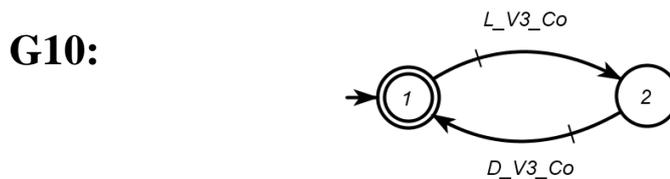
Eventos	Descrição	Tipo de Evento
S8_1_in	Interruptor de nível S8. O evento ocorre quando o nível da solução de água residual de eletrólito no tanque está alto.	Não controlável
S9_1_in	Interruptor de nível S9. O evento ocorre quando o nível da solução de água residual de eletrólito no tanque está baixo.	Não controlável
L_V3_Co	Ligar válvula V3. O evento ocorre quando o tanque precisa de um processo de descarga de água residual de eletrólito.	Controlável
D_V3_Co	Desligar válvula V3. O evento ocorre quando o tanque não precisa de uma descarga de água residual de eletrólito.	Controlável

4.5.1 Modelagem do Tanque do O₂ e da Válvula Solenoide V3

O autômato G9 (Figura 4.18) representa o modelo do comportamento livre do tanque de lavagem de H₂. O estado 1 representa o tanque a nível baixo de água residual de eletrólito e o estado 2, tanque a nível alto de água residual de eletrólito.

**Figura 4.18:** Modelo do tanque de lavagem de O₂.

O autômato G10 (Figura 4.19) representa o modelo de comportamento livre da válvula solenoide V3. O estado 1 representa a válvula solenoide V3 fechada e o estado 2, a válvula solenoide V3 aberta.

**Figura 4.19:** Modelo da válvula solenoide V3.

4.5.2 Modelagem da Especificação do Tanque de O₂ com a Válvula V3

Este tipo de especificação corresponde ao comportamento não desejado ou que deve ser restringido pelo supervisor no funcionamento do tanque de lavagem O₂ com a válvula solenoide V3. Para este caso, assume-se que o estado 1 representa o tanque a nível baixo de água residual de eletrólito com a válvula solenoide V3 desligada e o estado 2, o tanque a nível alto de água residual de eletrólito com a válvula solenoide V3 ligada. As restrições sobre o modelo da especificação é que no estado 1 não pode ocorrer o evento de ligar a válvula V3 e no estado 2 não pode ocorrer o evento de desligar a válvula V3. O modelo desta especificação é dado pelo autômato E5 da Figura 4.20.

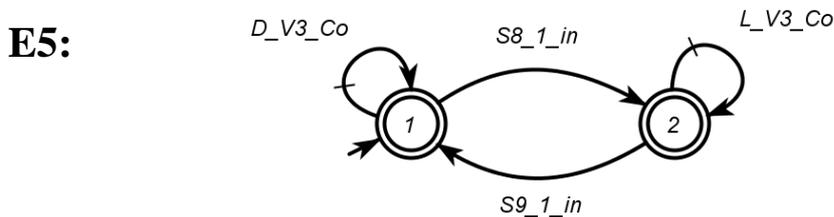


Figura 4.20: Modelo de especificação do tanque de lavagem de O₂ e a válvula V3.

4.6 Separador Líquido de O₂

O separador de líquido de O₂ é o equipamento que está instalado na saída do tanque de lavagem de O₂. Seu funcionamento é armazenar solução de água residual de eletrólito, para depois ser conectada ao tanque de água e assim realimentar o processo. A Figura 4.21, mostra uma vista interior do separador com seu sensor de nível LS6.

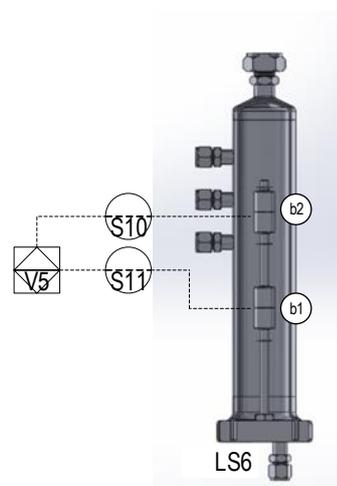


Figura 4.21: Vista interna do separador líquido de O₂ e seu sensor de nível.

Na Figura B.1 (Apêndice B), observa-se a válvula solenoide *V5* tem uma interdependência operacional como o sensor de nível *LS6*, instalado no interior do separador líquido. O funcionamento consiste em ter o separador com um nível baixo de água residual de eletrólito, assim a boia *b1* permanece no nível *S11* com a válvula solenoide *V5* desligada. Quando a água residual aumenta desloca a boia *b1* para fora da posição *S11* e a boia *b2* alcança o nível *S10*. Quando isto ocorre, a válvula *V5* liga e ocorre o processo de descarga até que a boia *b2* retorne a sua posição inicial e a boia *b1* volte para a posição *S11*.

A terminologia adotada para os eventos do nível físico é apresentada na Tabela 4.6:

Tabela 4.6: Eventos de tanque de lavagem de O_2 .

Eventos	Descrição	Tipo de Evento
S10_1_in	Interruptor de nível <i>S10</i> . O evento ocorre quando o nível da solução de água residual de eletrólito no tanque está alto.	Não controlável
S11_1_in	Interruptor de nível <i>S11</i> . O evento ocorre quando o nível da solução de água residual de eletrólito no tanque está baixo.	Não controlável
L_V5_Co	Ligar válvula <i>V5</i> . O evento ocorre quando o tanque precisa de um processo de descarga de água residual de eletrólito.	Controlável
D_V5_Co	Desligar válvula <i>V5</i> . O evento ocorre quando o tanque não precisa de um processo de descarga de água residual de eletrólito.	Controlável

4.6.1 Modelagem do Separador de O_2 e da Válvula *V5*

O autômato G11 (Figura 4.22) representa o modelo de comportamento livre do separador líquido de O_2 . O estado 1 representa o separador a nível baixo de água residual de eletrólito e o estado 2, separador a nível alto de água residual de eletrólito.

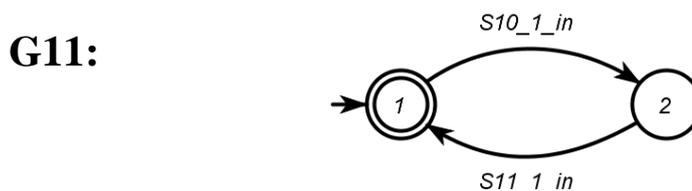
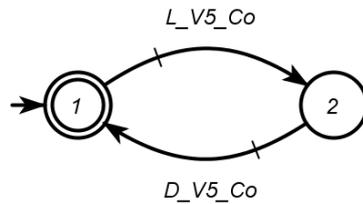


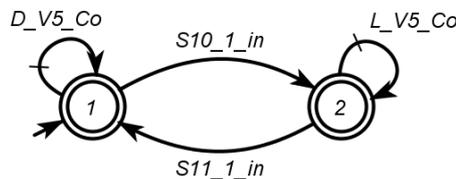
Figura 4.22: Modelo do separador líquido de O_2 .

O autômato G12 (Figura 4.23) representa o modelo de comportamento livre da válvula solenoide *V5*. O estado 1 representa a válvula solenoide *V5* fechada e o estado 2, a válvula solenoide *V5* aberta.

G12:**Figura 4.23:** Modelo da válvula solenoide V5.

4.6.2 Modelagem da Especificação do Separador de O₂ com a Válvula V5

Este tipo de especificação corresponde ao comportamento não desejado ou que deve ser restringido pelo supervisor no separador líquido de O₂ com a válvula solenoide V5. Para este caso, assume-se que o estado 1 representa o separador a nível baixo de água residual de eletrólito com a válvula solenoide V5 desligada e o estado 2, tanque a nível alto de água residual de eletrólito com a válvula solenoide V5 ligada. As restrições sobre o modelo da especificação é que no estado 1 não pode ocorrer o evento de ligar a válvula V5 e no estado 2 não pode ocorrer o evento de desligar a válvula V5. O modelo desta especificação é dado pelo autômato E6 da Figura 4.24.

E6:**Figura 4.24:** Modelo de especificação do separador de O₂ e a válvula solenoide V5.

4.7 Tanques Separadores Horizontais de H₂ e O₂

Os separadores horizontais de H₂ e O₂ estão instalados na saída dos eletrolisadores com o objetivo de separar a fase gasosa (H₂ e O₂) da fase líquida (solução de água e eletrólito). Seu funcionamento é baseado num processo cinético, no qual é transportado uma mescla de gás e fluido ao separador, que colide com um deflector interno causando uma separação inicial do líquido com o gás, dividindo as bolhas maiores em menores que por pressão e calor fluem para o filtro do separador. A solução líquida da bolha maior retorna para a parte inferior do separador e realimenta o eletrolisador em um fluxo contínuo. As bolhas menores atravessam o filtro, passando apenas gás saturado para o equipamento seguinte. A Figura 4.25, mostra uma vista interna dos separadores horizontais com seus sensores de nível LS7 e LS8.

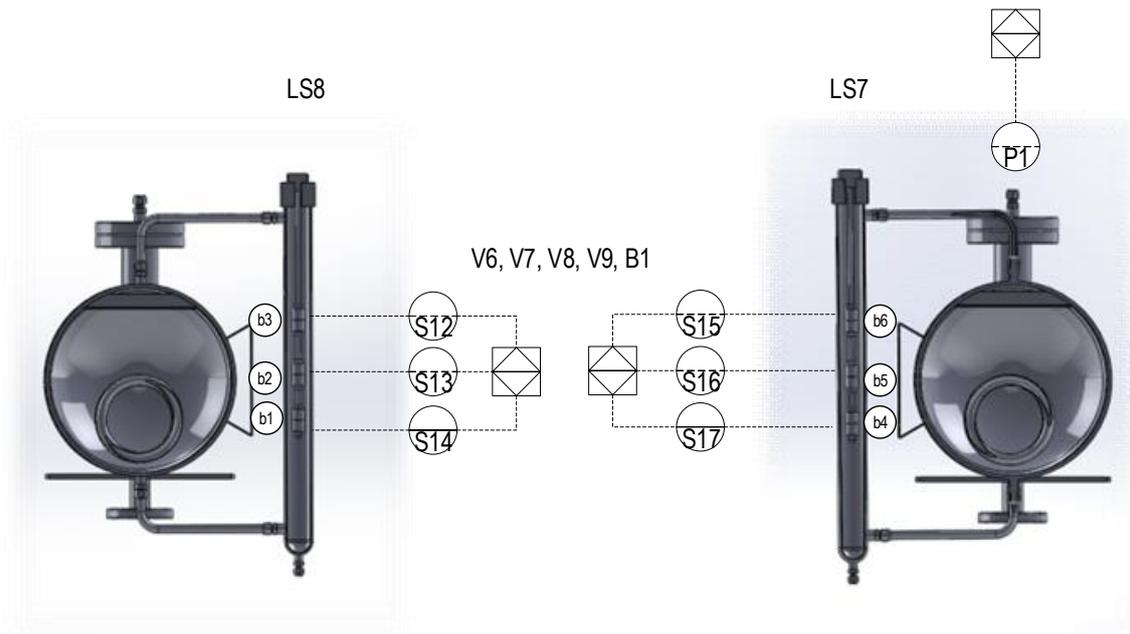


Figura 4.25: Vista interna dos separadores horizontais de H_2 , O_2 e seus sensores de nível.

Na Figura B.1 (Apêndice B), observa-se que as válvulas solenoides da linha de O_2 e H_2 , $V6$, $V7$, $V8$, $V9$ e a bomba de água H_2O , têm uma interdependência operacional com o transdutor de pressão $P1$ instalado no *Buffer I* e com os sensores de nível instalados no interior dos separadores. O funcionamento consiste em manter a solução de água e eletrólito no nível baixo dos separadores. Dessa forma, as boias $b1$, $b2$, $b4$ e $b5$ estão fora da posição dos níveis $S13$, $S14$, $S16$ e $S17$ e as boias $b3$, $b6$ na posição do nível $S12$ e $S15$. Porém, o funcionamento das válvulas solenoides $V6$, $V7$, $V8$ e $V9$ depende da pressão interna do *Buffer I*, significando que, quando a pressão no *Buffer I* for superior a 8 Bar as válvulas $V6$ e $V8$ tem preferência em ligar. Mas se a pressão no *Buffer I* for inferior a 8 Bar, as válvulas $V7$ e $V9$ tem preferência em ligar.

No caso em que a solução no separador de O_2 no transcurso da operação se apresenta em um nível muito baixo de solução, as boias $b1$, $b2$ e $b3$ estarão na posição do nível $S12$, $S13$ e $S14$. Desse modo, o nível da solução no separador de H_2 apresenta um nível alto de solução com as boias $b4$, $b5$ e $b6$ fora da posição nível $S15$, $S16$ e $S17$. Então, a válvula $V7$ é ligada se o *Buffer I* está pressurizado a uma pressão inferior que 8 Bar, caso contrário, a válvula solenoide $V6$ é ligada se a pressão for maior que 8 Bar. Assim, a abertura destas válvulas leva ao equilíbrio a solução e a mantém no nível baixo dos separadores.

Se o separador de O_2 no transcurso da operação apresentar um nível muito baixo de solução, as boias $b2$ e $b3$ estarão na posição do nível $S12$ e $S13$. Desse modo, o nível da solução no separador de H_2 apresenta um nível alto de solução com as boias $b4$, $b5$ e $b6$ fora da posição

do nível *S15*, *S16* e *S17*. Então, a válvula *V7* é ligada se o *Buffer I* estiver pressurizado a uma pressão inferior que 8 Bar, caso contrário, a válvula solenoide *V6* é ligada se a pressão for maior que 8 Bar. Assim, a abertura destas válvulas leva ao equilíbrio a solução e a mantém no nível baixo dos separadores.

Mas no caso em que a solução no separador de H_2 no transcurso da operação apresentar um nível muito baixo de solução, as boias *b4*, *b5* e *b6* estarão na posição do nível *S15*, *S16* e *S17*. Desse modo, o nível de solução no separador de O_2 apresenta um nível alto de solução com as boias *b1*, *b2* e *b3* fora da posição do nível *S12*, *S13* e *S14*. Então, a válvula *V9* é ligada se o *Buffer I* estiver pressurizado a uma pressão inferior que 8 Bar, caso contrário, a válvula *V8* é ligada se a pressão for maior que 8 Bar. Assim, a abertura destas válvulas leva ao equilíbrio a solução e a mantém no nível baixo dos separadores.

Se o separador de H_2 no transcurso da operação apresentar um nível muito baixo de solução, as boias *b6* e *b5* estarão na posição do nível *S15* e *S16*. Desse modo, o nível da solução no separador de O_2 apresenta um nível alto de solução com as boias *b1*, *b2* e *b3* fora da posição do nível *S12*, *S13* e *S14*. Então, a válvula solenoide *V9* é ligada se o *Buffer I* estiver pressurizado a uma pressão inferior que 8 Bar, caso contrário, a válvula solenoide *V8* é ligada se a pressão for maior que 8 Bar. Assim, a abertura destas válvulas leva ao equilíbrio a solução e a mantém no nível baixo dos separadores.

Na condição do separador de O_2 no decorrer da operação apresentar um nível muito baixo de solução, as boias *b2*, *b3* estarão na posição do nível *S12* e *S13*. Desse modo, o nível de solução no separador de H_2 apresenta um nível baixo de solução com a boia *b6* na posição do nível *S15* e as boias *b4*, *b5* fora da posição do nível *S16*, *S17*. Assim, a válvula *V7* é ligada se o *Buffer I* estiver pressurizado a uma pressão inferior que 8 Bar, caso contrário, a válvula *V6* é ligada se a pressão for maior que 8 Bar. Assim, a abertura destas válvulas leva ao equilíbrio a solução e a mantém no nível baixo dos separadores.

Finalmente, na condição do separador de H_2 no decorrer da operação apresentar um nível muito baixo de solução, as boias *b5*, *b6* estarão na posição do nível *S15* e *S16*. Desse modo, o nível de solução no separador de O_2 apresenta um nível baixo de solução com a boia *b3* na posição do nível *S12* e as boias *b1* e *b2* na posição do nível *S13*, *S14*. Assim, a bomba de água *B1* e válvula *V9* é ligada se o *Buffer I* estiver pressurizado a uma pressão inferior a 8 Bar, caso contrário, a bomba de água *B1* e válvula *V8* é ligada se a pressão for maior que 8 Bar. Assim, a

ligação da bomba de água *BI* com a abertura das válvulas *V8* e *V9* irá levar ao equilíbrio a solução e mantê-la no nível baixo dos separadores.

A terminologia adotada para os eventos do nível físico é apresentada na Tabela 4.7:

Tabela 4.7: Eventos dos tanques separadores de H_2 e O_2 .

Eventos	Descrição	Tipo de Evento
S12_0_in	Interruptor de nível <i>S12</i> . O evento ocorre quando o nível da solução de água e eletrólito no separado de O_2 está alto.	Não controlável
S13_0_in	Interruptor de nível <i>S13</i> . O evento ocorre quando o nível da solução de água e eletrólito no separador de O_2 está baixo.	Não controlável
S15_0_in	Interruptor de nível <i>S15</i> . O evento ocorre quando o nível da solução de água e eletrólito no separador de H_2 está alto.	Não controlável
S16_0_in	Interruptor de nível <i>S16</i> . O evento ocorre quando o nível da solução de água e eletrólito no separador de H_2 está baixo.	Não controlável
S12_1_in	Interruptor de nível <i>S12</i> . O evento ocorre quando o nível da solução de água e eletrólito no separador de O_2 está baixo.	Não controlável
S13_1_in	Interruptor de nível <i>S13</i> . O evento ocorre quando o nível da solução de água e eletrólito no separador de O_2 está muito baixo.	Não controlável
S15_1_in	Interruptor de nível <i>S15</i> . O evento ocorre quando o nível da solução de água e eletrólito no separador de H_2 está baixo.	Não controlável
S16_1_in	Interruptor de nível <i>S16</i> . O evento ocorre quando o nível da solução de água e eletrólito no separador de H_2 está muito baixo.	Não controlável
Maior_8bar_in	Pressão maior a 8 Bar. O evento ocorre quando a pressão no <i>Buffer I</i> é maior que 8 Bar.	Não controlável
Menor_8bar_in	Pressão menor a 8 Bar. O evento ocorre quando a pressão no <i>Buffer I</i> é menor que 8 Bar.	Não controlável
L_V6_Co	Ligar válvula <i>V6</i> em alta pressão. O evento ocorre quando o separador de H_2 está com uma solução no nível alto e o separador de O_2 está com a solução no nível muito baixo. Também, o evento ocorre quando o separador de H_2 está com a solução no nível baixo e o separador de O_2 está com a solução muito baixo. Para os dois casos o <i>Buffer I</i> tem que estar com uma pressão maior que 8 bar.	Controlável
D_V6_Co	Desligar válvula <i>V6</i> em alta pressão. O evento ocorre quando o separador de H_2 e O_2 está com a solução no nível baixo. Além disso, o <i>Buffer I</i> está com uma pressão maior que 8 bar.	Controlável
L_V7_Co	Ligar válvula <i>V7</i> em alta pressão. O evento ocorre quando o separador de H_2 está com uma solução no nível alto e o separador de O_2 está com	Controlável

	a solução no nível muito baixo. Também, o evento ocorre quando o separador de H ₂ está com a solução no nível baixo e no separador de O ₂ a solução está muito baixa. Para os dois casos o <i>Buffer I</i> tem que estar com uma pressão menor que 8 bar. A válvula também liga no Estado IV - PURGA, Estado VIII - DESPRESURIZAÇÃO e Estado IX – INERTIZAÇÃO do Controle sequencial da operação da planta da Figura 2.6.	
D_V7_Co	Desligar válvula V7 em alta pressão. O evento ocorre quando o separador de H ₂ e O ₂ está com a solução no nível baixo. Além disso, o <i>Buffer I</i> está com uma pressão menor a 8 bar.	Controlável
L_V8_Co	Ligar válvula V8 em alta pressão. O evento ocorre quando o separador de O ₂ está com uma solução no nível alto e o separador de H ₂ está com a solução muito baixo. Também, o evento ocorre quando o separador de O ₂ está com a solução no nível baixo e o separador de H ₂ está com a solução muito baixo. Para os dois casos o <i>Buffer I</i> tem que estar com uma pressão maior que 8 bar.	Controlável
D_V8_Co	Desligar válvula V8 em alta pressão. O evento ocorre quando o separador de H ₂ e O ₂ está com a solução no nível baixo. Além disso, o <i>Buffer I</i> está com uma pressão maior que 8 bar.	Controlável
L_V9_Co	Ligar válvula V9 em alta pressão. O evento ocorre quando o separador de O ₂ está com uma solução no nível alto e o separador de H ₂ está com a solução no nível muito baixo. Também, o evento ocorre quando o separador de O ₂ está com a solução no nível baixo e no separador de H ₂ a solução está no nível muito baixo. Para os dois fatos o <i>Buffer I</i> tem que estar com uma pressão menor que 8 bar. A válvula também liga no Estado IV - PURGA, Estado VIII - DESPRESURIZAÇÃO e Estado IX – INERTIZAÇÃO do Controle sequencial da operação da planta da Figura 2.6.	Controlável
D_V9_Co	Desligar válvula V9 em alta pressão. O evento ocorre quando o separador de H ₂ e O ₂ está com a solução no nível baixo. Além disso, o <i>Buffer I</i> está com uma pressão maior a 8 bar.	Controlável
L_B1_Co	Ligar bomba B1. O evento ocorre quando o separador de O ₂ está com a solução no nível baixo e no separador de H ₂ a solução está no nível muito baixo.	Controlável
D_B1_Co	Desligar bomba B1. O evento ocorre quando os separadores de H ₂ e O ₂ está com a solução no nível baixo.	Controlável

4.7.1 Modelagem dos Separadores, *Buffer I*, Bomba e Válvulas

O autômato G13 (Figura 4.26) representa o modelo de comportamento livre do separador horizontal de O₂. O estado 1 representa o separador de O₂ com nível baixo de solução, o estado

2, o separador de O₂ com nível alto de solução e o estado 3, separador de O₂ com nível muito baixo de solução.

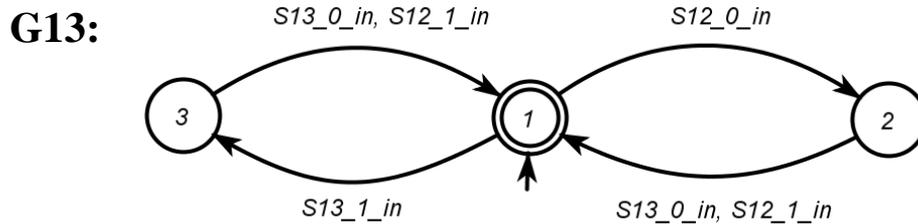


Figura 4.26: Modelo do separador horizontal de O₂.

O autômato G14 (Figura 4.27) representa o modelo de comportamento livre do separador horizontal de H₂. O estado 1 representa o separador de H₂ com nível baixo de solução, o estado 2, o separador de H₂ com nível alto de solução e o estado 3, com nível muito baixo de solução.

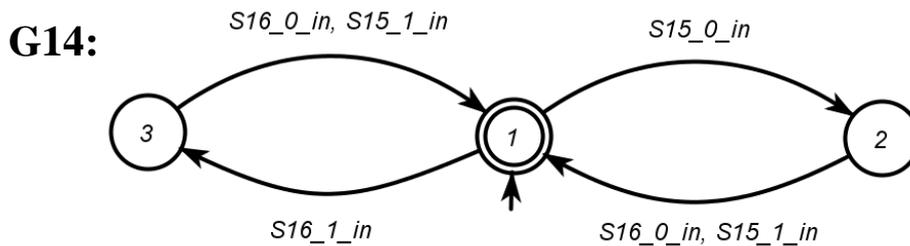


Figura 4.27: Modelo do separador horizontal de H₂.

O autômato G15 (Figura 4.28) representa o modelo de comportamento livre da pressão interna no *Buffer I*. O estado 1 representa o *Buffer I* com pressão menor que 8 Bar e o estado 2, representa o *Buffer I* com pressão maior que 8 Bar.

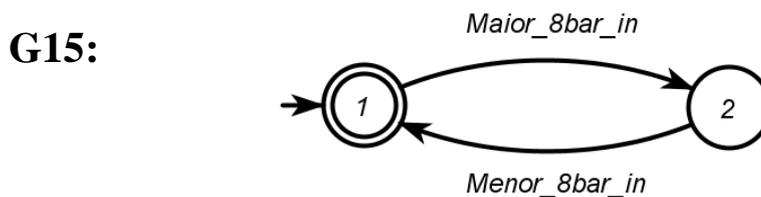
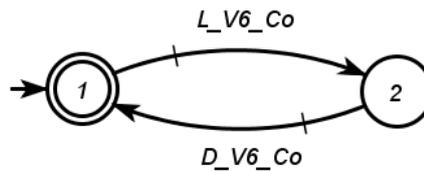
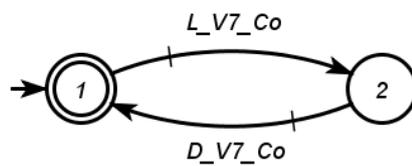


Figura 4.28: Modelo da pressão interna da linha no *Buffer I*.

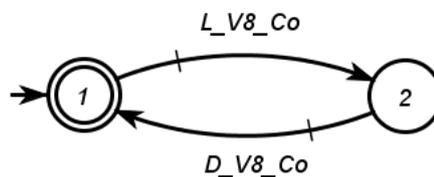
O autômato G16 (Figura 4.29) representa o modelo de comportamento livre da válvula solenoide V6. O estado 1 representa a válvula solenoide V6 fechada e o estado 2, a válvula solenoide V6 aberta.

G16:**Figura 4.29:** Modelo da válvula solenoide V6.

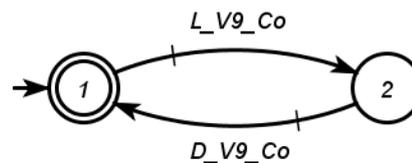
O autômato G17 (Figura 4.30) representa o modelo de comportamento livre da válvula solenoide V7. O estado 1 representa a válvula solenoide V7 fechada e o estado 2, a válvula solenoide V7 aberta.

G17:**Figura 4.30:** Modelo da válvula solenoide V7.

O autômato G18 (Figura 4.31) representa o modelo de comportamento livre da válvula solenoide V8. O estado 1 representa a válvula solenoide V8 fechada e o estado 2, a válvula solenoide V8 aberta.

G18:**Figura 4.31:** Modelo da válvula solenoide V8.

O autômato G19 (Figura 4.32) representa o modelo de comportamento livre da válvula solenoide V9. O estado 1 representa a válvula solenoide V9 fechada e o estado 2, a válvula solenoide V9 aberta.

G19:**Figura 4.32:** Modelo da válvula solenoide V9.

O autômato G20 (Figura 4.33) representa o modelo de comportamento livre da bomba de água *BI*. O estado 1 representa a bomba de água *BI* não operando e o estado 2, a bomba de água *BI* operando.

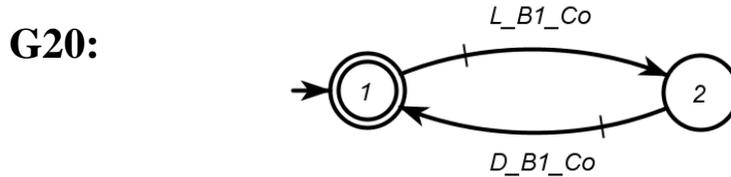


Figura 4.33: Modelo da bomba de água *BI*.

4.7.2 Modelagem da Especificação dos Separadores, *Buffer I* com a Bomba e as Válvulas

Este tipo de especificação corresponde ao comportamento não desejado ou que deve ser restringido pelo supervisor no funcionamento dos separadores horizontais de O_2 e H_2 com a bomba *B1* e as válvulas solenoides *V6*, *V7*, *V8* e *V9*.

Para este caso assume-se que o:

- Estado 1: representa os separadores horizontais de O_2 e H_2 com a solução no nível baixo e com pressão no *Buffer I* menor que 8 Bar.
- Estado 2: separadores horizontais de O_2 e H_2 com a solução no nível baixo e com a pressão no *Buffer I* maior que 8 Bar.
- Estado 3: separador de H_2 com nível alto de solução e com pressão no *Buffer I* maior que 8 Bar.
- Estado 4: separador de H_2 com nível alto de solução e com pressão no *Buffer I* menor que 8 Bar.
- Estado 5: separador de O_2 com nível alto de solução e com pressão no *Buffer I* maior que 8 Bar.
- Estado 6: separador de O_2 com nível alto de solução e com pressão no *Buffer I* menor que 8 Bar.
- Estado 7: separador de H_2 com nível muito baixo de solução e com a pressão no *Buffer I* maior que 8 Bar.

- Estado 8: separador de O_2 com nível muito baixo de solução e com a pressão no *Buffer I* maior que 8 Bar.
- Estado 9: separador de H_2 com nível muito baixo de solução e com a pressão no *Buffer I* menor que 8 Bar.
- Estado 10: separador de O_2 com nível de solução muito baixo de solução e com a pressão no *Buffer I* menor que 8 Bar.

As restrições sobre o modelo da especificação são:

- Estado 1: não pode ocorrer os eventos de ligar a bomba *B1* e válvulas *V6*, *V7*, *V8* e *V9*.
- Estado 2: não pode ocorrer os eventos de ligar a bomba *B1* e válvulas *V6*, *V7*, *V8* e *V9*.
- Estado 3: não pode ocorrer os eventos de desligar a válvula *V6* e ligar as válvulas *V7*, *V8*, *V9* e bomba *B1*.
- Estado 4: não pode ocorrer os eventos de desligar a válvula *V7* e ligar as válvulas *V7*, *V8*, *V9* e bomba *B1*.
- Estado 5: não pode ocorrer os eventos de desligar válvula *V8* e ligar as válvulas *V6*, *V7*, *V9* e bomba *B1*.
- Estado 6: não pode ocorrer os eventos de desligar a válvula *V9* e ligar as válvulas *V6*, *V7*, *V8* e bomba *B1*.
- Estado 7: não pode ocorrer os eventos de desligar a válvula *V8* e bomba *B1* e ligar as válvulas *V6*, *V7* e *V9*.
- Estado 8: não pode ocorrer os eventos de desligar a válvula *V6* e ligar as válvulas *V7*, *V8*, *V9* e bomba *B1*.
- Estado 9: não pode ocorrer os eventos de desligar a válvula *V9* e bomba *B1* e ligar as válvulas *V6*, *V7* e *V8*.
- Estado 10: não pode ocorrer os eventos de desligar a válvula *V7* e ligar as válvulas *V6*, *V8*, *V9* e bomba *B1*.

O modelo desta especificação é dado pelo autômato E7 da Figura 4.34.

E7:

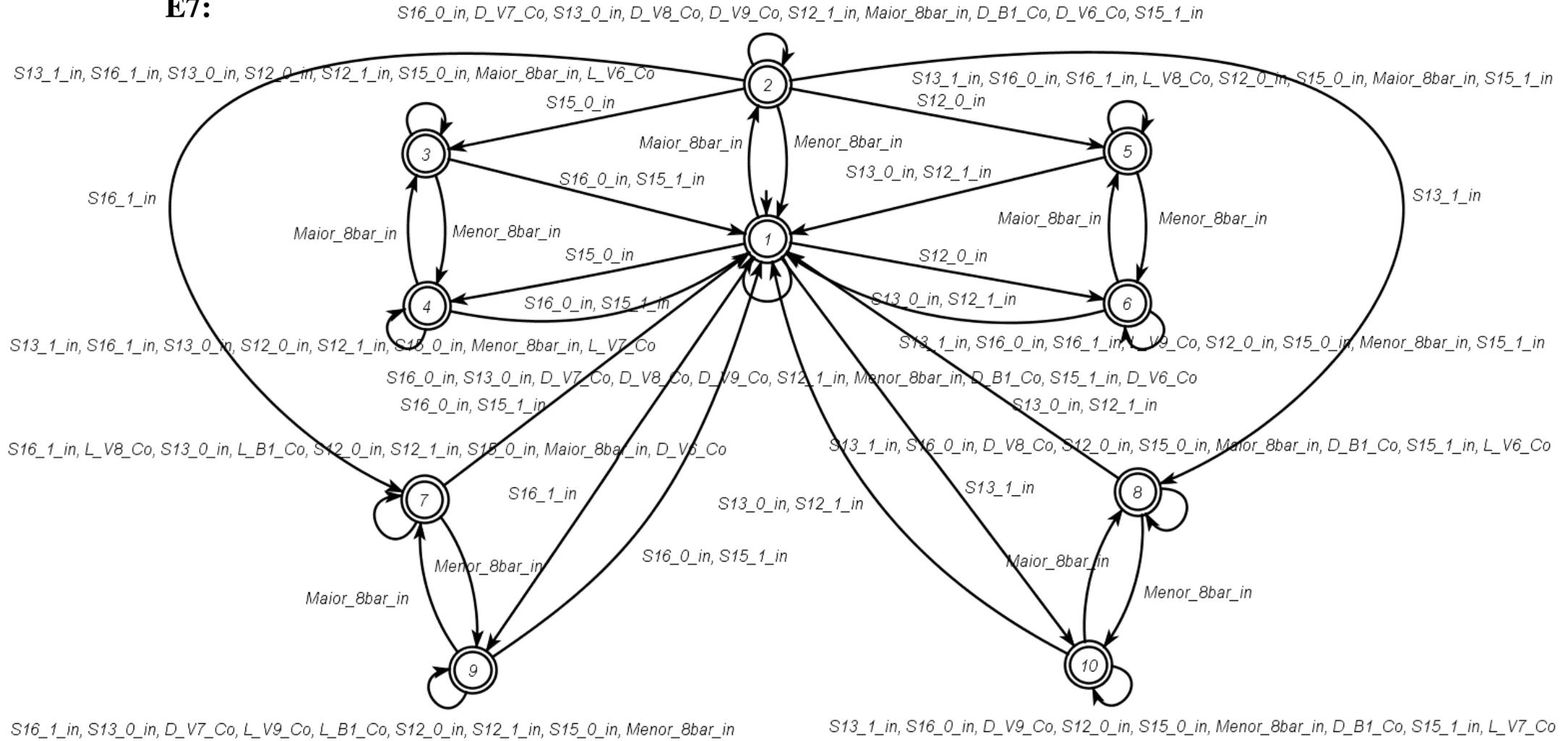


Figura 4.34: Modelo de especificação dos separadores, *buffer I*, com a bomba, e válvulas.

4.8 Refrigeração

A linha de refrigeração está instalada em etapas específicas da planta, tais como a subunidade de produção, purificação e a unidade de compressor. A função desta é manter a temperatura de operação constante em todas as unidades e subunidades de processamento, a fim de obter uma melhor performance na operação da planta.

Na Figura B.1 (Apêndice B) observa-se que as válvulas *V23*, *V24* e *V25*, têm uma interdependência operacional com o sensor de temperatura *T1* instalado na de entrada dos eletrolisadores. O funcionamento consiste em manter a temperatura constante em todas as unidades de processamento. Quando a temperatura da solução na entrada dos eletrolisadores é menor que 30°C, a válvula solenoide *V25* liga e as válvulas *V23* e *V24* permanecem desligadas. Desse modo, a água refrigerada somente circula no *chiller*. Porém, se a temperatura da solução na entrada dos eletrolisadores for maior que 30°C, as válvulas solenoides *V23*, *V24* ligam e a válvula *V25* desliga e nesse momento a água refrigerada circula pelas subunidades de produção, purificação e unidade do compressor.

A terminologia adotada para os eventos do nível físico é apresentada na Tabela 4.8:

Tabela 4.8: Eventos do subsistema de refrigeração.

Eventos	Descrição	Tipo de Evento
Mai_30C_T1_in	Temperatura maior que 30°C. O evento ocorre quando a temperatura da solução na entrada dos eletrolisadores é maior que 30 °C.	Não controlável
Men_30C_T1_in	Temperatura menor que 30°C. O evento ocorre quando a temperatura da solução na entrada dos eletrolisadores é menor que 30 °C.	Não controlável
L_V23_Co	Ligar válvula <i>V23</i> . O evento ocorre quando a subunidade de produção e purificação precisa de refrigeração. A temperatura na entrada dos eletrolisadores é maior que 30°C.	Controlável
D_V23_Co	Desligar válvula <i>V23</i> . O evento ocorre quando a subunidade de produção e purificação não precisa de refrigeração. A temperatura na entrada dos eletrolisadores é menor que 30°C.	Controlável
L_V24_Co	Ligar válvula <i>V24</i> . O evento ocorre quando a unidade do compressor precisa de refrigeração. A temperatura na entrada dos eletrolisadores é maior que 30°C.	Controlável
D_V24_Co	Desligar válvula <i>V24</i> . O evento ocorre quando a unidade do compressor não precisa de refrigeração. A temperatura na entrada dos eletrolisadores é menor que 30°C.	Controlável

L_V25_Co	Ligar válvula V25. O evento ocorre quando as subunidades de produção, purificação e unidade do compressor não precisa de refrigeração. A temperatura na entrada dos eletrolisadores é menor que 30°C.	Controlável
D_V25_Co:	Desligar válvula V25. O evento ocorre quando as subunidades de produção, purificação e unidade do compressor precisa de refrigeração. A temperatura na entrada dos eletrolisadores é maior que 30°C.	Controlável

4.8.1 Modelo do Sensor Temperatura e as Válvulas

O autômato G21 (Figura 4.35) representa o modelo do comportamento livre do sensor de temperatura *T1*. O estado 1 representa a solução na entrada do eletrolisador com temperatura menor que 30°C e o estado 2, a solução na entrada do eletrolisador com temperatura maior que 30°C.

G21:

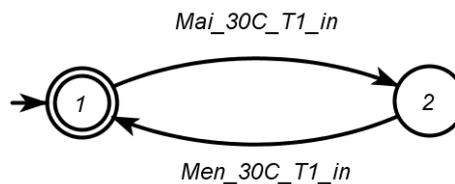


Figura 4.35: Modelo do sensor de temperatura *T1*.

O autômato G22 (Figura 4.36) representa o modelo de comportamento livre da válvula solenoide V23. O estado 1 representa a válvula solenoide V23 fechada e o estado 2, a válvula solenoide V23 aberta.

G22:

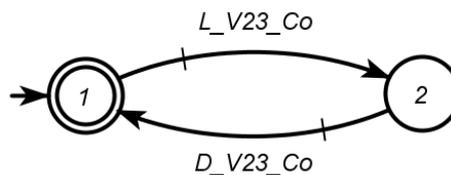
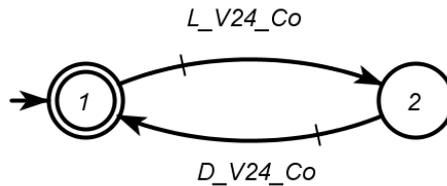
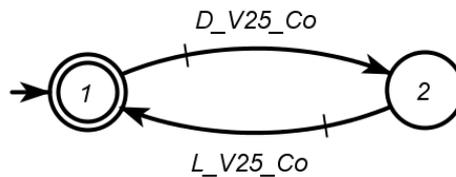


Figura 4.36: Modelo da válvula solenoide V23.

O autômato G23 (Figura 4.37) representa o modelo de comportamento livre da válvula solenoide V24. O estado 1 representa a válvula solenoide V24 fechada e o estado 2, a válvula solenoide V24 aberta.

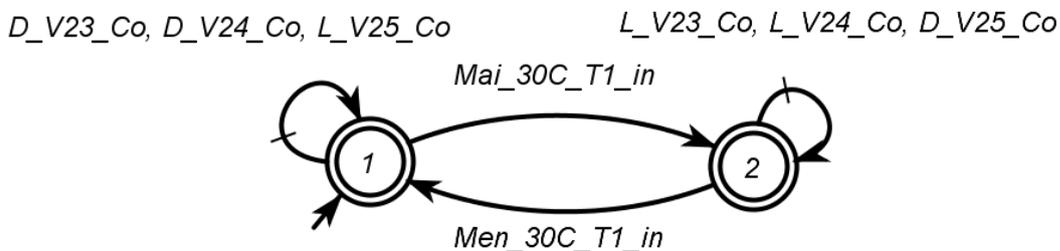
G23:**Figura 4.37:** Modelo da válvula solenoide V24.

O autômato G24 (Figura 4.38) representa o modelo de comportamento livre da válvula solenoide V25. O estado 1 representa a válvula solenoide V25 aberta e o estado 2, a válvula solenoide V25 fechada.

G24:**Figura 4.38:** Modelo da válvula solenoide V25.

4.8.2 Modelo da Especificação do Sensor de Temperatura com as Válvulas

Este tipo de especificação corresponde ao comportamento não desejado ou que deve ser restringido ao funcionamento do sensor de temperatura *T1* com as válvulas solenoides V23, V24 e V25. Para este caso, assume-se que o estado 1 representa a solução na entrada do eletrolisador com temperatura menor que 30°C e o estado 2, a solução na entrada do eletrolisador com temperatura maior que 30°C. As restrições sobre o modelo da especificação e que no estado 1 não pode ocorrer os eventos de ligar a válvulas V23, V24 e desligar a V25, no estado 2, não pode ocorrer os eventos de desligar as válvulas V23, V24 e ligar a V25. O modelo destas especificações é dado pelo autômato E8 da Figura 4.39.

**Figura 4.39:** Modelo de especificação do sensor *T1* e as válvulas V23, V24 e V25.

4.9 Compressor

O compressor é o equipamento que se encontra instalado na saída do *Buffer II*. A função dele é aumentar a pressão na linha do gás H_2 de 17 para 350 Bar para posteriormente ser armazenado em cilindros de alta pressão. Na Figura B.1 (Apêndice B), observa-se que o funcionamento do compressor tem uma interdependência operacional com a variação do transdutor de pressão P_2 instalado no *Buffer II*. Desse modo, quando a pressão interna do *Buffer II* atinge 17 Bar o compressor entra em funcionamento. Se a pressão do *Buffer II* decresce e atinge 14 Bar o compressor desliga e novamente este permanece desligado até que o *Buffer II* atinja a 17 Bar e o processo se repita.

A terminologia adotada para os eventos do nível físico é apresentada na Tabela 4.9:

Tabela 4.9: Eventos do sistema de compressor.

Eventos	Descrição	Tipo de Evento
17bar_P2_in	Pressão igual que 17 Bar. O evento ocorre quando a pressão no interior do <i>Buffer II</i> é maior ou igual a 17 Bar.	Não controlável
14bar_P2_in	Pressão igual que 14 Bar. O evento ocorre quando a pressão no interior do <i>Buffer II</i> é menor ou igual a 14 Bar.	Não controlável
L_comp_Co	Ligar compressor. O evento ocorre quando o <i>Buffer II</i> está com uma pressão maior ou igual a 17 Bar. O sistema precisa armazenar o H_2 na unidade de armazenamento.	Controlável
D_comp_Co	Desligar compressor. O evento ocorre quando o <i>Buffer II</i> está com uma pressão menor ou igual a 14 Bar. O sistema não precisa armazenar o H_2 na unidade de armazenamento.	Controlável

4.9.1 Modelo do *Buffer II* e o Compressor

O autômato G25 (Figura 4.40) representa o modelo de comportamento livre do transdutor de pressão P_2 instalado no *Buffer II*. O estado 1 representa *Buffer II* com pressão menor ou igual a 14 Bar e o estado 2, o *Buffer II* está com pressão maior ou igual a 17 Bar.

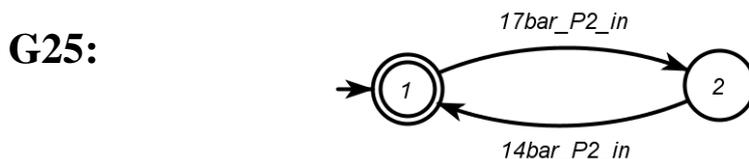


Figura 4.40: Modelo do *Buffer II*.

O autômato G26 (Figura 4.41) representa o modelo de comportamento livre do compressor. O estado 1 representa o compressor desligado e o estado 2, o compressor ligado.

G26:

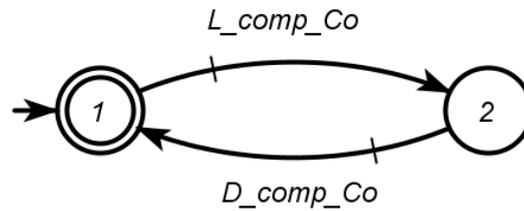


Figura 4.41: Modelo do compressor.

4.9.2 Modelo de Especificação do *Buffer II* com o Compressor

Este tipo de especificação corresponde ao comportamento não desejado ou que deve ser restringido ao funcionamento do transdutor de pressão do *Buffer II* com o compressor. Para este caso, assume-se que o estado 1 representa *Buffer II* com pressão menor ou igual a 14 Bar e o estado 2, o *Buffer II* com pressão maior ou igual a 17 Bar. As restrições sobre o modelo da especificação é que no estado 1 não pode ocorrer o evento de ligar o compressor e no estado 2 não pode ocorrer o evento de desligar o compressor.

O modelo desta especificação é dado pelo autômato E9 da Figura 4.42.

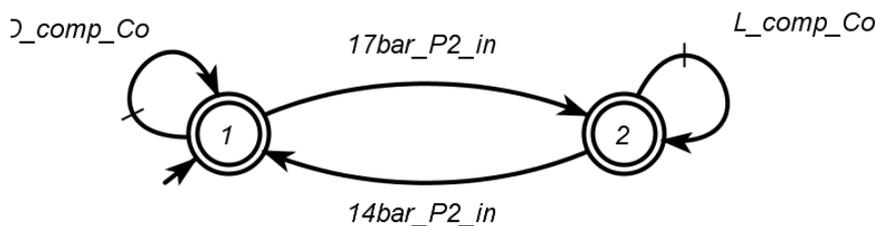


Figura 4.42: Modelo de especificação do *Buffer II* com o compressor.

4.10 Síntese dos Supervisores Monolíticos

Na abordagem monolítica, o processo de síntese é realizado sobre a máxima linguagem controlável K , que é resultado do produto síncrono do modelo completo de planta G e o modelo completo da especificação E . Para isso, G é obtido, pelo produto síncrono de todos os modelos de comportamento livre que compõem o equipamento ou sistema, e E é obtido pelo produto síncrono de todas as especificações operacionais desejadas do equipamento, conforme apresentado na subseção 3.2.1. Assim, para cada um dos nove subsistemas apresentados

anteriormente, é necessário encontrar uma única planta G , uma única especificação E , a máxima linguagem controlável K , para assim finalmente obter o supervisor S de cada subsistema.

Para o desenvolvimento deste procedimento foi utilizada a ferramenta de modelagem para sistemas de eventos discretos *Supremica*. Esta ferramenta permite construir um ambiente de desenvolvimento integrado para resolver problemas de modelagem, análise, verificação e síntese de supervisores, fornecendo dados desses supervisores, como nome dos estados, eventos e número de transições (Akenson, Fabian, Flordal, & Malik, 2006). Dessa maneira, também foi possível realizar o teste de controlabilidade das especificações, apresentada na seção 3.2.

A Tabela 4.10 apresenta os dados obtidos deste procedimento, onde as colunas estão dívidas em subsistemas, dispositivos que fazem parte dos subsistemas, cálculo do produto síncrono das plantas (dispositivos), especificações, cálculo do produto síncrono das especificações de controle, cálculo da máxima linguagem controlável, cálculo do supervisor monolítico e cálculo do supervisor monolítico minimizado.

Considerando como exemplo o caso do subsistema do tanque de água (primeira linha da Tabela 4.10), tem-se a modelagem do comportamento livre de dois dispositivos $G1$, $G2$ e a uma especificação de controle $E1$, apresentados nas seções 4.1.1 e 4.1.2. A partir dos modelos dos $G1$ e $G2$ é calculado um único modelo de autômato G , onde na coluna do produto síncrono das plantas (Figura 4.10) é mostrado os resultados dos números de estados, eventos e transições do autômato único G . Na continuação, a partir do modelo $E1$ é calculado um único modelo E , onde na coluna do produto síncrono das especificações (Figura 4.10) é mostrado os resultados dos números de estados, eventos e transições do autômato único E .

Para o próximo cálculo é necessário utilizar os modelos únicos G e E , onde por meio do produto síncrono é calculado K . Na coluna de máxima linguagem controlável (Figura 4.10) é apresentado os resultados dos números de estados, eventos e transições do autômato K . Finalmente o resultado do supervisor do subsistema de tanque de água é mostrado na coluna de supervisor monolito S (Figura 4.10) onde os resultados são os números de estados, eventos e transições do modelo de autômato S . Por outro lado, o supervisor monolito minimizado $min(S)$ (Figura 4.10) apresenta o resultado do processo de redução do supervisor S onde da mesma forma os resultados são os números de estados, eventos e transições do modelo de autômato $min(S)$.

Tabela 4.10: Dados da síntese dos supervisores monolíticos.

Subsistemas	Dispositivos	Produto Síncrono das Plantas (Dispositivos)			Especificações	Produto Síncrono das Especificações			Máxima Linguagem Controlável			Supervisor Monolítico			Supervisor Monolítico Minimizado		
		$G = G_1 \parallel \dots \parallel G_n$				$E = E_1 \parallel \dots \parallel E_n$			$K = G \parallel E$			$S = SupC(G, K)$			$min(S = SupC(G, K))$		
		$ Q ^*$	$ \Sigma ^{**}$	$ \rightarrow ^{***}$		$ Q $	$ \Sigma $	$ \rightarrow $	$ Q $	$ \Sigma $	$ \rightarrow $	$ Q $	$ \Sigma $	$ \rightarrow $	$ Q $	$ \Sigma $	$ \rightarrow $
Tanque de água	G1, G2	6	7	18	E1	3	7	12	6	7	15	6	7	15	6	7	15
Tanque de lavagem de H ₂	G3, G4	4	4	8	E2	2	4	4	4	4	6	4	4	6	4	4	6
Separador líquido de H ₂	G5, G6	4	4	8	E3	2	4	4	4	4	6	4	4	6	4	4	6
Filtro de H ₂	G7, G8	4	4	8	E4	2	4	4	4	4	6	4	4	6	4	4	6
Tanque de lavagem de O ₂	G9, G10	4	4	8	E5	2	4	4	4	4	6	4	4	6	4	4	6
Separador líquido de O ₂	G11, G12	4	4	8	E6	2	4	4	4	4	6	4	4	6	4	4	6
Tanques separadores de O ₂ e H ₂	G13, G14, G15, G16, G17, G18, G19, G20	576	20	5.760	E7	10	20	126	1.632	20	10.512	1.632	20	10.512	1.016	20	6.564
Refrigeração	G21, G22, G23, G24	16	8	64	E8	2	8	8	16	8	40	16	8	40	16	8	40
Compressor	G25, G26	4	4	8	E9	2	4	4	4	4	6	4	4	6	4	4	6
TOTAL	-	622	59	5.890	-	27	59	170	1.678	59	10.603	1.678	59	10.603	1062	59	6.655

* Número de Estados;

** Número de Eventos;

*** Número de Transições.

4.11 Controle Sequencial da Operação da PPH

Além da modelagem dos dispositivos e subsistemas apresentados, os quais atendem necessidades de operação e requisitos da Teoria de Controle Supervisório (TCS), a PPH precisa de um elemento que a faça seguir as etapas de operação de forma sequencial para que cumpra o ciclo de produção de H_2 . Esse elemento é responsável pelo controle sequencial da operação e lhe corresponde comandar e monitorar um conjunto de subsistemas e dispositivos que estão relacionados a cada estado do ciclo de produção de H_2 (apresentados na Figura 2.6).

O controle sequencial da operação não foi abordado pela TCS porque os modelos envolvidos são complexos, com um número considerável de dispositivos envolvidos, resultando em autômatos com número elevado de estados. Desta forma, no processo da composição síncrona de dispositivos e especificações, em algumas tentativas de modelagem, houve um crescimento exponencial na geração dos estados dos modelos envolvidos, o que inviabilizou a síntese do supervisor e, possivelmente, dificultaria ou impossibilitaria a implementação do programa no CLP. Particularmente, houveram casos em que o número de estados obtidos chegou na ordem dos milhões. Diante dessa impossibilidade, optou-se pelo desenvolvimento de um fluxograma que descreve o funcionamento sequencial da operação da planta. Assim, a abordagem do trabalho foi separada em dois níveis: o primeiro na modelagem dos subsistemas com base no formalismo matemático da TCS; e o segundo, no desenvolvimento de um fluxograma com base no estudo e experiência deste autor na operação da PPH.

Os subsistemas abordados no controle sequencial da planta são: bomba de hidróxido de potássio (*B2*), bomba do chiller (*B3*), eletrolisadores (*EMA*, *EMB*), reator desoxidante (*HDO*) e secadores (*HDRA*, *HDRB*), que, por sua vez estão compostos por um conjunto de dispositivos, tais como as eletroválvulas *V7*, *V9*, *V13*, *V14*, *V15*, *V16*, *V17*, *V18*, *V19*, *V20*, *V21*, *V22*, *V26*, *V27*, *V28*, *V29*, *V30*, *V31* e *V32*. Na Figura C.1 (Apêndice C) podem ser melhor visualizados os subsistemas e dispositivos abordados pelo controle sequencial da operação da planta. Um ponto significativo consiste na existência de dispositivos que são abordados nos dois tipos de controle sequencial e lógico. Um exemplo é o caso do sensor de nível da água *LSI* (apresentado na seção 4.1), que representa um alarme por nível muito baixo de solução no tanque de água e as válvulas solenoides *V7* e *V9* (apresentado na seção 4.7), que operam como aliviadores de pressão nos tanque separadores horizontais de H_2 e O_2 .

O diagrama de fluxo apresentado na Figura 4.43 retrata a modelagem de controle sequencial da operação da planta.

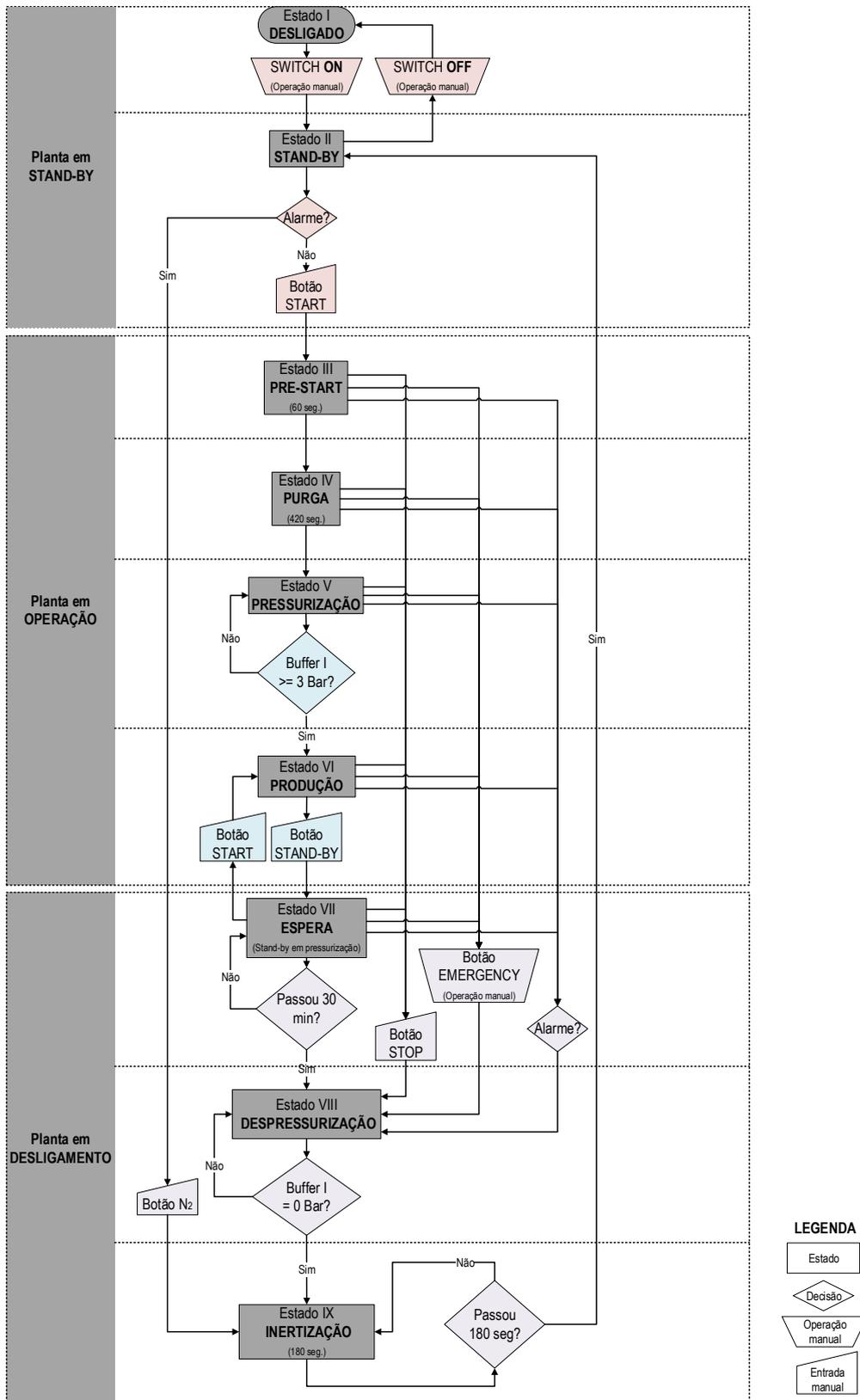


Figura 4.43: Fluxograma do controle sequencial da operação da planta.

O funcionamento desta sequência inicia no Estado I **DESLIGADO**, onde está desligado o Controlador Lógico Programável (CLP) e todos os subsistemas e seus dispositivos tais como: bomba de KOH, bomba do *chiller*, eletrolisadores, reator desoxidante, secadores e válvulas solenoides. Para ocorrer a mudança do Estado I **DESLIGADO** para o Estado II **STAND-BY** deve ocorrer uma operação manual de ligar o *switch*, mudando-o para a posição *ON*. Se a operação manual ocorrer, então o CLP é energizado e o sistema muda para o Estado II **STAND-BY** (Figura 4.43). Ainda neste Estado II todos os subsistemas e dispositivos mencionados anteriormente estão desligados com exceção do CLP. Desse modo, no Estado II o sistema inicia a monitorar a existência de alarmes ativos. Caso exista algum alarme ativo, então o sistema de produção de H₂ necessita de uma limpeza e isto só pode ocorrer com uma o acionamento manual por uma pessoa no botão de N₂, para mudar o Estado IX para **INERTIZAÇÃO** (localizado na Figura 4.43). Caso não exista nenhum alarme ativo, o sistema estará pronto para receber o acionamento manual do botão *Start*.

Se o botão *Start* é ativado então o sistema muda para o Estado III **PRE_START** (localizado na Figura 4.43), onde um grupo de subsistemas e dispositivos são ligados, tais como a bomba *B2* e as válvulas *V26*, *V27* e *V28*. Os demais dispositivos permanecem desligados. O Estado III tem um tempo de operação de 60 segundos, e ao final deste período, o sistema muda automaticamente para o Estado IV **PURGA** (Figura 4.43). No Estado IV a bomba do *chiller* *B3*, eletrolisadores *EMA*, *EMB* e as válvulas *V7* e *V9* são ligados, e a bomba *B2* e as válvulas *V26*, *V27* e *V28* permanecem ligados. A operação deste estado tem tempo de operação de 420 segundos, e ao final deste período o sistema muda automaticamente para o Estado V **PRESSURIZAÇÃO** (localizado na Figura 4.43).

No Estado V **PRESSURIZAÇÃO** permanecem ligados os dispositivos acionados anteriormente com exceção das válvulas *V7* e *V9* que são desligadas. Desse modo, o sistema inicia a pressurização até que a pressão no *Buffer I* alcance 3 Bar. Se a pressão é maior que 3 Bar o sistema muda automaticamente para o Estado VI **PRODUÇÃO** (Figura 4.43). No Estado VI são ligados o reator desoxidante *HDO*, os secadores *HDRA*, *HDRB* e as válvulas *V13*, *V16*, *V19*, *V21*, *V22*, *V29*, *V30*, *V31* e *V32*, além de permanecerem ligadas as bombas *B2*, *B3* e os eletrolisadores *EMA* e *EMB*. O grupo de dispositivos que desligam e que permanecem desligados nesse estado são as válvulas *V26*, *V27* e *V28* e os demais dispositivos ainda não são acionados. Dessa forma, o estado opera em regime permanente pressurizando a linha de H₂ até 17 Bar.

O botão *Stanb-by* necessita ser ativado para que o sistema saia do Estado VI **PRODUÇÃO** e entre no Estado VII **ESPERA**. Se o botão *Stanb-by* é ativado ocorre então a mudança do sistema para o Estado VII **ESPERA** (Figura 4.43). Neste Estado VII os subsistemas e dispositivos desligados são *EMA*, *EMB*, *HDO*, *HDRA*, *HDRB*, *V21*, *V22* e os subsistemas e dispositivos que permanecem ligados são *B2*, *V13*, *V16*, *V19*, *V29*, *V30*, *V31* e *V32*. É importante mencionar que neste Estado a linha de H_2 e O_2 permanecem pressurizados. Caso o botão *Start* seja ativado manualmente então o sistema muda para o Estado VI **PRODUÇÃO** (Figura 4.43) caso contrário, o Estado VII tem um tempo de operação de 30 minutos, e após o término deste período, o sistema muda para o Estado VIII **DESPRESSURIZAÇÃO** (Figura 4.43).

No Estado VIII **DESPRESSURIZAÇÃO**, os dispositivos ligados são as válvulas *V7*, *V9*, *V14*, *V15*, *V17*, *V18*, *V20*, *V26*, *V27* e *V28* e as válvulas que ainda permanecem ligadas são *V13*, *V16*, *V19* e *V32*. O subsistema e dispositivos que desligam nesse estado são a bomba *B2* e as eletroválvulas *V29*, *V30* e *V31*. Neste estado o sistema despressuriza as linhas de O_2 e H_2 até chegar a 0 Bar. Quando isto ocorre, o sistema muda para o Estado IX **INERTIZAÇÃO** (Figura 4.43). Neste último Estado IX os dispositivos que são ligados são as eletroválvulas *V10*, *V11* e os que permanecem ligados são as eletroválvulas *V7*, *V9*, *V13*, *V14*, *V15*, *V16*, *V17*, *V18*, *V19*, *V20*, *V21*, *V26*, *V27*, *V28* e *V32*, entretanto, os demais subsistemas e dispositivos permanecem desligados. A operação deste Estado IX também tem um tempo de operação de 180 segundos. Concluído esse período o sistema muda para o Estado II **STAND-BY** (Figura 4.43).

Nos Estados III, IV, V, VI e VII se são ativados os botões *Stop* e *Emergency* ou se qualquer alarme for ativado o sistema muda diretamente para o Estado VIII **DESPRESSURIZAÇÃO** (Figura 4.43). Este comportamento é um procedimento de segurança garantindo a despressurização do sistema e permitindo posteriormente a sua limpeza. Agora, no Estado II apresenta-se um alarme o sistema não permite pressionar o botão *Start* e sim o botão de N_2 para que o sistema mude diretamente para o Estado IX **INERTIZAÇÃO** (Figura 4.43).

Para apresentar melhor a ação de ligar e desligar os subsistemas e dispositivos nos estados de operação e monitoramento dos alarmes, a Tabela D.1 (Apêndice D) traz as informações mais detalhadas sobre este procedimento.

Capítulo 5

Implementação em Controlador Lógico Programável

Este capítulo apresenta a visão geral da implementação do controle lógico dos subsistemas e o controle sequencial da planta em Controladores Lógicos Programáveis (CLP's). Para o controle lógico, é utilizada a ferramenta *Supremica*, que em conjunto com uma ferramenta de geração automática do código em linguagem de texto estruturado, permite a implementação do controle lógico baseado na TCS diretamente em um Controlador Lógico programável (CLP). Para o segundo tipo de controle, apresenta-se o diagrama *ladder* como linguagem para a implementação do controle sequencial da planta em um segundo CLP. Ao final, é mostrada a bancada laboratorial que representa a Planta de Produção de Hidrogênio (PPH) desenvolvida para testar o comportamento da planta com os dois controles elaborados.

5.1 Visão Geral da Implementação

Para a implementação prática do projeto de controle da PPH é definido um diagrama de instalação onde se mostra de forma sistemática os dispositivos eletrônicos utilizados, os quais são: uma bancada laboratorial que representa a planta de produção de H_2 , dois CLP's, uma placa de prototipagem Arduino e um relé. Os CLP's operam sobre entradas que são os interruptores de *Start*, *Stop*, *Emergency*, *Stanb-by*, botão de N_2 e os sensores de nível tipo boia, temperatura e pressão. Com isso os CLP's fornecem saídas que correspondem a comandos ou sinais enviados aos atuadores, entre eles: eletroválvulas, bombas, reator desoxidante, secadores, eletrolisadores e compressor.

As entradas diretas, provenientes da bancada laboratorial e que servem de entrada para os CLP's (Figura 5.1), são sinais discretos do tipo liga/desliga (*on/off*) gerados pelos os interruptores *Start*, *Stop*, *Emergency*, *Stanb-by*, botão de N₂ e pelos sensores de nível tipo boia (30 entradas). Para a representação do comportamento dinâmico dos sensores de temperatura e pressão foram utilizados potenciômetros e relés que em conjunto com um Arduino UNO converteram a resistência ajustável em sinais discretos aptos para as entradas do tipo liga/desliga dos CLP's (5 entradas). Todos as saídas dos CLP's são sinais discretos do tipo liga/desliga (*on/off*) enviados para os atuadores (28 saídas).

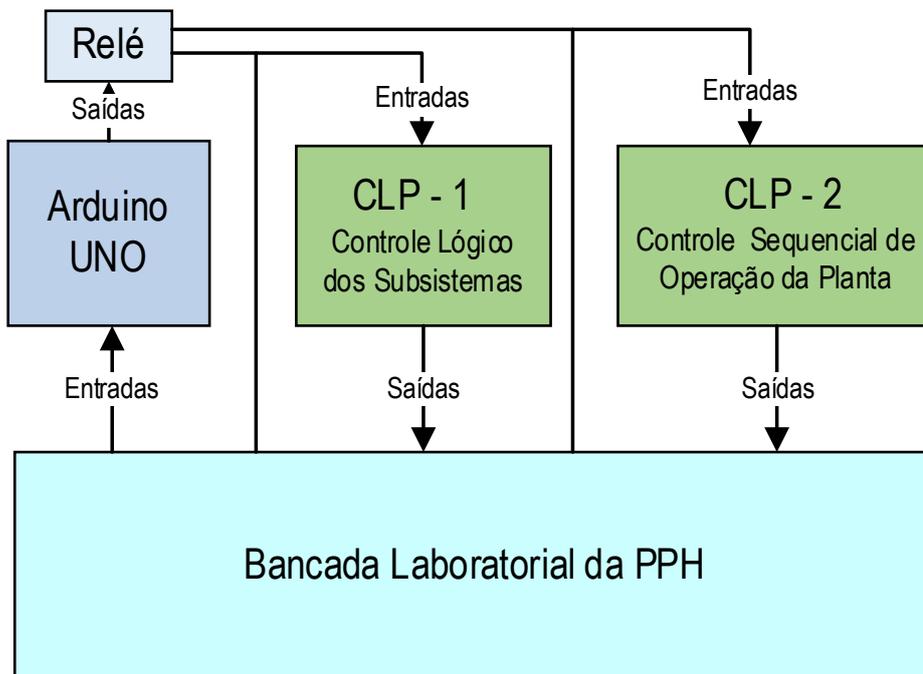


Figura 5.1: Diagrama de integração geral do projeto de controle da PPH.

5.2 Implementação dos Supervisores no CLP

Para a fase IV da metodologia aplicada (subseção 3.2.5), a implementação em CLP, e conforme a Norma IEC6111-3, a qual define as linguagens de programação para CLP's, duas foram as linguagens de CLP usadas. Para o controle sequencial, conforme já comentado na seção 4.11, foi empregada a linguagem *Ladder*. E para o controle lógico foi escolhida a linguagem baseada em texto estruturado ou ST (do inglês *Structured Text*), por existir uma ferramenta que gera o código automático para esta linguagem a partir de modelos das plantas, especificações e supervisores codificada a partir da ferramenta IDES2ST a qual será apresentada na subseção 5.2.2. Diante disso, para iniciar o processo de implementação, foi

necessário utilizar a ferramenta *Supremica* que permite a modelagem formal, simulação, verificação e síntese dos supervisores para os subsistemas da planta, explicada na próxima subseção.

5.2.1 Software *Supremica*

Supremica é uma ferramenta para modelar e analisar as funções de controle de eventos discretos com base nos modelos de máquinas de estado de planta e especificações de comportamento de malha-fechada desejados. A estrutura de modelagem no *Supremica* é baseada em máquinas de estados finitos entendidas como variáveis, condições de guarda e funções de ação associadas às transições (Akenson, Fabian, Flordal, & Malik, 2006).

Este *software* tem sido usado em vários projetos de pesquisa industrial para verificar e sintetizar funções de controle para supervisores, robôs industriais e sistemas de fabricação flexível. Diante disso, para tratar problemas em larga escala de tamanho industrial, *Supremica* desenvolveu técnicas avançadas para implementar algoritmos de verificação e funções de síntese de supervisores monolíticos e modulares tais como: composição síncrona, produto síncrono, cálculos da máxima linguagem controlável, comprovação de propriedades de controlabilidade de especificações e a obtenção das componentes acessíveis e coacessíveis (Malik, Akesson, Flordal, & Fabian, 2017).

Finalmente esta ferramenta apresenta uma interface gráfica, onde é possível visualizar os autômatos com seus estados atuais, seus estados vizinhos e suas respectivas transições. Por exemplo, na Figura 5.2 é apresentado uma captura da tela do *software Supremica* onde se apresentam os modelos de autômatos de comportamento livre do tanque de água (Figura 4.2), válvula solenoide V1 (Figura 4.3) e a especificação operacional *E1* desejada entre os dois equipamentos (Figura 4.4). Na ferramenta, os círculos vermelhos representam os estados iniciais e os de cor preta os estados vizinhos. As linhas de cor verde representam as transições habilitadas e as pretas as transições desabilitadas ou não possíveis fisicamente de ocorrerem. Por último, esta interface gráfica permite a interação direta com o programador para assim simular as possíveis cadeias de eventos que o autômato pode gerar.

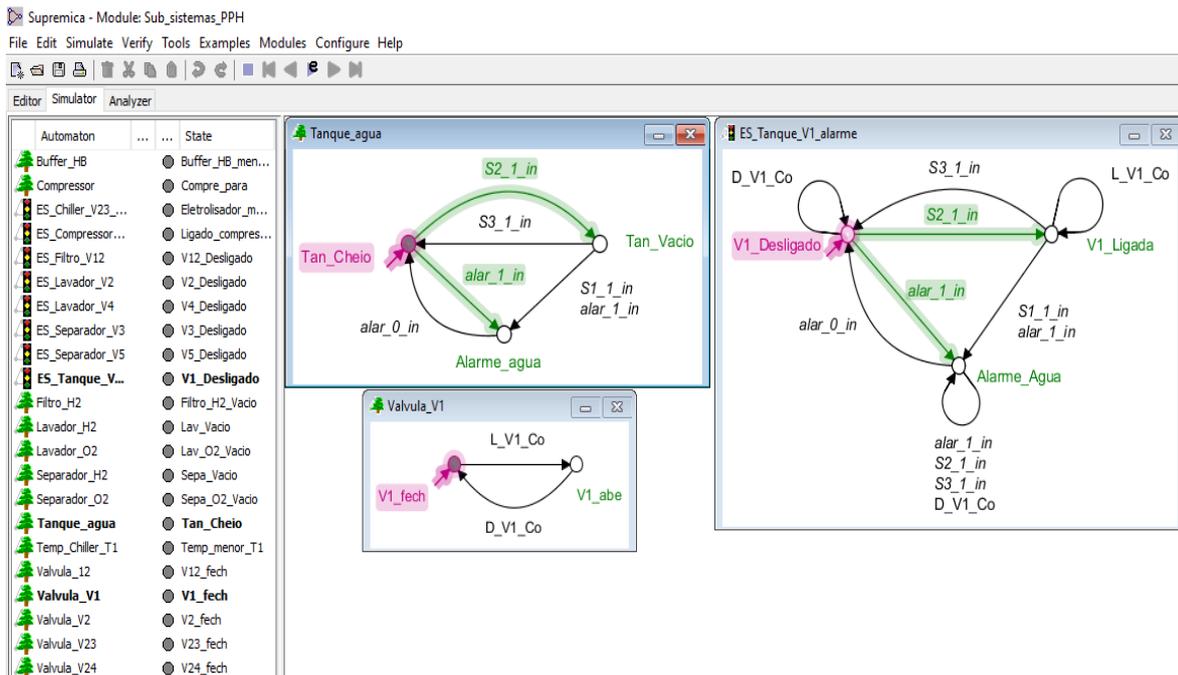


Figura 5.2: *Supremica*, mostrando os modelos do subsistema tanque de H₂O.

5.2.2 Geração de Código Automático em ST para os Supervisores

Após a modelagem dos dispositivos, especificações e sínteses de supervisórios necessários para controlar os subsistemas da planta, é preciso transcrever os modelos lógicos em uma estrutura de implementação utilizando uma linguagem que seja interpretada pelo CLP. Dessa forma, a linguagem escolhida para implementar os supervisores no CLP foi a linguagem ST, pois existe uma ferramenta que gera código automaticamente na linguagem de programação do CLP usado neste trabalho. Esta ferramenta é o IDES2ST. O IDES2ST é uma ferramenta complementar do IDES que foi desenvolvida por Kingle (2007), que consegue gerar o código do CLP a partir dos arquivos da IDES. O IDES por sua vez, é uma ferramenta para modelar SED's, baseada em *Java*, e que possui uma interface visual que facilita a criação e edição de modelos baseados em autômatos. Por meio desta ferramenta pode-se realizar as operações tais como: composição síncrona, cálculo da máxima linguagem controlável, cálculo do supervisor, minimização do supervisor, entre outros. A IDES, em comparação com o software *Supremica*, apresenta algumas limitações na simulação e análise das funções de controle dos autômatos. Assim, a ferramenta IDES só foi usada para traduzir os modelos formais desenvolvidos com a ferramenta *supremica* e assim permitir utilizar a ferramenta IDES2ST. Na Figura 5.3 é apresentado uma captura da tela do software IDES2ST gerando o código em linguagem ST exclusivamente para modelos de CLP Altus e S7-300.

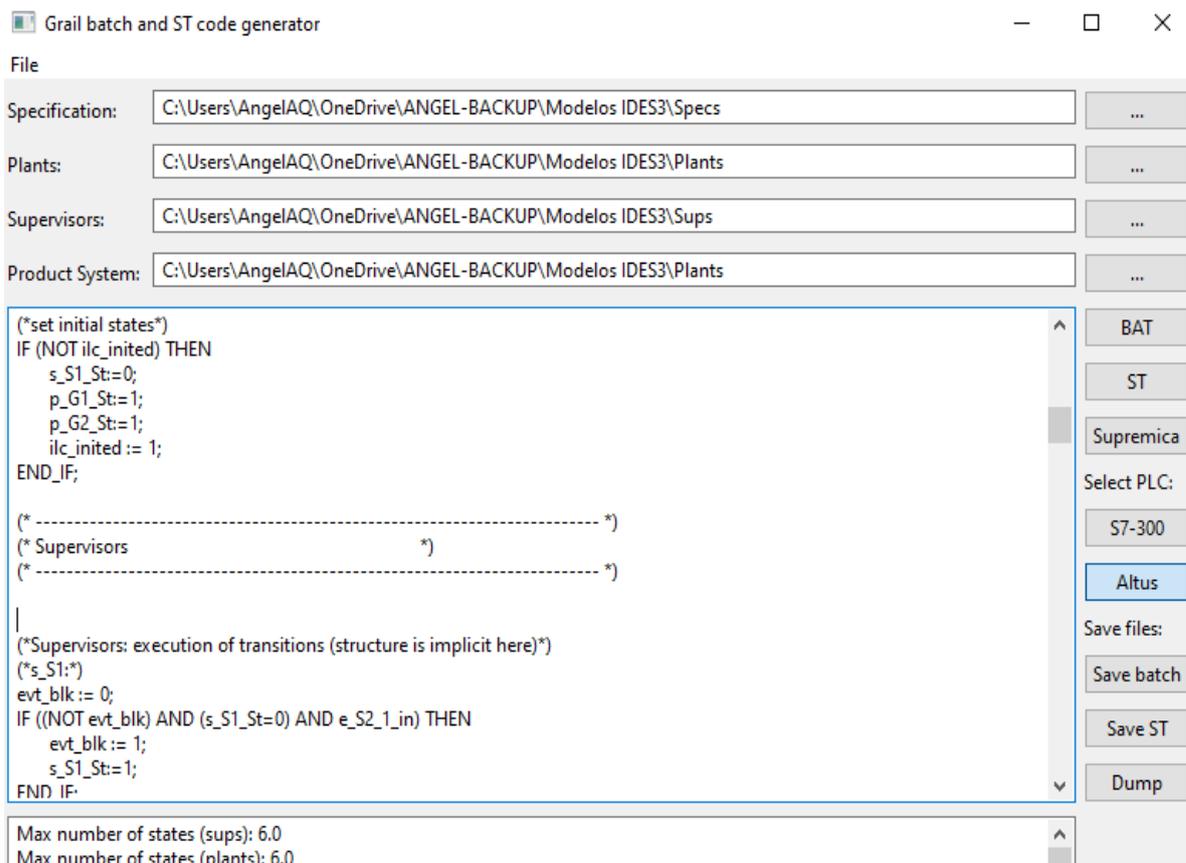


Figura 5.3: Geração do código no IDES2ST.

O código de implementação gerado pelo IDES2ST segue a estrutura proposta por Queiroz & Cury (2002), como apresentado na Figura 5.4. Este código é dividido em três blocos funcionais sendo estes Inicialização, Supervisor e Sistema Produto. Ao iniciar a execução da lógica do programa os estados dos supervisores e modelos das plantas (s_{S1_St} , p_{G1_St} e p_{G2_St}) são inicializados e recebem o valor lógico de 0 para seus estados iniciais (bloco **Inicialização**). Se a variável ilc_inited recebe o valor lógico 1 (linha 6 da Figura 5.4), garante que a lógica de inicialização seja executada apenas no primeiro ciclo, dado que a varredura de um programa de CLP é sequencial e cíclica (Figura 5.4).

O papel da variável evt_blk é indicar uma atualização de estado no supervisor e no sistema produto. Ela é utilizada para sinalizar uma atualização de estado no supervisor e no sistema produto. Com isso, nenhuma ação pode ocorrer até que exista uma nova varredura no programa de CLP. Assim, esta variável permite evitar a situação indesejável de computar duas transições subsequentes sem atualizar o estado do supervisor.

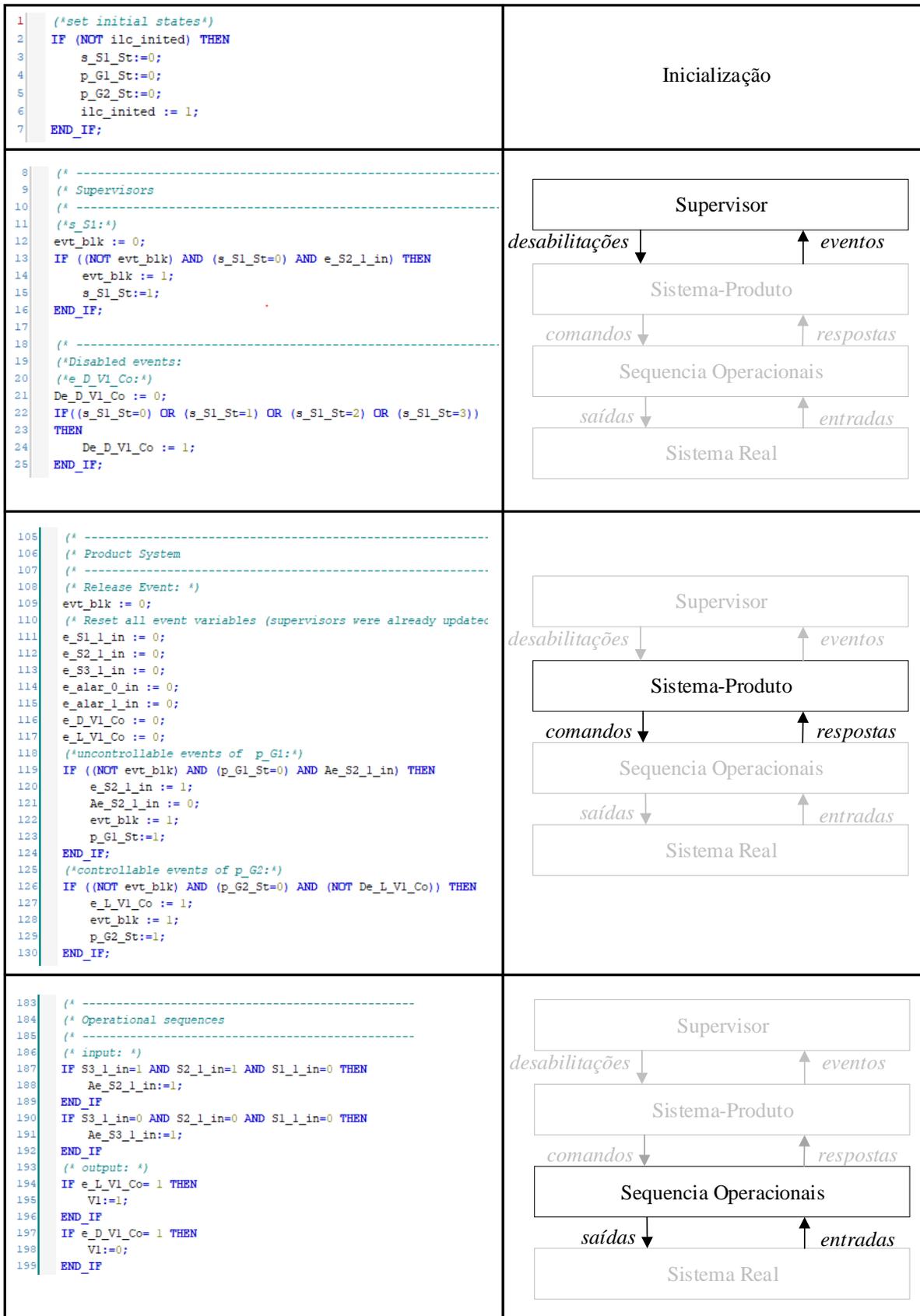


Figura 5.4: Estrutura do código implementado no CLP.

O bloco funcional **Supervisor** (Figura 5.5) tem a função de desabilitar os eventos controláveis e está dividida em duas partes. A primeira (Figura 5.5 – a), especifica o supervisor como um autômato, o qual descreve o estado atual e o evento de transição que leva para o próximo estado. Cada estado do supervisor é composto por um grupo de instruções do tipo *IF* os quais definem o número do estado atual e o número de estado alvo. A segunda parte (Figura 5.5 – b), se refere às desabilitações de eventos que são feitas através da definição da variável chamada *De_<evento>*. Esta parte também é composta por instruções do tipo *IF*, nas quais a variável *De_<evento>* é definida com o valor lógico 1, quando o estado da variável do supervisor que desabilita esse evento está ativo.

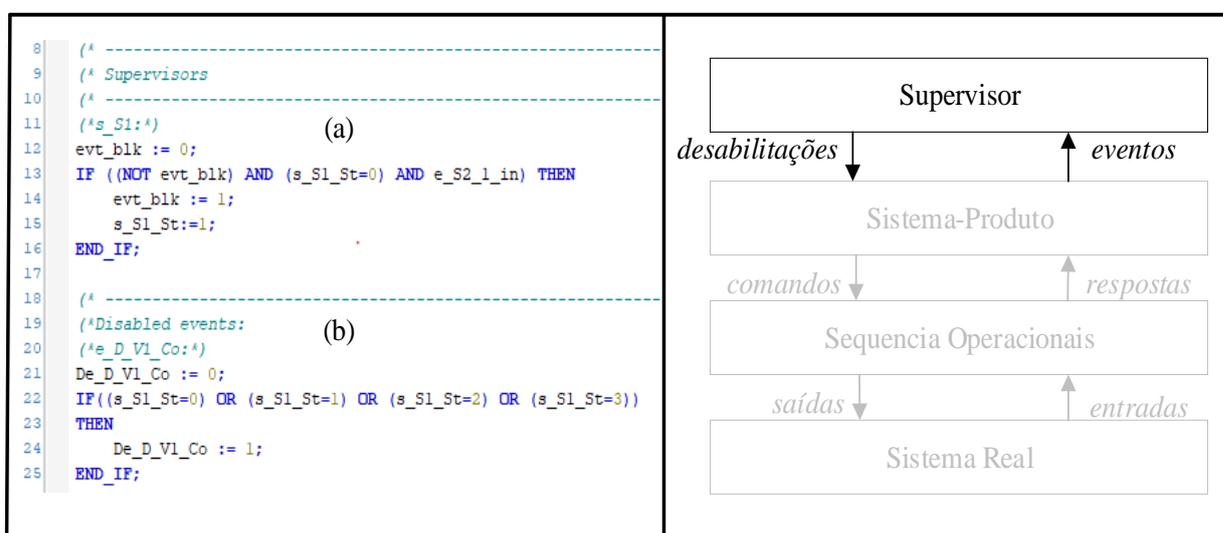


Figura 5.5: Bloco funcional do supervisor com a arquitetura de Queiroz e Cury.

O bloco funcional do **Sistema Produto** (Figura 5.6) tem a função de executar os comandos que são permitidos e não são desabilitados pelo supervisor. O bloco também recebe respostas enviadas pelas sequencias operacionais sinalizando então as mudanças de estado para os supervisores. O seu funcionamento está dividido em três partes. A primeira parte (Figura 5.6 – a) inicializa os eventos controláveis e não controláveis das plantas, recebendo o valor lógico 0. Esses eventos referem-se à definição chamada *e_<evento>*. A segunda parte (Figura 5.6 – b), especifica as plantas como autômatos, incluindo seus eventos não controláveis. A terceira parte (Figura 5.6 – c) especifica também as plantas como autômatos, e define quais são seus eventos controláveis. Esta segunda parte precede à terceira em consequência da sua imprevisibilidade.

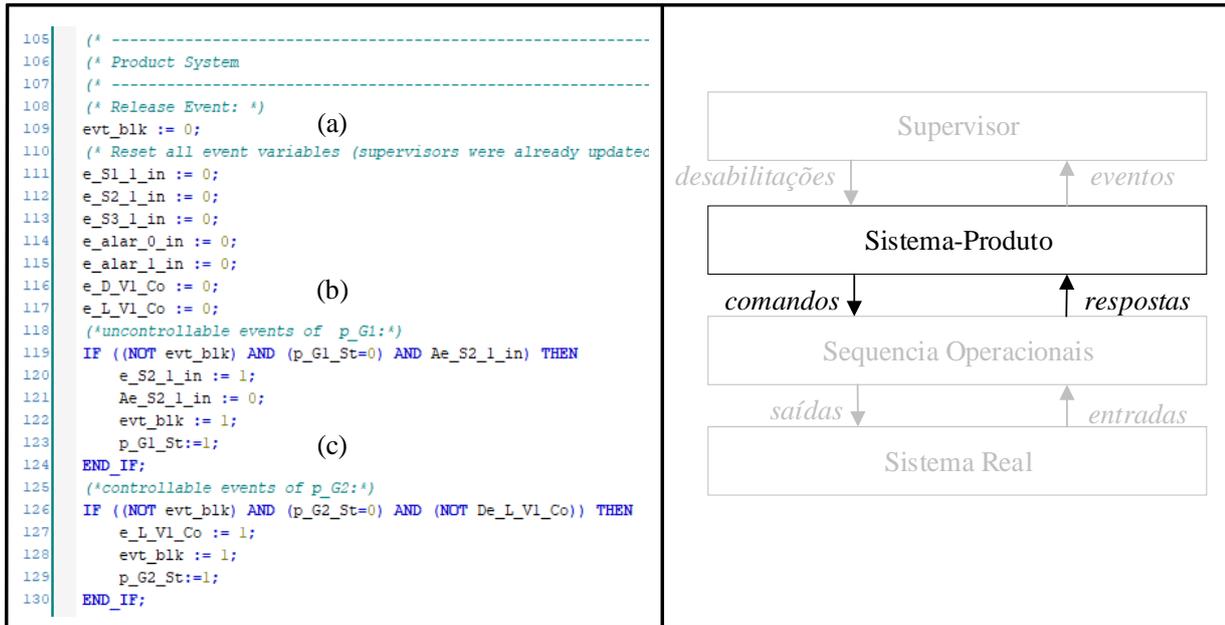


Figura 5.6: Bloco funcional do sistema produto com a arquitetura de Queiroz e Cury.

Assim, antes que qualquer evento controlável possa ser acionado, o código irá verificar se está habilitado um evento não controlável com o valor lógico 1, e este evento refere-se à definição $Ae_{<evento>}$. Caso isto seja cumprido, o estado da planta é atualizado e a variável do evento controlável de resposta $e_{<evento>}$ é definido como 1, indicando que o supervisor deve ser atualizado. Porém, caso não seja cumprido, a planta então entra em um estado no qual o evento controlável não está desabilitado, indicado com um valor lógico 0. Esse evento controlável refere-se à definição $De_{<evento>}$ controláveis. Se isso cumpre então o estado da planta será atualizado e a variável do evento de resposta é definida como 1, ou seja, um comando é enviado para iniciar a rotina para atualizar o supervisor.

Finalmente no bloco funcional da **Sequência Operacional** (Figura 5.7) corresponde a tradução dos eventos dos autômatos em comandos e sinais de saída da planta real, e é implementada manualmente pelo projetista respeitando as especificações de operação do subsistema modelado, ou seja, diferente dos códigos anteriores, que são decorrentes da tradução automática dos modelos definidos na ferramenta IDES2ST.

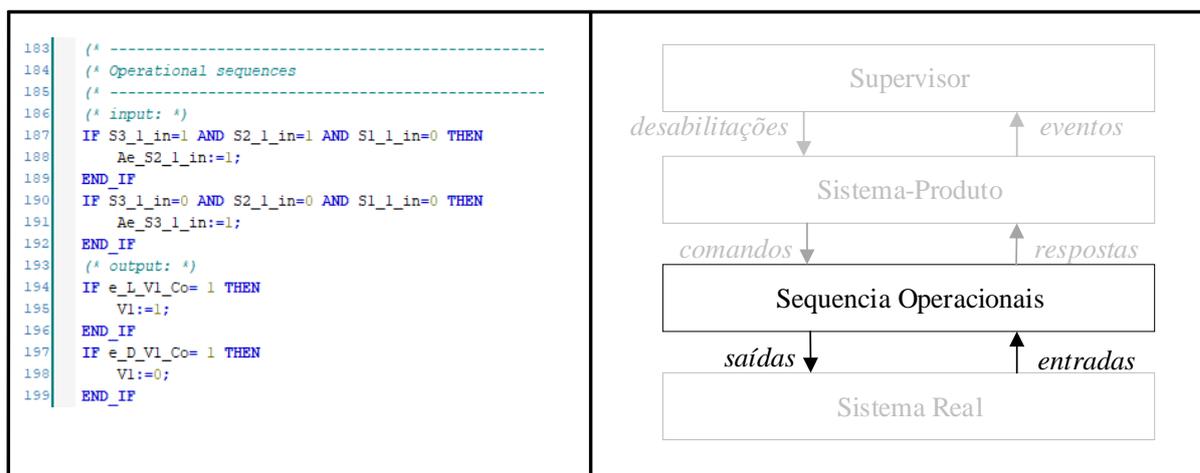


Figura 5.7: Bloco da sequência operacionais com a arquitetura de Queiroz e Cury.

5.3 Implementação da linguagem *Ladder* para o Controle Sequencial de Operação

A partir do fluxograma que modela a sequência de estados do ciclo de produção de H₂ (Figura 4.43), desenvolve-se o controle sequencial da operação da PPH. A linguagem escolhida para a implementação foi a linguagem *ladder* (LD), por ser uma linguagem de mais facilidade de utilização, ideal para a representação de ações sequenciais e uma das mais usadas na programação de CLP's.

Na estrutura da implementação do programa foram utilizadas os comandos “bobinas” *set* (S) e *reset* (R), as quais representam as saídas binárias (bobinas) de um CLP e correspondem a variáveis que armazenam estados (verdadeiro se a bobina é *set* e falso se a bobina é *reset*) em uma variável booleana toda vez que um sinal com valor lógico verdadeiro as ative. O estado então é mantido até que um sinal futuro altere seu valor. Este tipo de bobina facilita a implementação de sistemas com memória o qual ajuda na implementação sequencial do programa. A Figura 5.8 apresenta uma captura de tela do código de implementação de controle sequencial da operação da planta e o fluxograma que foi a base na implementação da linguagem *ladder*.

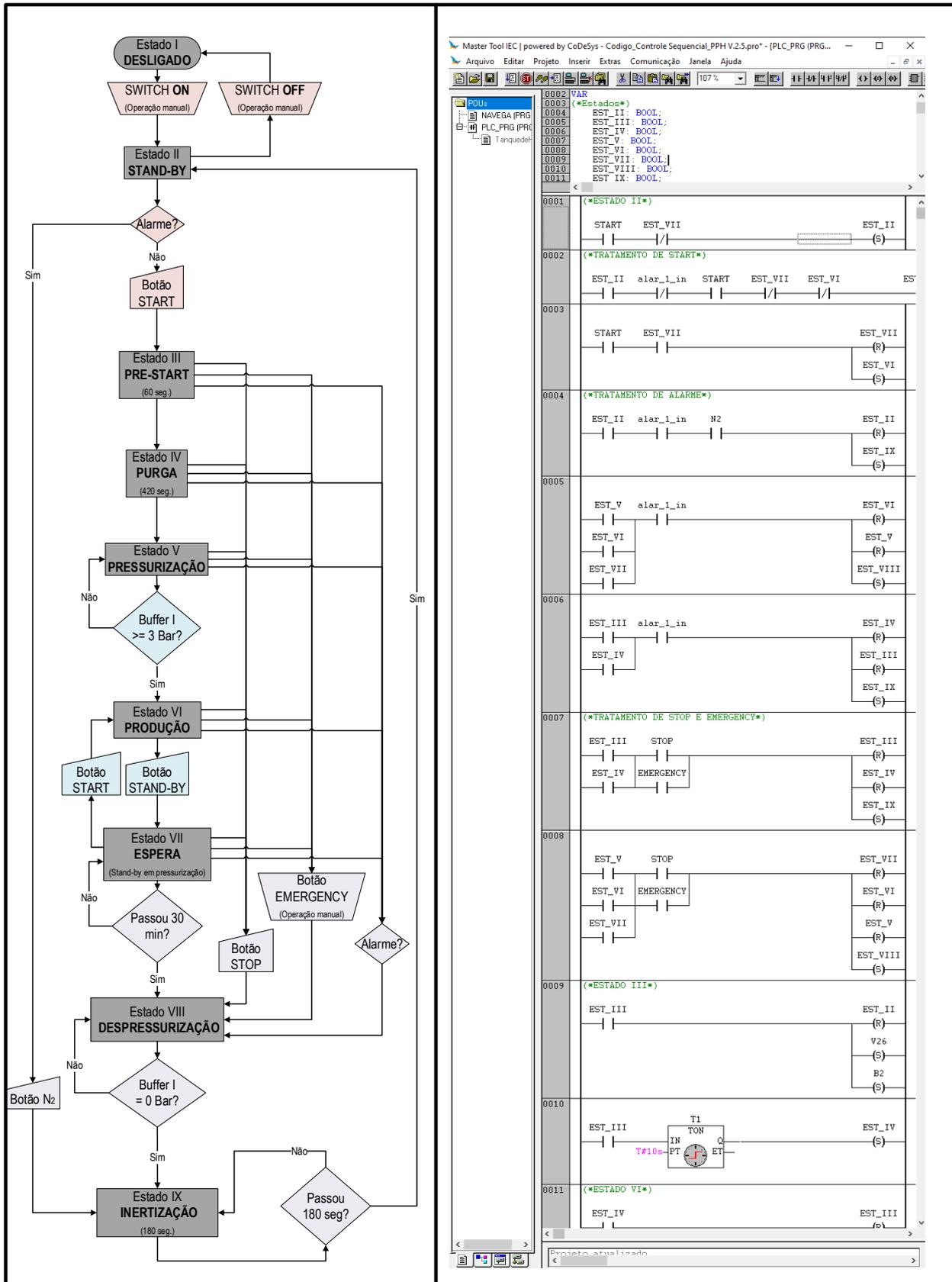


Figura 5.8: Código Ladder para o controle sequencial da operação da planta.

Como poder ser visto na Figura 5.8 a linguagem LD proporciona uma implementação mais direta do fluxograma, facilitando um raciocínio lógico na elaboração de comando feitos por relés. Ademais, apresenta uma estruturação clara dos estados de operação do fluxograma de controle sequencial da PPH (apresentado na seção 4.11), os blocos funcionais (temporizadores) e as variáveis de entrada e saídas. Porém, também apresenta desvantagens tais como a necessidade de teste mais exaustivos de modo a identificar e corrigir eventuais erros relacionados a codificação manual.

5.4 Bancada Laboratorial

A forma de comprovação dos modelos lógicos usados no controle supervísório dos subsistemas e no controle sequencial da operação da planta é realizado através de testes em uma bancada laboratorial, que retrata todas as unidades de processamento da PPH. Esta bancada foi exclusivamente construída para realizar os testes experimentais e observar o comportamento dinâmico discreto e sequencial da planta. A Figura 5.9 mostra uma imagem da bancada laboratorial representando todos subsistemas analisados no presente trabalho.

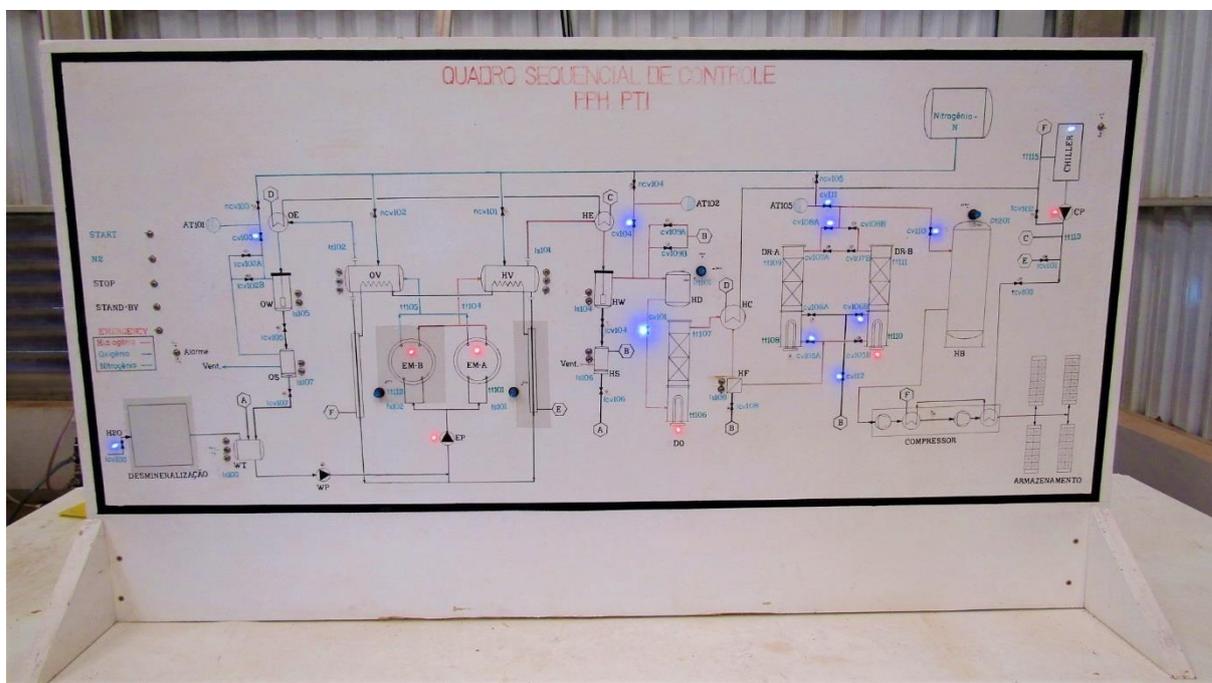


Figura 5.9: Bancada laboratorial que representa as unidades de processamento da PPH.

A Figura 5.10 apresenta uma imagem aumentada da bancada laboratorial detalhando a ilustração do tanque de água. Nela se pode observar a válvula solenoide *VI*, que é representada

por um LED, e o sensor tipo boia *LSI*, que é representado com três mini-interruptores que representam as três posições do sensor de nível do tanque de água.



Figura 5.10: Imagem da bancada experimental que representa o tanque de água.

Dessa forma, todos os sensores tipo boia da planta e os botões de *Start*, *Stop*, *Emergency*, *Stanb-by*, *Alarme* e N_2 na bancada laboratorial são representados por mini-interruptores (*on/off*) e o funcionamento dos subsistemas e dispositivos são representados por LED (*on/off*). Para a representação do comportamento dinâmico dos sensores de temperatura e pressão na bancada laboratorial foram utilizados potenciômetros e relés que em conjunto com um Arduino UNO converteram a resistência ajustável em sinais discretos aptos para as entradas dos CLP's.

Para construção da bancada foram necessários os seguintes itens:

- 43 diodos emissores de luz (LED);
- 43 resistências de 1K Ohm;
- 30 mini-interruptores;
- 4 potenciômetros 100K Ohm;
- 2 fontes de alimentação de 24Vdc;
- 1 fonte de alimentação de 5 Vdc;
- 1 placa de prototipagem Arduino UNO;
- 8 relés;
- 1 Trilho DIN;
- 2 Controladores Lógico Programável Altus modelo: DUO-351 (ver Tabela E.1 do Apêndice E)
- 5 Conector multiforme de 6mm/20.

Na bancada laboratorial os níveis de tensão de operação dos dois CLP's é de 24 Vdc na alimentação da entrada e saída. No caso do arduino UNO o nível de tensão é de 5 Vdc na alimentação da entrada e saída, pelo qual, para a comunicação com os CLP's foi necessário a utilização de um relei de 24Vdc. O monitoramento é realizado por meio de um computador onde é visualizada a plataforma de programação dos CLP's e do arduino UNO.

5.5 Discussões

Para o processo de implementação do projeto de controle da planta a escolha dos CLP's Altus modelo DUO-351 foi realizada em função da memória disponível para os modelos e o número de entradas e saídas que atendesse o projeto. A relativa baixa velocidade de resposta dos sensores e atuadores ou frequências de funcionamento dos diversos componentes não impuseram restrições temporais ao CLP, sendo suficiente os tempos de resposta dos CLP escolhidos.

A construção da bancada permitiu avaliar, ainda que de modo demonstrativa ou inicial, o funcionamento do ponto de vista lógico e operacional dos dois controladores empregados na bancada da PPH, possibilitando avaliar aspectos qualitativos (lógica e segurança) das duas abordagens de controle empregadas (lógico e sequencial). Nos testes laboratoriais com os códigos nos respectivos CLP's foi configurada a varredura cíclica da leitura do programa (*scan*) em 1 milissegundos e não apresentou os problemas de sincronização inexata, efeito avalanche ou simultaneidade que podem ser encontrados em implementações de sistemas de controle com SED's.

No caso dos alarmes da planta no projeto foi centralizado em uma só alarme que representa todo o conjunto de elas. Tal simplificação facilitou a modelagem nos dois níveis de controle lógico dos subsistemas e controle sequencial da planta. Sem a simplificação, o aumento no número de estados dos modelos dos subsistemas individuais levava a uma explosão no número de estados de todo o sistema, dificultando a obtenção do supervisor e sua implementação em CLP. Além disso, tal simplificação apresenta como desvantagem a não possibilidade de identificar alarmes específicos que podem ocorrer nos subsistemas individuais.

A bancada laboratorial não representa a totalidade da planta real, já que o projeto de controle do presente trabalho não foi considerado o controle na execução de funções avançadas, tais como diagnóstico de manutenção, diagnóstico de recuperação e detecção de erros e

recuperação, e sim um modelo que contém uma simplificação mais adequada para uma primeira abordagem de modelagem e controle da PPH, objetivo deste trabalho.

Capítulo 6

Conclusão

As PPH despertaram interesse de estudo no PTI com intenção de dominar a tecnologia de automação de estas infraestruturas que compreendem um elevado número de máquinas, equipamentos e dispositivos controlados por um computador. Esta dissertação apresenta um modelo lógico de operação e controle da Planta de Produção de Hidrogênio (PPH) instalada no Parque Tecnológico Itaipu (PTI). Diante disso, a dissertação mostra uma metodologia do projeto lógico de controle da PPH com a vantagem de ser um sistema automatizado de código aberto e flexível. Desse modo, este trabalho inicial também tem a pretensão de possibilitar a aplicação e aproveitamento melhor dos conteúdos da pesquisa de automação em plantas de H₂.

A caracterização, ou modelagem, da PPH é realizada a partir de abordagens que desenvolveram arquiteturas de controle para a planta. O sistema de controle proposto para a PPH apresenta dois níveis de controle lógico: controle lógico dos subsistemas e controle sequencial da operação da planta. O primeiro é abordado pelo formalismo da Teoria de Controle Supervisório (TCS); e o segundo pelo conhecimento empírico das etapas do ciclo de produção de hidrogênio (H₂). Ambas abordagens, em conjunto, permitiram definir uma lógica de controle global da planta e assim garantir o correto funcionamento para o ciclo de produção de H₂.

A Teoria de Controle Supervisório (TCS) apresenta ser uma solução para o projeto de sistemas de automação na indústria de processo, já que por meio dela é possível modelar o comportamento dos subsistemas da PPH como um Sistema de Eventos Discretos (SED's) e derivar controladores ou supervisores que, por construção, garantem especificações de segurança e operação para a planta controlada. Os autômatos de estados finitos são usados para descrever a planta, as especificações e os supervisores. Dessa forma, o processo de projeto conceitual proposto estabelece uma forma organizada, produtiva e segura de combinar a modelagem formal, a arquitetura de controle supervisório, o projeto do controlador e sua imple-

mentação em um controlador lógico programável (CLP), com a respectiva linguagem de programação do CLP, em uma abordagem formal unificada, favorecendo o desenvolvimento da lógica de controle de sistemas industriais. Também por meio da abordagem baseada em Sistemas a Eventos Discretos (SED's) na PPH foi possível separar o comportamento contínuo e discreto de operação de cada um dos subsistemas da planta, desse modo, propiciando uma vantagem no projeto do sistema de controle ao promover uma redução considerável de complexidade na análise dos subsistemas e na síntese da lógica de controle.

A natureza de operação autônoma e independente de cada subsistemas na planta de H₂ favoreceu a adoção da TCS monolítica. Esta abordagem permitiu, por projeto, a obtenção de supervisores não bloqueantes ótimos e minimamente restritivos para cada especificação, de acordo com o processo de síntese dos supervisores, ou controladores, da TCS. Portanto, a diminuição do número de estados dos modelos formais reduziu a complexidade computacional, evitaram a explosão exponencial de estados, que pode inviabilizar o processo de síntese dos supervisores e trazer dificuldade para a implementação em CLP's, facilitando o projeto e implementação do sistema de controle.

A arquitetura de implementação associada à geração de código automático garante que a lógica de controle desenvolvida para cada subsistema seja implementada diretamente nos controladores industriais. Assim, a implementação preserva as estruturas usadas na etapa de modelagem na implementação do projeto, ou seja, no modelo de controle lógico das plantas, especificações, bem como a posterior a síntese dos supervisores. Sendo assim, o código automático gerado se torna mais confiável pois tem menos erros em comparação a uma implementação manual das estruturas.

As fases aplicadas da metodologia de projeto de controle apresentada na subseção 3.2.5 se mostraram adequadas ao trabalho ao conferir a sistematização, flexibilidade e eficiência do projeto de controle e supervisão dos subsistemas da PPH. A metodologia auxiliou na diminuição do tempo necessário para o desenvolvimento de cada projeto lógico dos subsistemas. Além disso, a organização da estrutura de todo o projeto dos controladores, deixa a lógica de programação mais clara e objetiva para o projetista, ao passo que permite a comprovação de soluções de controle, também foi uma característica importante obtida pela aplicação da metodologia no decorrer deste trabalho.

Contudo, uma desvantagem no uso da abordagem da TCS monolítica em plantas mais complexas, consiste crescimento de número de estados e modelos envolvidos que inviabiliza a

síntese do supervisor e por consequência a implementação do programa no CLP. Tal fato foi observado para o caso para do controle sequencial de operação, inviabilizando a adoção da TCS para este nível de controle. Diante disso, a opção pela construção de um fluxograma que auxiliasse o entendimento dos estados de operação da planta, com base na experiência, e o estudo de uma planta real de hidrogênio instalado no PTI foi a alternativa encontrada diante da impossibilidade da aplicação da TCS no nível sequencial. Deste modo, o controle sequencial seguiu uma implementação informal geral baseada na experiência empírica com suporte no conhecimento e operação deste autor com a PPH.

Além disso, a construção do fluxograma, onde foi descrito o controle sequencial da operação da planta, se constitui de uma importante contribuição para o entendimento do funcionamento da PPH para as equipes do PTI. Diante disso, este fluxograma contribui para trabalhos futuros na área de tecnologias e automação em plantas de produção de H₂.

Destaca-se, também, como contribuição, que a utilização das ferramentas formais de modelagem e síntese de controladores de SED's ressalta a segurança do sistema de controle, não só pela sistematização do seu desenvolvimento, como também pela incorporação do formalismo lógico proveniente da TCS, garantindo assim o cumprimento das especificações estabelecidas.

Os modelos implementados nesse trabalho foram comprovados por meio de testes de simulação realizados num ambiente de programação do CLP que em conjunto com uma bancada experimental representam todo o sistema da PPH. Foi observado o correto funcionamento do controle lógico dos subsistemas e o controle sequencial da operação da planta, de acordo com a sistemática operacional da PPH.

Uma das principais contribuições na comunidade científica foi o trabalho: A. A. QUISPE, R. J. FERRACIN, V. A. R. BALBUENA, C. B. JAKUBIU, M. MIGUEL, R. REGINATTO, S. BATTISTELLA. *Implementação de Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos Aplicado a uma Planta de Produção de Hidrogênio do Parque Tecnológico Itaipu -PTI*. 4º Congresso de Engenharia e Ciências Aplicadas nas Três Fronteiras. 2019. Este foi premiado como trabalho destaque no evento.

6.1 Trabalhos Futuros

Além de apresentar as contribuições descritas na seção anterior, esta pesquisa deixa abertas algumas questões que servem como sugestões para trabalhos futuros. A primeira questão é continuidade do trabalho para realizar um estudo diferente com outras técnicas, métodos, e modelos relacionados, capazes de desenvolver um projeto de controle de um sistema na indústria de processos, notadamente, a aplicação de um método formal, como o Controle Hierárquico, para a modelagem e projeto do controle sequencial. Outro ponto importante a ser considerado para pesquisas futuras consiste na exploração de uma metodologia que pode ser utilizada para a análise dos sistemas dinâmicos contínuos da planta e sua integração na análise do sistema de eventos discretos, conforme as abordagens da área de Controle Híbrido.

O desenvolvimento de um sistema do tipo SCADA para monitoramento, supervisão e registro de dados também representa uma importante área para continuidade do trabalho, ao integrar a ação do sistema de controle com os demais níveis da pirâmide da automação. A aplicação das próximas fases propostas da metodologia de Portilla (2011), aplicada parcialmente neste trabalho, permitiria ampliar a análise e validação dos resultados obtidos neste trabalho.

Importante também ressaltar como recomendação a utilização desta abordagem no contexto de ensino da engenharia de controle, pois hoje em dia os modelos de ensino das diferentes engenharias tratam de forma separada a execução de um projeto prático e do controle. Nesse sentido, é fundamental integrar ao ensino de engenharia conteúdos que abordem projetos práticos e reais, como por exemplo o proposto no presente trabalho.

Referências Bibliográficas

- Akenson, K., Fabian, M., Flordal, H., & Malik, R. (2006). *Supremica - An Integrated Environment for Verification, Synthesis and Simulation of Discrete Event Systems. Proceedings - Eighth International Workshop on Discrete Event Systems, WODES 2006*, pp. 384-385.
- Altus. (2016). *Manual de Utilização DU350/DU351*. Manual Técnico.
- Alvaro, V. (2014). *Planta de Produção de Hidrogênio é Inaugurada em Foz do Iguaçu*. Acesso em 02 de outubro de 2019, disponível em Web Radio Agua: <http://www.folhadeibitinga.com.br>
- Anderson, J. A. (2007). *Automata Theory with Modern Applications* (Vol. 136). New York, EEUU: Cambridge University Press.
- Baccelli, F., Cohen, G., Olsder, G. J., & Quedrat, J. P. (1992). *Synchronization and Linearity* (Vol. 1).
- Balemi, S., Hoffmann, G., Gyugyi, P., Wong-Toi, H., & Franklin, G. F. (1993). Supervisory Control of a Rapid Thermal Multiprocessor. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38, pp. 1040-1059.
- Balieiro, S. (2007). *Aplicação da Teoria de Controle Supervisório no Projeto de Controladores para Sistemas de Rota Variável Centrado em Robô PPGEPS*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Battistella, S. (2015). *Controle de Missão Baseado na Teoria de Controle Supervisório com Aplicação a Veículos Subaquáticos Autônomos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Cantillo, M. (2007). *Uma Abordagem Híbrida para o Controle de Sistemas de Manufatura Baseada na Teoria de Controle Supervisório e nas Redes de Petri Coloridas*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Paraná, Curitiba, Brasil.
- Carnieletto, R. (2011). *Aproveitamento de Energia Vertida Turbinável para Produção de Hidrogênio e Geração Distribuída*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.
- Carroll, J., & Long, D. (1989). *Theory of Finite Automata with an Introduction to Formal Languages*. New Jersey, EEUU: Prentice-Hall, Inc.
- Cassandras, C. G., & Lafortune, S. (2008). *Introduction to Discrete Event Systems*. (S. Science+Business, Ed.) New York.
- CESP. (2019). *Quando ela Virou Energética*. Acesso em 22 de Outubro de 2019, disponível em Companhia Energética de São Paulo: <http://www.cesp.com.br>
- Chandra, V., Huang, Z., & Kumar, R. (2003). Automated Control Synthesis for an Assembly Line Using Discrete Event System Control Theory. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 33, pp. 284-290.

- Chandras, V., Orunganti, B., & Kumas, R. (2002). UKDES: A Graphical Software Tool for the Desing, Analysis & Control of Discrete Event Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, pp. 17-34.
- Claire, T. (2003). *Controle Supervisório Hierárquico de Sistemas a Eventos Discretos: Uma Abordagem Baseada na Agregação de Estados*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina , Florianópolis.
- Claire, T. C. (1999). *Implementação de Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos Aplicado a Processos de Manufatura*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Costa, A. T. (2015). *Método para Sequenciamento de Tarefas em Sistemas Flexíveis de Manufatura baseado em Metaheurísticas e Controle Supervisório*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais , Belo Horizonte, Brasil.
- Cunha, A. E. (2003). *Contribuições ao Controle Hierárquico de Sistemas a Eventos Discretos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Cury, J. E. (2001). *Teoria de Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos*. Relatório Técnico, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Automação e Sistemas, Canela, Brasil.
- Dincer, I., & Zamfirescu, C. (2016). *Sustainable Hydrogen Production* (Vol. 1). Amsterdam, Netherlands.
- Espinola, G., Cesar, R., Ferracin, R., Quispe, A., Jakubiu, B., Miguel, M., & Garcia, R. (2017). Análises Energética e Exergética da Planta de Produção de Hidrogênio Eletrolítico. *I Simpósio Paranaense de Hidrogênio, 1*, pp. 65-68.
- Fabian, M., & Hellgren, A. (1998). PLC-Based Implementation of Supervisory Control for Discrete Event Systems. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 3, pp. 3305-3310.
- Faustino, S. (2015). *Arquitetura de Sistema de Controle Supervisório Integrando CLP, SCADA e Roteamento de Tarefas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Glynn, P. (1989). A GSMP Formalism for Discrete Event Systems. *Proceeding of the IEEE*, 77.
- Groover, M. (2002). *Automation Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*.
- Gull, T., & Turk, D. (2019). *The Future of Hydrogen*. Report prepared by the IEA for the G20, Japan, International Energy Agency.
- Gupta, R. B. (2009). *Hydrogen Fuel - Production, Transport and Storage* (Vol. 1). New York, Estados Unidos .
- Hoffmann, P. (2001). *Tomorrow's Energy:Hydrogen, Fuel Cells, and the Prospects for a Cleaner Planet* (Vol. 1). Massachusetts, United States of America.
- Hopcroft, J. E., Motwani, R., & Ullman, J. D. (2001). *Introduction to Automata Theory , Languages , and Computation*. Stanford, EEUU: Perason Education.
- Hrúz, B., & Zhou, M. C. (2007). *Modeling and Control of Discrete-event Dynamic Systems: With Petri Nets and Other Tools*. Scotland: London, Springer-Verlag.
- Hurbet, T., Boom-Brett, L., & Buttner, W. (2018). *Sensors for Safety and Process Control in Hydrogen Technologies*. New York: Taylor & Francis Group.

- IDC-Technologies. (2012). *Industrial Automation* (1 ed., Vol. 1). United States: The IDC Engineers & Ventus Publishing AsP.
- IEC. (2003). *International Standard: Programmable Controllers. Part 3: Programming Languages*. Norma IEC 61131.
- Jammes, J., & Smit, H. (2005). Service-Oriented Paradigms in Industrial Automation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 62-70.
- Junior, S. (2016). *Ensino e Formação em Automação Industrial utilizando Integração de Elementos de Manufatura a partir do GRAFCET*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Kaszubowski, L. Y. (2012). *Integração dos Níveis MES, SCADA e Controle da Planta de Manufatura com Base na Teoria de Linguagens e Autômatos*. Dissertação de Mestrado, Univesidade do Estado de Santa Catarina , Joinville, Brasil.
- Kaszubowski, L. Y. (2016). *Supervisory Control Theory for Controlling Swarm Robotics Systems*. Thesis of Doctor in Philosophy, University of Sheffield , Sheffield, Inglaterra.
- Kingle, S. (2007). *Supervisory Control of a Manufacturing Cell : Modeling and Implementation*. Otto Von Guericke Universitat Magdeburg, Magdeburg, Alemanha.
- Kleinrock, L. (1975). *Queueing Systems* (Vol. 1). New York.
- Kumar, R., & Garg, V. K. (1995). *Systems, Modeling and Control of Logical Discrete Event*. (S. Science+Business, Ed.) New York.
- Lamb, F. (2015). *Automação Industrial na Prática* (Vol. 1). New York, EEUU: AMGH.
- Lemes, C. D. (2011). *Metodologia para Implementação de Controle Supervisório Modular Local em Controladores Lógicos Programáveis*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina , Joinville, Brasil.
- Malik, R., Akesson, K., Flordal, H., & Fabian, M. (2017). Supremica—An Efficient Tool for Large-Scale Discrete Event Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 50, pp. 5794-5799.
- Marchand, H. (2017). *Contribution to the Analysis of Discrete Event Systems*. Relatório Técnico , Université de Rennes I, Departament Software Engineering, Rennes.
- Marques, T. (2013). *Automatização e Integração de uma Linha de Produção Industrial*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Porto, Porto, Portugal.
- Martins, E. D., & Cury, J. E. (1997). Uma Arquitetura para Implementação de Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos. *Terceiro Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pp. 184-189.
- Matsumi, K. (2012). *Contribuições à Análise de Desempenho de Células de Manufatura Baseada na Teoria de Controle Supervisório*. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Brasil.
- Molina, C. (2007). *Uma Abordagem Híbrida para o Controle de Sistemas de Manufatura Baseada na Teoria de Controle Supervisório e nas Redes de Petri Coloridas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Católica do Paraná , Curitiba.
- Montgomery, E. (2004). *Introdução aos Sistemas a Eventos Discretos e a Teoria de Controle Supervisório*. Bahia, Brasil.
- Montgomery, E. (2011). *Redes de Petri e Aplicações aos Sistemas a Eventos Discretos* (Vol. 1). Petronila.

- Moody, J. O., & Antsaklis, P. J. (1998). *Supervisory Control of Discrete Event Systems Using Petri Nets*. Notre Dame: Springer Science+Business.
- Moraes, C., & Castrucci, L. (2008). *Engenharia de Automação Industrial* (2 ed., Vol. 1). São Paulo, Brasil: LTC.
- Murata, T. (1989). Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. *Proceedings of the IEEE*, 77, pp. 541-580.
- Ogata, K. (1982). *Engenharia de Controle Moderno*. Englewood, EEUU: Prentice/Hall do Brasil Ltda.
- Ogata, K. (2003). *Engenharia de Controle* (4 ed.). São Paulo, Brasil: Pearson Prentice Hall.
- Oliveira, J. J. (2012). *AES Tietê Adota Hidrogênio em Novo Processo de Geração*. Acesso em 02 de maio de 2019, disponível em www.valor.com.br: www.valor.com.br
- Paladino, P. A. (2013). *Uso de Hidrogênio no Transporte Público da Cidade de São Paulo*. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo - Brasil.
- Pessôa, M., & Spinola, M. (2014). *Introdução à Automação para Cursos de Engenharia e Gestão*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Pinha, C. D., Queiroz, M. H., & Cury, J. R. (2010). Escalonamento Da Produção com uso da Teoria de Controle Supervisório. *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, 4662-4668.
- Portilla, C. B., Queiroz, H. M., & Cury, E. J. (2014). Integration of Supervisory Control with SCADA System for a Flexible Manufacturing Cell. *IEEE*, pp. 261-266.
- Portilla, P. C. (2011). *Integração de Sistemas Scada com a Implementação de Controle Supervisório em CLP para Sistemas de Manufatura*. Dissertação de mestrado- Universidade Federal de Santa Catarina.
- Queiroz, M. H. (2004). *Controle Supervisório Modular e Multitarefa de Sistemas Compostos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina , Florianópolis, Brasil.
- Queiroz, M., & Cury, E. (2002b). Controle Supervisório Modular de Sistemas de Manufatura. *Control and Automation*, 13, pp. 123-133.
- Queiroz, M., & Cury, J. (2002a). Synthesis and Implementation of Local Modular Supervisory Control for a Manufacturing Cell. *Proceedings - 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES 2002*, pp. 377-382.
- Ramadge, P. J., & Wonham, W. M. (1989). The Control of Discrete Event Systems. *IEEE - Transactions on Control Theory*, 77, 81-98.
- Randall, C. (2019). *Electrive - Industry Service for Electric Mobility*. Acesso em 23 de Outubro de 2019, disponível em <https://www.electrive.com>
- Rezende, J. S. (2012). *Estudo e Implementação de Técnicas de Controle de Sistemas a Eventos Discretos em CLP: Aplicação em um Sistema Flexível de Manufatura Didático*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- Ribeiro, A. L. (2016). *Planejamento da Produção em Sistemas a Eventos Discretos Análise Lógica e Temporal*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- Rosario, M. J. (2009). *Automação Industrial*. São Paulo, Brasil.

- Sakurada, N., & Miyake, D. (2009). Aplicação de Simuladores de Eventos Discretos no Processo de Modelagem de Sistemas de Operações de Serviços. *Gestão & Produção*, 16, pp. 25-43.
- Sasaki, K., Li, H. W., Hayashi, A., Yamabe, J., Ogura, T., & Lyth, S. (2016). *Hydrogen Energy Engineering*. Japan: Springer Japan.
- Silva, A. M. (2014). *Controle Supervisório Robusto de Sistemas a Eventos Discretos Sujeitos a Perdas Intermitentes de Observação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Silveira, J. L. (2016). *Sustainable Hydrogen Production Processes-Energy, Economic and Ecological Issues*. São Paulo, Brazil: Springer International Publishing Switzerland.
- Sivaraman, S., Ramkrishna, J., & Maharana, S. (2011). *Supervisory Control for a Dynamic Power Flow Controller Using a Modular Approach*. Project Report, National Institute of Technology Rourkela, Department of Electronics & Communication Engineering, Rourkela, Índia.
- Sivolella, L. (2005). *Contribuições à Redução de Supervisores para Sistema a Eventos Discretos*. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil.
- Spricigo, M. C. (2018). *Aplicação de Algoritmos Genéticos para o Problema de Escalonamento de Tarefas em Sistemas de Manufatura com Controle Supervisório e Autômatos com Parâmetros*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Ursúa, A., Gandía, L., & Sanchis, P. (2012). Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. *Proceedings of the IEEE*, 100, pp. 410-426.
- Vian, O. A. (2006). *Introducción a la Química Industrial*. Barcelona, España: Editorial Reverté S. A.
- Vieira, D. A. (2007). *Método de Implementação do Controle de Sistemas e Eventos Discretos com Aplicação da Teoria de Controle Supervisório*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Villate, J. E. (2016). *Dinâmica e Sistemas Dinâmicos*. Porto, Portugal.
- Wainer, G. A. (2009). *Discrete-Event Modeling and Simulação: A Practitioners Approach*. New Jersey: Taylor & Francis Group.
- Wang, L., & Tan, K. (2006). *Modern Industrial Automation Software Design* (1 ed., Vol. 1). New Jersey, EEUU: IEEE Press Editorial Board.
- Wonham, W. (2014). Supervisory Control of Discrete-Event Systems. (Springer, Ed.) *Encyclopedia of Systems and Control*, pp. 1-10.
- Wonham, W. M., & Cai, K. (2010). *Supervisory Control of Discrete-Event Systems*. Suíça: Springer International Publishing.
- Wonham, W., Cai, K., & Rudie, K. (2017). Supervisory Control of Discrete-Event Systems: A Brief History – 1980-2015. *IFAC-PapersOnLine*, 50, pp. 1791-1797.

Apêndice A

Vista explodida dos subsistemas e dispositivos que se encontram instalados na PPH.

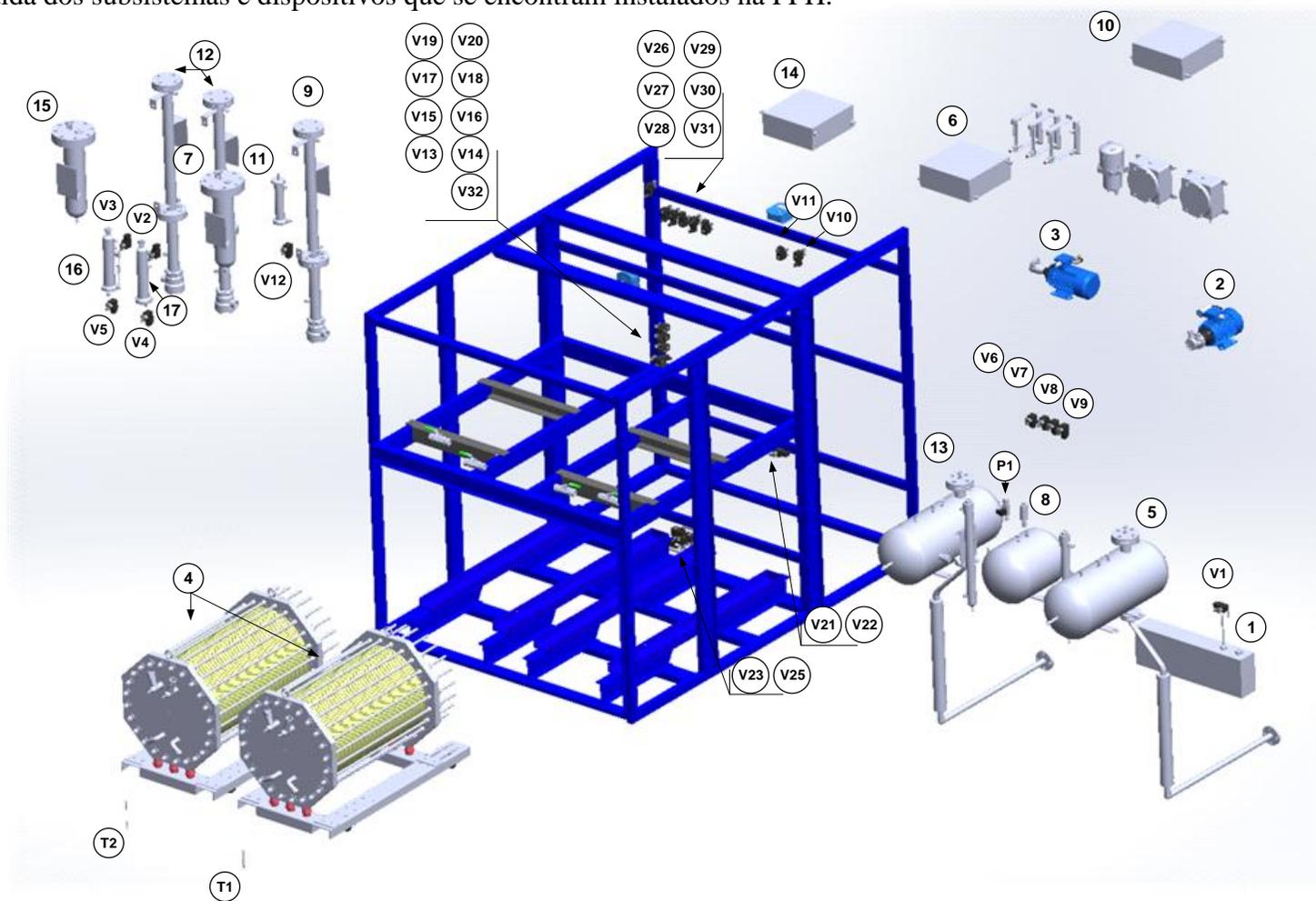


Figura A.1: Vista explodida dos subsistemas e dispositivos da PPH instalado no PTI.

A **Tabela A.1** apresenta a legenda da Figura A.1.

Tabela A.1: Legenda da Figura A.1.

Legenda			
1	Tanque de água	V10	Válvula solenoide
2	Bomba de H ₂ O	V11	Válvula solenoide
3	Bomba KOH	V12	Válvula solenoide
4	Eletrolisador	V13	Válvula solenoide
5	Separador horizontal H ₂	V14	Válvula solenoide
6	Trocador de calor H ₂	V15	Válvula solenoide
7	Tanque de lavagem de H ₂	V16	Válvula solenoide
8	Buffer-I	V17	Válvula solenoide
9	Desoxidante	V18	Válvula solenoide
10	Trocador de calor intermediário	V19	Válvula solenoide
11	Filtro de H ₂	V20	Válvula solenoide
12	Secador de H ₂	V21	Válvula solenoide
13	Separador horizontal O ₂	V22	Válvula solenoide
14	Trocador de calor O ₂	V23	Válvula solenoide
15	Tanque de lavagem de O ₂	V24	Válvula solenoide
16	Separador líquido de O ₂	V25	Válvula solenoide
17	Separador líquido de H ₂	V26	Válvula solenoide
V1	Válvula solenoide	V27	Válvula solenoide
V2	Válvula solenoide	V28	Válvula solenoide
V3	Válvula solenoide	V29	Válvula solenoide
V4	Válvula solenoide	V30	Válvula solenoide
V5	Válvula solenoide	V31	Válvula solenoide
V6	Válvula solenoide	T1	Sensor de temperatura
V7	Válvula solenoide	T2	Sensor de temperatura
V8	Válvula solenoide	P1	Transdutor de pressão
V9	Válvula solenoide		

Apêndice B

Subsistemas e dispositivos do processo e instrumentação da PPH instalado no PTI.

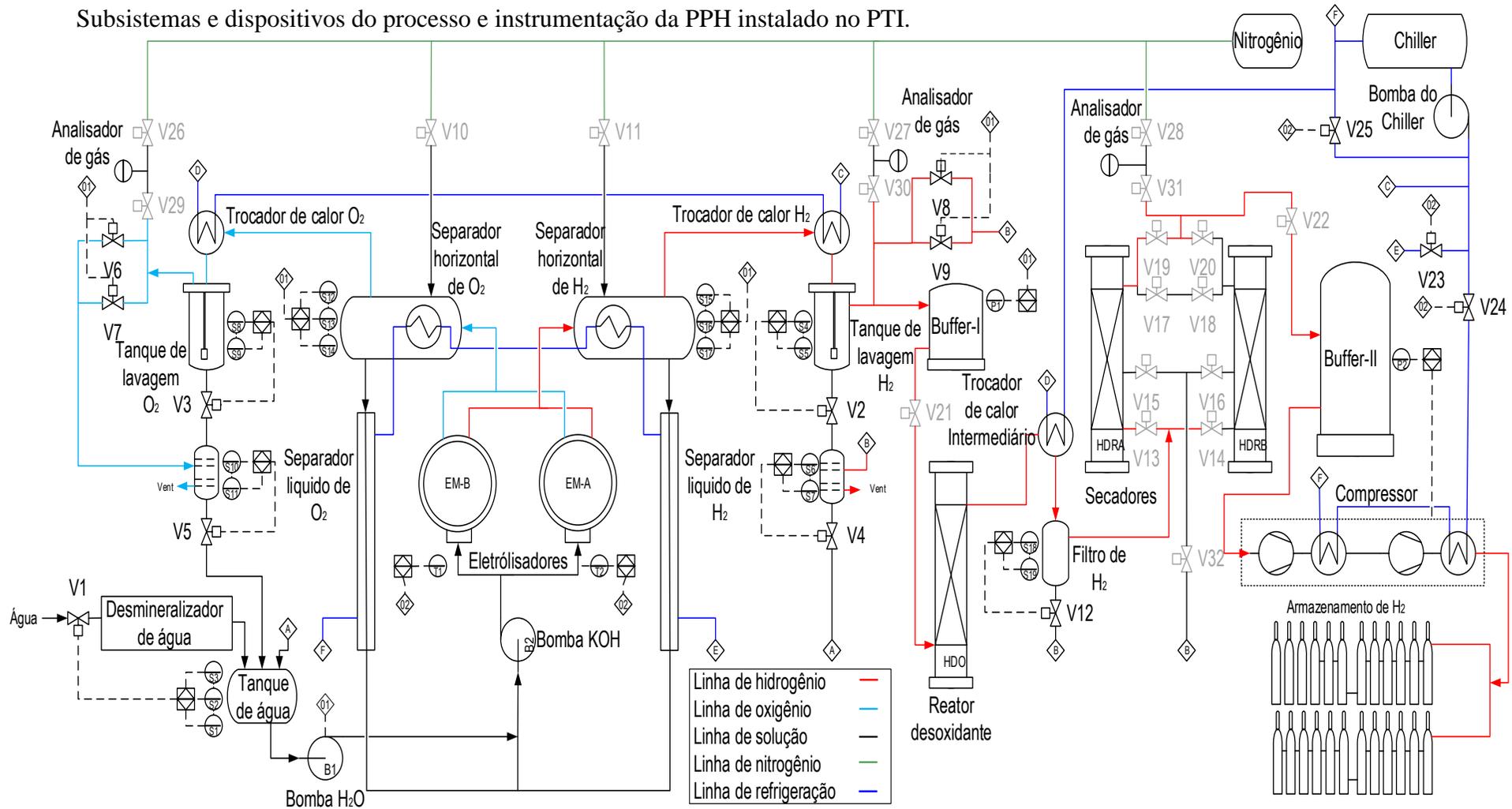


Figura B.1: Diagrama de processo e instrumentação da PPH instalado na PTI.

Apêndice C

Subsistemas e dispositivos que operam no controle sequencial de operação da PPH (em negrito).

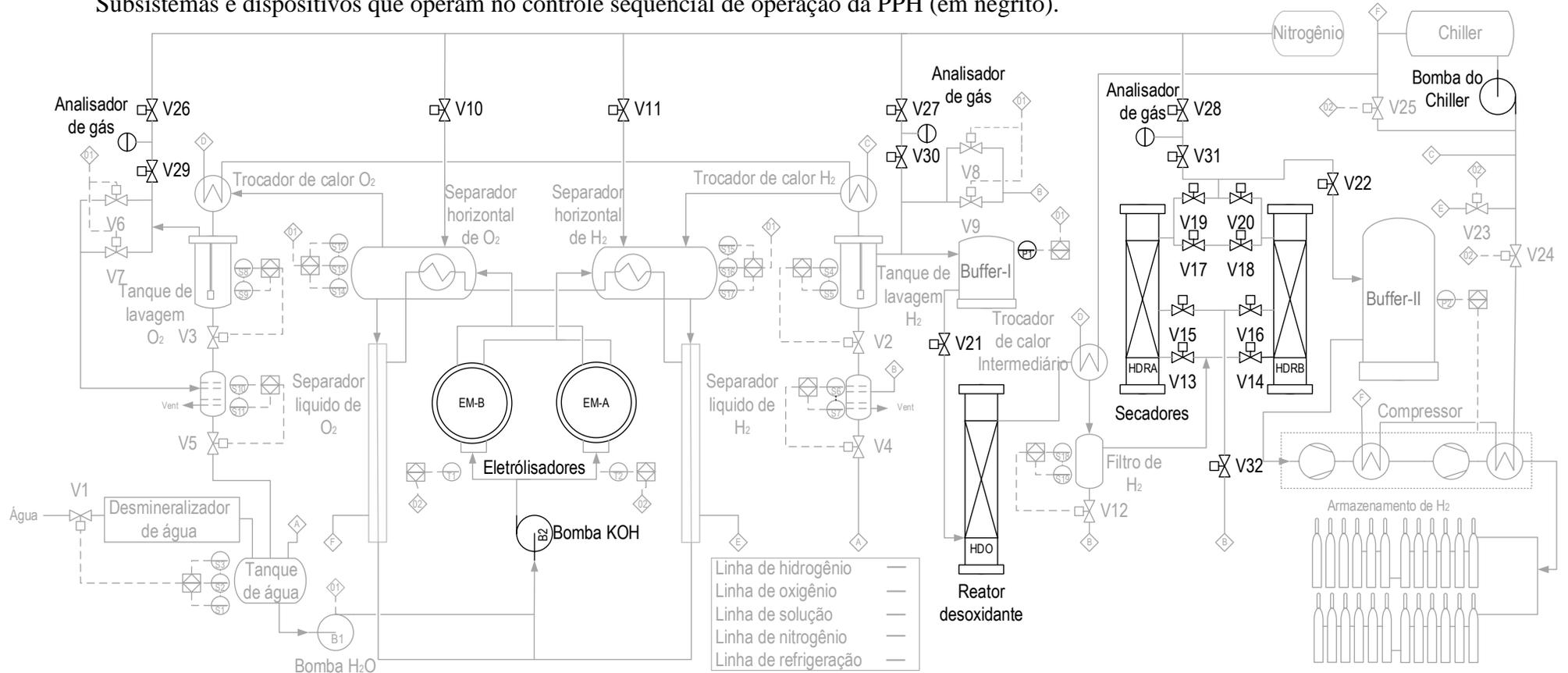


Figura C.1: Subsistemas que operam no controle sequencial da operação da PPH.

Apêndice D

A Tabela D.1 apresenta a sequência do estado ligado (*on*) e o estado desligado (*off*) dos subsistemas e dispositivos. A terminologia adotada para os dispositivos é dada pelos seguintes símbolos: PLC: Controlador lógico programável; B2: Bomba de KOH, B3: Bomba do *Chiller*; EMA, EMB: Eletrolisadores; HDO: Reator desoxidante; HDRA, HDRB: Secadores; V1, V2, V3, ..., V32: Válvulas solenoides; alar_0_in: Alarme desativa; alar_1_in: Alarme ativa; P1: Monitoramento de pressão no *Buffer I*.

Tabela D.1: Sequência de *on* e *off* de dispositivos nas etapas de operação da PPH.

Planta em STAND-BY	I-Estado DESLIGADO	Desligado: PLC, B2, B3, EMA, EMB, HDO, HDRA, HDRB, V7, V9, V10, V11, V13, V14, V15, V16, V17, V18, V19, V20, V21, V22, V26, V27, V28, V29, V30, V31, V32.
	II-Estado STAND-BY	Monitoramento: alar_0_in, alar_1_in, P1; Desligado: PLC, B2, EMA, EMB, HDO, HDRA, HDRB, V7, V9, V10, V11, V13, V14, V15, V16, V17, V18, V19, V20, V21, V22, V26, V27, V28, V29, V30, V31, V32.
Planta em OPERAÇÃO	III-Estado PRE-START	Monitoramento: alar_0_in, alar_1_in, P1; Ligado: PLC, B2, V26, V27, V28; Desligado: B3, EMA, EMB, HDO, HDRA, HDRB, V10, V11, V13, V14, V15, V16, V17, V18, V19, V20, V21, V22, V29, V30, V31, V32, V7, V9.
	IV-Estado PURGA	Monitoramento: alar_0_in, alar_1_in, P1; Ligado: PLC, B2, B3, EMA, EMB, V7, V9, V26, V27, V28; Desligado: HDO, HDRA, HDRB, V10, V11, V13, V14, V15, V16, V17, V18, V19, V20, V21, V22, V29, V30, V31, V32.
	V-Estado PRESSURIZAÇÃO	Monitoramento: alar_0_in, alar_1_in, P1; Ligado: PLC, B2, B3, EMA, BEM, V26, V27, V28; Desligado: HDO, HDRA, HDRB, V7, V9, V10, V11, V13, V14, V15, V16, V17, V18, V19, V20, V21, V22, V29, V30, V31, V32.
	VI-Estado PRODUÇÃO	Monitoramento: alar_0_in, alar_1_in, P1; Ligado: PLC, B2, B3, EMA, EMB, HDO, HDRA, HDRB, V13, V16, V19, V21, V22, V29, V30, V31, V32; Desligado: V7, V9, V10, V11, V14, V15, V17, V18, V20, V26, V27, V28.
Planta em DESLIGAMENTO	VII-Estado ESPERA	Monitoramento: alar_0_in, alar_1_in, P1; Ligado: PLC, B2, V13, V16, V19, V29, V30, V31, V32; Desligado: B3, EMA, EMB, HDO, HDRA, HDRB, V7, V9, V10, V11, V14, V15, V17, V18, V20, V21, V22, V26, V27, V28.
	VIII-Estado DESPRESSURIZAÇÃO	Ligado: PLC, V7, V9, V13, V14, V15, V16, V17, V18, V19, V20, V21, V22, V26, V27, V28, V32; Desligado: B2, B3, EMA, EMB, HDO, HDRA, HDRB, V10, V11, V29, V30, V31.
	IX-Estado INERTIZAÇÃO	Ligado: PLC, V7, V9, V10, V11, V13, V14, V15, V16, V17, V18, V19, V20, V26, V27, V28, V32; Desligado: B2, B3, EMA, EMB, HDO, HDRA, HDRB, V21, V22, V29, V30, V31.

Apêndice E

A Tabela E.1 apresenta as características técnicas do CLP Altus modelo DUO-351

Tabela E.1: Características técnicas do CLP modelo DUO-351.

Itens	Descrição
Número de pontos de entrada digital	<ul style="list-style-type: none">• 20 pontos;• 14 entradas digitais comuns;• 6 entradas digitais rápidas.
Número de pontos de saída Relé/transistor	<ul style="list-style-type: none">• 16 pontos;• 2 pontos de saída rápida;• 14 pontos de saída de relé.
Número de pontos de saída rápida	<ul style="list-style-type: none">• 2 pontos de saída rápidas: PTO, PWM, Frequência ou saída digital.
Contadores rápidos	<ul style="list-style-type: none">• 6 pontos rápido divididos em 2 blocos configuráveis como bidirecional ou unidirecional.
Saídas Analógicas	<ul style="list-style-type: none">• 2 saídas analógicas, 0 a 10v ou 0 a 20 mA.
Visor	<ul style="list-style-type: none">• Visor gráfico monocromático 128 x 64.
Protocolo MODBUS	<ul style="list-style-type: none">• Mestre e escravo RS-232 e RS-485
Interface RS-232	<ul style="list-style-type: none">• Sim uma interface não isolada com sinais de modem TXD, RXD, RTS, CTS, DTR, DSR, DCD.
Memória de aplicação	<ul style="list-style-type: none">• 256Kbytes.
Memória retentiva	<ul style="list-style-type: none">• 1250 bytes.
Tensão de trabalho	<ul style="list-style-type: none">• 24Vdc.
Normas atendidas	<ul style="list-style-type: none">• IEC 61131-3:2003.

Fonte: Altus (2016).

